

# **Funktionsabsicherung der umfelderfassenden Sensorik automatisierter Fahrzeuge in der Produktion**

Prozess- und Betriebsmittelentwicklung für die Absicherung der  
Inbetriebnahme umfelderfassender Sensoren automatisierter Fahrzeuge  
in der Produktionslinie

## **Dissertation**

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

von

**Lennard Margies, M.Sc.**

Saarbrücken

09.05.2025

<b>Tag des Kolloquiums:</b>	06.05.2025
<b>Dekan:</b>	Prof. Dr.-Ing. Dirk Bähre
<b>Berichterstatter:</b>	Prof. Dr.-Ing. Rainer Müller Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke
<b>Akad. Mitglied:</b>	Dr.-Ing. Sophie Nalbach
<b>Vorsitz:</b>	Prof. Dr.-Ing. Dirk Bähre





## **Zusammenfassung**

Vor dem Hintergrund der Zunahme hochautomatisierter und autonomer Fahrfunktionen steigen die Anforderungen an Fahrzeughersteller, die Sicherheit und Funktionsfähigkeit der Fahrzeuge nachzuweisen. Hierzu existieren bereits verschiedene Ansätze in der Produktentwicklung und zur Unterstützung der Prototypenphase. Eine Lösung für die Funktionsabsicherung in der Fahrzeugproduktion existiert zum aktuellen Zeitpunkt noch nicht.

Zur Adressierung dieser Herausforderung stellt die vorliegende Arbeit einen Prozess zur Funktionsabsicherung hochautomatisierter und autonomer Fahrzeuge in der Montagelinie vor. Ziel dieses Prozesses ist die präzise, robuste und nachvollziehbare Ermittlung der extrinsischen Kalibrierung der umfelderfassenden Sensoren. Um einer weiteren Parallelisierung des End-of-Lines entgegenzuwirken, zielt die entwickelte Lösung auf eine Integration in die Fließmontagelinie ab.

Für die Prozessentwicklung wird zunächst eine Analyse des Produktes und des Stands der Technik im Bereich der Fahrzeuginbetriebnahme und Funktionsabsicherung durchgeführt. Darauf aufbauend werden die Anforderungen an den Zielprozess definiert. Nach der Prozessentwicklung im Sinne eines Grob- und eines Lösungskonzeptes wird der Prozess in einem Technologiedemonstrator implementiert und validiert. Die Arbeit schließt mit einem Fazit und einem Ausblick auf den weiteren Forschungsbedarf.

## **Abstract**

Due to the increase of highly automated and autonomous driving functions, the demands on vehicle manufacturers to ensure the safety and functionality of vehicles are increasing. Various approaches concerning the product development and the prototype phase exist, but there is no solution for the validation of the vehicles functions in the production line.

To address this challenge, this thesis presents a process for the function validation of highly automated and autonomous vehicles on the assembly line. The aim of this development is the precise, robust and reproducible determination of the extrinsic calibration of the environmental sensors. In order to counteract further parallelization of the end-of-line, the developed concept focuses an integration into the flow assembly line.

For the process development, an analysis of the product and the state of the art in the field of vehicle commissioning is first carried out. On this basis, requirements for the development of a target process are defined.

After the process development in the terms of a rough and a solution concept, the process is implemented in a technology demonstrator and this implementation is validated.

The thesis concludes with a summary and an outlook on the need for further research.



## Vorwort

*Die vorliegende Arbeit ist im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Zentrum für Mechatronik und Automatisierungstechnik (ZeMA) in Saarbrücken entstanden. Hier durfte ich mich durch die Leitung der Gruppe für „Automobilmontage und Produktion alternativer Antriebstechnologien“ des Forschungsbereiches „Montagesysteme“ mit den unterschiedlichsten, spannenden und auch herausfordernden Fragestellungen beschäftigen.*

*Daher gilt mein besonderer Dank meinem Doktorvater und Mentor Herrn Prof. Dr.-Ing. Rainer Müller. Nur durch deine Zuversicht, dein Vertrauen und die durch dich ermöglichte Freiheit in meiner täglichen Arbeit war es mir möglich, die vorliegende Arbeit anzufertigen. Die vielen kritisch-konstruktiven Gespräche, auch über das Fachliche hinaus, haben es mir ermöglicht, mich nicht nur fachlich, sondern auch persönlich weiterzuentwickeln. Die letzten Jahre haben mich im positiven als Mensch verändert und mir teilweise ganz neue Möglichkeiten im Leben gezeigt!*

*Mein Dank gilt ebenso, mittlerweile Professor, Dr.-Ing. Matthias Scholer und Dr.-Ing. Marcel Otto, meinen Kollegen erster Stunde. Ihr habt in mir den Spaß an der Forschung und der täglichen Arbeit geweckt, mich geprägt und unterstützt, als ich selbst noch nicht so ganz an dieses Thema geglaubt habe. Neben den ernsten Themen der Arbeit hatten wir vor allem eines: sehr viel Spaß zusammen. Ein wichtiger Faktor!*

*Auch den Kollegen meiner ehemaligen und aktuellen Gruppe, Anne Blum, Paul Hubert Haas, Kevin Jungbluth, Martin Karkowski, Benedikt Kelm, Fabian Klaus, Philipp Litzenburger und Sarah Zimmer möchte ich meinen Dank aussprechen. Jeder von euch hat, wenn auch nicht immer wissentlich, seinen Teil zu diesem Werk dazu beigetragen. Vielen Dank für euren Zuspruch, die Rücksichtnahme und die Unterstützung, vor allem auf den letzten Metern! Ich war auf dem Weg sicherlich nicht immer die einfachste Person, wenn mal wieder viel zu tun war. Trotzdem haben wir uns gegenseitig nie im Stich gelassen. Ihr seid super Kollegen und ein tolles Team!*

*Weiterhin möchte ich mich auch bei meinen HiWis Justus Hoffmann, Meike Schreiner und Nick Kempel bedanken. Ihr habt meine Arbeit lange und geduldig unterstützt und habt dafür auch selbst viel Energie investiert. Ich bin sehr froh, dass sich unsere Wege gekreuzt haben und dass ich euch so für die Themen begeistern konnte. Ich hoffe, ihr konntet aus der Zusammenarbeit genauso viel mitnehmen wie ich. Ohne euch hätte ich die Arbeit sicherlich nicht in einem sinnvollen Zeitrahmen abschließen können. Vielen, vielen Dank für eure Unterstützung und die guten Gedanken, die ihr eingebracht habt!*

*Zuletzt, das Beste immer zum Schluss, möchte ich den wichtigsten Menschen in meinem Leben danken. Meiner Familie und meiner Freundin Lisa. Ihr wart auch in den intensivsten Momenten der letzten Jahre immer auf meiner Seite. Egal worum es ging. Ob mit einer ehrlichen und manchmal harten Meinung, mindestens genauso vielen gutgemeinten Ratschlägen, Ansporn, vielen Fragen, einfach offenen Armen oder simpler, alltäglicher Unterstützung in viele Dingen und Bereitschaft. Ihr könnt wohl nur vermuten, wie viel ihr mir geholfen habt. All das ist unbezahlbar und ein wesentlicher Faktor für meinen Erfolg. Ich bin unglaublich glücklich, dass ich euch habe!*

*Gemäß dem Sprichwort von Albert Schweitzer: „Es gibt keinen Menschen, von dem man nichts lernen kann.“*

*Danke, dass ich ausnahmslos von euch allen etwas lernen durfte!*



„Wo kämen wir hin,  
wenn alle sagten,  
wo kämen wir hin,  
und niemand ginge,  
um einmal zu schauen,  
wohin man käme,  
wenn man ginge.“

**Kurt Marti**



# I Inhaltsverzeichnis

<b>I</b>	<b>Inhaltsverzeichnis.....</b>	<b>i</b>
<b>II</b>	<b>Abkürzungsverzeichnis.....</b>	<b>iii</b>
<b>III</b>	<b>Abbildungsverzeichnis.....</b>	<b>vii</b>
<b>IV</b>	<b>Tabellenverzeichnis.....</b>	<b>xi</b>
<b>1</b>	<b>Einleitung.....</b>	<b>1</b>
1.1	Ausgangssituation und Motivation.....	3
1.2	Ziel der Arbeit.....	7
1.3	Aufbau der Arbeit.....	9
<b>2</b>	<b>Grundlagen des Betrachtungsbereichs.....</b>	<b>11</b>
2.1	Fahrzeugproduktion und Fahrzeugendmontage.....	11
2.1.1	Fahrzeuginbetriebnahme.....	13
2.1.2	Kalibrierung der Fahrzeugsensorik.....	15
2.2	Aufbau und Funktionen automatisierter Fahrzeuge.....	21
2.2.1	Grundlagen umfelderfassender Sensoren.....	24
2.2.2	Radarsensorik.....	26
2.2.3	Lidarsensorik.....	32
2.2.4	Kamerasysteme.....	37
2.3	Fazit.....	41
<b>3</b>	<b>Stand der Technik und Forschung.....</b>	<b>43</b>
3.1	Funktionsabsicherung und Inbetriebnahme automatisierter Fahrzeuge.....	43
3.1.1	Ganzheitliche Absicherung der Inbetriebnahme.....	46
3.1.2	Ansatz zur Kalibrierung in der Pkw-Inbetriebnahme.....	46
3.1.3	Zukunftsfähige Inbetriebnahme mittels drahtloser Vernetzung.....	47
3.1.4	Inbetriebnahme und Kalibrierung in der Montagelinie.....	47
3.1.5	Inline Inbetriebnahme und Kalibrierung von Fahrerassistenzsysteme.....	48
3.2	Kalibrierung umfelderfassender Sensoren autonomer Systeme.....	49
3.3	Fazit und Entwicklungsbedarf.....	55
<b>4</b>	<b>Vorgehen und Anforderungsdefinition.....</b>	<b>59</b>
4.1	Methodisches Vorgehen zur Lösungsentwicklung.....	59
4.2	Anforderungsdefinition.....	63

---

<b>5</b>	<b>Entwicklung des Lösungskonzeptes .....</b>	<b>67</b>
5.1	Grobkonzept für einen Prozess der Funktionsabsicherung .....	67
5.1.1	Aufteilung der Gesamtaufgabe .....	70
5.1.2	Konzeption des Referenznormals.....	72
5.2	Entwicklung des Gesamtprozesses.....	75
5.2.1	Modularer Absicherungsprozess .....	75
5.2.2	Hybrides Multitarget .....	81
5.2.3	Sensorspezifische Funktionsabsicherung.....	90
5.2.4	Statischer, dynamischer und referenzfreier Prozess.....	97
5.2.5	Zentrale Datenstruktur.....	102
5.3	Abgleich der Anforderungen.....	105
<b>6</b>	<b>Implementierung.....</b>	<b>109</b>
6.1	Hybrides Multitarget .....	111
6.2	Zentrale Prozessinfrastruktur .....	114
6.3	Targetextraktion und Bestimmung der extrinsischen Parameter .....	117
6.4	Funktionsabsicherung und Dokumentation .....	129
6.5	User-Interface .....	131
<b>7</b>	<b>Validierung der Anforderungen .....</b>	<b>133</b>
7.1	Genauigkeit und Universalität .....	134
7.2	Analyse der Fehlereinflüsse .....	141
7.3	Prozesssicherheit und Robustheit.....	144
7.4	Nachvollziehbarkeit und Dokumentation .....	146
<b>8</b>	<b>Fazit und Ausblick .....</b>	<b>147</b>
8.1	Fazit.....	147
8.2	Ausblick und weiterer Forschungsbedarf.....	149
<b>V</b>	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>152</b>
<b>VI</b>	<b>Anhang.....</b>	<b>162</b>
<b>VII</b>	<b>Betreute wissenschaftliche Arbeiten .....</b>	<b>175</b>

## II Abkürzungsverzeichnis

<b>Abkürzung</b>	<b>Beschreibung</b>
2D	Zweidimensional
3D	Dreidimensional
5G	Fünfte Generation des Mobilfunks
ABS	Antiblockiersystem
ADAS	Advanced driver assistance systems
ADC	Analog-Digital-Converter
AM	Amplitudenmodulation
ASIL	Automotive Safety Integrity Level
BIRCH	Balanced Iterative Reducing and Clustering using Hierarchies
CCD	Charge-Coupled Device
CFAR	Constant False Alarm Rate
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor
CW	Continuous Wave
dBi	Antennengewinn bzgl. des isotropen Kugelstrahlers
DoE	Design of Experiments
DoIP	Diagnostics over Internet Protocol
EoL	End-of-Line
ESP	Elektronisches Stabilitätsprogramm
FAS	Fahrerassistenzsysteme

---

FCPE	Fully connected pose estimation
FCPSE	Fully connected pose and structure estimation
FLIR	Forward Looking Infrared
FM	Frequenzmodulation
FMCW	Frequency Modulated Continuous Wave
FoV	Field of View
GHz	Gigahertz
GUI	Graphical User Interface
HAF	Hochautomatisierte Fahrfunktion
HDBSCAN	Hierarchical Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise
HIL	Hardware in the Loop
HMI	Human Machine Interface
IBN	Inbetriebnahme
ICP	Iterative Closest Point
IF	Intermediate Frequency
IPC	Industrie-PC
IQR	Interquartile Range
kNN	Nächste-Nachbarn-Klassifikation (k-nearest neighbor)
KOS	Koordinatensystem
Lidar	Light Detection and Ranging
LTE	Long Term Evolution

---

---

MCPE	Minimally connected pose estimation
MEMS	Micro-Electro-Mechanical Systems
MIMO	Multiple Input Multiple Output
MJF	Multi Jet Fusion
MPC	Multi Purpose Camera
OBD	On-Board-Diagnose
OEM	Original Equipment Manufacturer
OPA	Optical Phased Array
OtA	Over-the-Air
PEP	Produktentstehungsprozess
PKW	Personenkraftwagen
PSE	Pose and structure estimation
Radar	Radio Detection and Ranging
RAE	Radadaptionseinheit
RANSAC	Random Sample Consensus
RCS	Radar Cross Section
ROI	Region of Interest
SIL	Software in the Loop
SLAM	Simultaneous Localizing and Mapping
SMPC	Stereo Multi Purpose Camera
SOA	Serviceorientierte Architektur
SVD	Singular Value Decomposition

---

---

ToF	Time of Flight
V2X	Vehicle-to-Anything
WLAN	Wireless Local Area Network
XaaS	Anything-as-a-Service

---

## III Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: CASE - Wandlungstreiber in der Automobilindustrie .....	1
Abbildung 1.2: Entwicklung der automatisierten Fahrfunktionen .....	3
Abbildung 1.3: Stufen des automatisierten Fahrens .....	4
Abbildung 1.4: Anzahl der Sensoren nach Autonomielevel.....	5
Abbildung 1.5: Inline-Konzept.....	8
Abbildung 1.6: Aufbau der Arbeit und Zuordnung der Kapitel .....	9
Abbildung 2.1: Aufbau der Fahrzeugproduktion.....	12
Abbildung 2.2: Aufbau des End-of-Lin .....	13
Abbildung 2.3: Aufgaben der Inbetriebnahme.....	14
Abbildung 2.4: Referenzen am Fahrzeug .....	15
Abbildung 2.5: Toleranzkette in der Sensorkalibrierung.....	16
Abbildung 2.6: Kinematische Kette zur Ermittlung der extrinsischen Kalibrierung.....	18
Abbildung 2.7: ADAS-Kalibrierprüfstand x-DASalign .....	19
Abbildung 2.8: ADAS-Kalibrierprüfstand.....	19
Abbildung 2.9: Grundfunktionen eines automatisierten Fahrzeuges .....	21
Abbildung 2.10: Systemaufbau eines automatisierten Fahrzeuges.....	22
Abbildung 2.11: Sensorik und Erfassungsbereiche.....	24
Abbildung 2.12: Radar-Arten .....	26
Abbildung 2.13: Antennendiagramm eines AWR1243 FMCW-Radars.....	28
Abbildung 2.14: Aufbau eines FMCW-Radarsensors.....	29
Abbildung 2.15: Winkel-Entfernungsplot einer Beispielmessung .....	31
Abbildung 2.16: Lidar-Arten .....	32

---

Abbildung 2.17: Aufbau eines MEMS-Lidarsensors.....	34
Abbildung 2.18: Scanmuster eines MEMS-Lidar.....	35
Abbildung 2.19: Punktwolke eines MEMS-Lidars.....	37
Abbildung 2.20: Kamera-Arten .....	38
Abbildung 2.21: Aufbau und Abbildungsentstehung in einer Kamera.....	39
Abbildung 3.1: Der Produktentstehungsprozess .....	43
Abbildung 3.2: Gliederung der Ansätze zur Funktionsabsicherung .....	45
Abbildung 3.3: Klassifikation von Kalibrierprozessen .....	49
Abbildung 3.4: Kalibrierkonfigurationen .....	50
Abbildung 3.5: Maßnahmen der Funktionsabsicherung .....	55
Abbildung 4.1: Zusammenhang von Produkt, Prozess und Betriebsmittel .....	59
Abbildung 4.2: V-Modell .....	60
Abbildung 4.3: Vorgehensweise zur Anforderungsdefinition .....	61
Abbildung 4.4: Vorgehensweise zur Lösungsentwicklung.....	61
Abbildung 5.1: Rotation und Translation zweier Koordinatensysteme.....	67
Abbildung 5.2: Fusionsebenen .....	70
Abbildung 5.3: Aufteilung der Gesamtaufgabe .....	71
Abbildung 5.4: Verortung des Prozesses in der Montagelinie .....	72
Abbildung 5.5: Toleranzketten von Inbetriebnahme und Lösungskonzept .....	73
Abbildung 5.6: Aufteilung des Gesamtprozesses in Module und Teilaufgaben .....	76
Abbildung 5.7: Evaluation des Gesamtprozesses.....	78
Abbildung 5.8: Unterscheidung der Fehlerursache .....	80
Abbildung 5.9: Abhängigkeiten der Gesamtgenauigkeit.....	81

---

Abbildung 5.10: Cornerreflektor zur Radardetektion .....	83
Abbildung 5.11: Vorteile einer runden Struktur zur Lidardetektion .....	85
Abbildung 5.12: Frontansicht einer Multi-Referenzmarke für Radar, Lidar und Kamera.....	86
Abbildung 5.13: Anordnung der Referenzmarken für eine Sensorgruppe in der Draufsicht ..	87
Abbildung 5.14: Multitarget in der Frontansicht.....	88
Abbildung 5.15: Anordnung der Einzelmarken in der Fließmontagelinie .....	89
Abbildung 5.16: Funktionsabsicherung der Radarsensorik.....	91
Abbildung 5.17: Funktionsabsicherung der Lidarsensorik.....	93
Abbildung 5.18: Target-Erkennung für Lidar-Daten .....	94
Abbildung 5.19: Funktionsabsicherung von Kameras .....	95
Abbildung 5.20: Target-Erkennung in Bilddaten.....	96
Abbildung 5.21: Statische Funktionsabsicherung .....	98
Abbildung 5.22: Referenzerfassung zweier Sensoren .....	99
Abbildung 5.23: Dynamische Funktionsabsicherung .....	99
Abbildung 5.24: Bewertung der extrinsischen Parameter mittels FCPSE .....	100
Abbildung 5.25: Referenzfreie Funktionsabsicherung.....	101
Abbildung 5.26: Übergreifende Datenstruktur.....	102
Abbildung 6.1: Technologiedemonstrator zur prototypischen Implementierung .....	109
Abbildung 6.2: Umsetzung der Referenzmarken .....	112
Abbildung 6.3: Implementierung der Target-Anordnung .....	113
Abbildung 6.4: Implementierung der Prozessinfrastruktur und Containerisierung .....	115
Abbildung 6.5: Schritte der Targetextraktion für den Radar .....	119
Abbildung 6.6: Ablaufdiagramm Targetextraktion und Transformationsberechnung Radar.	120

---

Abbildung 6.7: Schritte der Targetextraktion für den Lidar .....	123
Abbildung 6.8: Ablaufdiagramm Targetextraktion und Transformationsberechnung Lidar ..	124
Abbildung 6.9: Schritte der Targetextraktion für die Kamera.....	127
Abbildung 6.10: Ablaufdiagramm Kamera .....	128
Abbildung 6.11: Ablaufdiagramm zur Evaluation .....	129
Abbildung 6.12: Übersichtsebene der Nutzeroberfläche .....	131
Abbildung 6.13: Datenebene des Nutzerschnittstelle.....	132
Abbildung 7.1: Validierungsaufbau aus Perspektive der MPC des Testfahrzeuges .....	133
Abbildung 7.2: Gierwinkel über 25 Messframes des Radar .....	135
Abbildung 7.3: Gierwinkel des Radars über verschiedene Arbeitsabstände .....	136
Abbildung 7.4: Rotationsparameter über 25 Messframes des Lidar.....	137
Abbildung 7.5: Gierwinkel des Lidars über verschiedene Arbeitsabstände .....	138
Abbildung 7.6: Gierwinkel über 25 Messframes der Kamera .....	139
Abbildung 7.7: Gierwinkel der MPC über verschiedene Arbeitsabstände.....	140
Abbildung 7.8: Verteilungen der Targetextraktion .....	141
Abbildung 7.9: Verteilung der Rotationsberechnung.....	142
Abbildung 7.10: Verteilung des Gesamtprozesses .....	142
Abbildung 7.11: Punktwolke der Referenzmarken mit Person .....	144
Abbildung 7.12: Vergleich der Prozessergebnisse bei gestörter Prozessumgebung.....	145
Abbildung 7.13: Zentrale Datenstruktur nach Durchführung des Absicherungsprozesses ..	146

---

## IV Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Komplementäre Sensornutzung.....	25
Tabelle 2: Übersicht der aktuellen Ansätze mit Bezug zum Kontext .....	56
Tabelle 3: Anforderungen an den Zielprozess .....	63
Tabelle 4: Eigenschaften der verwendeten Sensoren.....	110
Tabelle 5: Standardabweichungen des Gierwinkels des Radar .....	136
Tabelle 6: Standardabweichungen des Gierwinkels des Lidar .....	138
Tabelle 7: Standardabweichungen des Gierwinkels der Kamera .....	140



## 1 Einleitung

Das Automobil hat sich seit seiner Erfindung von einem rein mechanischen Produkt zu einem vollintegrierten mechatronischen System entwickelt [BRE18]. Auf Basis des ursprünglichen „Motorwagens“, erfunden von Carl Benz im Jahre 1886, wurden technische Innovationen beispielsweise in den Bereichen der Motorentechnik, des Fahrzeugdesigns, der Energiebordnetze, der Antriebssysteme und der Fahrerassistenzsysteme kontinuierlich vorangetrieben [RE17].

Nach diesen Entwicklungen steht die Automobilindustrie weltweit unter einem hohen Transformationsdruck. Wandlungstreiber wie der Klimawandel, zunehmend komplexe Kundenanforderungen, welche eine zunehmende Digitalisierung erfordern, und sich veränderte Produktionsbedingungen vor allem an Hochlohnstandorten fordern Neu- und Weiterentwicklungen im Bereich der Fahrzeugtechnik. [KÖL20]

Die Gesamtheit dieser Entwicklung lässt sich mit dem Begriff „CASE“ (engl.: connected, autonomous, services, electric) beschreiben (siehe Abbildung 1.1) [MIN22].

Hiernach lässt sich die aktuelle Weiterentwicklung des Fahrzeuges, wie folgt, in vier Schwerpunkte unterteilen:

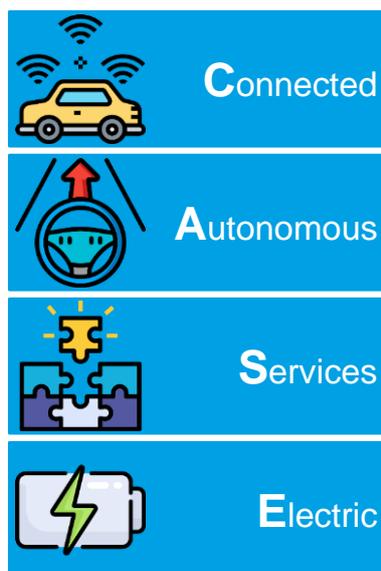


Abbildung 1.1: CASE - Wandlungstreiber in der Automobilindustrie

Durch die zunehmende Elektrifizierung der Fahrzeuge und die parallele Entwicklung der automatisierten Fahrfunktionen verändert sich auch die elektrische Architektur des Automobils. So nimmt nach einer bisher steigenden Anzahl an Steuergeräten zur Realisierung der unterschiedlichen Fahrfunktionen die Zahl der verbauten Steuergeräte aktuell wieder ab. [GRU21] Aufgrund der Verfügbarkeit gesteigerter Rechenleistung werden viele Funktionen zentralisiert. Dies bedingt, dass statt einzelner Steuergeräte je Baugruppe und Funktion zunehmend zentrale Steuergeräte mit einer entsprechend erhöhten Rechenleistung eingesetzt werden. Durch diesen Architekturwandel nehmen die Verbindungsmöglichkeiten der Fahrzeuge zu, was sich unter dem dritten Begriff der *Vernetzung* (engl.: connectivity) zusammenfassen lässt. Durch

die Integration von WiFi-, Mobilfunk und 5G werden neue Verbindungsmöglichkeiten geschaffen. Dies ermöglicht beispielsweise die Vehicle-to-Anything (V2X) Technologie, welche eine Verbindung des Fahrzeuges sowohl mit anderen Verkehrsteilnehmern, als auch der umgebenden Infrastruktur beschreibt. [GRU21; LEM22]

Neben den zunehmenden Verbindungsmöglichkeiten können unter dem Begriff der *Automatisierung* (engl.: autonomous) die Entwicklungen rund um Assistenzfunktionen und das automatisierte und autonome Fahren zusammengefasst werden. Aus Sicherheits- und Komfortaspekten steigt die Zahl der Fahrerassistenzsysteme sowie der automatisierten Fahrfunktionen. Dies erfordert eine steigende Anzahl an umfelderfassenden Sensoren sowie eine Zunahme der zur Erfüllung der Fahrfunktionen notwendigen Steuergeräte. [BRE18; LEM22]

Der dritte Begriff umfasst die Integration neuer Funktionalitäten und Nutzungsmodelle unter dem Begriff *services*. Hierunter fallen, auf Basis der Weiterentwicklung der Fahrzeugarchitektur und der neuen Verbindungsmöglichkeiten realisierbare, neue Nutzungskonzepte. So können in Fahrzeugen zukünftig auf Basis des „Anything-as-a-Service“ (XaaS) Konzeptes Funktionen als Abomodell angeboten und per Software und Over-the-Air Update (OtA-Update) freigeschaltet, beziehungsweise aktualisiert werden. Auch das Nutzungskonzept des Fahrzeuges an sich verändert sich. Hierdurch wird eine „shared mobility“, also eine Mobilität, welche nicht mehr das Eigentum eines Fahrzeuges voraussetzt umsetzbar. [GRU21; LEM22; VDA15]

Unter dem Begriff der *Elektrifizierung* (engl.: electric) wird die Entwicklung neuer Antriebsformen zusammengefasst. Ausgehend von den Forderungen nach sinkenden CO<sub>2</sub>-Emissionen im Mobilitätssektor begann die Transformation in der Automobilindustrie zunächst mit der steigenden Nachfrage nach neuen, emissionsfreien Antriebsformen. Neben dem herkömmlichen Verbrennungsmotor wurden in einer Übergangsphase zunächst hybride Antriebsformen (Micro-, Mild-, Voll- und Plug-In Hybrid) entwickelt, gefolgt von rein batterieelektrischen Antriebssträngen und auch auf Wasserstofftechnologien basierende Antriebsformen, wie der Antrieb mittels Brennstoffzelle und Wasserstoffdirektverbrennungsmotor. [KAM24; LEM22]

Die Gesamtheit dieser teilweise tiefgreifenden Entwicklungen stellt nicht nur die Fahrzeugentwicklung vor neue und auch steigende Herausforderungen, sondern betrifft maßgeblich auch die Fahrzeugproduktion. Neben der Produktion neuer Komponenten und Module erfährt die Fahrzeugendmontage als wesentlicher Teil der Wertschöpfung einen großen Wandlungsdruck.

So bewirken die neuen Antriebstechnologien Veränderungen der Montage- und dadurch auch der Inbetriebnahmeprozesse des Antriebsstrangs. Zukünftig müssen elektrifizierte und hochintegrierte Komponenten verbaut und mittels neuer Prozesse in Betrieb genommen werden. [MUE22] Die Zunahme der automatisierten Fahrfunktionen und die damit steigende Anzahl an Sensorsystemen erfordert zusätzliche Montage- und Inbetriebnahmeprozesse mit hohen Anforderungen an die Qualität, da es sich hierbei oftmals um sicherheitskritische Funktionen handelt. Die neuen Verbindungsmöglichkeiten und die veränderte elektrische Architektur der Fahrzeuge stellen allerdings auch ein großes Potenzial für die Montage dar. So können Fahrzeuge teils autonom Qualitäts- und Verbaukontrollen durchführen und die Ergebnisse dieser Prüfungen direkt durch integrierte Schnittstellen mit der Produktionsinfrastruktur kommunizieren. [BRE18; MUE22; VDA15]

Im Rahmen dieser Arbeit werden die Entwicklungen im Bereich des autonomen Fahrens fokussiert. Der Anstieg der hochautomatisierten und autonomen Fahrfunktionen sowie die steigende Konnektivität und der Wandel der Fahrzeugarchitektur haben tiefgreifende Auswirkungen auf die Fahrzeugendmontage. Im Folgenden werden die genannten Aspekte und die daraus resultierenden Herausforderungen betreffend die Funktionsfähigkeit der Fahrzeuge erläutert. Anschließend wird daraus die Zielstellung der Arbeit abgeleitet.

## 1.1 Ausgangssituation und Motivation

Mit der Einführung des Antiblockiersystems (ABS) im Jahr 1978 begann die Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen (FAS). Erstmals wurde durch ein Übersteuern der Fahrbefehle des Fahrers die Sicherheit des Fahrzeuges gesteigert. 1995 folgte die Einführung des elektronischen Stabilitätsprogrammes (ESP), welches als zweites maßgebliches Assistenzsystem gilt. 1998 folgte die Integration der „Adaptive Cruise Control“ (ACC). Hierbei handelt es sich im Gegensatz zu ABS und ESP weniger um ein System zur Steigerung der Fahrzeugsicherheit, als um ein sogenanntes Fahrerassistenzsystem, welches durch eine automatische Abstandskontrolle zum vorausfahrenden Fahrzeug den Fahrkomfort steigert. [VDA15]

Seither wurden kontinuierlich neue und umfassendere Assistenzfunktionen entwickelt, bis zum heute noch in der Forschung befindlichen vollautonomen Fahren. Diese Entwicklung einiger wesentlicher Assistenzsysteme ist in Abbildung 1.2 dargestellt.

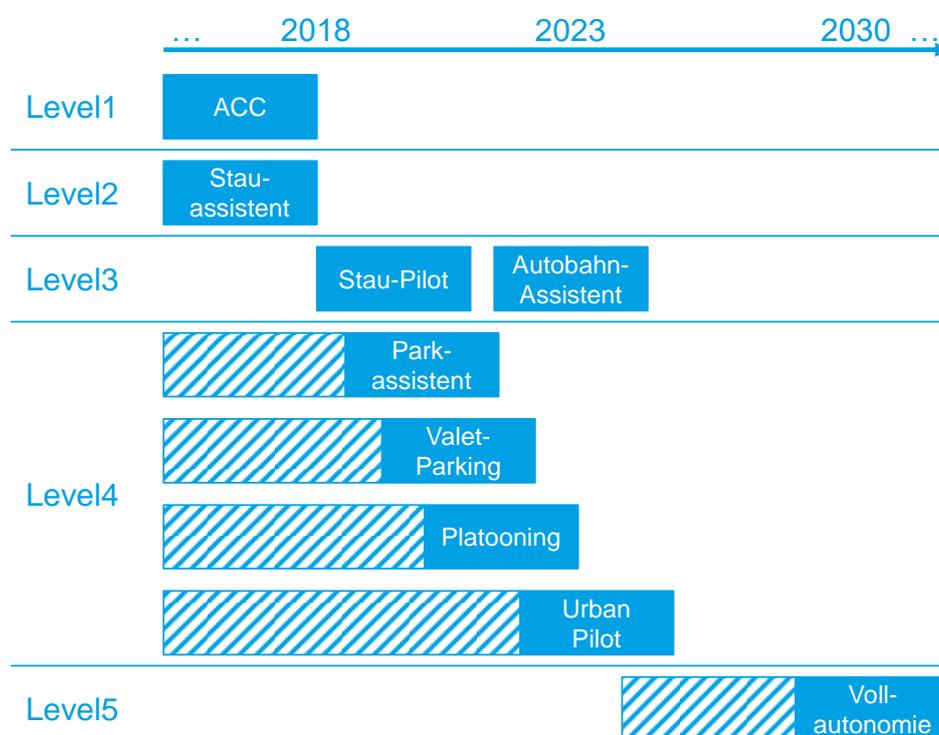


Abbildung 1.2: Entwicklung der automatisierten Fahrfunktionen nach [PRO19]

Wie in Abbildung 1.3 zu erkennen, können automatisierte Fahrzeuge anhand des Automatisierungsgrades voneinander unterschieden werden. In [VDA15] werden hierzu fünf Stufen des automatisierten Fahrens definiert.

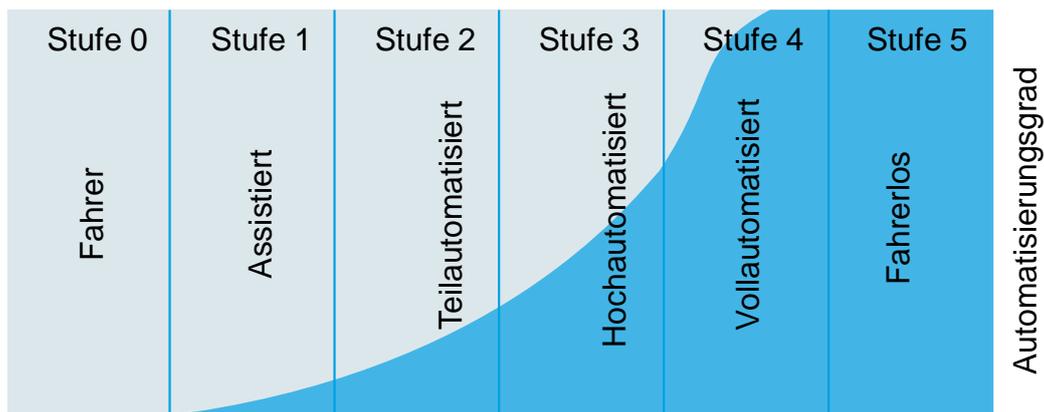


Abbildung 1.3: Stufen des automatisierten Fahrens nach [VDA15]

Diese fünf Stufen sind in Abbildung 1.3 dargestellt. Die Kategorisierung beginnt mit der Stufe 0, welche das Führen des Fahrzeuges ohne Assistenz definiert. Der Fahrer ist für Längs- und Querführung verantwortlich. Folgend darauf wird Stufe 1 definiert, in der mittels einfacher Assistenzsysteme entweder Längs- oder Querführung übernommen werden. Dies umfasst beispielsweise Systeme, wie das bereits beschriebene ACC.

Stufe 2 bezeichnet das sogenannte *teilautomatisierte* Fahren. Hierbei können Längs- und Querführung gleichzeitig von Fahrzeugsystemen in einem definierten Szenario übernommen werden. Der Fahrer bleibt in der Verantwortung und muss jederzeit eingreifen können. Ein Beispiel ist der Stauassistent, welcher bei Geschwindigkeiten bis 60 km/h auf Autobahnen die Längs- und Querführung übernimmt.

Stufe 3, das *hochautomatisierte* Fahren definiert die Längs- und Querführung des Fahrzeuges, ohne dass eine direkte Bereitschaft zur Übernahme der Fahraufgabe seitens des Fahrers notwendig ist. Das System warnt den Fahrer in Grenzfällen. Dieser muss innerhalb eines definierten Zeitintervalls die Fahrzeugführung übernehmen. Erfolgt dies nicht, leitet das Fahrzeug selbstständig einen sicheren Zustand ein, beispielsweise einen sicheren Stopp auf dem Standstreifen.

Als *vollautomatisiert* wird die vierte Stufe bezeichnet. Das Fahrzeug übernimmt hierbei die Fahraufgabe komplett. Der Fahrer kann sich während der Fahrt anderen Aufgaben zuwenden und muss nicht mehr innerhalb eines Zeitintervalls übernehmen. Situationen, in denen das System die Fahraufgabe übernehmen kann, sind genau spezifiziert.

Die fünfte und letzte Stufe bildet das *fahrerlose* oder auch *vollautonome Fahren*. Das Fahrzeug ist hierbei in der Lage, die Fahraufgabe vollumfassend auszuführen. Es müssen keine Elemente zur Fahrzeugsteuerung mehr vorhanden sein. [VDA15]

Mit dem steigenden Automatisierungsgrad der Fahrzeugfunktionen steigt auch die Anzahl der zur Erfüllung der Fahraufgabe notwendigen Sensoren zur Umfelderkennung. So verfügen Fahrzeuge ab Level 2 mindestens über einen Radarsensor sowie mindestens zwei Kamerasysteme zur Umfelderkennung. Mit Erreichen von Level 3 steigt die Anzahl der Sensoren auf insgesamt mindestens zehn, den Hauptteil bilden hier Radarsensoren und Kameras. Ab Level 4 steigt die Anzahl der notwendigen Sensoren auf über, hierunter mindestens zehn Radarsensoren, welche in unterschiedlichen Modi betrieben werden. Zusätzlich werden aus Gründen der Sicherheit noch weitere Sensor-Typen, wie beispielsweise Lidarsensoren, integriert. [SCH18a]

Aktuellste Systeme verfügen über mehr als 31 Sensoren zur Umfelderkennung [FEI22]. Die Zunahme der Sensorik in Abhängigkeit des Automatisierungslevels ist in Abbildung 1.4 abgebildet. Parallel zur Anzahl der Sensoren steigen die Anforderungen bezüglich Genauigkeit und Verfügbarkeit der Sensorik sowie auch die Anforderungen an die zugrundeliegende Datenverarbeitung. Folglich lässt sich trotz Zentralisierungsstrategie eine Zunahme der Rechenleistung und der Anzahl der zur Verarbeitung der erfassten Daten eingesetzten Steuergeräte beobachten. [BRE18; MIC14; TIL18]

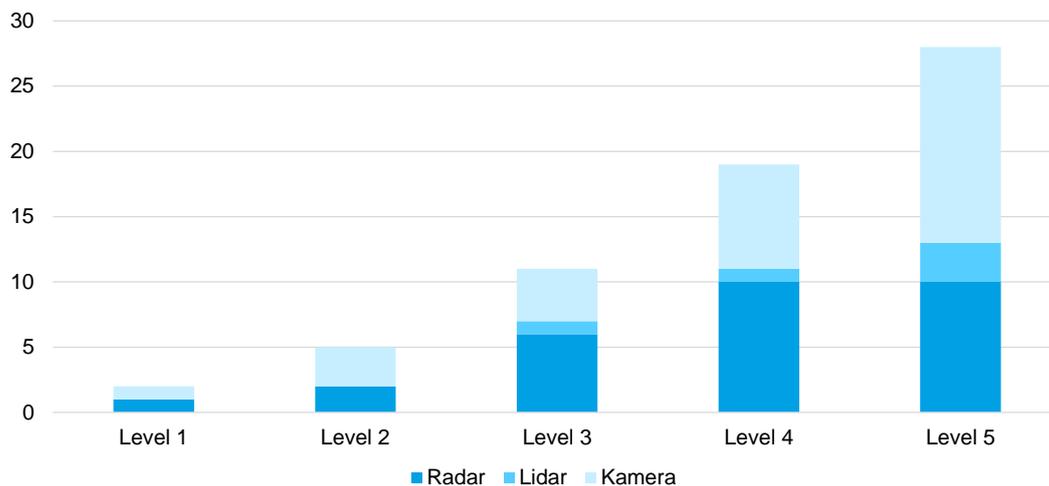


Abbildung 1.4: Anzahl der Sensoren nach Autonomielevel [JEF23; SCH18a; SOH18]

Ebenfalls steigt die Anzahl der sicherheitskritischen Funktionen. Daher sind die Automobilhersteller (engl.: Original Equipment Manufacturer, OEM) darauf angewiesen, die Funktionsfähigkeit des Gesamtsystems sicherzustellen. Hierzu existieren verschiedene Gesetze und Normen, welche die Entwicklung des Produktes, das Inverkehrbringen dieses oder den Umgang mit diesem reglementieren.

Bezüglich des Inverkehrbringens autonomer Fahrzeuge existiert als grundlegendes Gesetz die deutsche Produkthaftung nach § 1 des deutschen Produkthaftungsgesetzes. Diese hat zum Ziel, den Endverbraucher vor Gefahren zu schützen, welche von einem fehlerhaften Produkt ausgehen. [BUN17; ROS19]

Zur Absicherung der Funktionsfähigkeit im Schritt der Produktentwicklung beschreibt die ISO Norm 26262 das Vorgehen zur Sicherstellung der „Funktionalen Sicherheit“, und fokussiert die Entwicklung der sicherheitskritischen Komponenten von Fahrzeugen. Im Rahmen einer Sicherheitsbetrachtung soll durch Anwendung der Norm das Risiko einer sicherheitskritischen Fehlfunktion minimiert werden, was unter den Aspekt der funktionalen Sicherheit fällt. Die Norm definiert das sogenannte Automotive Safety Integrity Level (ASIL). Der ASIL stellt das Ergebnis der im Rahmen der Produktentwicklung durchgeführten Risikobeurteilung dar, wobei der Aufwand zur Gewährleistung der Produktsicherheit mit der Zunahme des ASIL-Levels steigt. [BÖR11; ISO18b; WIL15]

Weitere Normen, wie die ISO/PAS 21448 und auch in weiteren Sinne die IEC 61508, definieren die sicherheitstechnische Betrachtung der beabsichtigten Funktion von Kraftfahrzeugen (ISO 21448, „Safety of the intended functionality“, SOTIF) und die funktionale Sicherheit si-

cherheitsrelevanter Steuerungssysteme (IEC 61508), zu denen die Systeme, welche sicherheitskritische Funktionen ausführen, gehören. [ISO22; LIE22] Die beiden Normen sind damit ergänzend zueinander zu verstehen.

Bezüglich der Verwendung bestimmt das Wiener Übereinkommen von 1968, dass Fahrzeuge jederzeit unter der Kontrolle eines Fahrers stehen müssen [DIE19; MAU15]. Um die zunehmende Automatisierung der Fahrzeuge abzudecken, wurde das deutsche Straßenverkehrsgesetz (StVG), was sich hieran anlehnt, ergänzt. Nach der durchgeführten Änderung fordert dieses ebenfalls eine ständige Bereitschaft des Fahrers seiner „Fahrpflicht jederzeit nachzukommen“. [ROS19]

Zur Gewährleistung einer einheitlichen Regelung im europäischen Raum wurde im März 2014 von der UNECE, der europäischen Wirtschaftskommission, eine Richtlinie betreffend die Realisierung von automatisierten und autonomen Fahrfunktionen verabschiedet. Konkret besagt diese, dass hochautomatisierte Systeme zukünftig unter das Wiener Übereinkommen fallen, sofern ein Fahrer anwesend ist, der jederzeit das System ein- und ausschalten sowie übersteuern kann. In Folge dieser neuen Änderung trägt im Falle eines Unfalls, der durch eine Fehlfunktion des automatisierten oder autonomen Systems verursacht wurde, der OEM die Verantwortung, da dies bei aktivierter Automatisierung nicht in die Verantwortung des Fahrers fällt. [AUE17; BMV21; BUN21]

Um die so hinzugekommenen Verpflichtungen zu erfüllen, werden verschiedene Maßnahmen ergriffen, um eine Funktionsabsicherung der autonomen Systeme und ihrer Komponenten sicherzustellen. Neben den genannten Schritten in der Produktentwicklung findet in der Produktion eine Sicherstellung der Funktionsfähigkeit im Rahmen der Fahrzeuginbetriebnahme statt. Auf verschiedenen Prüfständen des End-of-Line (EoL) werden umfelderfassende Sensoren kalibriert sowie die notwendige Aktorik zur Längs- und Querführung in Betrieb genommen. Da hierbei, wie später gezeigt, ein Fehlerschlupf möglich ist, kann dies nicht als sichere und nachvollziehbare Funktionsabsicherung bezeichnet werden, wie sie für zukünftige Fahrzeuge benötigt wird. [MUE22; OTT21] Dementsprechend wichtig einzuordnen ist der Forschungsbedarf hinsichtlich neuer Absicherungsstrategien, vor allem für automatisierte Systeme ab Level 3 und höher. Dazu muss die Frage beantwortet werden, wie zukünftige Prozesse ausgelegt und wo diese verortet werden müssen, um die technische Sicherheit nachzuweisen. [GAS15]

## 1.2 Ziel der Arbeit

Nach Betrachtung der rechtlichen, normativen und technischen Randbedingungen erschließt sich, dass neben der Produktentwicklung eine Funktionsabsicherung vor allem in der Montage des Produktes stattfinden muss. Im Bereich der Fahrzeug-Inbetriebnahme existieren verschiedene Ansätze zur Sicherstellung der Funktionsfähigkeit. Allerdings ist der aktuelle Stand der Technik nicht auf die Produktion hochautomatisierter und autonomer Systeme ausgelegt. Nicht ausgereifte und veraltete Produktionsstrukturen verursachen bei der Inbetriebnahme der Fahrzeuge einen hohen Fehlerschlupf. Zudem ist dieser Bereich oft unflexibel und wenig wandlungsfähig, was der steigenden Häufigkeit von Produktneuentwicklungen und Variantenwechseln entgegensteht. Zu den bereits bestehenden Montageprozessen im End-of-Line müssen folglich weitere integriert werden, um die Funktionsfähigkeit der Fahrzeuge sicherzustellen und zu dokumentieren.

Neuartige Ansätze decken sowohl die Prozessentwicklung, als auch die Inbetriebnahme selbst ab. Als Werkzeuge werden dabei in verschiedenen Ansätzen Entwicklungsmethoden, unterschiedliche Simulationsarten sowie neu entwickelte Prozesse und Betriebsmittel vorgestellt. [GRE18; JON19; OTT21; SCH21] Allerdings adressiert keine dieser Lösungen die Absicherung im Sinne einer Prüfung der Fahrzeugfunktion nach Abschluss aller Montageprozesse. Somit kann keine fehlerfreie Funktion zum Zeitpunkt der Auslieferung an den Kunden gewährleistet werden.

Die vorliegende Arbeit fokussiert daher explizit den Bereich der Fahrzeugendmontage und hat die Beantwortung der folgenden Forschungsfrage zum Ziel:

*Wie kann die Funktion hochautomatisierter und autonomer Fahrzeuge in der Montagelinie sicher, nachvollziehbar und technologieübergreifend abgesichert werden?*

Somit ist das primäre Ziel der Arbeit die Entwicklung eines Prozesses und der notwendigen Betriebsmittel zur Funktionsabsicherung hochautomatisierter und autonomer Fahrzeuge der Level drei bis fünf in der Montagelinie.

Wie im Verlauf der Arbeit begründet, soll die erarbeitete Lösung dabei die Funktionsabsicherung der umfelderfassenden Sensorik fokussieren. Diese stellt die Grundlagen zur Erfüllung der automatisierten Fahraufgabe dar und unterliegt in der Produktion einer Vielzahl an Einflüssen.

Bei der Beantwortung der Forschungsfrage und der damit verfolgten Entwicklung wird die Zielsetzung in die folgenden Teilschritte unterteilt:

- Definition der abzusichernden Eigenschaften der umfelderfassenden Systeme
- Entwicklung eines Prozesses zur Funktionsabsicherung der definierten Umfänge
- Entwicklung der zur Durchführung des Prozesses benötigten Betriebsmittel
- Nutzung der Eigenschaften zukünftiger Fahrzeuge, wie die zunehmende Verwendung von Zentralsteuergeräten und V2X-Funktionen, um einen möglichst flexiblen und effizienten Prozess zu realisieren

Bei der Entwicklung einer Lösung orientiert sich die Arbeit am in [OTT21] und [MUE22] vorgestellten Zielbild der Inline-Inbetriebnahme. Dieses ist in Abbildung 1.5 dargestellt.

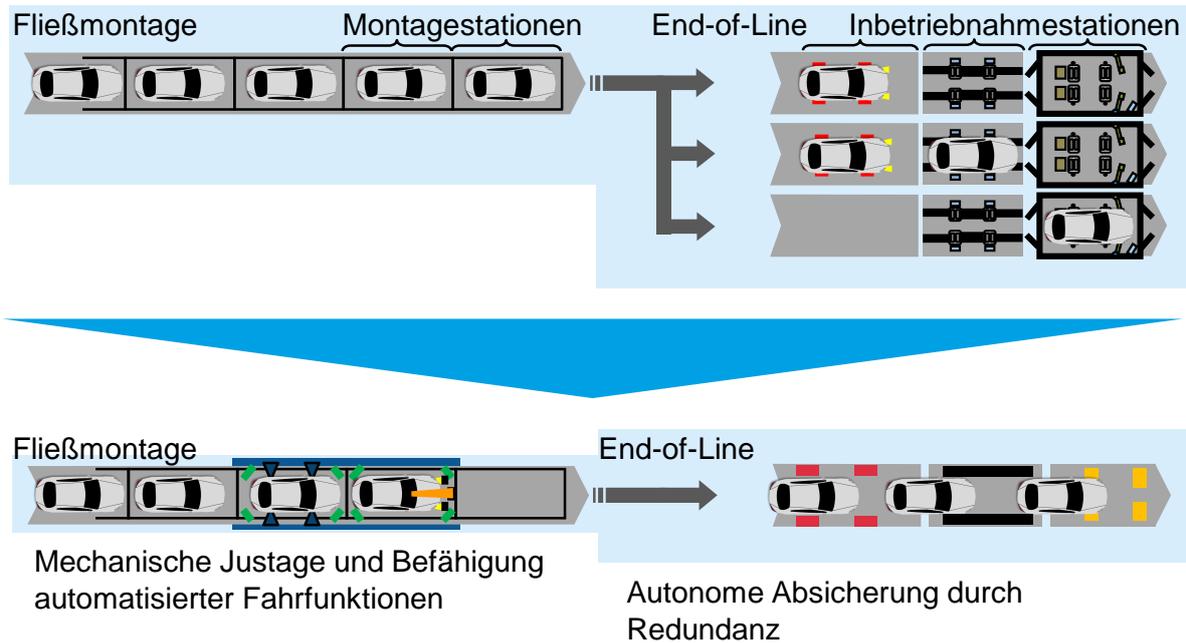


Abbildung 1.5: Inline-Konzept nach [OTT21] und [MUE22]

Das Inline-Konzept stellt eine Lösung der in Kapitel 2.1 näher erläuterten Herausforderung der Prozessparallelisierung im Bereich des EoL dar. Dazu sollen, wie in [OTT21] beschrieben, wesentliche Umfänge zur Kalibrierung der umfelderfassenden Sensorik hochautomatisierter Fahrzeuge bereits in der Fließmontagelinie erfolgen. Auf Basis dieser, auch als „Befähigung“ bezeichneten, Inbetriebnahme vor dem Eintreten in das End-of-Line, können Folgeprozesse weiterhin in einer Linienstruktur durchgeführt werden, sodass eine Parallelisierung obsolet wird. Der Ansatz wird weiterentwickelt, sodass sich nach der erfolgten Montage ein „autonomer Abfahrbereich“ anschließt. In diesem Bereich werden keine Änderungen am Fahrzeug vorgenommen, sodass eine finale Funktionsabsicherung der automatisierten Fahrfunktionen möglich wird.

### 1.3 Aufbau der Arbeit

Zur Adressierung der Aufgabenstellung ist eine übergreifende Betrachtung und ein Verständnis sowohl des Produktes, als auch der Produktionsstruktur notwendig, um einen optimalen Prozess zu entwickeln.

Dementsprechend müssen zunächst die relevanten Grundlagen zum Verständnis der Problemstellung untersucht werden. Anschließend erfolgt die Feindefinition der Zielstellung und der damit einhergehenden, zu erfüllenden Anforderungen. Es wird ein Lösungskonzept zur Erfüllung der definierten Anforderungen vorgestellt und dieses anschließend implementiert. Die Arbeit schließt mit einer Validierung der Forschungsergebnisse sowie einem Fazit und Ausblick auf weitere Entwicklungsschritte.

Diese Einzelschritte spiegeln sich im Aufbau der Arbeit wieder. Die Einzelschritte sind mit Zuordnung zu den jeweiligen Kapiteln der Arbeit in Abbildung 1.6 dargestellt.

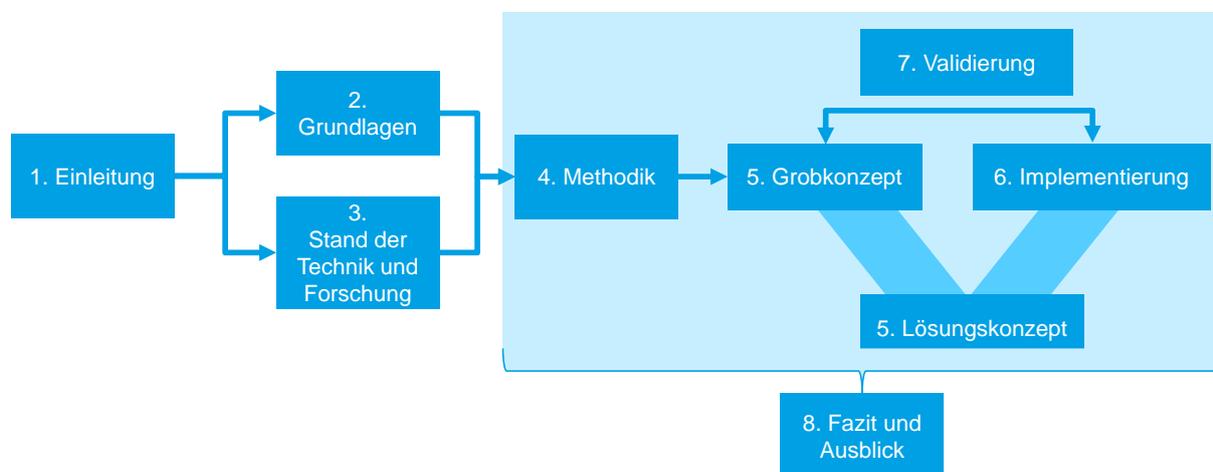


Abbildung 1.6: Aufbau der Arbeit und Zuordnung der Kapitel

Im ersten Kapitel wurden innerhalb der Einleitung die Motivation und die Notwendigkeit zur Bearbeitung der Problemstellung dargestellt. Weiterhin wurde das Ziel der Arbeit dargelegt und der Aufbau der vorliegenden Arbeit der Vorgehensweise folgend erläutert.

In Kapitel 2 werden die Grundlagen erläutert, welche für das Verständnis des Produktes und der Problemstellungen in der Fahrzeugmontage notwendig sind. Im ersten Teil wird der aktuelle Stand der Technik bezüglich automatisierter Fahrzeuge, deren Aufbau und Grundfunktionen dargestellt. Nachfolgend werden die Grundlagen der verwendeten umfelderfassenden Sensorik beschrieben. Im zweiten Abschnitt werden die Grundlagen der Fahrzeugproduktion und Fahrzeugendmontage mit Fokus auf das End-of-Line und die Fahrzeuginbetriebnahme vermittelt. Hierbei werden die existierenden Prozesse zur Kalibrierung umfelderfassender Sensoren von Fahrerassistenzsystemen erläutert. Diese sind als Vorstufe der automatisierten Fahrfunktionen zu verstehen und stellen damit eine wichtige Grundlage des zu entwickelnden Prozesses dar.

Auf dieser Basis werden in Kapitel 3 der bestehende Stand der Technik und aktuelle Ansätze aus der Forschung in Hinblick auf das zu bearbeitende Themenfeld beschrieben. Zunächst werden relevante Forschungsarbeiten zu den Themen Fahrzeuginbetriebnahme, Funktionsabsicherung und Sensorkalibrierung aufgeführt und bewertet. Vertiefend werden anschließend

allgemeine Ansätze zur extrinsischen Kalibrierung von umfelderfassenden Sensoren automatisierter Systeme untersucht. Aus diesen Betrachtungen wird ein übergeordnetes Fazit gezogen, aus dem der notwendige Handlungsbedarf zur Realisierung der Aufgabenstellung abgeleitet wird.

Nach der Beschreibung der Grundlagen und des Standes der Technik und Forschung, wird in Kapitel 4 die in dieser Arbeit angewandte Methode zur Lösungsentwicklung beschrieben. Unter Beachtung des abgeleiteten Handlungsbedarfs werden anschließend Anforderungen definiert, welche die Grundlage für die Lösungsentwicklung im Rahmen der definierten Methode darstellen.

Diesem methodischen Vorgehen folgend, werden in Kapitel 5 zunächst die zur Erfüllung der Zielstellung notwendigen Unteraufgaben definiert. Auf Basis dieser wird anschließend ein Grobkonzept für einen Prozess zur Funktionsabsicherung entwickelt. Mittels diesem Grobkonzept wird der Zielprozess in der Montagelinie verortet und anschließend ein Konzept für die benötigten Betriebsmittel vorgestellt. Abschließend wird das Grobkonzept mit den definierten Anforderungen abgeglichen. Im zweiten Teil des Kapitels wird das so entstandene Grobkonzept zu einem finalen Lösungskonzept weiterentwickelt. Dabei werden Eigenschaften des Produktes sowie Randbedingungen der Prozessumgebung berücksichtigt.

Im sechsten Kapitel wird das entwickelte Lösungskonzept in einem realitätsnahen Technologiedemonstrator implementiert. Hierzu wird zunächst der Systemaufbau erläutert und die Realisierung der notwendigen Betriebsmittel beschrieben. Danach wird die erfolgte Implementierung des Prozessablaufes auf Seiten des Produktes als auch auf Seiten der Prozessinfrastruktur beschrieben.

Zur Validierung der Entwicklungen werden in Kapitel 7 Versuche mit einem Testfahrzeug in einem Technologiedemonstrator durchgeführt. Hierbei wird die Funktionsabsicherung für Radar, Lidar und Kamerasysteme am Fahrzeug durchgeführt. Die implementierten Lösungen aus Kapitel 6 werden geprüft und die Ergebnisse bewertet.

Abschließend wird in Kapitel 8 eine Zusammenfassung der Arbeit vorgestellt. Die Zielerreichung wird auf Basis der Validierung bewertet. Schlussendlich wird ein Ausblick auf anschließende Forschungs- und Entwicklungsschritte gegeben.

## 2 Grundlagen des Betrachtungsbereichs

Um ein grundlegendes Verständnis der eingangs genannten Herausforderungen und der Thematik der Arbeit zu ermöglichen, werden in diesem Kapitel die Grundlagen des Betrachtungsbereichs abgebildet. Hochautomatisierte und autonome Fahrzeuge, im Folgenden aus Gründen der Lesbarkeit als *automatisierte Fahrzeuge* bezeichnet, bilden als Produkt die Grundlage für die Entwicklung eines Prozesses zur Funktionsabsicherung in der Produktion.

Dementsprechend wird in diesem Kapitel zunächst auf den Aufbau und die Funktionen automatisierter Fahrzeuge eingegangen. Es werden die Grundaufgaben der automatisierten Fahrfunktionen, die damit zusammenhängende Fahrzeugarchitektur sowie die wesentlichen Sensoren zur Umfelderkennung dargestellt.

Darauffolgend werden die Grundlagen der Fahrzeugproduktion und Fahrzeugendmontage sowie im speziellen der Fahrzeuginbetriebnahme vermittelt. Das Kapitel schließt mit der Darstellung des Standes der Technik bezüglich der Kalibrierung umfelderfassender Sensoren automatisierter Fahrzeuge in der Produktion.

Übergreifend wird ein Fazit gezogen, welches die wesentlichen Punkte für die Funktionsabsicherung zusammenfasst.

### 2.1 Fahrzeugproduktion und Fahrzeugendmontage

Die Automobilproduktion ist unabhängig vom Automatisierungslevel des herzustellenden Produktes grundlegend ähnlich aufgebaut. Zunächst kann die Produktion in die Bereiche der Fertigung und Montage unterteilt werden [MUE24c]. In der Automobilproduktion umfasst der Bereich der Fertigung, wie im Abbildung 2.1 dargestellt, das Presswerk, in dem die Rohteile der Karosserie hergestellt werden. Darauf folgt der Bereich der Montage, welcher sich in Rohbau, Lackiererei und Endmontage untergliedert. Im Rohbau werden die einzelnen Karosserieteile zu einem Fahrzeugrohbau gefügt, dieser anschließend lackiert und die Rohkarosserie in der Fahrzeugendmontage mit den weiteren Komponenten des Fahrzeuges zu einem finalen Produkt zusammengefügt. [MUE23]

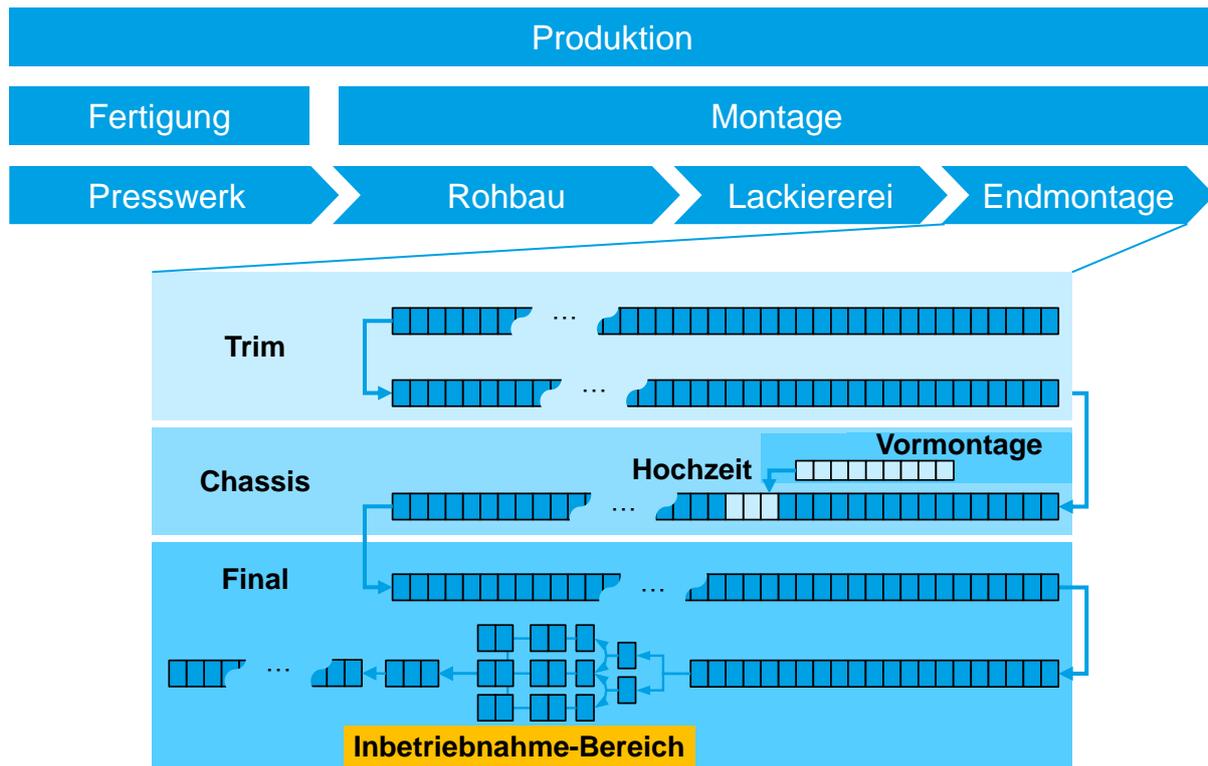


Abbildung 2.1: Aufbau der Fahrzeugproduktion [MUE23]

Die Fahrzeugendmontage untergliedert sich in die drei Teilbereiche Trim, Chassis und Final. Dabei orientiert sich der Aufbau der Endmontage am modularen Aufbau des Produktes.

Im Trim wird der Innenausbau des Fahrzeuges vorgenommen. Es werden Kabelbaum, Cockpit, Sitze und weitere Module und Komponenten verbaut. Diese werden zentral oder dezentral vormontiert und in der korrekten Sequenz am Montageband bereitgestellt. Nach der Montage der Komponenten erfolgen erste Konnektivitäts- und Funktionsprüfungen. So werden beispielsweise Kabelbäume und Steuergeräte sowie deren Steckverbinder getestet, um eine aufwändige Nacharbeit bei voll bestücktem Fahrzeug zu vermeiden.

Im Umfeld des Chassis wird parallel zur Hauptmontage der Antriebsstrang vormontiert. Dieser wird im Bereich der Hochzeit mit dem fertigen Chassis gefügt. Zusätzlich erfolgen weitere Montagetaetigkeiten, wie die Montage der mit der Sensorik vormontierten Front- und Back-End Module. Analog zum Trim werden erste Prüfungen durchgeführt.

Das Final umfasst die letzten Montageprozesse, welche notwendig sind, um das Fahrzeug betriebsfähig zu machen. In diesem befindet sich der Inbetriebnahme-Bereich, welcher auch als End-of-Line bezeichnet wird. [MUE23]

### 2.1.1 Fahrzeuginbetriebnahme

In der Endmontage sammeln sich alle Fehler, die von den vorgelagerten Entwicklungs-, Produktions- und Montageprozessen der Einzelteile, Baugruppen und Module weitergegeben wurden [MUE21].

Um nach Abschluss aller Montageprozesse die Qualitätsziele und damit auch die Funktionsfähigkeit des Produktes unter Einfluss der nicht vermeidbaren Abweichungen der verbauten Einzelteile, Baugruppen und Module sicherzustellen, werden im EoL verschiedene Prozesse zur Fahrzeuginbetriebnahme durchgeführt. Diese minimieren die Abweichungen der auftretenden Produkttoleranzen. [GRE18; MUE23; MUE19]

Hierzu wird im EoL die Linienstruktur, wie in Abbildung 2.2 zu erkennen, mittels Parallelisierung aufgebrochen. Dies ist notwendig, da die Prozesszeiten der Prüf- und Inbetriebnahme-Umfänge in diesem Bereich meist deutlich länger dauern als der zugrundeliegende Linientakt. Maßgeblich hierfür sind meist auch die notwendigen Kalibrierumfangs der umfelderfassenden Sensorik. Bedingt durch die umfangreichen Prozesse, entstehen hier Prozesszeiten von bis zu mehreren Minuten. [MUE23; OTT21; SCH23]

Mit einer weiteren Zunahme der umfelderfassenden Systeme wird der Parallelisierungsdruck in diesem Bereich weiter steigen. Daher zählt das EoL zu einem der kostenintensivsten und gleichzeitig zu einem der unflexibelsten Bereiche der Fahrzeugendmontage. Vor dem Hintergrund der steigenden Automatisierung des Fahrzeuges ergeben sich somit neben den regulativen auch wirtschaftlich-technische Herausforderungen, welche in naher Zukunft gelöst werden müssen. Der Bereich des EoL muss mit Hilfe neuartiger Prozesse restrukturiert werden, um weiterhin eine wirtschaftliche Produktion zu ermöglichen. [MUE23]

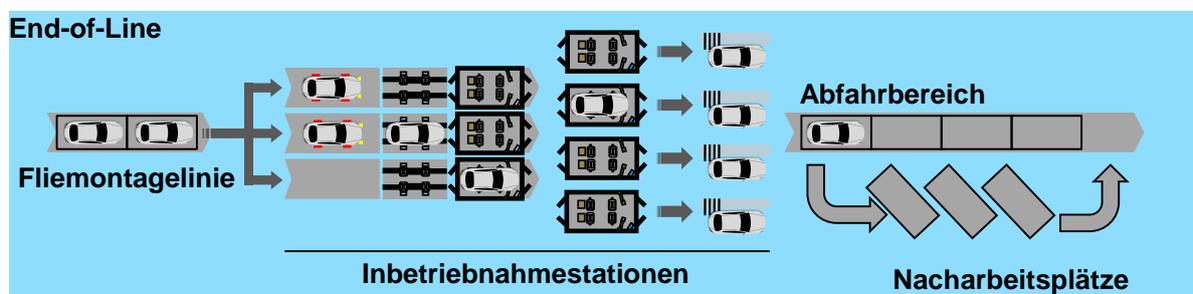


Abbildung 2.2: Aufbau des End-of-Line [MUE23]

Die Prozesse der Fahrzeuginbetriebnahme umfassen als erste Station einen sogenannten Fahrwerkstand. In diesem wird das Fahrwerk des Fahrzeuges eingestellt, wodurch die geometrische Fahrachse oder die Fahrzeugsymmetrieachse als Referenz für weitere Einstellvorgänge erfasst werden. Aus diesem Grund werden erste Justageumfänge, wie die Scheinwerfereinstellung oder die Kalibrierung der umfelderfassenden Sensorik, nach der Einstellung von Spur und Sturz in diesem Prüfstand durchgeführt. [MUE23; OTT21] Dieser Prozess stellt die Grundlage für alle weiteren Einstellvorgänge dar und wird detailliert in Abschnitt 2.1.2 erläutert. Aufgrund der Zunahme der umfelderfassenden Sensorik finden sich im EoL weitere Prüfstände zur Inbetriebnahme der umfelderfassenden Systeme. Daraufaufgehend werden auf sogenannten Rollenprüfständen weitere Umfänge zur Einstellung und Parametrierung des Antriebsstrangs ausgeführt. [MUE23]

Das EoL wird durch einen Abfahrbereich und das Finish abgeschlossen. Hier werden letzte Nacharbeitsumfänge, wie anfallende Korrekturen, Reparaturen etwaiger Beschädigungen sowie Einstellprozesse, durchgeführt. Für umfangreichere Arbeiten sind hierzu dedizierte Nacharbeitsplätze zu finden. [MUE23]

Die Inbetriebnahme stellt somit den letzten Prozess in der Produktion dar, welcher die korrekte Funktionsfähigkeit des Endproduktes sicherstellt. Dies betrifft vor allem die Einhaltung der vorgegebenen Montagetoleranzen der umfelderfassenden Sensorik. Bei mechatronischen Produkten, wie dem Fahrzeug, ist dabei insbesondere das Zusammenspiel zwischen Mechanik, Elektronik, Software sowie deren Schnittstellen zu beachten. [GRE18; MUE23; MUE21; OTT21; SCH23]

Die Inbetriebnahme umfasst hierzu wie in Abbildung 2.3 die Grundaufgaben des Konfigurierens, Justierens und des Prüfens und damit alle Tätigkeiten, die entsprechend der Spezifikation einen betriebsfähigen Zustand des montierten Produkts gewährleisten [LOT06; MUE23; OTT21].

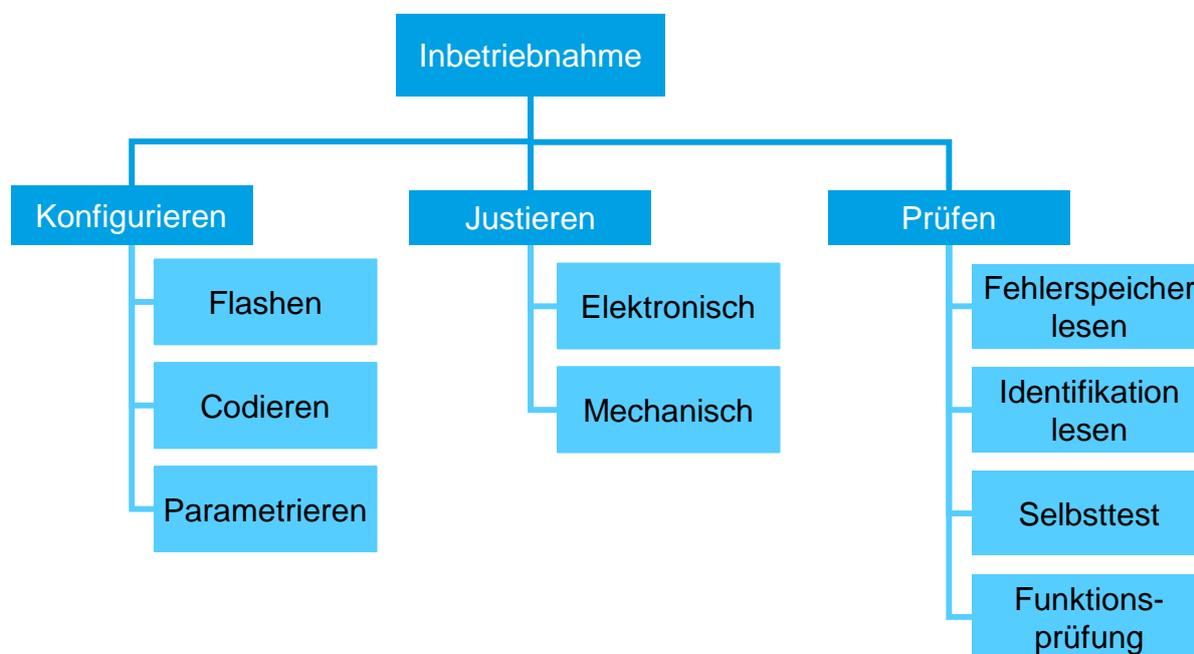


Abbildung 2.3: Aufgaben der Inbetriebnahme [LOT06; MUE23; OTT21]

Der Schritt des *Konfigurierens* beschreibt die Vorgänge des Flashens, Codierens und des Parametrierens. Das Flashen umfasst das Laden von Anwendungsdaten auf Steuergeräte des Fahrzeuges. Über das Codieren werden diese Anwendungsdaten anschließend durch das Setzen von Codier-Bits individualisiert. Im Schritt des Parametrierens werden Parameterlisten, Kennwerte und –felder auf die betreffenden Steuergeräte überspielt. [MUE24a; OTT21]

Die *Justageprozesse* beschreiben alle planmäßigen Prozesse zum Ausgleich produktionstechnisch unvermeidbarer Abweichungen, um geforderte Funktionen und Genauigkeiten innerhalb der vorgegebenen Spezifikation zu erreichen. Dabei können diese mechanisch und/oder rein elektronisch erfolgen. Zur Justage von umfelderfassenden Sensoren werden häufig elektronische Verfahren angewandt. Mittlerweile seltener kommen dabei auch die veralteten Verfahren der mechanischen Justage, wie beispielsweise die mechanische Einstellung des Gierwinkels von Sensoren mittels Justierschrauben zum Einsatz. [LOT06; MUE24a; OTT21; SCH23]

Zur *Prüfung* des Produktzustandes werden nach der erfolgten Montage und meist am Ende der Endmontage Fehlerspeicher und Identifikationen der Fahrzeuge ausgelesen. Weiterhin umfassen Prüfungsumfänge Selbsttests und Funktionsprüfungen von Steuergeräten, den zunehmend intelligenten Einzelsensoren der Fahrzeuge sowie ausgewählter Aktoren. [GRU21; MUE24a; OTT21]

Die für diese Arbeit relevanten Prozesse im Bereich der Fahrzeuginbetriebnahme sind das Parametrieren, Justieren und das Funktionsprüfen der Einzelsensoren, wobei es sich zumeist um Radar, Lidar und Kamerasysteme handelt [GRE18; MUE23; MUE21; OTT21].

### 2.1.2 Kalibrierung der Fahrzeugsensorik

Für die korrekte Erfassung und Auswertung des Umfeldes müssen die Daten aller Sensoren, welche sich mit unterschiedlicher Blickrichtung und Erfassungsbereich (engl.: Field-of-View , FoV) an verschiedenen Positionen des Fahrzeuges befinden, zusammengeführt werden [JON19; OTT21; SCH23]. Hierzu müssen diese in ein gemeinsames Koordinatensystem (KOS) überführt werden. Als Basiskoordinatensystem wird dazu häufig das fahrzeugfeste KOS  $F$  verwendet. [OTT21] Dieses ist nach [DIN13] im Mittelpunkt der Hinterachse verortet, die positive X-Richtung weist in Richtung der Fahrzeugsymmetrieachse in Fahrtrichtung. Die Anordnung des Fahrzeugkoordinatensystems und einem exemplarischen Sensorkoordinatensystem ist in Abbildung 2.4 verdeutlicht:

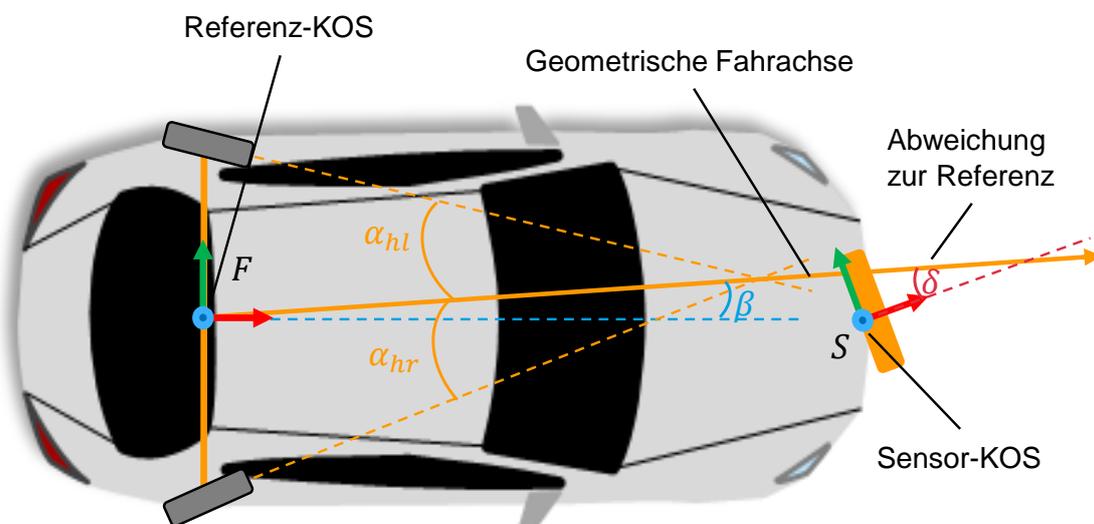


Abbildung 2.4: Referenzen am Fahrzeug

Für diese Zusammenführung der Umfelddaten ist, wie in [OTT21] und [SCH23] beschrieben, die Ausrichtung der Sensorik entlang einer Fahrzeugreferenz notwendig. Hierzu können die Fahrzeugsymmetrieachse oder die geometrische Fahrachse genutzt werden. Die geometrische Fahrachse ist dabei, wie in Abbildung 2.4 vereinfacht dargestellt, durch den Dachellaufwinkel  $\beta$  als die Winkelhalbierende der Einzelspurwinkel der Hinterachse definiert. [OTT21] Die Ausrichtung der Sensorik in Relation zum Fahrzeug ist durch die beschriebenen Montagetoleranzen bestimmt. Exemplarisch ist eine Toleranzkette dieser anhand eines vereinfachten Beispiels in Abbildung 2.5 dargestellt. Wie dort zu erkennen, ist der Differenzwinkel  $\delta$  abhängig von der Ausrichtung des Sensors zum Sensorträger, welcher sich toleranzbehaftet in diesem Beispiel am Frontend befindet. Die Orientierung des Frontends weist wiederum, durch beispielsweise die Einstellung von Spaltmaßen, Abweichungen zur Solllage im Bezug zur Fahrzeugreferenz auf. [GRE18; SCH23]

Bereits ab Level 2 erfolgt die Einstellung der Sensoren in einem Toleranzbereich von  $\pm 0,1^\circ$  bezogen auf den Nick- und  $\pm 0,05^\circ$  auf den Gierwinkel zur Fahrzeugreferenz [GRE18].

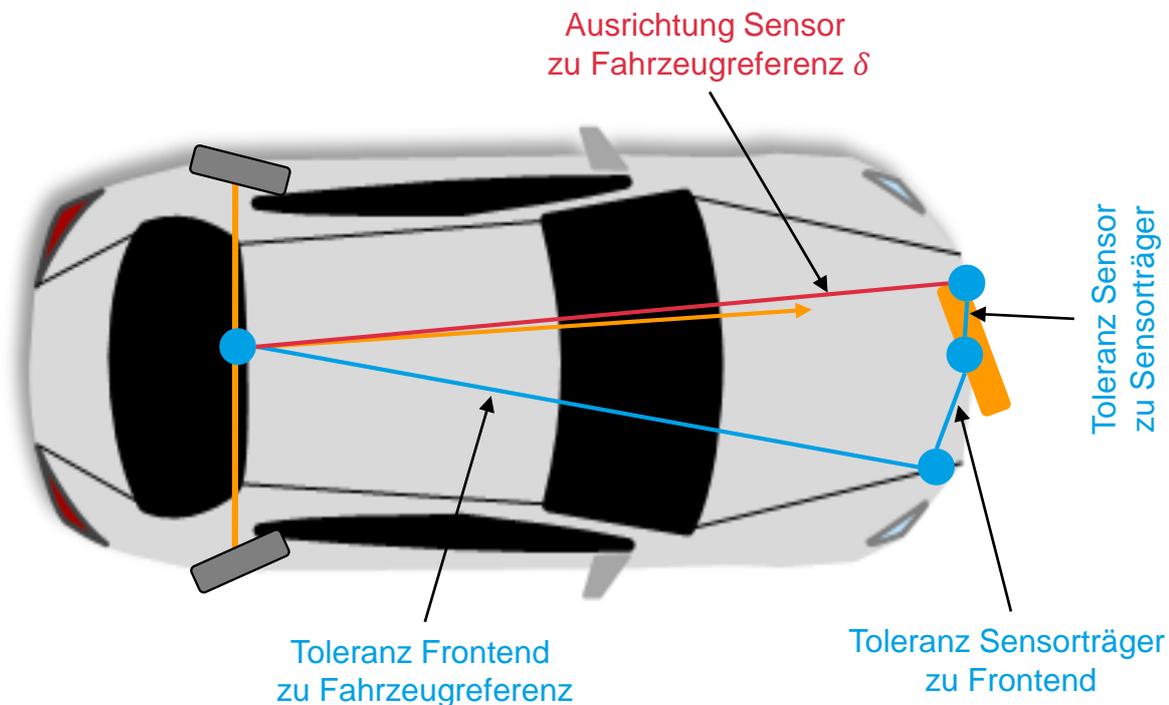


Abbildung 2.5: Toleranzkette in der Sensorkalibrierung

Zur Minimierung der Abweichung  $\delta$ , um die vorgegebenen funktionsrelevanten Lagetoleranzen einzuhalten, erfolgt im Rahmen der Fahrzeuginbetriebnahme eine Kalibrierung der umfelderfassenden Sensorik [MUE23].

Der Begriff Kalibrierung beschreibt dabei definitionsgemäß die „Ermittlung des Zusammenhangs zwischen Messwert der Ausgangsgröße und dem zugehörigen wahren Wert der Eingangsgröße“. Nach erfolgter Kalibrierung kann eine Justierung des Sensors erfolgen, um diesen auf eine systematische Messabweichung einzustellen und diese Abweichung damit zu minimieren. [DIN95]

Die Kalibrierung kann in intrinsische und extrinsische Kalibrierung untergliedert werden. Die intrinsische Kalibrierung beschreibt systeminternen systematischen Abweichungen und ist abhängig vom Sensor-Typ. [SCH23] Sie erfolgt durch den Hersteller der Sensorik und muss in der Fahrzeugendmontage nicht durchgeführt werden, da danach keine weiteren Veränderungen der internen Sensorparameter erfolgen. [FIE14]

Daher ist in der Endmontage nur die extrinsische Kalibrierung der umfelderfassenden Sensorik von Relevanz. Sie beschreibt die Ermittlung der gesuchten Rotation und Translation eines Sensors zu einem Bezugskoordinatensystem und ermittelt somit sechs Freiheitsgrade, drei Raumwinkel ( $\mathbf{R}_x, \mathbf{R}_y, \mathbf{R}_z$ ) und drei Translationskomponenten ( $t_x, t_y, t_z$ ). [SIE11]

Dieser Bezug kann in Form einer Transformationsmatrix  $\mathbf{T}$  nach Gleichung (1)-(6) dargestellt werden. Durch die Multiplikation jedes Punktes  $\mathbf{p}_S$  im Sensor-KOS mit der Transformationsmatrix  $\mathbf{T}$  ergibt sich nach dem Zusammenhang in Gleichung (7) ein korrespondierender Punkt im Fahrzeug-KOS. Mittels der durch die extrinsische Kalibrierung bestimmten Transformationsmatrix lässt sich für jeden Punkt im Raum ein korrespondierender Punkt im gemeinsamen Fahrzeug-KOS berechnen. [HAR03; SZE22]

$$\text{Transformationsmatrix:} \quad {}^F\mathbf{T}_S = \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{t} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\text{Rotation:} \quad \mathbf{R} = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\text{Translation:} \quad \mathbf{t} = \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\text{Roll:} \quad \mathbf{R}_x(\alpha) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\text{Pitch:} \quad \mathbf{R}_y(\beta) = \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\text{Yaw:} \quad \mathbf{R}_z(\gamma) = \begin{bmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$${}^F\mathbf{p}_S = {}^F\mathbf{T}_S * {}^S\mathbf{p}_S \quad (7)$$

Für die Ermittlung der extrinsischen Kalibrierung wird auf den Prüfständen die Lage der Fahrzeugreferenz oder des Fahrzeuges im Anlagenkoordinatensystem bestimmt, wodurch der Bezug  ${}^A T_F$  zwischen Anlagen- und Fahrzeug-KOS bestimmt werden kann. Durch Erfassung der Lage eines Referenznormals durch die Sensorik, sowie die bekannte Lage des Normals zum Anlagen-KOS sind die Bezüge  ${}^S T_T$  zwischen Sensor und Referenznormal und  ${}^A T_T$  zwischen Anlage und Referenznormal bestimmt. Hierdurch existiert eine geschlossene kinematische Kette und die gesuchte Transformation  ${}^S T_F$  eines jeden Sensors zum Fahrzeug- oder Referenzkoordinatensystem kann nach Gleichung (8) bestimmt werden. Die kinematische Kette im Prüfstands Aufbau ist in Abbildung 2.6 dargestellt [MUE24b; MUE22]:

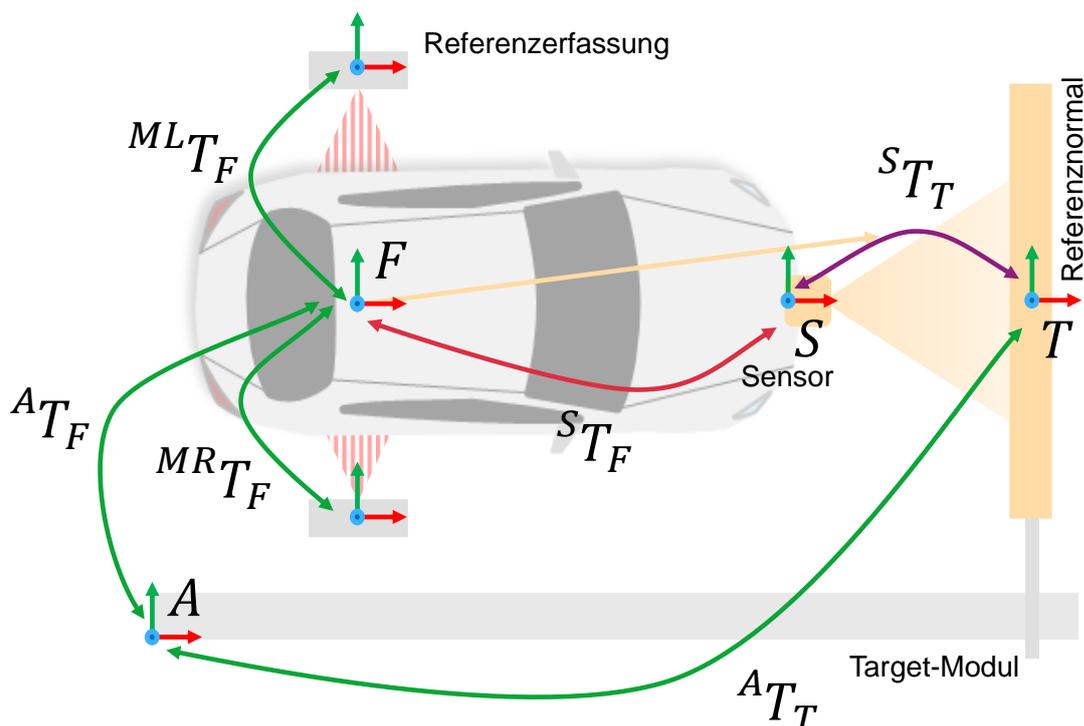


Abbildung 2.6: Kinematische Kette zur Ermittlung der extrinsischen Kalibrierung

$${}^S T_F = {}^S T_T * {}^T T_A * {}^A T_F \quad (8)$$

Zur Durchführung dieses Prozesses existieren Prüfstände verschiedener Hersteller. Führend sind hierbei die Firmen Dürr Assembly Systems und Burke Porter Group. In Abbildung 2.7 ist ein Prüfstand zur Kalibrierung von Radar, Lidar und Kamera im EoL nach [DUE23] dargestellt. Zu erkennen sind die seitlich des Fahrzeuges angeordneten Messeinrichtungen zur Erfassung der Fahrzeugreferenz. Weiterhin verfügt der Prüfstand über mehrere Referenznormale zur Kalibrierung von Radar, Lidar und Kamera. Diese sind spezifisch je Sensor-Typ ausgelegt. So werden für die Kamerakalibrierung Normale mit kontrastreichen Referenzmustern verwendet, für die Kalibrierung der Radarsensoren metallische, verstellbare Normale und für die Lidarsensoren ausgerichtete Kalibrierflächen (nicht in der Abbildung ersichtlich).

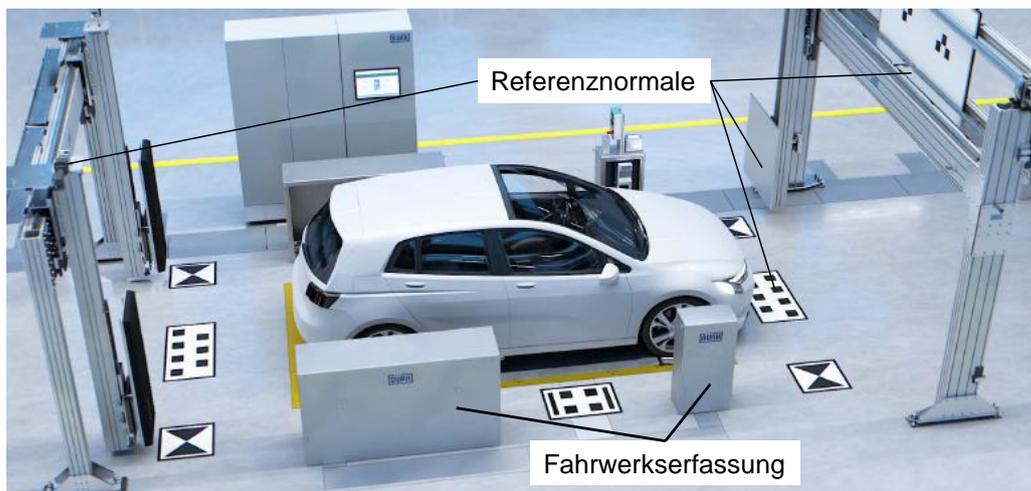


Abbildung 2.7: ADAS-Kalibrierprüfstand x-DASalign [DUE23]

Ein Kalibrierprüfstand der Burke Porter Group ist in Abbildung 2.8 dargestellt. Die Lösung ermöglicht die Kalibrierung von Radarsensoren und Kamerasystemen. Zu erkennen sind neben den Einheiten zur Referenzfassung die ebenfalls verstellbaren Referenznormale, welche eine Durchfahrt des Fahrzeuges durch den Prüfstand ermöglichen, sowie die unterschiedlich angeordneten Referenznormale zur Kamerakalibrierung.

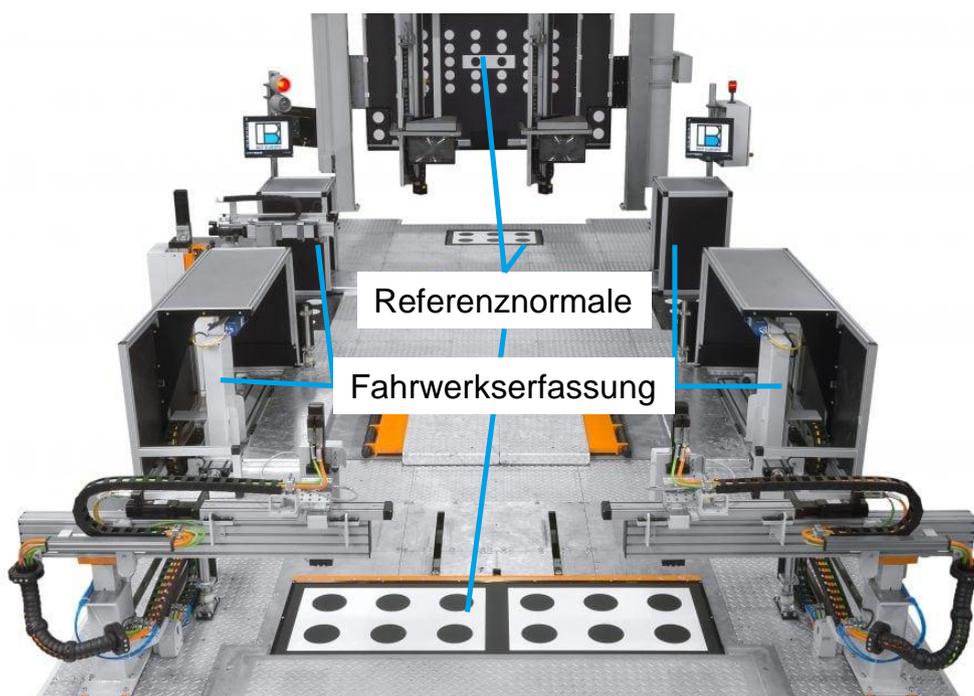


Abbildung 2.8: ADAS-Kalibrierprüfstand von [BEP24]

Unabhängig vom Hersteller erfolgt der Inbetriebnahmeprozess fahrzeugspezifisch. Nach Einfahren des Fahrzeuges in den Prüfstand und Erfassung der Fahrzeuglage oder Fahrzeugreferenz werden die Referenznormale auf ihre Sollposition gefahren. Anschließend wird über die On-Board-Diagnose (OBD) Schnittstelle die Kalibrierroutine jedes Sensors gestartet. Diese stellt eine abgeschlossene Funktion dar und ermittelt die extrinsischen Parameter jedes Sensors spezifisch. Das Ergebnis der Funktion ist dabei nicht verfügbar und wird lediglich intern

gespeichert. Nach Abschluss dieser Routine wird das Prozessergebnis über die OBD-Schnittstelle zurückgemeldet, die Referenznormale werden in Grundstellung gefahren und das Fahrzeug kann den Prüfstand verlassen.

## 2.2 Aufbau und Funktionen automatisierter Fahrzeuge

Automatisierte Fahrzeuge der Level 3-5 zeichnen sich durch eine selbstständige Quer- und Längsführung auf Basis der erfassten Umgebung und des erfassten Verkehrs aus. Die hierzu notwendigen Funktionen der Fahrzeuge folgen dem Zyklus von Erfassen, Planen und Steuern beziehungsweise Regeln [SCH23]. Dabei kann das Erfassen der Umwelt in die Erfassung durch die Sensorik, das Erkennen der erfassten Objekte und die anschließende Bewertung unterteilt werden.

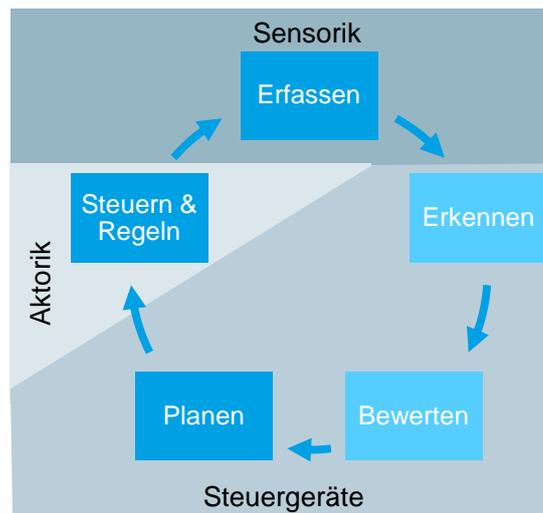


Abbildung 2.9: Grundfunktionen eines automatisierten Fahrzeuges

Diese Grundfunktionen, welche in Abbildung 2.9 dargestellt sind, werden dabei von unterschiedlichen Teilsystemen des Fahrzeuges ausgeführt. Zur Erfassung des Umfeldes verfügen automatisierte Fahrzeuge über eine Vielzahl an Sensoren. Diese übertragen die Messdaten an Steuergeräte, welche eine Erkennung der erfassten Objekte durchführen und diese auf Basis der erkannten Merkmale identifizieren und klassifizieren. Hierdurch wird beispielsweise eine Detektion von Fahrzeugen, Radfahrern, Fußgängern und Objekten der Umwelt ermöglicht. Auf Basis der Erfassung, Erkennung und Identifikation folgt eine Bewertung des Fahrzeugumfeldes. Anhand dieser Bewertung wird eine Zieltrajektorie geplant, entlang derer sich das Fahrzeug bewegen soll. Die hieraus gewonnenen Sollwerte für die Längs- und Querführung werden anschließend an die Fahrzeugaktorik übermittelt, welche der Steuerungs- und Regelungsaufgabe nachkommt. [FRA15; MAT15; ROB19].

Aus dem in Abbildung 2.9 dargestellten Zyklus kann der Systemaufbau eines automatisierten Fahrzeuges abgeleitet werden. Dieser ist in Abbildung 2.10 dargestellt und in die drei wesentlichen Domänen der Sensorik, Steuergeräte und Aktorik unterteilt. Diese sind zur Datenübertragung über Bussysteme miteinander verbunden.

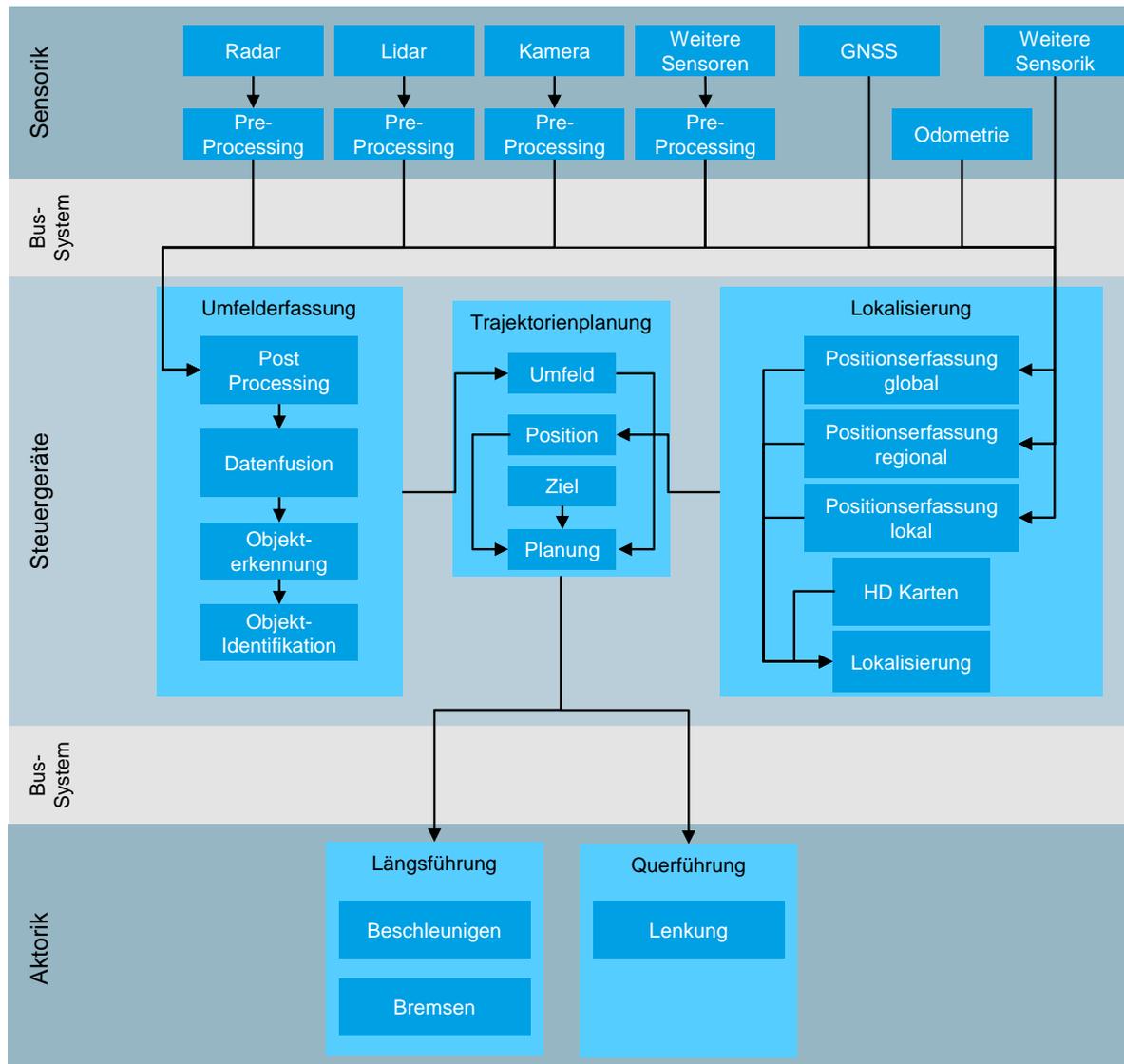


Abbildung 2.10: Systemaufbau eines automatisierten Fahrzeuges

Automatisierte Fahrzeuge verfügen im Bereich der Sensorik neben der konventionellen Sensorik, wie Raddrehzahl- und Beschleunigungssensoren, über weitere Sensoren zur Erfassung des Umfeldes sowie zur Lokalisierung. Wie dargestellt, werden zur Erfassung des Umfeldes unterschiedliche Sensor-Typen genutzt, bei automatisierten Fahrzeugen ab Level 3 maßgeblich Radar- und Lidarsensoren sowie Kameras. Zur globalen Lokalisierung werden GNSS-Empfänger verwendet, für die regionale Lokalisierung und zur Präzisionssteigerung der Lokalisierung via GNSS werden zusätzlich die Daten von Odometriesensoren eingebunden. Die lokale Lokalisierung, also die Bestimmung der exakten Position innerhalb einer Fahrspur erfolgt durch die Erfassung der Umgebung mittels der umfelderfassenden Sensoren. Die von den Sensoren erfassten Daten werden hierzu über einen Datenbus an die Steuergeräte zur weiteren Datenverarbeitung übertragen. Aufgrund der Vielzahl an Sensoren und der hohen Auflösung dieser sowie zur Einsparung von Rechenleistung in den Steuergeräten findet meist direkt in den Sensoren eine Datenvorverarbeitung (engl.: preprocessing) statt. So werden beispielsweise Hintergrunddaten, welche keine Informationen enthalten, entfernt, oder direkt die aus den Daten extrahierten Objekte zur Verfügung gestellt.

Die Verarbeitung der erfassten Sensordaten und der Lokalisationsdaten zur Trajektorienplanung lässt sich in drei Module unterteilen. Im Lokalisierungsmodul werden die Daten der globalen und lokalen Lokalisierung zusammengeführt. Weiterhin werden zur Feinlokalisierung zunehmend hochgenaue Karten genutzt, welche Daten der Umfelderkennung zur Positionsbestimmung auf einer präzisen Karte nutzen.

Im Modul zur Umfelderkennung werden die vorverarbeiteten Daten aller umfelderfassenden Sensoren zusammengeführt und verarbeitet. Hierzu werden aus den Daten potenzielle Objekte extrahiert. Dieser Schritt wird auch als Postprocessing bezeichnet. Je nach Sensor-Typ kommen hierzu unterschiedliche Algorithmen zum Einsatz. Mit den hieraus gewonnenen Informationen wird anschließend eine Sensordaten- beziehungsweise Informationsfusion durchgeführt, bei der die erkannten Objekte räumlich und zeitlich synchronisiert werden. Die verarbeiteten Sensordaten aller Sensoren werden überlagert, sodass ein neuer, mehrdimensionaler Datenraum entsteht. In diesem Datensatz stehen zu jedem Objekt unterschiedliche Informationen zur Verfügung, mit deren Hilfe eine Objekterkennung und eine Objektidentifikation durchgeführt werden kann. [WIN15a]

Die Ergebnisse der Lokalisierung und der Umfelderkennung werden im Modul zur Trajektorienplanung zusammengeführt. Aus dem Ziel, der aktuellen Position sowie den erfassten Umfelddaten wird eine Zieltrajektorie berechnet, oder aktualisiert.

Diese Zieltrajektorie wird an die Steuergeräte der Fahrzeugaktuatorik übergeben, welche die nächsten gültigen Steuerbefehle berechnet. Die Fahrzeugaktuatorik selbst übernimmt folgend die Steuerung und Regelung der Längs- und Querverführung zur bestmöglichen Realisierung der Bahnplanung.

In automatisierten Fahrzeugen werden zur Erfüllung dieser Aufgaben ein oder mehrere Steuergeräte eingesetzt. Im Zuge der in Kapitel 1 beschriebenen CASE-Entwicklung und der damit verbundenen V2X Funktionalitäten steigt die Integrationsdichte der Steuergeräte. Um dem wachsenden Leistungsbedarf durch Positionsbestimmung, Umfeldüberwachung und Trajektorienplanung gerecht zu werden, entwickelt sich die Fahrzeugarchitektur von einer steuergereorientierten Architektur zu einer Zentralrechnerarchitektur. Die Anzahl der verbauten Steuergeräte sinkt, die Integrationsdichte der Funktionen je Steuergerät steigt, damit auch die Rechenleistung der Steuergeräte und des Gesamtsystems. Zur Umsetzung dieses Architekturwandels findet (Automotive-)Ethernet als Verbindungsstandard zunehmende Anwendung. [GRU21]

Die Erfassung des Fahrzeugumfeldes stellt neben der Positionsbestimmung und der Trajektorienplanung die grundlegendste Eingangsgröße zur Erfüllung der automatisierten Fahrfunktion dar. Die korrekte Erfassung des Umfeldes, die Erkennung und Identifikation von Objekten im Erfassungsbereich sowie die sichere Bestimmung der Lage dieser Objekte mit einem definierten Bezug zum Fahrzeug ist damit essenziell, um die automatisierte Fahraufgabe sicher und reproduzierbar erfüllen zu können. [ROB19] Die Güte der Erfassung des Umfeldes hat also einen direkten Einfluss auf das Planen und Steuern. Nur bei korrekter Erfassung des Umfeldes kann eine fehlerfreie Funktion des Fahrzeuges ab Automatisierungslevel 3 realisiert werden. [DIE19; MUE22; VDA15]

### 2.2.1 Grundlagen umfelderfassender Sensoren

Zur Erfassung des Umfeldes werden, wie bereits beschrieben, verschiedene Sensor-Typen genutzt. Diese verfügen über unterschiedliche FoVs, um einen möglichst großen Bereich um das Fahrzeug zu erfassen, wobei auch die Unterscheidung von Nah- und Fernbereich berücksichtigt werden muss. Abbildung 2.11 zeigt schematisch die Anordnung der Sensoren an einem automatisierten Fahrzeug ab Level 3. Zu erkennen sind die drei Sensor-Typen Radar, Lidar und Kamera, die sich teilweise überschneidenden FoVs sowie die Abdeckung von Nah- und Fernbereich. [AUD14; BRE18; THI23]

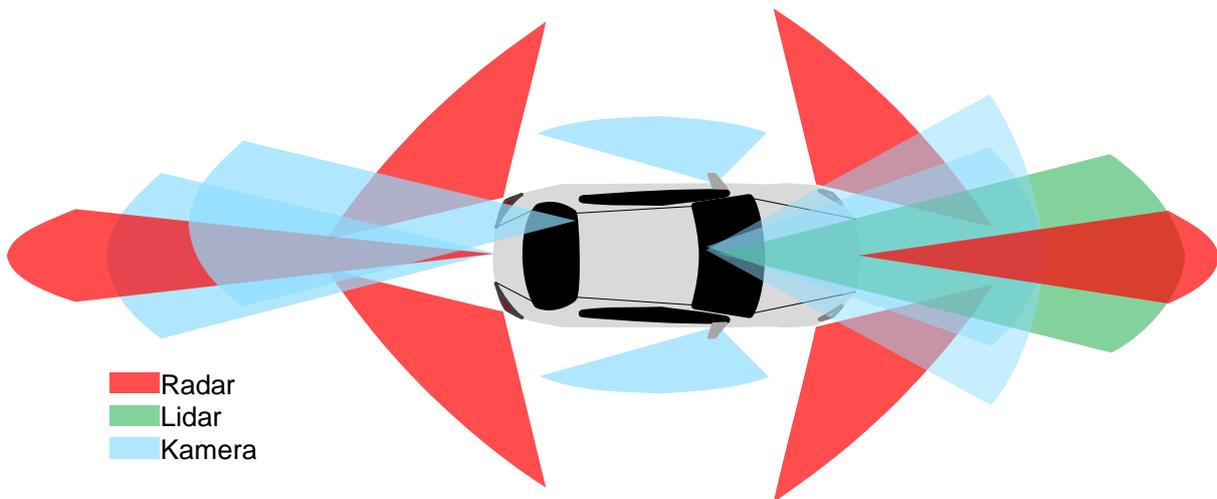


Abbildung 2.11: Sensorik und Erfassungsbereiche

Bei der Erfassung des Nahbereiches werden Multi-Mode-Radare und Kameras mit einem großen Öffnungswinkel verwendet.

Für die Erfassung des Fernbereichs werden Radar, Lidar und Kameras als komplementäre Sensor-Typen verwendet, welche sich in ihren Stärken und Schwächen ergänzen. In Tabelle 1 werden die Sensoren in den Kriterien der Reichweite, Auflösung bezüglich Entfernung und Winkel, den erfassten Daten sowie ihrer Beeinflussbarkeit durch Umweltbedingungen unterschieden.

Tabelle 1: Komplementäre Sensornutzung in Anlehnung an [VDI19a]

Eigenschaften		Radar	Lidar	Kamera
	Preis			
Entfernung	Reichweite			
	Auflösung			
Winkel	Field of View			
	Auflösung			
Messgrößen	Räumlich	2D oder 3D	3D	2D
	Zusätzlich	Geschwindigkeit RCS	Reflektivität	Farb-information
Umwelt- einflüsse	Belichtung			
	Regen, Schnee			

Radarsensoren erfassen Ziele bei guter Auflösung auch in großer Entfernung. Sie verfügen über ein großes FoV und eine ausgeprägte Winkelauflösung. Dabei sind sie unabhängig von der Belichtung und werden durch Regen und Schnee nur geringfügig beeinträchtigt. Je nach Architektur beschreiben Radarsensoren die Messdaten in 2D oder 3D-Polarkoordinaten. Zusätzlich ist aus den erfassten Daten ein direkter Rückschluss auf den Geschwindigkeitsvektor sowie den Radarquerschnitt (engl.: radar cross section, RCS) möglich (siehe 2.2.2), allerdings erfassen sie nur metallische Ziele. Lidarsensoren verfügen ebenfalls über eine gute Auflösung im Entfernungsbereich, bei geringerer Reichweite als Radarsensoren. Weiterhin sind sie unabhängig von der Belichtung der erfassten Szene, werden durch Regen und Schnee allerdings stärker beeinträchtigt. Lidarsensoren erfassen die Umwelt in 3D-Koordinaten und liefern zusätzlich Informationen über die Reflektivität der erfassten Ziele. Die im Automobilbereich genutzten Kamerasysteme werden vor allem aufgrund ihrer sehr hohen Winkelauflösung in Kombination mit den erfassten Farbinformationen genutzt. Die erfassten Daten liegen dabei zunächst in Pixeln vor, also als 2D Koordinaten. Dabei sind Kameras aufgrund ihrer bereits weiten Verbreitung die preiswertesten Sensoren. [RE114; TH123; VDI19a]

Im Folgenden werden die Grundlagen der drei für automatisierte Fahrzeuge wesentlichen Sensor-Typen Radar, Lidar und Kamera beschrieben. Dabei wird jeweils auf das zugrundeliegende Sensorprinzip, die verschiedenen Sensor-Arten sowie das Funktionsprinzip und den Aufbau der für die Anwendung im Fahrzeugbereich relevanten Sensoren eingegangen.

### 2.2.2 Radarsensorik

Radio detection and ranging (kurz: Radar) bezeichnet ein Verfahren zur räumlichen Ortung metallischer Gegenstände durch die Nutzung von elektromagnetischen Wellen. Bereits 1998 wurde der erste Radarsensor in einem Automobil verbaut. [REI14]

Radarsensoren lassen sich in passive und aktive Sensoren unterteilen. Passive Radarsensoren empfangen dabei lediglich elektromagnetische Wellen und werten diese aus, aktive Radarsensoren hingegen strahlen elektromagnetischer Wellen gebündelt mittels einer Antenne ab und empfangen deren Reflexion. [WIN15b]

Im Automobilbereich sind, um die Entfernung und Geschwindigkeit eines Objektes zu bestimmen, lediglich aktive Radarsensoren von Bedeutung. Je nach Sensor-Typ ist dabei die Erfassung von entweder einem oder zwei Raumwinkeln (Elevation und Azimut) möglich. [REI14; THI23]

In Deutschland sind für Anwendungen im Straßenverkehr die Frequenzbänder 24-24,25 GHz, 76-77 GHz und 77-81 GHz reserviert. Dabei werden 24 GHz Systeme vorrangig für die Nahbereichserfassung (0,2 bis 30 m) eingesetzt. Fernbereichsradare arbeiten bei einer Frequenz von 77 GHz und können eine Distanz bis zu 200 m abdecken, da ein frequenzbedingt erhöhter Antennengewinn vorliegt, wodurch mehr Sendeenergie weiter entfernte Objekte erreichen kann. Der Frequenzbereich von 77-81 GHz wird aktuell nicht genutzt. [CZI19; THI23; WIN15b]

#### Arten von Radarsensoren

Aktive Radarsensoren können anhand ihres Funktionsprinzips in verschiedene Arten unterteilt werden. Wie in Abbildung 2.12 dargestellt, lassen sich die aktiven Radarsensoren zunächst in gepulste und kontinuierlich erregte Sensoren unterscheiden. Diese werden als Puls- und als Dauerstrich-Radar bezeichnet. [WIN15b]

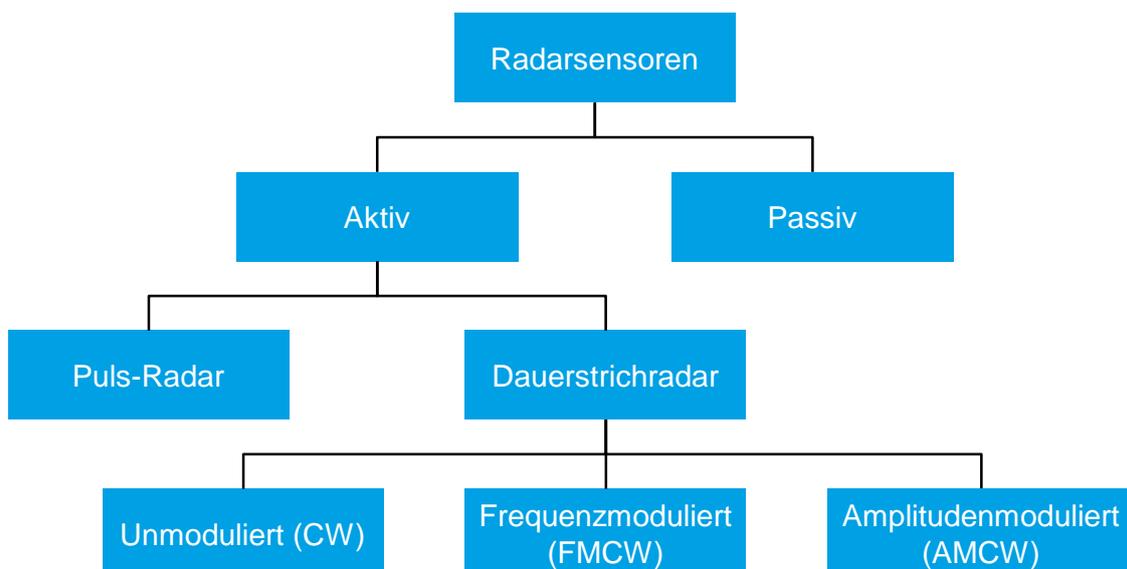


Abbildung 2.12: Radar-Arten

Das Puls-Radar regt die Antenne intervallartig an und empfängt die von einem Objekt reflektierte elektromagnetische Strahlung. Die Entfernung zum Objekt wird durch eine Laufzeitmessung (Time-of-Flight, ToF) bestimmt. Dabei wird die Zeit zwischen Aussenden und Empfangen der elektromagnetischen Welle gemessen, bei bekannter Wellengeschwindigkeit ergibt das Produkt aus Zeit und Geschwindigkeit die Entfernung. Da die Strecke zweimal durchlaufen wurde, muss die gemessene Zeit halbiert werden. [WEI24]

Weiterhin kann zur Entfernungsbestimmung der Dopplereffekt genutzt werden. Bei einer auftretenden Relativgeschwindigkeit zwischen Sender und Empfänger wird das empfangene Signal bei Annäherung gestaucht und die Empfangsfrequenz erhöht, bei Entfernung wird das Signal gestreckt und die Frequenz geringer. [KAR20]

Im Unterschied zum Puls-Radar sendet das Dauerstrichradar eine kontinuierliche Welle mit einer konstanten Amplitude. Dabei kann diese Art in continuous wave radar (CW-Radar) und frequency modulated continuous wave radar (FMCW-Radar) unterschieden werden. [WEI24] Das FMCW-Radar moduliert die Frequenz der ausgesendeten Welle über die Zeit. Somit kann im Gegensatz zum CW-Radar durch den damit vorhandenen Zeitbezug neben der Relativgeschwindigkeit auch die Entfernung bestimmt werden. [WIN15a] Neben dem FMCW existiert auch die Möglichkeit der Amplitudenmodulation (AMCW), diese Art wird in der Automobilindustrie aktuell nicht genutzt und daher nicht weiter betrachtet.

In automobilen Anwendungen werden Radarsensoren beispielsweise für die Realisierung von Kollisionsvermeidungssystemen oder dem Abstandsregeltempomat (engl.: adaptive cruise control, ACC) verwendet [REI14]. Hierzu werden sowohl Puls- als auch Dauerstrichradar integriert, wobei primär FMCW-Radar eingesetzt werden [REI14; THI23]. Dementsprechend wird im Folgenden der Aufbau, die Funktionsweise und die Signalauswertung des FMCW-Radars genauer dargestellt.

### Aufbau und Funktionsweise von FMCW-Radarsensoren

FMCW Radare werden meist als Gruppenstrahler realisiert. Durch die Anordnung mehrerer Sende- und Empfangsantennen wird damit inklusive der Geschwindigkeit eine mindestens dreidimensionale Auflösung ermöglicht. FMCW Radare können im 3D-Fall den Elevationswinkel, die Entfernung und die Objektgeschwindigkeit ermitteln. In 4D-Konfiguration kann zusätzlich der Azimut-Winkel einer eintreffenden Welle bestimmt werden. Zusätzlich ermöglicht diese Auslegung eine Steuerung der Abstrahlcharakteristik durch Veränderung der Sendeparameter. [KAR20; REI14]

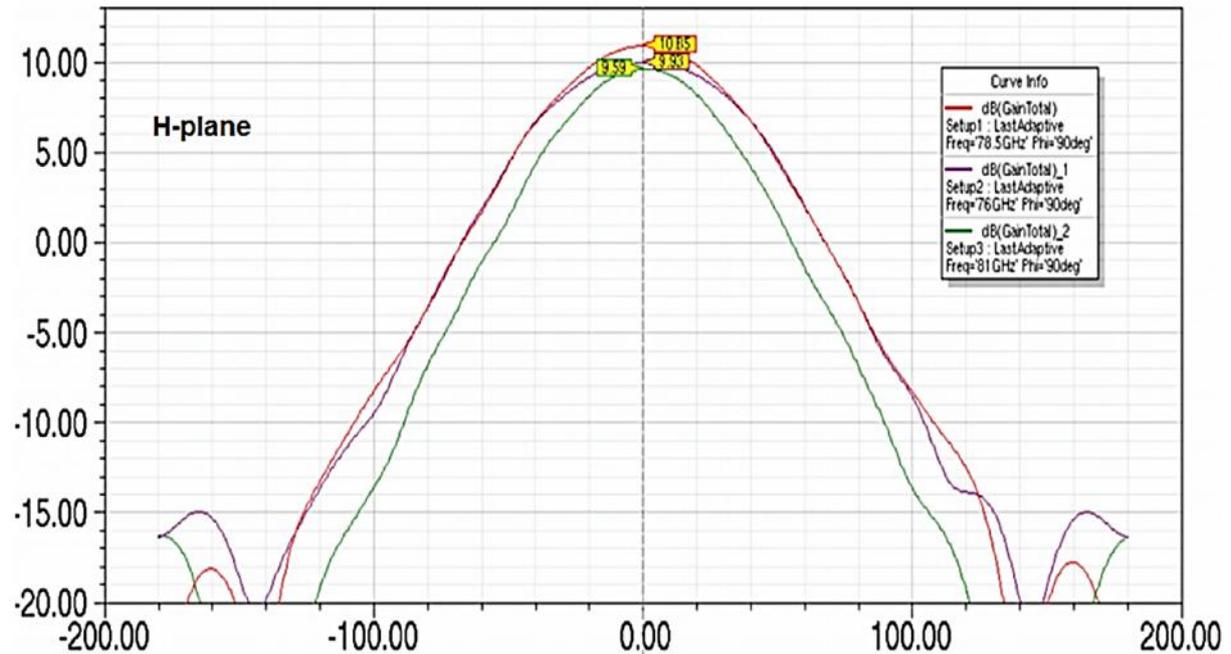


Abbildung 2.13: Antennendiagramm eines AWR1243 FMCW-Radars [TEX20]

Der Aufbau mittels mehrerer Sende- und Empfangsantennen bedingt eine nicht homogene Abstrahl- und Empfangscharakteristik. Diese ist am Beispiel eines Texas Instruments AWR1243 FMCW Radars mit drei Sende- und vier Empfangsantennen in Abbildung 2.13 in der horizontalen Ebene dargestellt. Auf der X-Achse ist dabei der Öffnungswinkel bezogen auf die Empfangsantennen und auf der Y-Achse der Antennengewinn in dBi dargestellt. Zu erkennen ist dabei die überdurchschnittlich starke Empfindlichkeit um  $0^\circ$  Öffnungswinkel verglichen mit den Randbereichen. Hieraus ergibt sich ein typischer Arbeitsbereich im Bereich von  $\pm 30^\circ$ . Der schematische Aufbau dieses FMCW Radars mit vier Empfangs- (Rx, blau) und drei Sendeantennen (Tx, rot) ist in Abbildung 2.14 dargestellt.

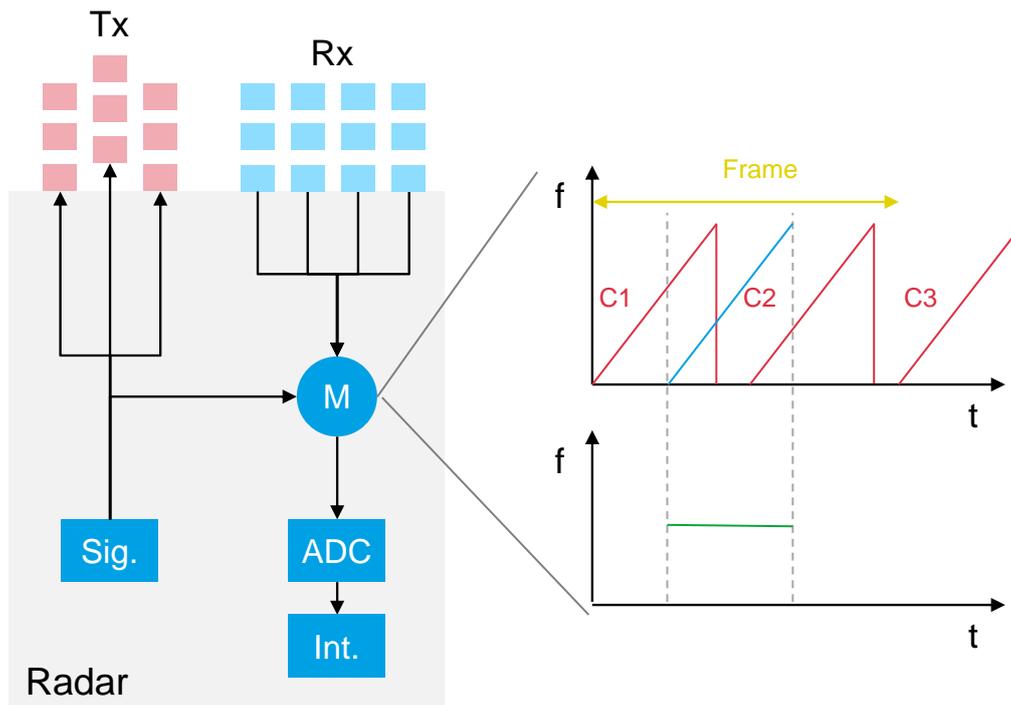


Abbildung 2.14: Aufbau eines FMCW-Radarsensors

In der Abbildung ist die Frequenzmodulation im roten Sendesignal zu erkennen. Die Frequenz steigt linear mit der Zeit, bis die maximale Frequenz der definierten Bandbreite erreicht ist. Anschließend beginnt der Zyklus erneut. Ein solcher Zyklus wird als Chirp bezeichnet, mehrere Chirps ergeben einen Frame (gelb). In diesem Beispiel enthält ein Frame zwei Chirps. Wie abgebildet, wird zur Auswertung das empfangene Signal (blau) mit dem vom Signalgenerator in die Sendeantenne gespeisten Signal (rot) gemischt. Hieraus kann anschließend die Frequenz- und Phasendifferenz der zwei Signale bestimmt werden (grün) und mittels Konvertierung in einem Analog-Digitalwandler (ADC) in ein digitales Signal über eine Schnittstelle für die weitere Datenverarbeitung verfügbar gemacht werden. [WEI24; WIN15b]

Das so bereitgestellte Signal, auch als Intermediate Frequency Signal (IF) bezeichnet, liegt komplexwertig vor und besteht aus Amplitude, Frequenz und Phase in Form einer  $A \times M \times N$  Matrix. Diese Struktur wird als Radar-Cube bezeichnet und gibt die Messwerte jedes Kanals (Antennenanzahl  $A$ ) über  $M$  Samples und  $N$  Chirps an. [TEX17]

Mittels Fouriertransformation kann diese Datenstruktur von einem zeitdiskreten in ein frequenzdiskretes Signal überführt werden. [OHM10]

### Datenverarbeitung in FMCW-Radarsensoren

Die Entfernung aller erfassten Objekte kann anschließend aus dem Radar-Cube anhand der aufgelösten Frequenzschritte bestimmt werden. Gleichung (9) zeigt, dass die Mischfrequenz aus einem entfernungsabhängigen und einem geschwindigkeitsabhängigen Anteil besteht.  $f_c$  bezeichnet dabei die Startfrequenz der Rampensteigung,  $v_r$  die Relativgeschwindigkeit,  $B_S$  die Sample-Bandbreite,  $t_S$  die Sample-Dauer und  $R$  den Abstand zum Ziel. [SCH18b]

$$f_{IF} = f_{Dopp} + f_R = \frac{2f_c * v_r}{c} + \frac{2B_S * R}{t_S * c} \quad (9)$$

Im Radar-Cube liegt für jede Differenzfrequenz ein Pegel vor, welcher die Reflexion der Welle an einem Ziel wiedergibt. Die Entfernungsauflösung eines Radarsensors hängt nach Gleichung (10) von der Sample-Bandbreite ab:

$$R_{Res} = \frac{c}{2 * B_S} \quad (10)$$

Analog kann der Winkel  $\theta$  der erfassten Objekte berechnet werden. Hierzu muss der Einfallswinkel aus dem Laufzeitunterschied der empfangenen Welle zwischen den verschiedenen Empfangsantennen bestimmt werden. Dazu werden der Abstand  $d$  der Antennen zueinander sowie die Phasenänderung  $\omega$  des Signals wie in Gleichung (11) beschrieben genutzt:

$$\omega = \frac{2 * \pi * d * \sin(\theta)}{\lambda} \quad (11)$$

Zur Berechnung der Geschwindigkeit werden die Daten jeder Antenne eines Zeitpunktes betrachtet und deren Phasenunterschiede genutzt. Aufgrund des nichtlinearen Anteils des Sinus wird die hohe Empfindlichkeit des Sensors bei  $0^\circ$  deutlich. Gleichung (12) beschreibt die Abhängigkeit der Winkelauflösung eines Sensors vom Antennenabstand  $d$  sowie von der Antennenanzahl  $n$  und der Wellenlänge  $\lambda$ :

$$\theta_{Res} = \frac{\lambda}{n * d * \cos(\theta)} \quad (12)$$

Die erfassten Rohdaten eines Radarsensors lassen sich, wie in Abbildung 2.15 abgebildet, darstellen. Zu erkennen ist die Auflösung der Entfernung und des Winkels in der X-Y-Ebene. Auffallend ist die Unterteilung der Daten in Winkel-Entfernungs-Zellen durch die Rasterung der Grafik. Zusätzlich kann die Signalstärke je Winkel-Entfernungszone auf der Z-Achse abgebildet werden. Nicht dargestellt ist hier die ebenfalls erfasste Geschwindigkeit aller Objekte.

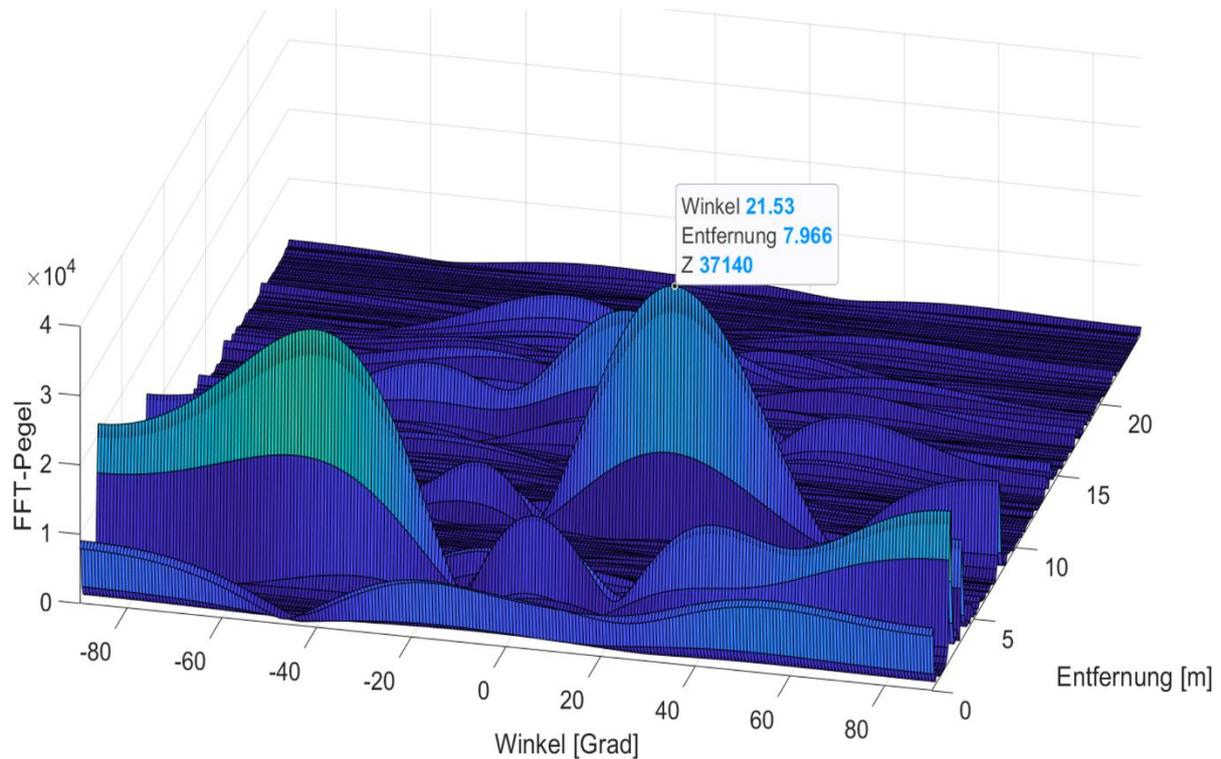


Abbildung 2.15: Winkel-Entfernungsplot einer Beispielmessung

Zusammenfassend sind Radarsensoren in der Lage, die Intensität der reflektierten Strahlung metallischer Objekte zu detektieren. Dabei können aus den erfassten Rohdaten neben der Signalstärke Informationen über die Entfernung sowie mindestens einen Raumwinkel und die Geschwindigkeit je Auflösungsschritt gewonnen werden. Diese werden in der Regel in Form einer mehrdimensionalen Matrix und in Polarkoordinaten bereitgestellt. Die Genauigkeit der Zielerfassung ist dabei bei kleinen Winkeln am präzisesten und nimmt zu den Randbereichen des FoV ab.

### 2.2.3 Lidarsensorik

Light Detection and Ranging (kurz: Lidar) ist ein optisches Messverfahren zur räumlichen Ortung auf Basis von gebündelten Lichtstrahlen. Die verwendeten Wellenlängen liegen in einem Bereich zwischen 10 nm und 1 µm und umfassen damit das ultraviolette bis zum infraroten Spektrum und somit auch den Bereich des sichtbaren Lichts. Automobile Systeme arbeiten meist im Bereich von 850-1.000 nm. [GOT15; TIL18]

Zunächst war die Lidar-Technologie hauptsächlich in Anwendungen der Geodäsie verbreitet, mit der Weiterentwicklung automatisierter Fahrzeuge werden Lidar-Systeme zunehmend zur Umgebungserfassung in diesen genutzt. [RAU14]

#### Arten von Lidarsensoren

Analog zu den Radarsensoren können Lidarsensoren in verschiedene Arten aufgeteilt werden. Neben den Eigenschaften der ausgesandten Lichtwelle spielt beim Lidar auch das Funktionsprinzip und damit der variierende Aufbau eine zentrale Rolle. Die Systematik zur Unterscheidung der verschiedenen Lidar-Arten ist in Abbildung 2.16 dargestellt. Zu beachten ist dabei die Unterteilung in die zwei Ebenen bezüglich Aufbau und Messprinzip.

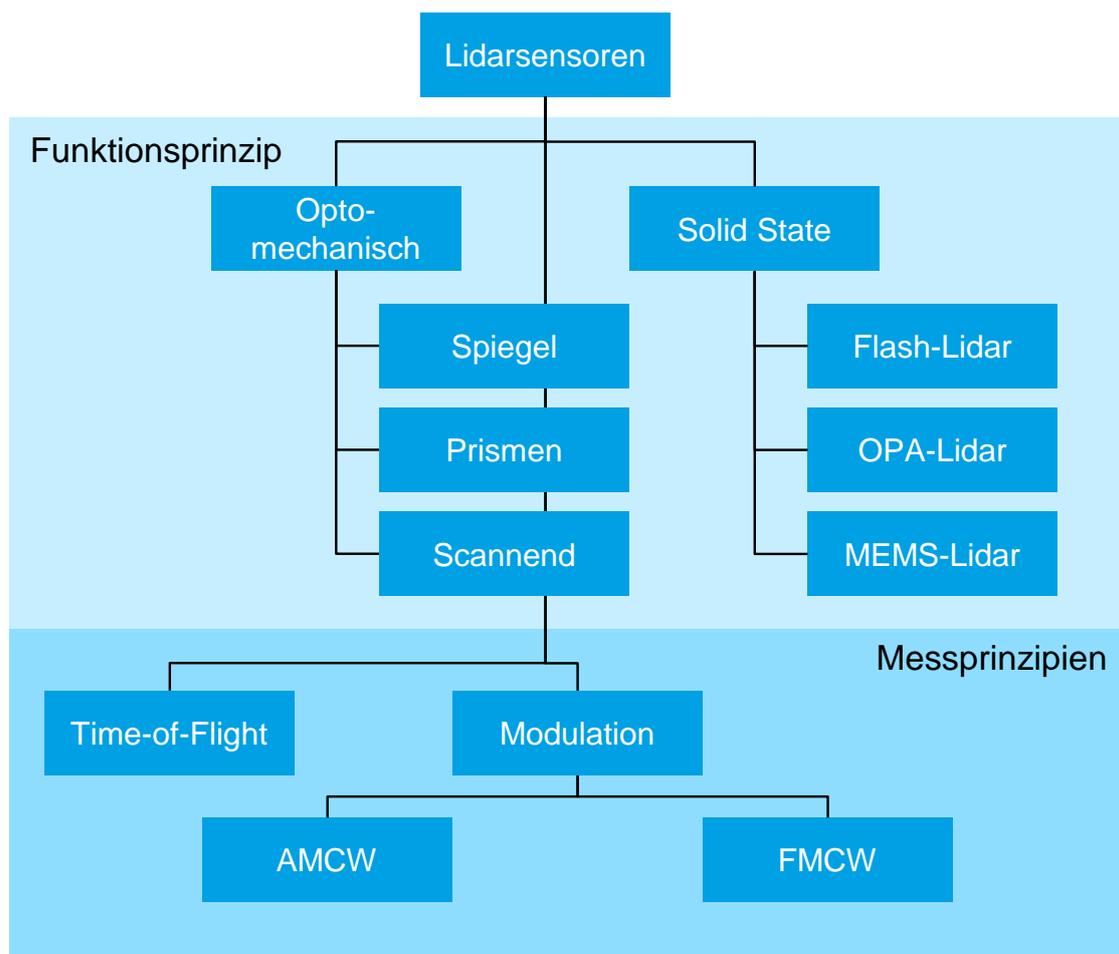


Abbildung 2.16: Lidar-Arten

Zunächst werden die unterschiedlichen Arten anhand ihres Funktionsprinzips unterschieden. Aufgrund des abtastenden Messprinzips müssen Lidarsensoren die zu erfassende Szene scannen. Hierzu ist eine Ablenkung des Lichtstrahls über das gesamte FoV notwendig. Zur Realisierung des Scannens existieren unterschiedliche Prinzipien. Es wird in optomechanischen und Solid State Sensoren unterschieden. [KHA23]

Optomechanische Lidarsensoren nutzen zur Ablenkung des Lichtstrahls optische und mechanische Bauteile, wie Spiegel oder die Direktbewegung der emittierenden Diode. Dabei existieren Lösungen in denen der emittierte Lichtstrahl über schwingende Spiegel oder Prismen in definierten Scanbereichen abgelenkt wird, bis hin zu rotierenden Sensorköpfen mit 360° Erfassungsbereich. Durch die Nutzung mehrerer Laserdioden kann zusätzlich eine Auffächerung erzeugt werden, sodass das FoV weiter vergrößert werden kann. [HAL10]

Die zweite Sensor-Art wird als Solid State Lidar bezeichnet. Hierbei wird auf bewegte Teile verzichtet. Meist ist das FoV damit kleiner als bei optomechanischen Sensoren. [ROR22] Solid State Sensoren können anhand von drei Bauformen unterschieden werden. Bei MEMS-Sensoren (engl.: Micro-Electro-Mechanical Systems, MEMS) werden mikromechanische Elemente zur Erzeugung eines Strahlengangs genutzt, welche durch eine definierte Vibration eine Ablenkung der Lichtwelle bewirken. [RAJ20] Optical-Phased Array Sensoren (OPA) hingegen nutzen optische Arrays, um durch die Nutzung von Phaseneffekten und Filtern einen Strahlengang zu erzeugen. [YAA15] Als dritte Art existiert der Flash-Lidar, welcher ein FoV durch ein Detektorarray erfasst und so die räumliche Auflösung über die angeordneten Einzeldetektoren erzeugt, sodass lediglich ein einzelner Lichtpuls erzeugt werden muss, um eine räumliche Abdeckung zu realisieren. [MCM17]

Unabhängig von der Bauform können in Lidarsensoren verschiedene Messverfahren umgesetzt werden. Diese können in Modulationsverfahren und Time-of-Flight (ToF) Verfahren unterschieden werden. [GOT15]

Ähnlich der Messverfahren bei Radarsensoren, können die von einem Lidarsensor emittierten Lichtstrahlen in ihrer Amplitude (Amplitudenmodulation, AMCW) oder Frequenz (Frequenzmodulation (FMCW) moduliert werden. Zur Bestimmung der Entfernung eines reflektierenden Objektes wird dabei, wie bereits in Abschnitt 2.2.2 erläutert, die Phasenverschiebung bestimmt. [ROR22]

Wird die ausgesandte Lichtwelle nicht moduliert, werden gepulste Signale verwendet. Hierbei wird zur Bestimmung der Laufzeit die Zeit zwischen dem Aussenden und dem Empfangen des reflektierten Lichtpulses gemessen. [BUX15]

In der Fahrzeugtechnik werden vorwiegend Single- oder Multi-Beam Sensoren genutzt. Aufgrund des wirtschaftlichen Vorteils werden aktuell vor allem MEMS-Sensoren integriert, sodass diese im Weiteren fokussiert werden. [PET23] Dabei wird zur Positionsbestimmung der erfassten Objekte die Methode der Laufzeitmessung verwendet. [GOT15] Eine Nutzung von Amplituden- oder Frequenzmodulation sowie des Dopplereffekts erfordert kostenintensive Bauteile, sodass diese Technologie aktuell noch nicht im Massenmarkt genutzt werden kann. Dabei können Lidarsensoren sowohl im Fahrzeuginnenraum, beispielsweise hinter der Frontscheibe, als auch im Außenbereich, beispielsweise im Kühlergrill, verortet sein.

Lidarsensoren werden analog zum Radar zur Realisierung von Funktionen der Abstandseinhaltung genutzt. Beispielsweise werden die so erfassten Daten im ACC verwendet. Dabei sind zusätzlich Funktionen, wie eine Sichtweitenmessung, Verschmutzungserkennung des Sensors und Geschwindigkeitsermittlung, durch die Beurteilung der Datenqualität möglich [GOT15; REI14].

### Aufbau und Funktionsweise von MEMS-Lidarsensoren

Abbildung 2.17 beschreibt den Aufbau eines MEMS-Lidarsensors sowie die Funktionsweise des ToF. Zu erkennen ist die Aufteilung des Sensors in Elektronik, Emittent, Detektor, die MEMS-Einheit sowie das Objektiv. Dargestellt ist ein Sensor mit einem Emittent. Dieser erzeugt einen kontinuierlichen Lichtstrahl einer definierten Wellenlänge, beziehungsweise eines definierten Spektrums. Der so erzeugte Strahl wird durch einen Strahlteiler zur Trennung von eingehender und ausgehender Welle in die MEMS-Einheit geleitet. Im dargestellten Beispiel besteht diese aus zwei Mikrospeiegeln. Diese sind versetzt angeordnet und oszillieren mit einer festen Frequenz und einem definierten Phasenversatz. Hierdurch wird ein räumliches Scanmuster erzeugt, durch welches das FoV vergrößert wird. Die Scanlinien eines solchen Musters sind in Abbildung 2.18 dargestellt. [BLI24; KER18; LIU20]

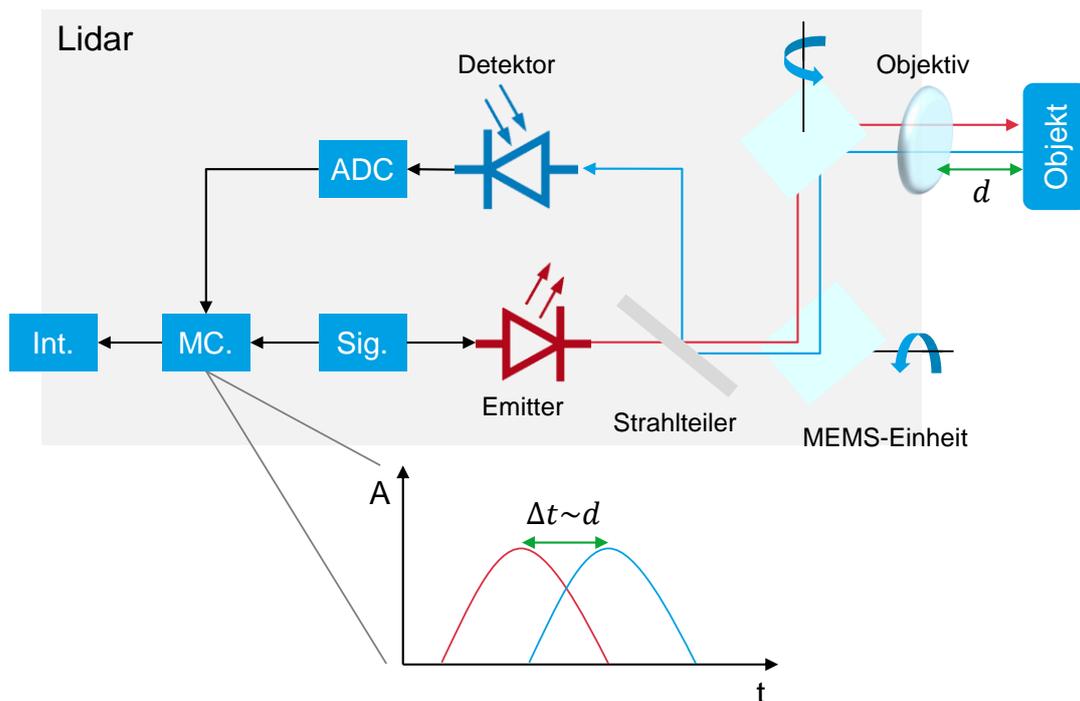


Abbildung 2.17: Aufbau eines MEMS-Lidarsensors

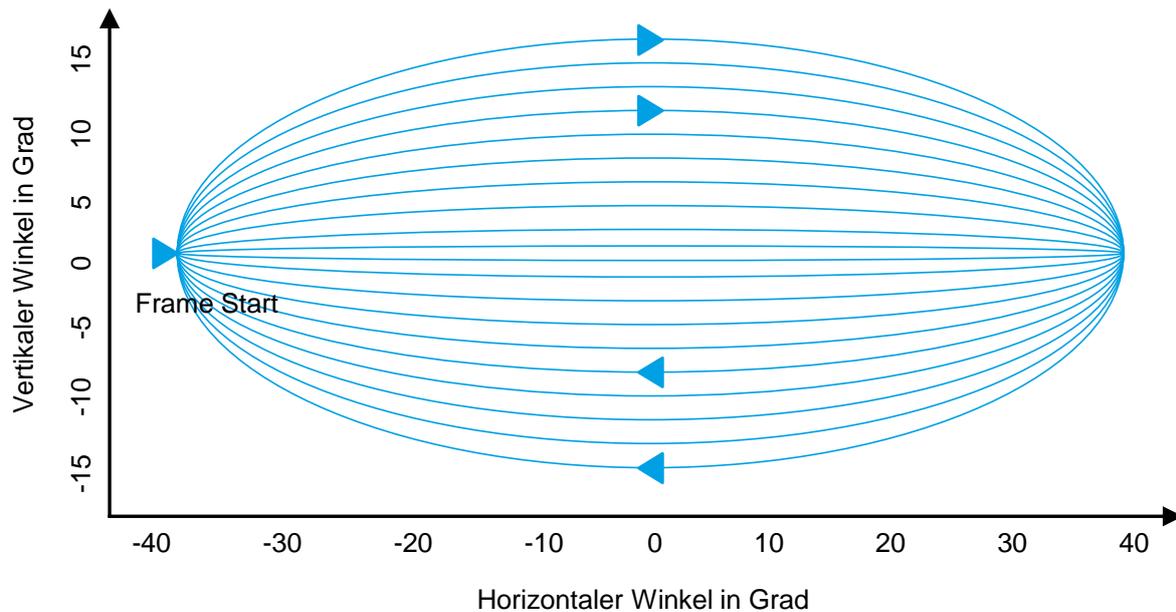


Abbildung 2.18: Scanmuster eines MEMS-Lidar nach [BLI24]

Der so bewegte Lichtstrahl tritt durch ein Objektiv aus dem Sensor aus und wird von Objekten der Umwelt reflektiert. Die reflektierten Lichtstrahlen treffen durch das Objektiv über die MEMS-Einheit auf den Strahlteiler, welcher diese in die Laser-Detektionseinheit leitet. Hier wird die Energie des auftreffenden Lichtstrahls in ein diskretes Signal umgewandelt. Die Pulsantwort, beziehungsweise das empfangene Signal entspricht dabei einer Gauß-Verteilung, da die emittierte Lichtwelle nicht gebündelt zurückgeworfen, sondern an Oberflächen teilweise gebrochen wird. [GOT15; KER18]

Die Leistungsfähigkeit und Genauigkeit eines Lidarsensors werden von Parametern beeinflusst, welche vom Aufbau und dem Betriebsmodus abhängen. So ist die maximale Reichweite eines Lidarsensors direkt von der Lichtstärke einer detektierten Lichtwelle abhängig. Diese hängt von der Sendeleistung sowie dem Reflexionsvermögen des angestrahlten Objektes ab. Die Entfernungsauflösung wird maßgeblich von der Geschwindigkeit und dem Rauschen der Auswerteelektronik beeinflusst. Je schneller und genauer der ADC arbeitet und je genauer die Zählakte der Emissions- und Stelleinheiten erfasst werden können, desto präziser ist das Ergebnis der Laufzeitmessung. Die Winkelauflösung ist ebenfalls von der Genauigkeit und Geschwindigkeit der Auswerteelektronik abhängig sowie von der Frequenz der Spiegel, welche den Strahl in der MEMS-Einheit ablenken. Je geringer diese Frequenz oder je schneller die Auswerteelektronik, desto geringer die Winkelschritte, in denen das Signal ausgewertet werden kann. [GOT15; KER18]

### Datenverarbeitung in MEMS-Lidarsensoren

Bei der Abtastung der Umgebung entsteht ein Tiefenbild. Hierbei wird die Intensität der Reflexion der erfassten Punkte zunächst in Polarkoordinaten erfasst. So ergibt sich eine Punktwolke, welche jedem Schritt in Elevations- und Azimut-Winkel einen Radius und eine Intensität zuordnet. Beim Prinzip der Laufzeitmessung ergibt sich die Distanz  $d$  aus der verstrichenen Zeit zwischen Aussenden und Empfangen der Lichtwelle nach Gleichung (13). Die Laufzeit  $T_{oF}$  des Signals wird nach Gleichung (14) ermittelt. Dabei bezeichnen  $T_{CL}$  die Taktperiode, beziehungsweise die Frequenz der Spiegel und  $N_Z$  die Zählakte des Zeitgebers. [KER18]

$$d = \frac{c_0 * T_{oF}}{2} \quad (13)$$

$$T_{oF} = N_Z * T_{CL} \quad (14)$$

Wie in Abbildung 2.17 dargestellt, wird das empfangene Lichtsignal als Gauß-Kurve erfasst. Zur Auswertung des exakten Empfangszeitpunktes muss aus dieser der Zeitpunkt des maximalen Pegels bestimmt werden. Hierzu wird das rohe Eingangssignal zunächst geglättet, um das Rauschen des ADC zu minimieren. Danach wird das Signal nach Perioden aufgeteilt, um die korrespondierenden Echopegel zu erhalten. Abschließend wird das Maximum der so erhaltenen Gauß-Kurve bestimmt, um daraus die Zeitdifferenz zu erhalten. [LIU20]

Ein Sonderfall stellt die Erfassung bei sogenannter Mehrzielfähigkeit dar. Hierbei können mehrere Pulse erfasst und ausgewertet werden, wodurch auch bei auftretendem Regen oder Nebel die von einem schwächeren Echo überlagerte Reflexion erfasst werden kann. [GOT15]

Zur intuitiveren Verarbeitung werden die Punktwolken nach Gleichung (15) in kartesische Koordinaten überführt:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r * \sin \theta * \cos \varphi \\ r * \sin \theta * \sin \varphi \\ r * \cos \theta \end{pmatrix} \quad (15)$$

Abbildung 2.19 zeigt die Punktwolke eines MEMS-Lidars mit einer Winkelauflösung von  $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ . Die unterschiedliche Intensität der Datenpunkte ist durch die Farbgebung zu erkennen, ebenso das breite FoV von horizontal  $75^\circ$  und vertikal  $30^\circ$ .

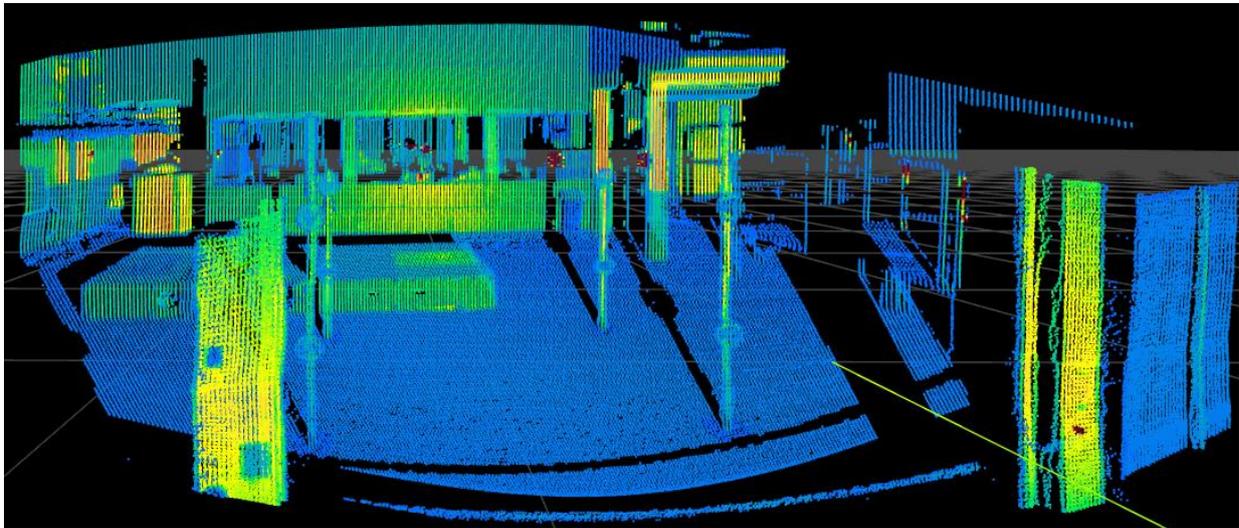


Abbildung 2.19: Punktwolke eines MEMS-Lidars

Lidarsensoren stellen eine komplementäre Technologie zu den bereits erläuterten Radarsensoren dar. Sie sind in der Lage alle nicht transparenten Objekte unabhängig ihrer Materialeigenschaften zu detektieren. Aufgrund der Verwendung von Lichtstrahlen sind Lidarsensoren ebenfalls den aktiven Sensoren zuzuordnen, werden im Vergleich zu Radarsensoren allerdings stärker durch Umwelteffekte, wie Staub, Regen oder Nebel, beeinflusst. Neben der Position eines erfassten Objektes erfassen Lidarsensoren zudem Informationen über die Reflektivität eines Objektes. Die erfassten Daten werden, wie dargestellt, in Form einer Punktwolke in kartesischen Koordinaten bereitgestellt. Lidarsensoren weisen dabei analog zu den Radarsensoren bedingt durch das Scanmuster die höchste Genauigkeit in der Mitte ihres FoV auf. Die Genauigkeit der Entfernungsauflösung ist dabei in den Randbereichen des FoV, beziehungsweise in der Mitte des Arbeitsbereiches am höchsten, da diese durch die signalverarbeitende Elektronik reglementiert wird. Die Auslegung des Scanmusters hat durch die räumlich verteilten Scanlinien einen Einfluss auf die Genauigkeit der Erfassung von Objekten.

#### 2.2.4 Kamerasysteme

Im Gegensatz zu Radar und Lidar erfassen Kameras die optischen Daten des Umfeldes passiv. Dabei arbeiten diese in verschiedenen Bereichen des optischen und infraroten Spektrums von 400 bis 1100 nm. In den Systemen werden dabei typischerweise die Schritte der Bilderfassung und -aufbereitung ausgeführt. [RE14] Die Bildverarbeitung erfolgt nachgelagert in einem dafür vorgesehenen Steuergerät, sodass in diesem Abschnitt zunächst der Schritt der Bilderfassung fokussiert wird.

### Kameras im Bereich des automatisierten Fahrens

Im Fahrzeugbereich werden Kameras für verschiedene Anwendungen genutzt. Als eine der ersten Funktionen wurde die Nutzung als Rückfahrkamera implementiert. Dementsprechend wurden die Anwendungsbereiche auf die Erfassung des Umfeldes, zur Überwachung des Fahrers und zur Erkennung von Handgesten als Mensch-Maschine Schnittstelle (engl.: Human-Machine-Interface, HMI) erweitert. Im für diese Arbeit relevanten Bereich der Umfelderkennung finden sich hauptsächlich Front-Kameras, sogenannten Surround-View-Kameras und Kameras als Spiegelersatz. [PUN15] Je nach Anwendungsgebiet werden dazu verschiedene Bauformen genutzt. So werden durch unterschiedliche Kombinationen aus Sensoren zur Bilderfassung und Objektiven die wesentlichen Eigenschaften der Systeme ausgelegt. Diese beschreiben das FoV, die Auflösung, den Dynamikumfang und die Farbempfindlichkeit. [PUN15]

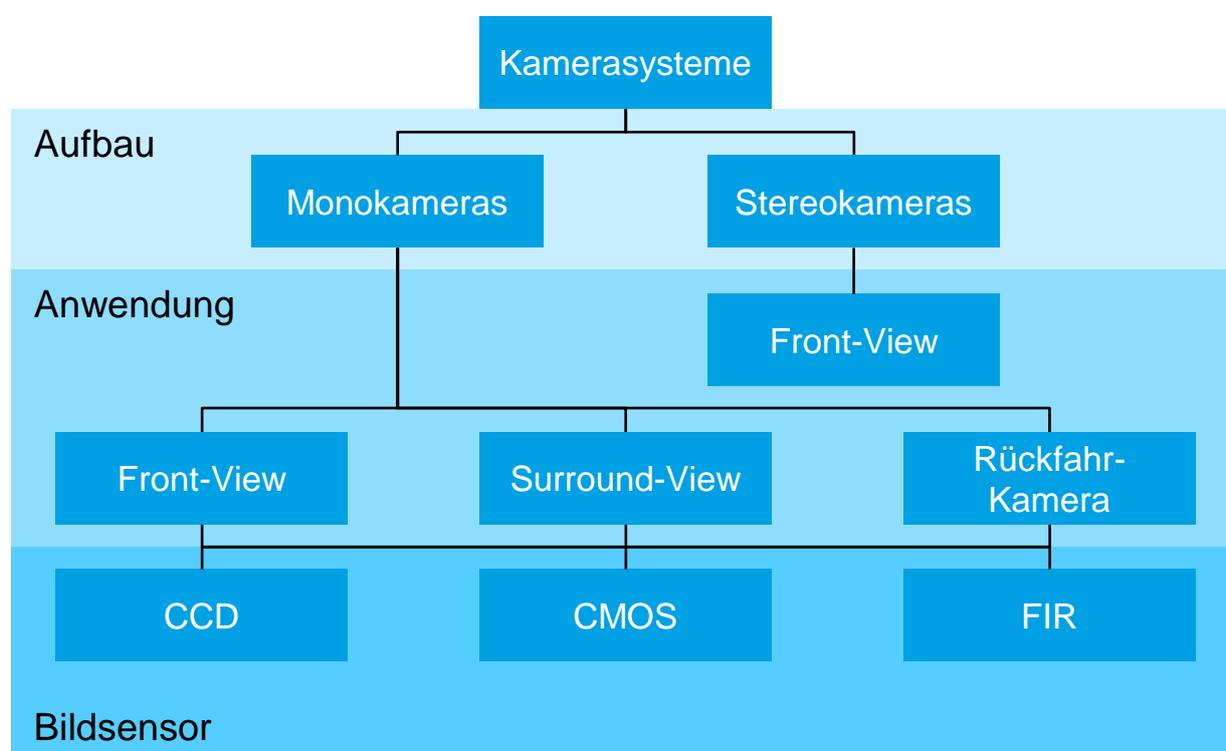


Abbildung 2.20: Kamera-Arten

Die verschiedenen Arten von Kameras mit Bezug zum automatisierten Fahren sind in Abbildung 2.20 aufgeführt. Dabei kann zunächst nach Aufbau unterschieden werden. Einzelne Kameras werden als Monokameras bezeichnet. Durch Kombination von zwei Monokameras kann durch eine Kalibrierung ein, als Stereokamera bezeichnetes, System erzeugt werden. Dabei müssen beide Kameras den gleichen Aufbau von Objektiv und Bilderfassungschip aufweisen. [PUN15]

Neben den bereits erläuterten Anwendungsarten können Kameras nach der Art des zur Bilderfassung genutzten Sensors unterschieden werden. Dabei existieren CCD (engl.: Charge-Coupled Device), CMOS (engl.: Complementary Metal Oxide Semiconductor) und FIR oder FLIR (engl.: Forward Looking Infrared) Chips. Während CCD und CMOS den fotoelektrischen Effekt nutzen, um sichtbares Licht zu detektieren, nutzen FLIR-Chips das infrarote Spektrum. [REI14]

CCD und CMOS-Chips unterscheiden sich durch die Art der Anordnung der Fotodioden auf dem Sensor. So ist bei CCD-Kameras das Auslesen des Bildes nur als Ganzes möglich, wohingegen bei CMOS-Chips die einzelnen Bildpunkte (engl.: Pixel) ausgelesen werden können. Dies bietet Vorteile im Bereich der Bildwiederholrate und eine reduzierte Überblendung. [RE14]

Da für die meisten Anwendungsfälle in automatisierten Fahrzeugen Monokameras verwendet werden und auch Stereokamerasysteme aus zwei Monokameras bestehen, werden diese im Folgenden vertieft betrachtet. Hierbei werden CMOS Kameras mit Farberfassung fokussiert, da diese am häufigsten für die Umfelderkennung genutzt werden [PUN15; RE14].

### Aufbau und Funktionsweise von Kameras

Zur Beschreibung der Bilderfassung wird meist das Lochkameramodell verwendet [ROB24; SÜß14]. Die Bildentstehung nach diesem ist in Abbildung 2.21 dargestellt.

Wie dargestellt, erfasst eine Kamera Objekte, deren Lage im Welt-KOS beschrieben werden können, indem das von den Objekten reflektierte Licht durch ein Objektiv auf den Sensor zur Bilderfassung abgebildet wird. Hierbei findet eine Transformation der 3D-Weltkoordinaten in das 2D-Bild-KOS der Kamera statt. Das Lochkameramodell wird aufgrund dieser affinen Transformation auch als affines Kameramodell bezeichnet. [SÜß14]

Die so im Pixelraum erfassten Objekte werden bildweise durch die Auswerteelektronik der Kamera ausgelesen. Dabei erfolgt bei CMOS-Kameras ein pixelweises Auslesen der einzelnen Bildpunkte und eine anschließende Rekonstruktion zum Gesamtbild. Durch eine nachfolgende Bildaufbereitung werden Rauscheffekte, Farbraumkonvertierungen und ein Ausgleich der möglichen Linsenverzerrung durchgeführt. [ROB24; THI23] Anschließend werden die erfassten Bilder mittels einer standardisierten Schnittstelle übertragen.

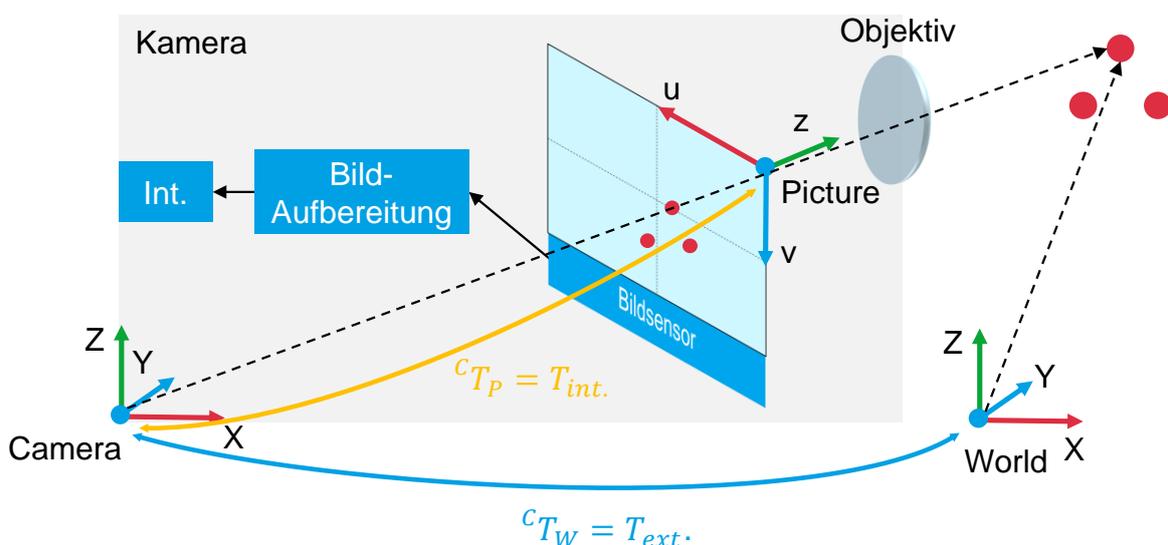


Abbildung 2.21: Aufbau und Abbildungsentstehung in einer Kamera

### Datenverarbeitung in CMOS-Kameras

Die Abbildung der Weltkoordinaten in Bildkoordinaten auf Basis des Lochkameramodells wird durch Formel (16) beschrieben. Wie erläutert, werden dabei zunächst die Koordinaten des Objektes im Welt-KOS durch die extrinsische Transformation  ${}^cT_W$  im Kamera-KOS abgebildet. Anschließend werden diese durch die Transformation  ${}^cT_p$  mit den intrinsischen Parametern in das Bild-KOS transformiert. Hierdurch findet eine Projektion statt, sodass die Pixelkoordinaten durch die Entfernung der Objektpunkte zur Kamera skaliert werden. [ROB24; SÜß14]

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_C \\ Y_C \\ Z_C \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{21} & r_{31} & t_x \\ r_{12} & r_{22} & r_{32} & t_y \\ r_{13} & r_{23} & r_{33} & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_W \\ Y_W \\ Z_W \\ 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

Die extrinsischen Parameter beschreiben die Lage der Kamera im Bezug zum Welt-KOS auf Basis einer Rotation und Translation. Die intrinsischen Parameter werden durch die Matrix  $K$  beschrieben. Diese umfasst die Pixelkoordinaten  $c_x, c_y$  des Bildhauptpunktes, welcher im Bereich der Mitte des Bildsensors liegt. Weiterhin beschreiben die Skalierungsfaktoren  $f_x, f_y$ , die Bildverzerrung aufgrund von Pixeleffekten. Mittels einer nichtlinearen Funktion kann zusätzlich die Verzeichnung des Bildes durch Effekte des Objektivs beschrieben werden. Diese ist abhängig vom Abstand eines Bildpunktes zum optischen Zentrum der Kamera. [SÜß14] Somit ist dieser Effekt zu den Bildrändern hin am stärksten. Zusammengefasst zählen die Parameter des Modells sechs extrinsische sowie fünf intrinsische Parameter.

Um die Lage von Objekten im Bezug zur Kamera korrekt zu beschreiben, müssen die intrinsischen und extrinsischen Parameter bekannt sein. Diese können mittels Kamerakalibrierung bestimmt werden. Hierzu existieren verschiedene Verfahren, welche mittels unterschiedlicher Ansätze auf Basis von mindestens sechs Referenzpunkten in einem oder mehreren Bildern die Parameter anhand Gleichung (16) bestimmen. [ROB24; SÜß14]

Kameras stellen passive Sensoren dar, wodurch sie stärker von Umwelteinflüssen, wie der Belichtung, Nebel, Regen und Schnee, beeinflusst werden. Im Gegensatz zu Radar und Lidar sind sie in der Lage, sichtbares Licht und damit die Farbinformationen der aufgenommenen Szene zu erfassen. Analog zum Lidar können daher nur sichtbare und nicht verdeckte Objekte detektiert werden. Durch die Eigenschaften des Systemaufbaus aus Bilderfassungssensor und Objektiv ist die Winkelauflösung dabei höher als bei Lidar oder Radar, allerdings stellen Monokameras durch die stattfindende Projektion keine Tiefeninformation der aufgenommenen Szene zur Verfügung. Kameras stellen die Daten in diskreten Pixelwerten bestehend aus X- und Y-Koordinate und Helligkeits- beziehungsweise Farbwert des jeweiligen Pixels dar. Die Genauigkeit der Erfassung nimmt wie bei Radar und Lidar zu den Rändern des FoV aufgrund der Effekte der Verzeichnung ab.

## 2.3 Fazit

Automatisierte Fahrzeuge stellen komplexe mechatronische Systeme dar. Der erste und damit ein grundlegender Schritt zur Erfüllung der automatisierten Fahrfunktion ist die Erfassung der Umwelt. Dieser Schritt stellt die Eingangsdaten für den Verarbeitungszyklus automatisierter Fahrzeuge bereit und die Grundlage für alle weiteren Fahrzeugfunktionen dar. Nur mit fehlerfrei erfassten Eingangsdaten können die folgenden Schritte der Objekterkennung, Trajektorienplanung und das Ausführen der eigentlichen Fahraufgabe sicher und zuverlässig erfolgen.

Zur Minimierung der durch den modularen Aufbau moderner Fahrzeuge bedingten, unvermeidlichen Abweichungen an den Bauteilen, Komponenten und Modulen, welche einen Einfluss auf die Güte der Erfassung haben, erfolgt im Rahmen der Fahrzeuginbetriebnahme eine Inbetriebnahme und Kalibrierung der umfelderfassenden Systeme. Durch diesen Schritt sollen funktions- und sicherheitsrelevante Toleranzen der Sensorik eingehalten und hierdurch die Abweichungen der Systeme reduziert werden. Trotz übergreifender Ansätze des Prozess- und Toleranzmanagements, können jedoch nicht alle Einflüsse und Abweichungen vermieden werden. [GRE18; MUE22; MUE20]

Mit der Zunahme automatisierter Fahrfunktionen und der damit wachsenden Anzahl an Sensorsystemen wird dieser Umfang an Relevanz gewinnen und daher die Anzahl der hierfür notwendigen Prozesse steigen. Aufgrund der hohen Taktzeiten dieser Prozesse bedingt dies eine steigende Parallelisierung im EoL und einen damit einhergehenden Kostendruck.

Wie gezeigt, stellt die Fahrzeuginbetriebnahme nicht den letzten Prozess der Fahrzeug-Endmontage dar. Es folgen weitere Schritte zur Finalisierung und Nacharbeit, sodass nachträgliche Veränderungen, welche sich auf die Funktionsfähigkeit der Fahrzeugsensorik auswirken können, nicht ausgeschlossen, nicht festgestellt und damit nicht kompensiert werden können. Die in der Produktion genutzten Prüfstände und Routinen zur Kalibrierung sind aufgrund ihrer monolithischen Architektur und der spezifischen Auslegung auf die zu kalibrierenden Sensoren abhängig von Fahrzeug- und Prüfstandhersteller und folglich wenig wandlungsfähig und flexibel.

Vor dem Hintergrund der Zunahme sicherheitskritischer Funktionen mit steigendem Automatisierungslevel bedeutet dies, dass ein finaler Prozess zur Feststellung der Funktionsfähigkeit und daher unter anderem der validen extrinsischen Kalibrierung der verbauten Sensorsysteme als letzter Schritt der Montage notwendig wird. Dieser muss sich in die Struktur des EoL integrieren lassen, um weiteren Zeit- und Flächenbedarf zu vermeiden und transparente und nachvollziehbare Prozessergebnisse bereitstellen.



### 3 Stand der Technik und Forschung

Auf Basis der bis hier hin beschriebenen Grundlagen und der damit einhergehenden Motivation, wird in diesem Kapitel der aktuelle Stand der Technik und Forschung bezüglich der Inbetriebnahme und Funktionsabsicherung automatisierter Fahrzeuge behandelt.

Zunächst werden dazu in Abschnitt 3.1 aktuelle Ansätze zur Inbetriebnahme und Funktionsabsicherung automatisierter Fahrzeuge dargestellt. Darauf folgend wird in Abschnitt 3.2 der Stand der Forschung bezüglich der extrinsischen Kalibrierung umfelderfassender Sensoren autonomer Systeme abgebildet.

Abschnitt 3.3 fasst die Inhalte des Kapitels zusammen und bewertet die vorgestellten Ansätze vor dem Hintergrund der zu bearbeitenden Aufgabenstellung. Aus dieser Bewertung wird anschließend ein Handlungs- und Entwicklungsbedarf abgeleitet, welcher die Grundlage der folgenden Kapitel darstellt.

#### 3.1 Funktionsabsicherung und Inbetriebnahme automatisierter Fahrzeuge

Maßnahmen zur Absicherung der Funktionen automatisierter Fahrzeuge finden entlang des gesamten Produktentstehungsprozesses (PEP) statt. Dieser ist nach [BLO23; BRU10; MUE23; RUD15] in Abbildung 3.1 dargestellt:

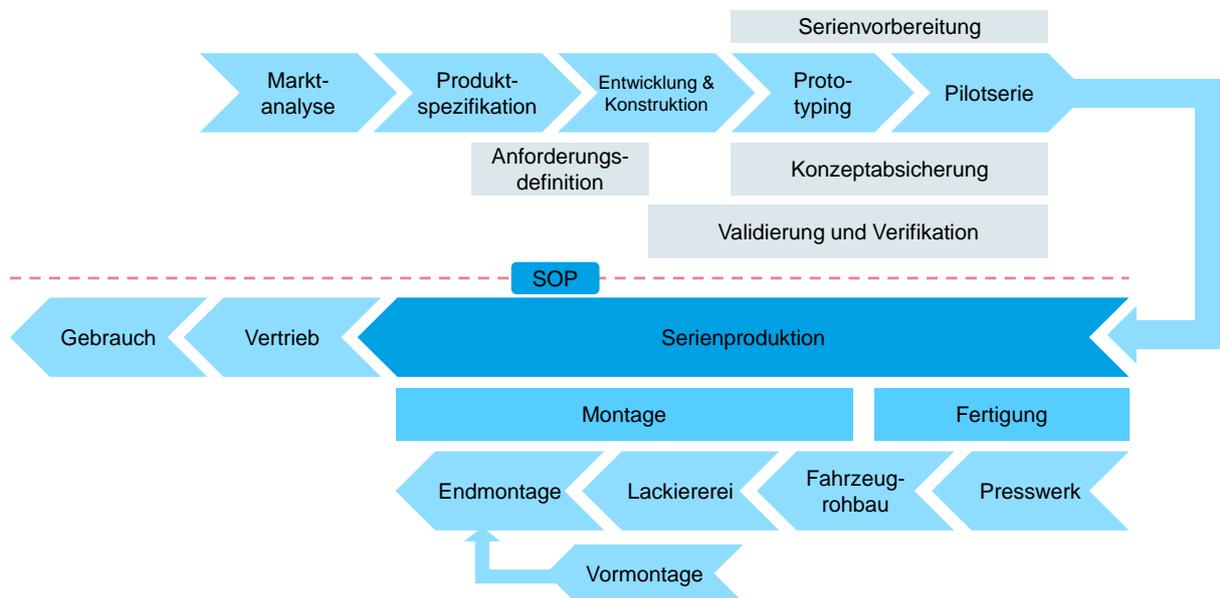


Abbildung 3.1: Der Produktentstehungsprozess

Bereits mit der Produktspezifikation werden zur Sicherstellung der Funktionsfähigkeit des zukünftigen Produktes Anforderungen definiert, welche anschließend in der Entwicklung und Konstruktion des zukünftigen Produktes erfüllt werden müssen. Hierzu werden bereits sehr früh geeignete Entwicklungsmethoden und Standards, wie beispielsweise ISO 26262, IEC 61508, oder ISO 21448 genutzt. Dabei werden diese Vorgehen, der modularen Bauweise der Fahrzeuge folgend, auf allen Ebenen, beginnen mit der Systemebene bis zur Einzelteilebene

und für alle Systemfunktionen verfolgt. [IEC10; IEE22; ISO18a; ISO18b; ISO22]

Im darauffolgenden Schritt des Prototyping werden zur Funktionsabsicherung Werkzeuge auf Basis von Simulationen, wie beispielsweise Software-in-the-Loop (SiL) und Hardware-in-the-Loop (HiL) genutzt [ECK17]. Hiermit werden Datensätze generiert, welche anschließend in virtuellen Modellen zur Verifikation der Fahrzeugfunktionen genutzt werden. Dies wird auf Ebene der Software, Steuergeräte und auch Sensorik durchgeführt. Hierdurch kann eine große Anzahl an Testfällen in kurzer Zeit geprüft werden, jedoch ist eine vollständige Abdeckung aller möglichen Testfälle aufgrund der Vielzahl dieser nicht möglich. [MAU15; TIL20]

Nach Abschluss des Prototypenbaus folgt zur Serienvorbereitung eine Pilotserie. In dieser werden erstmals Feldversuche zur Prüfung des Systemverhaltens und der Funktion unter Realbedingungen durchgeführt. Diese decken nur einen kleinen Teil aller möglichen Szenarien ab. Somit werden teilweise sehr lange Dauerversuche mit bis zu 36 Millionen Testkilometern durchgeführt. [MAT15]

Nach der Entwicklung, der Konstruktion und dem Prototyping aller Komponenten (Sensorik, Steuergeräte und Aktorik) folgt die Serienproduktion und Vormontage dieser. Hierbei werden im Rahmen des Qualitätsmanagements Prüfungen der Komponenten vor Auslieferung an den OEM durchgeführt. Hierzu zählen unter anderem Prüfungen der elektrischen Anschlüsse und der Funktionsfähigkeit beispielsweise von Sensoren, Steuergeräten und Aktoren. [GRE18; IAT16] Sensoren werden in diesem Schritt durch den Hersteller bereits intrinsisch kalibriert und Steuergeräte vorgeflasht [SCH23]. Da die grundlegende Funktionsfähigkeit bereits in der Produktentwicklung durchgeführt wurde, wird diese nicht mehr anhand spezifischer Testfälle überprüft.

In der Fahrzeugendmontage werden anschließend Sensoren, Steuergeräte und Aktoren verbaut. Hierbei erfolgen im Rahmen der einzelnen Montageschritte Maßnahmen zur Fehlervermeidung und Qualitätssicherung. So werden beispielsweise Steckverbindungen vertauschungssicher ausgelegt und mittels haptischer Lösungen deren korrekter Sitz geprüft. Sensoren werden durch konstruktive Maßnahmen abgesichert verbaut, sodass ein lage- und positionsrichtiger Einbau unumgänglich ist. Im Rahmen der Endmontage werden die elektronischen Komponenten, wie Sensoren und Steuergeräte, geflasht und codiert, sodass diese nach diesem Schritt in einem prinzipiell funktionsfähigen Zustand sind. [GRE18] Hierdurch lässt sich die Funktionsfähigkeit der Sensoren, der Datenkommunikation und der Steuergeräte absichern.

Nach der Montage der Einzelkomponenten folgt die Fahrzeuginbetriebnahme. Hierzu werden, wie in Kapitel 2.1 dargestellt, stationäre Prüfstände verwendet. Auf diesen werden Sensoren und Aktorik, die zur Erfüllung der automatisierten Fahraufgaben verwendet werden, im Verbund getestet und in Betrieb genommen. Dieser Schritt umfasst die extrinsische Kalibrierung der umfelderfassenden Sensoren. Die Fahrzeuginbetriebnahme stellt damit die letzte Maßnahme zur Prüfung der Funktionsfähigkeit in der Produktion dar.

Die genannten Umfänge lassen sich in Anlehnung an [ROB19], wie in Abbildung 3.2 dargestellt, in drei Kategorien unterteilen. Die Kategorie Safety by Design umschreibt alle Maßnahmen zur Sicherstellung der Funktion im Bereich der Entwicklung. Diese Schritte adressieren die Fahrzeugfunktionen, einzelne Komponenten und Systeme sowie Maßnahmen auf Ebene der Fahrzeugarchitektur. Die Kategorie Verifikation und Validierung beschreibt alle nachgelagerten Testverfahren, Simulationen, Feldtests und Maßnahmen zur Verifikation und Validierung bis zur eigentlichen Serienproduktion. Zur Abdeckung des gesamten PEP wird die Systematik durch die Kategorie der Absicherung in der Produktion erweitert. Diese adressiert Methoden des Qualitätsmanagements in der Produktion und Montage, Methoden zur Sicherstellung eines korrekten Verbaus in der Montage und die Umfänge der Inbetriebnahme und Funktionsabsicherung. Während die Kategorien entlang des PEP zeitlich aufeinander folgen, bestehen zusätzliche Wechselwirkungen zwischen diesen, sodass Erkenntnisse aus dem Bereich der Produktion, beispielsweise im Sinne eines kontinuierlichen Verbesserungsmanagements, auch direkt in die Entwicklung zurückgeführt werden können.

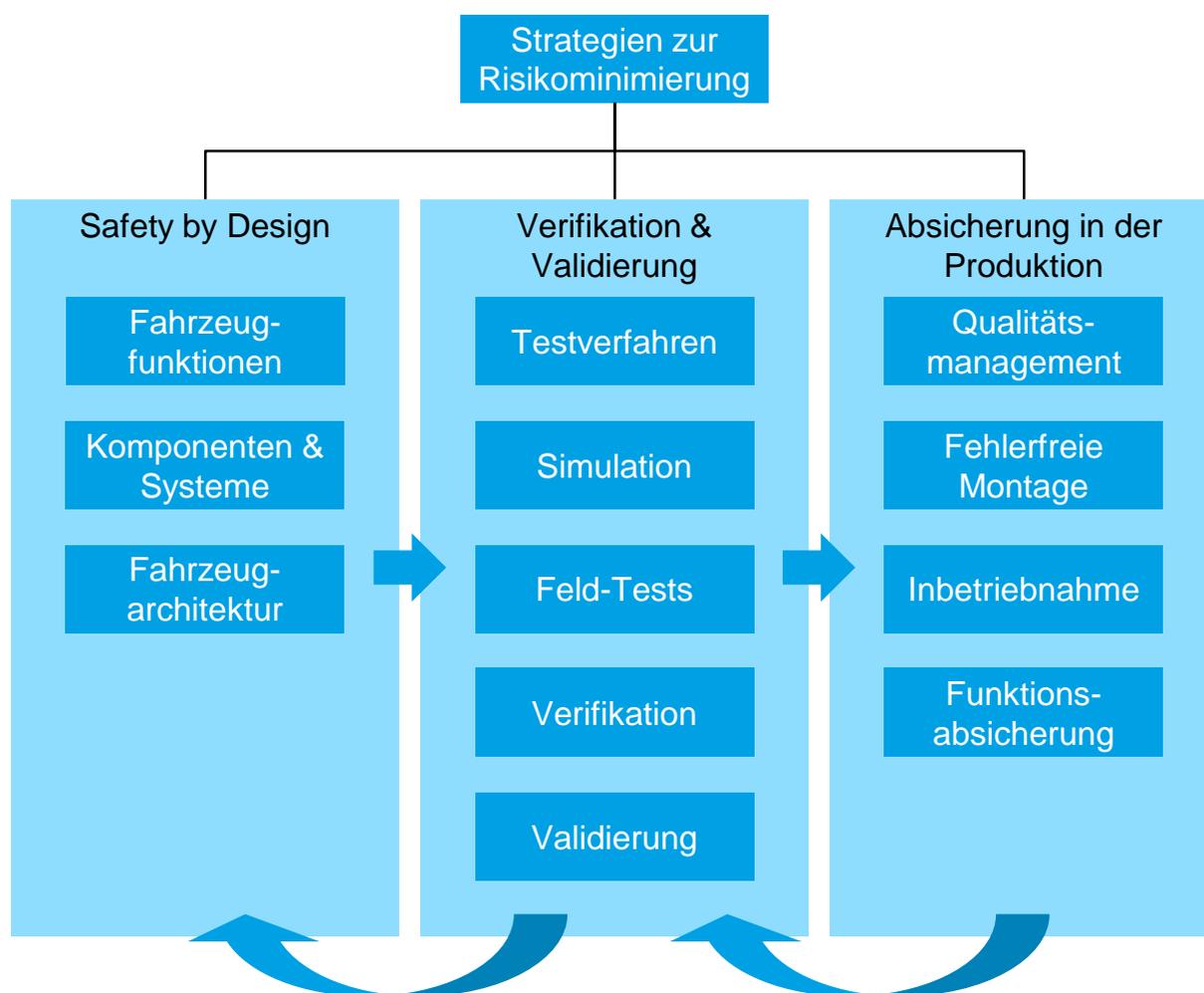


Abbildung 3.2: Gliederung der Ansätze zur Funktionsabsicherung in Anlehnung an [ROB19]

Neben der Produktentwicklung wirken also vor allem in der Fahrzeugendmontage Einflüsse auf die Systeme und deren Funktionsfähigkeit. Hierdurch kann eine fehlerfreie Funktion zum Zeitpunkt der Fahrzeugübergabe nicht garantiert werden. [GRE18; OTT21; SCH23]

Um diese Lücke zu schließen, existieren verschiedene Lösungen zur Prüfung der Funktionsfähigkeit mit Fokus auf den Bereich der Endmontage. Diese sind im Folgenden kurz dargestellt, um anschließend eine Bewertung der bestehenden Lösungen zur Funktionsabsicherung durchzuführen.

Vor dem in Kapitel 1.1 aufgezeigten Hintergrund der steigenden Notwendigkeit einer Funktionsabsicherung wurden verschiedene Ansätze mit Fokus auf die Fahrzeugendmontage entwickelt. Die Ansätze mit Bezug zur Thematik dieser Arbeit werden im Folgenden kurz erläutert und in Kapitel 3.3 gemeinsam mit den aktuellsten Ansätzen aus der Forschung bewertet.

### **3.1.1 Ganzheitliche Absicherung der Inbetriebnahme**

In [GRE18] wird eine Methodik zur ganzheitlichen Absicherung der Inbetriebnahme (GADI) entwickelt. Dabei befasst sich die Arbeit ausgehend von der Analyse der Anforderungen an die Inbetriebnahme bereits im Produktentstehungsprozess mit einer ganzheitlichen Toleranzbetrachtung und einer präventiven Versuchsplanung und –durchführung zur Absicherung von Produkt, Prozess und Betriebsmittel. Abschließend wird ein Vorgehen zur Überwachung des Inbetriebnahmeprozesses vorgesehen.

Damit bietet die Methodik ein durchgängiges Vorgehen zur systematischen Absicherung der Funktion im Rahmen der Fahrzeuginbetriebnahme und anhand bestehender Entwicklungsprozesse samt der verwendeten Betriebsmittel. Im Rahmen der Arbeit werden keine neuen Prozesse oder Betriebsmittel entwickelt. Nach dieser Methodik stellt die Fahrzeuginbetriebnahme den wichtigsten Prozess zur Absicherung der Fahrzeugfunktionen dar. Die Methodik wird anhand der umfelderfassenden Sensorik validiert.

### **3.1.2 Ansatz zur Kalibrierung in der Pkw-Inbetriebnahme**

[JON19] entwickelt einen neuartigen Ansatz zur Inline Fahrwerksgeometrievermessung und damit zur Inbetriebnahme automatisierter Fahrzeuge in der Montagelinie. In der Arbeit wird zunächst das Produkt analysiert und spezifische Einflussfaktoren abgeleitet. Darauf aufbauend wird ein Konzept entwickelt, um die geometrische Fahrachse am bewegten Fahrzeug zu erfassen. Hierfür wird folgend eine Messgenauigkeits- und Toleranzanalyse durchgeführt. Anschließend werden ein Prozess und ein Betriebsmittel entwickelt, welche den geforderten Genauigkeiten und Toleranzen genügen sollen. Als Ergebnis entsteht ein System, welches mittels Lasertriangulationssensoren die geometrische Fahrachse bestimmt, indem der Radflansch erfasst und über die Bewegungsbahn des Fahrzeuges verfolgt wird. Anschließend wird mittels der Methode des Design of Experiments (DoE) eine Validierung durchgeführt.

Das vorgestellte Konzept und der hierauf basierende Prozess sowie die entwickelten Betriebsmittel stellen eine Neuentwicklung zur flexiblen Messung einer gültigen Fahrzeugreferenz in der Fließmontagelinie dar, welche für die spätere Kalibrierung der umfelderfassenden Sensoren notwendig ist. Es wird folglich ein Teil des Inbetriebnahmeumfangs im EoL adressiert, allerdings keine Sensorkalibrierung und keine Funktionsabsicherung. Es werden keine Umfänge zur Dokumentation der Prozessergebnisse vorgestellt.

### 3.1.3 Zukunftsfähige Inbetriebnahme mittels drahtloser Vernetzung

[GRU21] beantwortet die Fragestellung nach der zukünftigen Inbetriebnahme vernetzter Fahrzeuge. In der Arbeit werden Ansätze aufgezeigt, um herkömmliche Prozesse mittels Vernetzung des Fahrzeuges über die V2X-Schnittstelle mit der Produktionsinfrastruktur zu optimieren. Hierzu werden die drei Schwerpunkte Vernetzung, Inbetriebnahmesystem und Inbetriebnahmeprozess fokussiert. Basierend auf einer Analyse der verfügbaren Vernetzungstechnologien, wie WLAN, LTE und 5G, werden zwei Ansätze für eine optimierte Fahrzeuginbetriebnahme entwickelt, die ablauf- und die prozessgesteuerte Inbetriebnahme. Bei der ablaufbasierten Inbetriebnahme wird der klassische Prozess durch eine sogenannte Inbetriebnahme-Cloud gesteuert. Hierzu kommuniziert das Fahrzeug mittels seiner Schnittstellen direkt mit der Cloud, welche den Prozessablauf verwaltet und dokumentiert. Die prozessgesteuerte IBN hingegen wird direkt durch das Fahrzeug selbst verwaltet und nutzt die aufkommende Zentralarchitektur. Basierend auf dem Verbauzustand werden Prüf- und Inbetriebnahmeroutinen selbstständig gestartet und deren Ergebnisse automatisch dokumentiert. Die Ansätze werden anhand der Inbetriebnahme eines Türsteuergerätes validiert.

Die Arbeit adressiert maßgeblich die Umsetzung von Inbetriebnahmeprozessen unter Nutzung der Fahrzeugkommunikation und der geänderten Fahrzeugarchitektur. Hierzu wird auch eine optimierte Prozessinfrastruktur vorgestellt. Die Arbeit befasst sich im Schwerpunkt nicht mit automatisierten Fahrzeugen und deren Systemen. Ebenso ist die Funktionsabsicherung nicht Gegenstand der Entwicklung.

### 3.1.4 Inbetriebnahme und Kalibrierung in der Montagelinie

Einen ersten vollständigen Prozess inklusive der notwendigen Betriebsmittel zur Inbetriebnahme von automatisierten Fahrzeugen wird in [OTT21] vorgestellt. Übergeordnetes Ziel hierbei ist das Erreichen einer einlinigen EoL-Struktur, was als Inline-Szenario vorgestellt wird. Fokus der Arbeit ist die Entwicklung eines Prozesses zur Bestimmung der geometrischen Fahrachse zu einem möglichst frühen Zeitpunkt in der Montagelinie. Diese dient im weiteren Prozess als Referenz für die Inbetriebnahme der umfelderfassenden Sensoren. Es werden ein neuartiges Radadaptionssystem zur Messung der Fahrzeugreferenz sowie ein modulares Referenztarget zur Kalibrierung vorgestellt. Unter Verwendung des neu entwickelten Messsystems und des modularen Referenznormals wird gezeigt, dass eine Inbetriebnahme in der Fließmontage mit dem vorgestellten Konzept möglich ist. Dies macht die Parallelisierung im EoL obsolet, wodurch das Forschungsziel der Einlinigkeit erreicht werden kann. Weiterhin wird die Funktionsabsicherung mittels Durchführung der Inbetriebnahme adressiert.

Dementsprechend adressiert die Arbeit maßgeblich die Inbetriebnahme im Sinne der extrinsischen Kalibrierung der umfelderfassenden Sensorik autonomer Fahrzeuge in der Fließmontagelinie. Die Prüfergebnisse werden nicht dokumentiert, somit lassen sich diese nicht für eine Funktionsabsicherung nutzen.

### 3.1.5 Inline Inbetriebnahme und Kalibrierung von Fahrerassistenzsysteme

Die Arbeit von [SCH23] befasst sich mit der Entwicklung eines Prozesses zur Realisierung der Inline Inbetriebnahme bestehend aus Fahrzeugreferenzierung und Kalibrierung der umfelderfassenden Sensorik. Zunächst wird ein Verfahren zur Referenzierung des Fahrzeuges unter Verwendung zweier Stereokamerasysteme entwickelt. Dieses System wird im Gesamtprozess dazu genutzt, die Fahrzeugsymmetrieachse zu bestimmen. In Bezug zu dieser werden im Folgenden alle umfelderfassenden Sensoren eingestellt.

Zur Inline-Kalibrierung der umfelderfassenden Sensoren, hier Radar, Lidar und Kamerasysteme, wird anschließend je ein Verfahren entwickelt, welches eine extrinsische Kalibrierung der Raumwinkel im Fließbetrieb ermöglicht. Für die Kalibrierung am Beispiel einer Stereo Multi Purpose Camera (SMPC) wird ein Verfahren auf Basis des optischen Flusses als zielführend vorgestellt. Die Kalibrierung der Lidarsensorik erfolgt mittels eines Verfahrens der Ebenschätzung in Kombination mit der Methode des Iterative Closest Point (ICP). Zur Kalibrierung von Radarsensoren wird eine Methode zur Punktverfolgung unter Nutzung eines Corner-Reflektors vorgestellt.

Die Arbeit stellt damit den gesamten Umfang der notwendigen Einzelprozesse für eine Inline-Inbetriebnahme dar. Unter Referenzierung auf die Fahrzeugsymmetrieachse werden für zwei von drei Sensor-Typen targetlose Kalibrierverfahren entwickelt. Als Prozessergebnisse werden die errechneten Orientierungen als Winkel ausgegeben, eine Nachvollziehbarkeit der Einzelergebnisse ist nicht gegeben. Auch ist unklar, inwiefern der Prozess durch das Fahrzeug oder durch eine externe Prozessinfrastruktur ausgeführt wird.

### 3.2 Kalibrierung umfelderfassender Sensoren autonomer Systeme

Einer der wichtigsten Schritte zur Funktionsabsicherung in der Produktion ist die Ermittlung der räumlichen Orientierung der umfelderfassenden Sensoren. Dabei ist vor allem die Rotation um die Hochachse, beziehungsweise der Gierwinkel, von Bedeutung. [GRE18; MUE22; OTT21; SCH23]. Zur Erfüllung dieser Aufgabe müssen, wie in Abschnitt 2.1 erläutert, die Bezüge der von Sensor- und Fahrzeugkoordinatensystem zueinander bestimmt werden. Zur Lösung der zugrundeliegenden mathematischen Problemstellung existieren verschiedene Ansätze [FAU86; KAB76; VOS92].

Für den Betrachtungsbereich dieser Arbeit sind vor allem solche relevant, welche sich mit der extrinsischen Kalibrierung der umfelderfassenden Sensoren autonomer Systeme befassen. Diese Ansätze umfassen immer die Erfassung einer Referenzszene zur Identifikation und Extraktion von spezifischen Merkmalen, welche dann als Referenz zur Bestimmung der extrinsischen Parameter genutzt werden. Diese Merkmale müssen einander zugeordnet und das hierdurch formulierte mathematische Problem gelöst werden. Zur Unterscheidung der existierenden Ansätze können diese nach den Kriterien aus Abbildung 3.3 klassifiziert werden:

Ausführung	Manuell	Halbautomatisch	Automatisch
Verfahren	Offline		Online
Dynamik	Statische Szene	Dynamisches Target	Dynamische Sensoren
Referenzfassung	1 Perspektive		M Perspektiven
Referenznormal	Ein Target	N Targets	Targetlos
Zusatzdaten	Odometriedaten		A Priori Informationen
Lösungsverfahren	Mathematisch Numerisch		Neuronale Netze

Abbildung 3.3: Klassifikation von Kalibrierprozessen

Zunächst können die Ansätze bezüglich der Ausführungsart unterschieden werden. Hierzu werden die Schritte zur Erfassung, Identifikation und Extraktion der Referenzpunkte entweder manuell, halbautomatisch oder vollautomatisch durchgeführt. Weiterhin können die Verfahren entweder zur Inbetriebnahme vor Aufnahme des Betriebs (Offline-Kalibrierung) oder im laufenden Betrieb (Online-Kalibrierung) ausgeführt werden. Die Ausführung erfolgt weiterhin bei statischer Szene (weder Sensoren noch Referenzen werden bewegt), bei bewegten Referenzen oder bei bewegtem Erfassungssystem und damit bewegten Sensoren. [DOM19; GAO10a; GLI22; SCH23]

Die Erfassung der Referenznormale kann in einer einzelnen Perspektive oder durch mehrere verschiedene Perspektiven, welche sich durch mehrere Aufnahmen bei dynamischer Szene erzeugen lassen, erfolgen. Dies kann die Menge der zur Kalibrierung verfügbaren Daten erhöhen und damit zu einer besseren Genauigkeit beitragen. Zusätzlich kann nach der Anzahl der verwendeten Referenznormale klassifiziert werden. Es existieren Prozesse, welche beispielsweise zur Kamerakalibrierung eine einzelne Referenz nutzen, Ansätze zur Verwendung mehrerer Einzelreferenzen sowie targetlose Verfahren, welche automatisiert markante Punkte in einer Szene detektieren und einander zuordnen. [CIV09; DOM19; GLI22; HEN20; SOL14] Zur Steigerung der Genauigkeit der Verfahren können durch zusätzliche Sensorik erfasste Daten in die Lösung mit einbezogen werden. Dabei werden beispielsweise Odometriedaten, oder auch a-priori Daten, wie beispielsweise die grobe Position des Sensors oder die Sollposition eines Sensors, im Gesamtsystem genutzt.

Schließlich können die mathematischen Bezüge durch die numerische Lösung des als Optimierungsproblem formulierten Gleichungssystems oder durch die Nutzung von neuronalen Netzen, beziehungsweise Algorithmen auf Basis künstlicher Intelligenz errechnet werden. [BES92; CHE92; SCH17]

Ein weiteres wesentliches Unterscheidungsmerkmal bei der Bestimmung der Sensororientierung ist die Wahl der Referenz. Wie in Abbildung 3.4 gezeigt, können die zu bestimmenden kinematischen Ketten auf unterschiedliche Art definiert werden. Dies beeinflusst das zu lösende mathematische Problem. [DOM19]

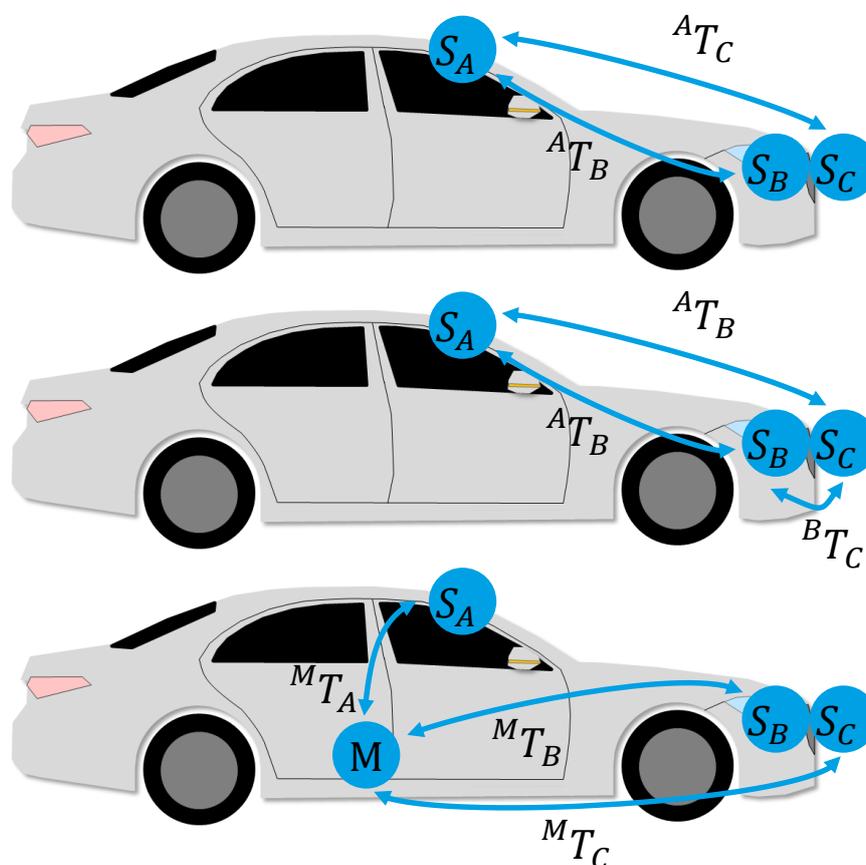


Abbildung 3.4: Kalibrierkonfigurationen (Oben MCPE, Mitte FCPE, Unten PSE) nach [DOM19]

Die *Minimalverbundene Lageschätzung* (engl.: Minimally connected pose estimation, MCPE) beschreibt die Referenzierung mit der kürzesten Kette. Hierzu wird ein Sensor als Hauptsensor gewählt, auf welchen alle Sensoren referenziert werden. Vorteilhaft ist die vergleichsweise geringe Anzahl der Berechnungsschritte und die Berechnung ohne Verwendung einer Fahrzeugreferenz. [DOM19]

Die *Vollverbundene Lageschätzung* (engl.: Fully connected pose estimation, FCPE) bestimmt analog zur MCPE die Transformationen aller Sensoren untereinander und berechnet daraus eine konsistente Lösung der kinematischen Kette. Oftmals wird hierzu ein iterativer Ansatz verwendet. Durch die geschlossene kinematische Kette ist dieses Vorgehen präziser als die MCPE, jedoch können durch Messungenauigkeiten der Sensorik Lösungen entstehen, welche nicht komplett konvergieren. [DOM19]

Die *Lage- und Strukturschätzung* (engl.: Pose and structure estimation, PSE) berechnet die Transformation aller Sensoren zu einer gemeinsamen Referenz [DOM19]. Dieses Verfahren wird, wie in Kapitel 2.1 beschrieben, zur Kalibrierung der umfelderfassenden Sensoren im EoL genutzt.

Die Anzahl an Lösungen und Vorgehen zur extrinsischen Kalibrierung von umfelderfassenden Sensoren übersteigt den Betrachtungsbereich dieser Arbeit deutlich. Daher werden im Folgenden aktuelle Ansätze aus der Forschung bezüglich Verfahren zur targetbasierten und targetlosen Kalibrierung zusammengefasst und gegenübergestellt.

### **Verfahren zur targetbasierten Kalibrierung**

Viele Kalibriermethoden nutzen Referenzmarken zur Ermittlung der intrinsischen und extrinsischen Parameter. Wie bereits beschrieben, werden dabei unterschiedliche Ausprägungen und Geometrien genutzt. Radarsensoren benötigen zur Kalibrierung Objekte, welche die elektromagnetische Strahlung reflektieren. Hierzu werden oft metallische Platten oder metallische Retroreflektoren genutzt. Diese Marken stellen Kalibrierpunkte dar, welche im Referenzkoordinatensystem bekannt sein müssen, oder für eine Sensor-zu-Sensor Kalibrierung nach der Methode des MCPE oder FCPE verwendet werden. [DOM19; ELN15; STE95]

Für die Kalibrierung von Lidarsensoren existieren Ansätze, welche häufig planare Referenzflächen nutzen. Dabei werden alle Punkte der Ebenen der Referenzflächen extrahiert und die zugehörige Ebenengleichung approximiert. Auf Basis dieser werden anschließend die extrinsischen Parameter bestimmt. [DOM19; GUI17; KIM19; PER17]

Bei der Kalibrierung von Mono- und Stereokameras haben sich in diesem Bereich oftmals schachbrettmuster-artige Referenznormale bewährt. Diese bieten eine ausreichende Anzahl an Referenzpunkten. Zusätzlich existiert eine Vielzahl an automatischen Kalibrieralgorithmen, die diese Muster bereits verwenden. Dabei werden entweder mehrere Referenznormale verwendet, oder es werden mehrere Aufnahmen mit verschiedenen Positionen der Normale genutzt. [DOM19; GUI17; OPE21; PER17]

Die meisten Ansätze stellen dabei keine Lösungen für die Kalibrierung von Einzelsensoren dar, auch wenn sie hierfür geeignet sind. Oftmals werden verschiedene Formen von Referenznormalen kombiniert, um sogenannte Multitargets zu erzeugen. Diese können durch mehrere Sensor-Typen gleichzeitig erfasst werden. Ein Verlust der Genauigkeit gegenüber Kalibrierverfahren für Einzelsensoren lässt sich dabei nicht beobachten. Vielmehr stellt die verkettete Kalibrierung eine Möglichkeit zur Steigerung der Genauigkeit der Verfahren dar [DOM19].

### Verfahren zur targetlosen Kalibrierung

Im Gegensatz zu den targetbasierten Verfahren lassen sich Sensoren auch mittels sogenannter targetloser Verfahren kalibrieren. Diese Verfahren nutzen markante Punkte in der erfassten Szene, um eine extrinsische Kalibrierung durchzuführen [DOM19]. Dabei haben sie den Vorteil, dass sie aufgrund der fehlenden Betriebsmittel flexibler sind. Allerdings besteht hierbei die Herausforderung, dass die von der Sensorik erfasste Szene für eine Kalibrierung geeignet ist [GLI22]. Zudem lässt sich mittels dieser Verfahren meist kein Bezug zu einer Systemreferenz herstellen, da die zur Kalibrierung genutzten Punkte zufällig gewählt und nicht reproduzierbar sind. Teilweise wird die Genauigkeit der Verfahren durch die Nutzung zusätzlicher Daten wie 3D-Karten und Odometriedaten gesteigert [HEN20; LEV10]. Entsprechend eignet sich die Mehrheit dieser Verfahren auch nur für eine Sensor-zu-Sensor Kalibrierung und somit meist auch nur zu extrinsischen Kalibrierung.

Die Kalibrierung von Radarsensoren erfolgt bei diesen Verfahren auf Basis stark reflektierender Objekte im erfassten Umfeld. So werden teilweise konkrete Szenen, beispielsweise mit einer Vielzahl an metallischen Objekten, wie Laternen, [IZQ18] aufgesucht oder zufällig vorhandene Reflexionen genutzt [GLI22].

Für Lidarsensoren werden meist geometrische Flächen oder die gesamte Punktwolke der erfassten Umgebung genutzt. Erfasste Flächen können dabei über verschiedene Sensor-Typen hinweg einander zugeordnet werden oder durch eine geeignete Parametrisierung beschrieben und deren Orientierung sensorübergreifend zur Kalibrierung genutzt werden.

Methoden der targetlosen Kalibrierung von Kameras nutzt die Bewegung der Sensoren während der Aufnahme von Bildern aus. Hierbei werden automatisiert Punkte mit bestimmten Eigenschaften aus verschiedenen Aufnahmen eines Sensors extrahiert. Anhand dieser Punkte und anhand der Sensorbewegung können anschließend durch die Lösung eines Optimierungsproblems die extrinsischen Parameter zwischen den Sensoren bestimmt werden. [CIV09]

Weiterhin werden zur extrinsischen Kalibrierung von Multisensorsystemen die Verfahren des Simultaneous Localizing and Mapping (SLAM) [DUR06] oder Varianten des ICP [BES92; RUS01] verwendet. Dabei werden die Daten aller Sensoren auf Punktwolken-Ebene abstrahiert, um ein übergreifend nutzbares Datenformat zu erhalten. Bei diesen Ansätzen wird versucht, möglichst viele korrespondierende Punkte der Ausgangs- und Zieldatenmenge zu bestimmen und anhand dieser das Optimierungsproblem bestehend aus Rotation und Translation zu lösen. Die bestmögliche Lösung davon stellt anschließend die extrinsischen Parameter des Multisensorsystems dar. Die zugrundeliegenden mathematischen Modelle, welche zur Optimierung genutzt werden, variieren dabei je nach Ansatz. [GAO10b; GLI22; GUE14]

Somit existieren zur Bestimmung der extrinsischen Parameter von Multisensorsystemen verschiedene targetlose und targetbasierte Verfahren. Die Ergebnisse targetbasierter Verfahren sind meist nachvollziehbarer und verfügen über eine Fehlermetrik bei einer geringen Anzahl von Aufnahmen. Hierzu existieren verschiedene Konzepte für die Gestaltung der Referenznormale.

Targetlose Verfahren sind flexibler und weisen einen geringeren Aufwand bei der Auslegung der zur Referenzerfassung notwendigen Algorithmen auf, da diese generischer Natur sind. Allerdings haben diese Ansätze den Nachteil, dass oftmals eine Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse nicht gegeben ist. Zudem sind die existierenden Fehlermetriken nicht absolut interpretierbar, sodass ein unerkannter, nicht bewertbarer Restfehler verbleiben kann.

Für die Inbetriebnahme und Funktionsabsicherung automatisierter Fahrzeuge bedeutet dies, dass aufgrund der Nachvollziehbarkeit und Bewertbarkeit der Prozessergebnisse targetbasierte Verfahren zu bevorzugen sind.

### 3.3 Fazit und Entwicklungsbedarf

Zur Absicherung der Funktionsfähigkeit der sicherheitskritischen Systeme und Funktionen automatisierter Fahrzeuge existieren verschiedene Maßnahmen entlang des Produktentstehungsprozesses. Dabei liegt der Fokus vor allem auf der System- und Komponentenentwicklung im Hardware- und Softwarebereich sowie dem Testen der Systeme in der Prototypenphase.

Im Bereich der Produktion wirken eine Vielzahl an Einflüssen vor allem auf die zur Umfeldfassung genutzte Sensorik, welche die Grundlage für die automatisierte Fahrfunktion bildet. Diese Einflüsse werden lediglich im Rahmen der Fahrzeuginbetriebnahme über die Kalibrierung der umfelderfassenden Sensorik kompensiert. Aktuelle Prozesse sind dabei von einem hohen Fehlerschlupf geprägt und finden zudem nicht als letzter Schritt im EoL statt, sodass, wie in Kapitel 2.1 dargestellt, nachträgliche Veränderungen an der Sensorik möglich sind, ohne dass diese kompensiert oder erkannt werden können.

Die in Kapitel 2 und Kapitel 3 vorgestellten Prozesse und Lösungen, welche das Spektrum der für diese Arbeit relevanten Ansätze darstellen, lassen sich entlang der Grundfunktionen und über den Produktentstehungsprozess eines automatisierten Fahrzeuges, wie in Abbildung 3.5 dargestellt, verorten:

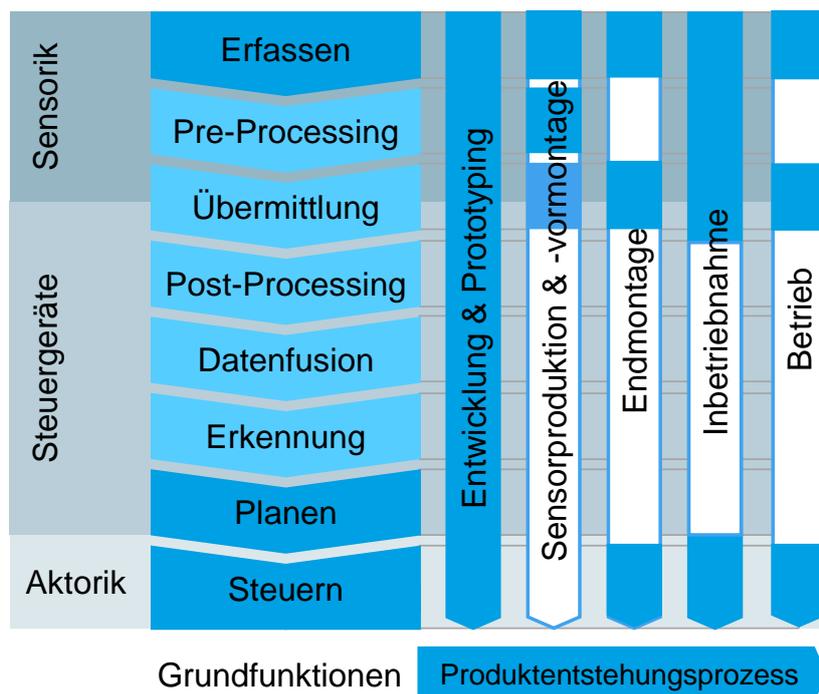


Abbildung 3.5: Maßnahmen der Funktionsabsicherung entlang des Produktentstehungsprozesses

Wie zu erkennen, existieren vor allem in der Produktion keine Prozesse zur validen Funktionsprüfung und Absicherung dieser Systeme und ihrer Funktionen [MAT15]. Insbesondere die Absicherung der umfelderfassenden Sensorik stellt damit eine zunehmende Herausforderung dar [GRE18; ROB19].

Zur Definition des Handlungsbedarfes, werden die in diesem Kapitel untersuchten Ansätze anhand der folgenden Kriterien gegenübergestellt und bewertet:

*Art:* Berücksichtigung des Umfangs, der durch den Ansatz adressiert wird. Dabei kann es sich um Ansätze für ein methodisches Vorgehen, um Prozesse zur Inbetriebnahme, zur Kalibrierung oder Prozesse zur Funktionsabsicherung handeln.

*Umfang:* Betrachtung des Umfangs der Ansätze. Welchen Umfang adressieren die Ansätze. Handelt es sich beispielsweise um einen Ansatz zur Einstellung der Fahrzeugsensorik unter Berücksichtigung einer erfassten Referenz.

*Prozessschritte:* Berücksichtigung der wesentlichen Schritte. Werden Prozessschritte und -ergebnisse nachvollziehbar dokumentiert, sind diese Schritte für eine Funktionsabsicherung in der Produktion nutzbar?

*Flexibilität und Wandlungsfähigkeit:* Flexibilität und Wandlungsfähigkeit der Lösungen. Sind die Lösungen bei Produkt- oder Prozessänderungen einfach anpassbar?

*Verortung des Prozesses:* Bewertung der Verortung der Lösungen in der Endmontage. Kann eine Lösung als letzter Prozess in der Montagelinie durchgeführt werden? Werden die zukünftigen Herausforderungen an das EoL berücksichtigt? Sind die Prozesse im Rahmen eines Inline-Szenarios implementierbar?

Tabelle 2: Übersicht der aktuellen Ansätze mit Bezug zum Kontext

	Art				Umfang				Schritte		Flexibilität		Verortung	
	Methodik	Kalibrierung	Inbetriebnahme	Funktionsabsicherung	Referenzfassung	Radar	Lidar	Kamera	Nachvollziehbarkeit	Dokumentation	Produktänderungen	Prozessänderungen	Montagelinie	InLine
Ansätze aus 2.2	○	●	●	○	●	●	○	●	○	○	○	○	●	○
[GRE18]	●	○	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
[JON18]	○	○	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
[GRU21]	○	○	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
[OTT21]	○	○	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
[SCH23]	○	○	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Ansätze aus 3.2	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Handlungsbedarf	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

Erfüllungsgrad

0% ○

25% ○

50% ○

100% ●

Tabelle 2 zeigt, dass unter allen betrachteten Ansätzen keine Lösung für eine Funktionsabsicherung existiert, welche alle genannten Kriterien erfüllt.

Lösungen, welche in Abschnitt 2.1 den Stand der Technik in der Montagelinie abbilden, adressieren ausschließlich im Rahmen der Fahrzeuginbetriebnahme eine Kalibrierung der umfelderfassenden Sensoren. Dabei werden hauptsächlich Radarsensoren und Kamerasysteme kalibriert. Nur einige wenige Lösungen sind zur Kalibrierung von Lidarsensoren geeignet. Eine Nachvollziehbarkeit der Kalibrierergebnisse ist dabei bei keinem Prozess gegeben. Weiterhin sind die Prozesse stark monolithisch, sodass bei Produkt- und damit einhergehenden Prozessänderungen aufwändige Vorgänge zum Einrichten eines neuen Prozesses notwendig sind.

Unter den betrachteten Ansätzen der Forschung mit Bezug zur Fahrzeugendmontage in Kapitel 3.1 finden sich Prozesse zur Kalibrierung und Inbetriebnahme umfelderfassender Sensoren, sowohl für einzelne Sensoren, also auch für Multisensorsysteme und Prozesse zur Inbetriebnahme der umfelderfassenden Systeme unter Berücksichtigung einer erfassten Fahrzeugreferenz. Dabei ist keine Lösung zur Funktionsabsicherung der Systeme ausgelegt, da einerseits die Verortung der Prozesse, andererseits wichtige Schritte, wie eine nachvollziehbare Ermittlung der Prozessergebnisse oder auch eine Dokumentation, nicht adressiert werden. Die vorgestellten Lösungen sind dabei flexibler als der aktuelle Stand der Technik und adressieren teilweise auch die Integration in die Fließmontagelinie sowie ein Inline-Szenario. Die aktuellen Ansätze aus der Forschung in Kapitel 3.2 adressieren ausschließlich die extrinsische Kalibrierung von umfelderfassenden Sensoren. Diese erfolgt dabei meist paarweise, als Sensor-zu-Sensor Kalibrierung. Eine direkte Referenzierung zu einem Bezugssystem erfolgt meist nicht. Folglich weisen die meisten Ansätze komplexe Kalibrierroutinen auf, welche speziell auf die verwendete Sensorik zugeschnitten sind. Hierzu werden entweder targetlose Verfahren oder speziell für die adressierten Sensoren ausgelegte Kalibriernormale verwendet. Ein Bezug zur Fahrzeugendmontage ist nicht gegeben. Auch sind Prozessablauf und Prozessergebnisse meist nicht nachvollziehbar dokumentiert.

Folglich besteht folgender Entwicklungsbedarf:

- Ein Prozess zur Funktionsabsicherung im Sinne der Überprüfung der umfelderfassenden Sensorik ist notwendig. Dabei muss der Prozess als letzter Schritt in der Produktion verortet sein, um nachfolgende Einflüsse auf die Sensorik ausschließen zu können.
- Der Prozess muss mit nachvollziehbaren Ergebnissen und deren Dokumentation zu Absicherungszwecken realisiert werden. Nur so kann die fehlerfreie Montage und Inbetriebnahme der umfelderfassenden Sensoren dokumentiert werden.
- Dabei muss der Prozess für die Sensor-Typen Radar, Lidar und Kamera realisiert werden.
- Zur Berücksichtigung der steigenden Anforderungen an das EoL sollte das Inline-Konzept nach [MUE22] und [OTT21] berücksichtigt werden.

Im Folgenden wird hierauf basierend zunächst das methodische Vorgehen zur Adressierung des Handlungsbedarfes dargelegt. Anschließend werden diesem Handlungsbedarf folgend Anforderungen an die zu entwickelnde technische Lösung definiert.



## 4 Vorgehen und Anforderungsdefinition

Wie in den bisherigen Kapiteln herausgestellt, ist die Absicherung der Funktionsfähigkeit automatisierter Fahrzeuge in der Montagelinie zukünftig von hoher Relevanz. Als wesentlichen Schritt umfasst dies analog zur Fahrzeuginbetriebnahme die Validierung der extrinsischen Kalibrierung der umfelderfassenden Sensoren.

Um eine zielgerichtete Bearbeitung der Aufgabenstellung zu ermöglichen, wird bei der Lösungsentwicklung methodisch vorgegangen und dieses Vorgehen im Folgenden beschrieben. Darauf folgend werden Anforderungen an das zu entwickelnde Lösungskonzept definiert. Diese Anforderungen orientieren sich an dem in Abschnitt 3.3 herausgestellten Entwicklungsbedarf und dienen im weiteren Verlauf der Arbeit als Grundlage für die Entwicklung der Funktionsabsicherung.

### 4.1 Methodisches Vorgehen zur Lösungsentwicklung

Die Schritte zur Lösungsentwicklung können zunächst in zwei Ebenen aufgeteilt werden. Übergeordnet wird zunächst das in Abbildung 4.1 dargestellte Vorgehen zur Berücksichtigung der Wechselwirkungen von Produkt, Prozess und Betriebsmittel nach [MUE21] genutzt:

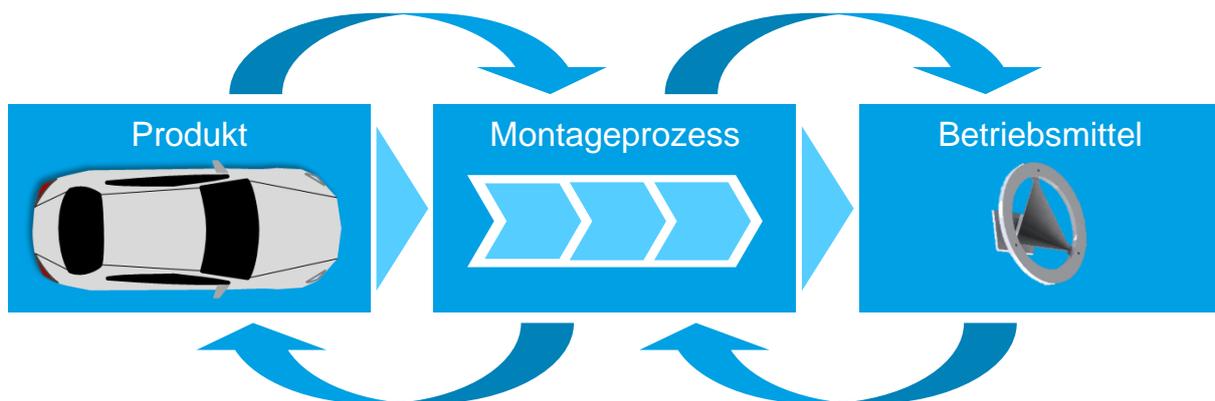


Abbildung 4.1: Zusammenhang von Produkt, Prozess und Betriebsmittel nach [MUE21]

Maßgeblich für die angestrebte Entwicklung eines Absicherungsprozesses sind zunächst die Eigenschaften des betrachteten Produktes. Diese bedingen sowohl die Art, als auch Umsetzbarkeit des Lösungskonzeptes. Zu Beginn der Entwicklung muss daher zuerst eine Produktanalyse durchgeführt werden. Die Eigenschaften automatisierter Fahrzeuge umfassend deren Architektur sowie die genutzte Sensorik wurden hierzu in Abschnitt 2.1 beschrieben. Mit den Produkteigenschaften sowie den daraus abgeleiteten Anforderungen an einen Zielprozess kann anschließend die Prozessentwicklung durchgeführt werden. Diese erfolgt auf der zweiten Ebene der Entwicklungsmethode. Nach Definition und Bewertung der Passfähigkeit eines finalen Lösungskonzeptes können anschließend die zur Durchführung des Prozesses notwendigen Betriebsmittel entwickelt werden. Wie aufgezeigt, sind bei diesem Vorgehen die Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Schritten zu beachten. So kann beispielsweise die Auslegung eines Betriebsmittels Auswirkungen auf den zugrundeliegenden Prozess haben,

sodass dieser angepasst werden muss. Ebenfalls ist es möglich, dass Eigenschaften des Prozesses Auswirkungen auf das Produkt und dessen Eigenschaften haben.

Die Entwicklung einer technischen Lösung im Sinne eines Prozesses zur Funktionsabsicherung in der Produktionslinie stellt die Entwicklung eines mechatronischen Systems dar. Hierzu existieren verschiedene Ansätze, wie beispielsweise das in VDI 2221 beschriebene Vorgehen zur Entwicklung technischer Produkte und Systeme, das V-Modell nach VDI 2206 zur Entwicklung mechatronischer und cyber-physischer Systeme oder das W-Modell betreffend das Systems Engineering aktiver Systeme. [NAT13; VDI19b; VDI21]

Das Vorgehen nach VDI 2221 stellt dabei einen iterativen Entwicklungszyklus bestehend aus den Schritten der Problemanalyse, der Problemformulierung, der Systemsynthese, der Beurteilung dieser Synthese und der Entscheidung zur Bildung einer Lösung dar. Dieses Vorgehen wird so lange wiederholt, bis eine komplexe Problemstellung vollständig adressiert wurde. [VDI19b] Das V-Modell nach VDI 2206 beginnt mit der Definition von Anforderungen für einen Systementwurf, der am Ende des Vorgehens in einem Produkt münden soll, welches die Anforderungen erfüllt. Dabei werden in der Lösungsentwicklung die Ebenen Maschinenbau, Elektrotechnik und Informationstechnik unterschieden. Die auf diesen Ebenen erarbeiteten Lösungen werden in einer Systemintegration zusammengeführt und das so entstandene System mit den Anforderungen abgeglichen. Das V-Modell ist in Abbildung 4.2 dargestellt. [VDI21]

Aufbauend auf dem V-Modell beschreibt das W-Modell eine weiterentwickelte Methode. Hierbei werden auf Basis einer System- und Anforderungsanalyse Subsysteme definiert. Diese werden anschließend als Weiterentwicklung zum V-Modell virtuell abgebildet und einer detaillierten Analyse unterzogen. Auf Basis dieser wird anschließend folgend dem V-Modell eine Lösungssynthese durchgeführt. [NAT13]

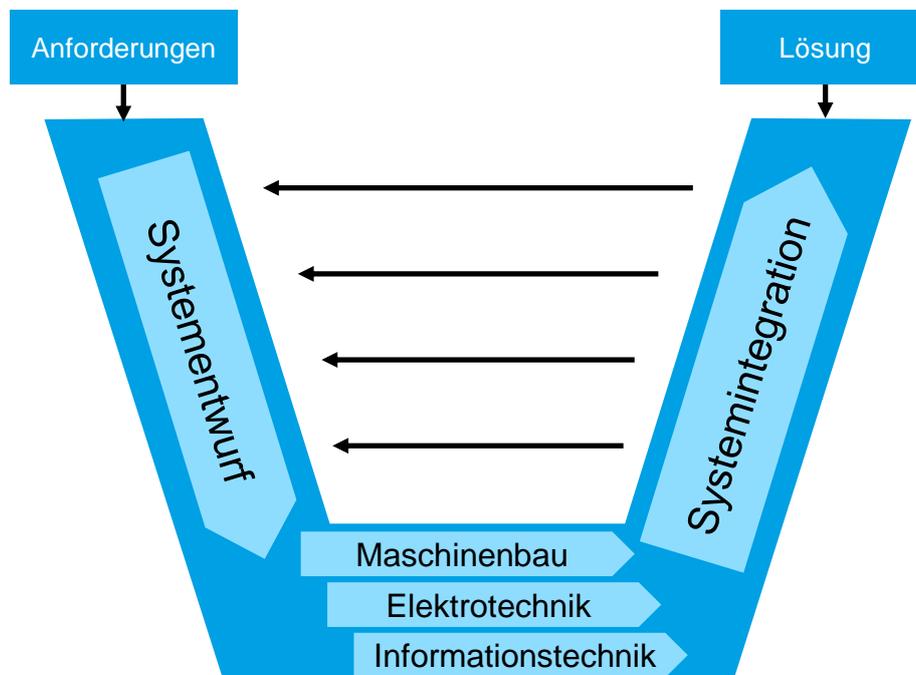


Abbildung 4.2: V-Modell nach VDI 2206 [VDI21]

Die Lösungsentwicklung eines Prozesses zur Funktionsabsicherung adressiert ein bisher wenig betrachtetes Problem. Dementsprechend ist zusätzlich zum Vorgehen nach dem V-Modell als erster Schritt eine detaillierte Problemanalyse notwendig, sodass Anforderungen definiert werden, welche anschließend adressiert werden können. Das Vorgehen hierzu ist in Abbildung 4.3 dargestellt:

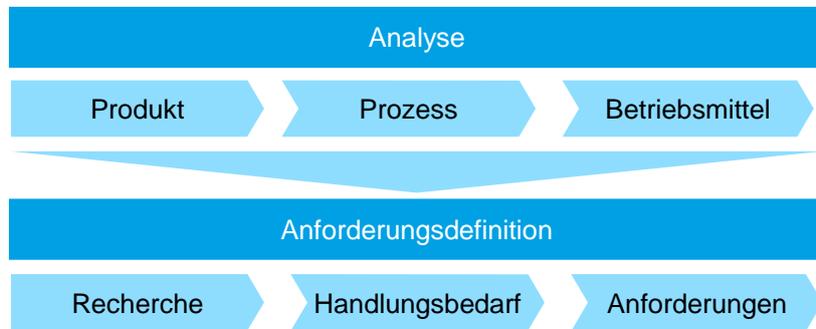


Abbildung 4.3: Vorgehensweise zur Anforderungsdefinition

Nach Definition der Anforderungen folgt ein kombiniertes Vorgehen nach VDI 2221 und VDI 2206. In diesem zunächst die Gesamtaufgabe aufgeteilt. Anschließend wird ein Konzept für einen Lösungsprozess entwickelt und für diesen schließlich eine Betriebsmittelentwicklung durchgeführt. Dieses Vorgehen, an dem sich der weitere Aufbau der Arbeit orientiert, ist in Abbildung 4.4 dargestellt:

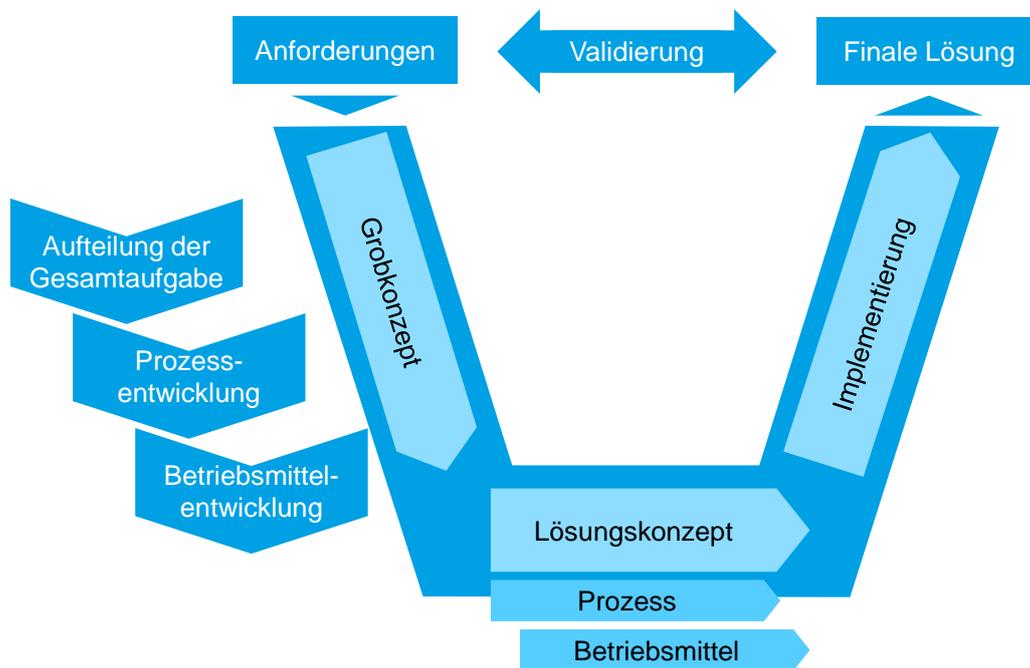


Abbildung 4.4: Vorgehensweise zur Lösungsentwicklung

Zur Analyse von Produkt und den aktuellen Lösungen zur Funktionsabsicherung wurden in Kapitel 2 die Grundlagen automatisierter Fahrzeuge und insbesondere der umfelderfassenden Sensoren dieser Systeme dargestellt. Ebenfalls wurden die Grundlagen der Fahrzeugproduktion und der Sensorkalibrierung im EoL dargestellt.

In Kapitel 3 wurde aufbauend auf diesen Grundlagen zur Abbildung aktuellster Ansätze der Stand der Technik und Forschung bezüglich der Fahrzeuginbetriebnahme und Funktionsabsicherung, als auch der Kalibrierung umfelderfassender Sensoren autonomer Systeme dargestellt.

Abschließend wurde in Abschnitt 2.3 und Abschnitt 3.3 dieser aktuelle Stand zusammengefasst und ein Entwicklungsbedarf abgeleitet. Auf dieser Basis lassen sich im folgenden Abschnitt 4.2 Anforderungen an ein Lösungskonzept definieren.

Diese Anforderungsdefinition wird in Kapitel 5 dazu genutzt, dem V-Modell folgend einen Prozess zur Funktionsabsicherung in der Fließmontagelinie zu entwickeln. Dazu wird zunächst eine Gesamtaufgabe definiert und diese in ihre Teilaufgaben unterteilt. So kann zunächst ein auf einem Grobkonzept basierender Gesamtprozess definiert werden, für welchen anschließend die einzelnen Prozessschritte und folgend die notwendigen Betriebsmittel entwickelt werden können.

Abschließend wird auf Basis dieses Lösungskonzeptes ein die definierten Anforderungen erfüllender Prozess und die für die Prozessdurchführung notwendigen Betriebsmittel entwickelt. In Kapitel 6 werden der entwickelte Prozess und das zugehörige Betriebsmittel schlussendlich implementiert und diese Implementierung in Kapitel 7 unter Abgleich mit den definierten Anforderungen validiert.

## 4.2 Anforderungsdefinition

Für die zielgerichtete Entwicklung eines Prozesses zur Absicherung der automatisierten Fahrfunktionen in der Montage gilt es, dem Vorgehen aus Abschnitt 4.1 folgend, zunächst Anforderungen zu definieren.

Wie in den Abschnitten 2.3 und 3.3 herausgestellt wurde, existieren für einen solchen Prozess aktuell noch keine Lösungen. Daher ist das Ziel der Arbeit, wie in Abschnitt 1.2 beschrieben, die Absicherung der Funktion der umfelderfassenden Sensoren, da diese die zur Erfüllung der Fahraufgabe notwendigen Daten liefern.

Dieser Umfang soll im Rahmen des in [MUE22] und [OTT21] vorgestellten Inline-Konzeptes als letzter Schritt der Montagelinie realisiert werden.

Die Anforderungen lassen sich hierzu aus dem in Abschnitt 3.3 abgeleiteten Handlungsbedarf und den dazu untersuchten Vorarbeiten definieren. Unter der Annahme, dass die Auslegung des Produktes nicht beeinflusst werden kann, werden zunächst Anforderungen für einen Zielprozess formuliert. Die Prozessanforderungen sind in Tabelle 3 mit abnehmender Wichtigkeit aufgeführt und im Folgenden erläutert.

Tabelle 3: Anforderungen an den Zielprozess

Anforderung	Beschreibung
<b>Genauigkeit</b>	Ermittlung der Sensororientierung mit einer Wiederholgenauigkeit von mindestens $\pm 0,3^\circ$ für den Gierwinkel und $\pm 0,6^\circ$ für Nick- und Rollwinkel.
<b>Prozesssicherheit und Robustheit</b>	Der Prozess soll robust gegenüber Umwelteinflüssen und Störfaktoren der Produktionsumgebung sein.
<b>Nachvollziehbarkeit und Dokumentation</b>	Das Ergebnis des Prozesses sowie die Einzelschritte des Prozesses sollen nachvollziehbar sein. Diese müssen fälschungssicher dokumentiert werden.
<b>Universalität</b>	Der Prozess soll für alle Sensor-Typen (Radar, Lidar, Kamera) und deren Sensor-Arten sowie für sich überschneidende und getrennte FOVs anwendbar sein.
<b>Flexibilität und Wandlungsfähigkeit</b>	Der Prozess soll einfach auf Produkt- und Prozessänderungen anpassbar und rekonfigurierbar sein.
<b>Integrierbarkeit</b>	Der Prozess sollte in bestehende Montagelinien integrierbar sein.

*Genauigkeit:* Der Prozess soll die Orientierung aller umfelderfassenden Sensoren im Bezug zu einer Referenz präzise und wiederholbar genau ermitteln können. Nur wenn das Prozessergebnis wiederholbar genau ist, kann die Güte der Funktionsabsicherung als ausreichend bezeichnet werden. Für eine ausreichende Genauigkeit des Prozessergebnisses wird eine Wiederholgenauigkeit von mindestens  $\pm 0,3^\circ$  für den Gierwinkel und mindestens  $\pm 0,6^\circ$  für den Roll- und Nickwinkel auf Basis der bestehenden Ansätze der Fahrzeuginbetriebnahme festgelegt. [GRE18; OTT21]

*Prozesssicherheit und Robustheit:* Der Prozess soll zur Berechnung wiederholgenauer Ergebnisse robust gegenüber Einflüssen gestaltet werden. Hierzu zählen Umwelteinflüsse, welche in der Produktion durch benachbarte Prozesse, Fahrzeuge und Logistik entstehen können (Belichtung, Störobjekte in der Produktion, etc.), sowie Abweichungen im Prozess, welche beispielsweise durch eine Veränderung der Betriebsmittel verursacht werden können.

Weiterhin soll die Lage der Sensoren sicher ermittelt werden können. Die Prozessergebnisse dürfen nicht durch eine Änderung der Prozessinfrastruktur oder der Prozessdaten manipulierbar sein. Eine automatisierte Detektion von Abweichungen kann die Prozesssicherheit weiter erhöhen.

*Nachvollziehbarkeit und Dokumentation:* Die Prozessergebnisse als auch der Prozessablauf sollen für jedes Fahrzeug nachvollziehbar sein. Hierdurch können im Fall einer Fehlfunktion eines automatisierten Fahrzeuges Produktionsfehler seitens des Herstellers ausgeschlossen werden. Zum Nachweis eines fehlerfreien Prozesses sollen die Prozessschritte und Prozessergebnisse für jedes Fahrzeug dokumentiert werden. Die Dokumentation sollte in einem fälschungssicheren Format erfolgen.

*Universalität:* Der Prozess soll in der Lage sein, eine Funktionsabsicherung aller Sensor-Typen (Radar, Lidar und Kamera) durchzuführen. Dabei soll der Prozess auch alle Sensor-Arten sowie getrennte und sich überschneidende FoVs der Sensoren berücksichtigen.

*Flexibilität und Wandlungsfähigkeit:* Da sich automatisierte Fahrzeuge noch im Hochlauf der Technologie befinden, sind häufige Produktänderungen zu erwarten. Dies betrifft auch die Art und Anzahl der umfelderfassenden Sensoren sowie deren Position und Orientierung am Fahrzeug. Um auf diese Veränderungen reagieren zu können, soll der Prozess flexibel ausgelegt sein. Der Prozess soll auf Änderungen in der Anzahl, Anordnung und den Eigenschaften der Sensoren reagieren können. Dementsprechend sollen Hard- und Software des Prozesses flexibel und einfach anpassbar ausgelegt werden.

*Integrierbarkeit:* Wie beschrieben, soll der Prozess zur Realisierung des Inline-Konzeptes in bestehende Montagelinien integrierbar sein. Damit soll die Funktionsabsicherung dynamisch, also am bewegten Produkt durchgeführt werden können. Hierzu soll der Prozess durch einfache Betriebsmittel, welche keine tiefgreifenden Umbaumaßnahmen an der Prozessinfrastruktur des EoL erfordert, umsetzbar sein.

Durch Adressierung dieser Anforderungen kann im Folgenden ein Lösungskonzept für einen Prozess zur Funktionsabsicherung automatisierter Fahrzeuge in der Produktionslinie entwickelt werden. Der Zielprozess wird dabei robust und nachvollziehbar universell für alle Sensortypen einsetzbar sein. In den folgenden Kapiteln wird zunächst schrittweise ein Grobkonzept sowie darauf basierend die einzelnen Prozessschritte und schließlich die notwendigen Betriebsmittel entwickelt.



## 5 Entwicklung des Lösungskonzeptes

Die Entwicklung des Lösungskonzeptes erfolgt dem Vorgehen aus Abschnitt 4.1 nach in drei wesentlichen Schritten. Zunächst wird in Abschnitt 5.1 ein Grobkonzept entwickelt. Dieses Grobkonzept adressiert das grundlegende Vorgehen der Funktionsabsicherung und zur Ermittlung der extrinsischen Orientierung aller umfelderfassenden Sensoren eines automatisierten Fahrzeuges. Mit diesem Grobkonzept kann der Gesamtprozess in seine Teilaufgaben aufgeteilt und eine erste Konzeption der benötigten Betriebsmittel durchgeführt werden.

Im zweiten Schritt wird in Abschnitt 5.2 basierend auf diesem Grobkonzept ein finales Lösungskonzept entwickelt. Dazu werden die einzelnen Prozessschritte definiert und aus der definierten Gesamtaufgabe Teilaufgaben abgeleitet. Auf dieser Basis wird anschließend die finale Entwicklung der benötigten Betriebsmittel durchgeführt.

Nach der erfolgten Entwicklung einer finalen Lösung wird diese in Abschnitt 5.2.5 mit den eingangs definierten Anforderungen abgeglichen, um die Passfähigkeit der Lösung zu bewerten.

### 5.1 Grobkonzept für einen Prozess der Funktionsabsicherung

Die Kernaufgabe der Funktionsabsicherung ist die präzise und nachvollziehbare Überprüfung der extrinsischen Kalibrierung aller umfelderfassenden Sensoren eines automatisierten Fahrzeuges. Hierdurch können Einflüsse auf die Sensorik, welche nach der Fahrzeuginbetriebnahme in weiteren Prozessschritten wirken, detektiert und im Sinne einer Rekalibrierung minimiert werden. Damit steht als Grundaufgabe des Prozesses die sichere und reproduzierbare Ermittlung der Sensororientierung im Fokus.

Hierzu muss der in Abschnitt 2.1 beschriebene Zusammenhang zwischen KOS-Orientierung eines jeden Sensors  $S_i$  und einem Referenz-KOS  $F_{Ref}$  in Form einer gültigen Transformation bestimmt werden. Dieser Zusammenhang, bestehend aus translatorischer und rotatorischer Komponente ist noch einmal in Abbildung 5.1 dargestellt:

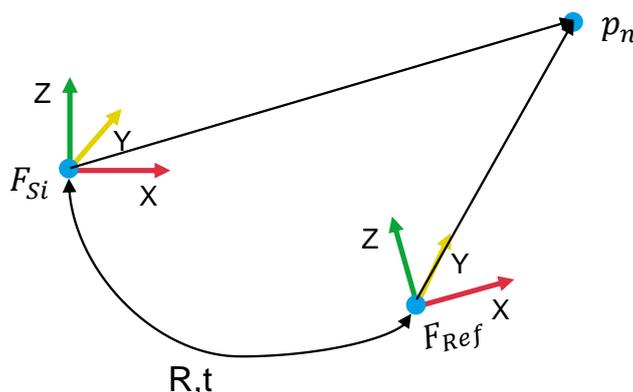


Abbildung 5.1: Rotation und Translation zweier Koordinatensysteme zueinander

Wie abgebildet, erfasst jeder Sensor  $S_i$  einen Referenzpunkt  $\mathbf{p}_n$  im Sensor-KOS  $F_{S_i}$  als  $\mathbf{p}_{S,n}$ , welcher auch als  $\mathbf{p}_{Ref,n}$  im Referenz-KOS  $F_{Ref}$  bekannt ist. Dies gilt für eine beliebige Anzahl  $N$  an Referenzpunkten. Hierzu werden homogene Koordinaten genutzt, welche eine einheitliche Darstellung von Koordinaten im projektiven Raum ermöglichen, was die Berechnungen im Folgenden vereinfacht. Es gilt der folgende Zusammenhang, welcher zur Lösung der Grundaufgabe genutzt wird:

$$\mathbf{p}_{S,n} = {}^S T_{Ref} * \mathbf{p}_{Ref,n} \quad (17)$$

Die Transformationsmatrix  ${}^S T_{Ref}$  beschreibt, wie in Abbildung 5.1 dargestellt, die Rotation und Translation der extrinsischen Kalibrierung. Gleichung (17) wird beschrieben als Problem der absoluten Orientierung, welches bei fehlerbehafteten Messwerten durch das nicht iterative Vorgehen nach Kabsch gelöst werden kann [HAR03; HOR88; KAB76; LAW19].

Hiernach stellt die Lösung der Gleichung die Minimierung des Fehlers zwischen gemessenem und transformiertem zu bekanntem Referenzpunkt, wie in (18) beschrieben, dar [KAB76]:

$$E(\mathbf{T}) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left\| {}^{Ref} T_S * \mathbf{p}_{S,n} - \mathbf{p}_{Ref,n} \right\|^2 \quad (18)$$

Zur Lösung des Problems kann zunächst die translatorische Komponente aus der Verschiebung der Referenzpunkte um ihren Schwerpunkt berechnet werden. Es ergibt sich die verschobene Punktmenge nach Gleichung (19),  $\hat{\mathbf{p}}_n$  bezeichnet dabei den Schwerpunkt der jeweiligen Punktmenge:

$$\overline{\mathbf{p}}_n = \mathbf{p}_n - \hat{\mathbf{p}}_n \quad (19)$$

Hieraus ergibt sich Gleichung (20) als vereinfachtes Problem, in welchem nur noch die Rotation der Punktmenge zueinander zu ermitteln ist:

$$E(\mathbf{R}) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left\| {}^{Ref} R_S * \overline{\mathbf{p}}_{S,n} - \overline{\mathbf{p}}_{Ref,n} \right\|^2 \quad (20)$$

Die Minimierung der Abweichung in Gleichung (20) erfolgt durch Lösung von Gleichung (21):

$${}^{Ref} R_S * \overline{\mathbf{p}}_{S,n} = \overline{\mathbf{p}}_{Ref,n} \quad (21)$$

Die Berechnung der optimalen Rotationsmatrix  $R$  ist nach [KAB76] auf Basis der Singulärwertzerlegung (engl.: Singular Value Decomposition, SVD) der aus den Punktpaaren berechneten Kovarianzmatrix  $C$ , wie in Gleichung (22)-(24), möglich:

$$\overline{\mathbf{P}}_S, \overline{\mathbf{P}}_{Ref} = \begin{bmatrix} \overline{p_{1x}} & \dots & \overline{p_{Nx}} \\ \overline{p_{1y}} & \dots & \overline{p_{Ny}} \\ \overline{p_{1z}} & \dots & \overline{p_{Nz}} \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$\mathbf{C} = \overline{\mathbf{P}}_S * \overline{\mathbf{P}}_{Ref}^T = \mathbf{V} * \mathbf{S} * \mathbf{W}^T \quad (23)$$

$${}^{Ref}\mathbf{R}_S = \mathbf{W} * \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & d \end{bmatrix} * \mathbf{V}^T, \text{ mit } d = \text{sgn}(\det(\mathbf{V} * \mathbf{W})) \quad (24)$$

Damit gilt folglich:

$$\overline{\mathbf{p}}_{S,n} = \mathbf{W} * \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & d \end{bmatrix} * \mathbf{V}^T * \overline{\mathbf{p}}_{Ref,n} \quad (25)$$

$$\mathbf{p}_{S,n} = \mathbf{W} * \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & d \end{bmatrix} * \mathbf{V}^T * \mathbf{p}_{Ref,n} + \mathbf{t} \quad (26)$$

Diesem Vorgehen folgend, müssen zur Ermittlung der extrinsischen Orientierung aller umfelderfassenden Sensoren eines Fahrzeuges in Bezug zu einer definierten Referenz Referenzpunkte  $\mathbf{p}_{Ref,n}$  zur Lösung des Gleichungssystems durch jeden Sensor  $S_i$  als Punkte  $\mathbf{p}_{S,n}$  im Sensorkoordinatensystem erfasst und einander zugeordnet werden.

Da es sich bei der zu entwickelnden Lösung um einen automatischen Prozess in der Fließmontagelinie handelt, kann der Klassifikation in Abschnitt 3.2 folgend, der Zielprozess damit als dynamisches, automatisches Offline-Verfahren definiert werden. Dabei sind aufgrund der Bewegung des Produktes die Sensoren bewegt und die Referenzpunkte statisch.

Die Gestaltung der Referenzpunkte stellt die Entwicklung eines Betriebsmittels dar. Dies kann erst nach der Konzeption des Gesamtprozesses durchgeführt werden. Die Art der Erfassung richtet sich nach der Auslegung der Referenzpunkte und kann damit ebenfalls erst nach dieser erfolgen.

Da der Prozess für alle Fahrzeuge mit umfelderfassender Sensorik einsetzbar sein soll, sind als Zusatzdaten nur die bekannten Montagepositionen am Fahrzeug nutzbar, da nicht jedes Fahrzeug über eine Schnittstelle zu den erfassten Odometriedaten verfügt.

### 5.1.1 Aufteilung der Gesamtaufgabe

Die Grundaufgabe stellt folglich die Erfassung einer Szene zur Erfassung von Referenzpunkten durch jeden Sensor eines Fahrzeuges dar. Anhand dieser Referenzpunkte kann anschließend die Rotation des Sensors im Referenz-KOS ermittelt werden. Diese Rotationen und deren Abweichungen von einer vorgegebenen Toleranz können anschließend in einem Evaluationsschritt genutzt werden, um die Funktionsfähigkeit der umfelderfassenden Sensoren zu beschreiben.

Die sensorübergreifende Evaluation der erfassten Daten zur Durchführung des Prozesses stellt dabei einen Anwendungsfall aus dem Bereich der Sensordatenfusion dar. Hier existieren verschiedene Ansätze zur gemeinsamen Verarbeitung unterschiedlich stark verarbeiteter Daten verschiedener Sensor-Typen. [ELM02; STÜ03]

	Radar	Lidar	Kamera
Daten	Rohdaten	Punktwolke	Eingangsbild
Merkmale	Referenzpunkte	Referenzpunkte	Referenzpunkte
Informationen	Rotationen	Rotationen	Rotationen

Abbildung 5.2: Fusionsebenen in Anlehnung an [EST05]

In Abbildung 5.2 sind die Ebenen, auf denen eine Datenfusion möglich ist, aufgezeigt. So können zur Funktionsabsicherung über die unterschiedlichen Sensor-Typen verschiedene Formen von Daten genutzt werden. Dabei wird in Daten, Merkmale und Informationen unterschieden. [EST05; STÜ03] Prinzipiell ist eine Auswertung und damit einer Beurteilung der Orientierung der Sensoren zueinander auf jeder Ebene möglich. Für die Auswertung auf Datenebene ist der Aufwand aufgrund stark unterschiedlicher Datenformate allerdings sehr hoch. Auf der Ebene der Merkmale besteht im vorliegenden Anwendungsfall die Möglichkeit, dass die Referenzpunkte aufgrund der Durchführung im Produktionsumfeld Abweichungen enthalten, was die Ergebnisse des Prozesses negativ beeinflussen kann. Somit ist es sinnvoll, eine Funktionsabsicherung auf der Informationsebene durchzuführen.

Auf Basis der definierten Anforderungen, dem Grobkonzept und der Festlegung der Absicherung auf Basis der Einzelrotationen der Sensoren kann die Gesamtaufgabe der Funktionsabsicherung in der Fließmontagelinie in die notwendigen Einzelschritte unterteilt werden. Hieraus lässt sich anschließend der Prozessablauf ableiten.

Darauf folgend können die einzelnen Schritte der Gesamtaufgabe Produkt, Prozess und Betriebsmittel zugeordnet werden. Die Erfassung der Referenzpunkte, welche das notwendige Betriebsmittel darstellen, muss durch die Fahrzeugsensorik, in diesem Sinne das Produkt, erfolgen. Die erfassten Sensordaten müssen daraufhin in eine geeignete Prozessinfrastruktur übertragen werden. Hier erfolgt die Extraktion der Referenzpunkte aus den Sensordaten sowie der eigentliche Prozess der Funktionsabsicherung im Sinne einer Evaluation der erfassten Daten. Die Gesamtaufgabe und ihre Teilschritte sind in Abbildung 5.3 dargestellt.

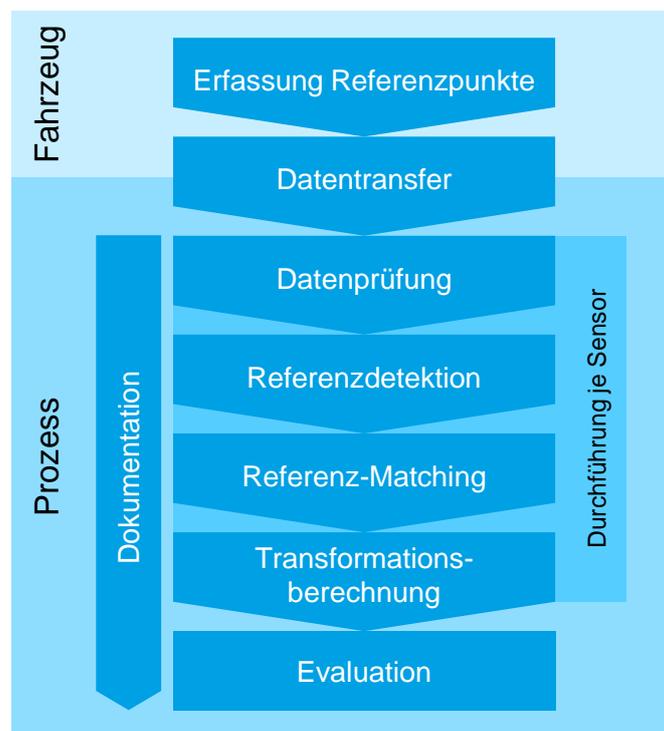


Abbildung 5.3: Aufteilung der Gesamtaufgabe

Die zu erfassende Referenzszene stellt in diesem Kontext einen Bereich der Montagelinie dar, in welchem das zu erfassende Referenznormal verortet ist. Zur Durchführung des Prozesses müssen die so erfassten Sensordaten an eine zentrale Prozessinfrastruktur übertragen werden, welche den Prozess nachvollziehbar und dokumentierbar für jedes Fahrzeug ausführt. Zur Übertragung der Sensordaten wird, wie in [GRU21] beschrieben, statt wie bisher die OBD die V2X-Schnittstelle genutzt.

Zur Sicherstellung der Funktion der umfelderfassenden Sensoren müssen im Rahmen der Funktionsabsicherung diese auf Konnektivität, Beschädigungen sowie Verschmutzungen und die valide extrinsische Kalibrierung geprüft werden.

Zur Prüfung der Konnektivität und des Sensorzustandes, können die empfangenen Daten jedes Sensors zunächst auf Vollständigkeit und die vorliegende Datenqualität analysiert werden. Anschließend müssen die erfassten Referenzpunkte in den Sensordaten identifiziert und extrahiert werden. Die so durch jeden Sensor erhaltenen Referenzpunkte müssen den bekannten Referenzpunkten innerhalb der Szene zugeordnet werden, sodass sich valide Punktpaare ableiten lassen, um Gleichung (17) zu lösen. Mit diesen Punktpaaren kann danach für jeden Sensor eine gültige extrinsische Orientierung im Referenzkoordinatensystem abgeleitet wer-

den. Maßgeblich ist hier vor allem der Yaw-Winkel (Rotation um die Z-Achse). Die verbleibenden Rotationen werden durch den Fahrzeugzustand sowie die Fahrdynamik beeinflusst und im Betrieb kompensiert, sofern sie den Montagetoleranzen entsprechen. [SCH23]

Aufgrund der unterschiedlichen Funktionsprinzipien und Datenformate der Einzelsensoren erfolgt die Datenprüfung und die Referenzdetektion spezifisch je Sensor-Typ. Nach diesen Schritten liegt mit der Extraktion der Referenzpunkte als Punktwolke ein standardisiertes Datenformat vor, welches sensorunabhängig in allen folgenden Prozessschritten weiterverwendet werden kann.

Auf Basis der Ergebnisse aller Sensoren kann abschließend eine Evaluation der Funktionsfähigkeit der Einzelsensoren durchgeführt werden. Hierzu müssen die durch den Prozess erfassten extrinsischen Orientierungen gemeinsam mit einer Kenngröße über die jeweilige Prozessqualität bewertet werden, um die Einhaltung der einzuhaltenden Toleranzen sicherzustellen.

Weiterhin ist eine nachvollziehbare Dokumentation des Gesamtprozesses notwendig. Hierzu werden die Ergebnisse jedes Einzelschrittes sowie das finale Prüfergebnis zusammengeführt und dokumentiert.

### 5.1.2 Konzeption des Referenznormals

Zur Finalisierung des Konzeptes ist die Auslegung des Referenznormals notwendig. Dies wird direkt von der Wahl der Referenzscene beeinflusst, welche wiederum direkt durch die Verortung des Prozesses in der Montagelinie beeinflusst wird.

Wie in den Anforderungen definiert, soll der Prozess zur Funktionsabsicherung aufgrund der Vielzahl an Einflüssen auf die Sensorik in der Montagelinie als letzter Schritt der Produktion erfolgen. Zusätzlich ist das Ziel der Arbeit die Adressierung des Inline Konzeptes, sodass durch die Integration der Funktionsabsicherung keine weiteren Prüfstände oder eine Parallelisierung im EoL notwendig ist.

Der Ansatz von [OTT21] adressiert bereits die mechanische Einstellung der spurgebenden Hinterachsgeometrie sowie die Kalibrierung der umfelderfassenden Sensorik in der Fließmontagelinie. Hierdurch wird das Fahrzeug bereits zu einem frühen Zeitpunkt der Montage dazu befähigt, sich in einer autonomen Fahrt durch die Montagelinie zu bewegen. Auf Basis dieser Vorbefähigung kann der letzte Takt der Montagelinie, wie in Abbildung 5.4 dargestellt, als „autonomer Abfahrbereich“ genutzt werden. Die Anforderung der Durchführung der Funktionsabsicherung kann damit als letzter Prozess in der Montagelinie sowie im Rahmen des Inline-Szenarios erfüllt werden.

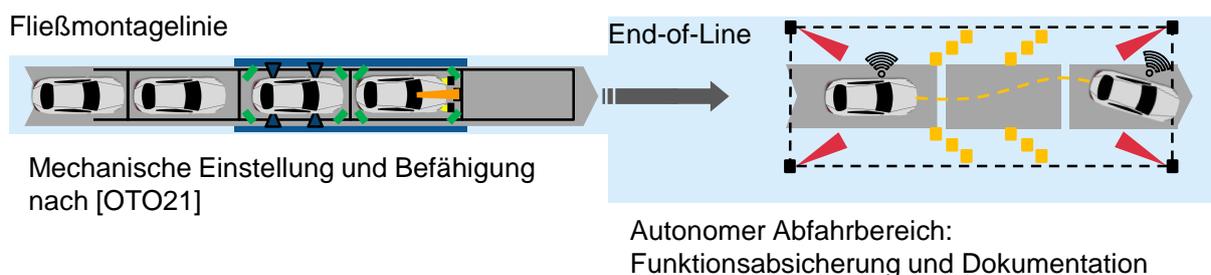


Abbildung 5.4: Verortung des Prozesses in der Montagelinie

Auf Basis dieser Verortung und unter Berücksichtigung der Anforderungen bezüglich der Universalität sowie der Integrierbarkeit sind alle Randbedingungen an die Entwicklung eines Referenznormals fixiert.

Zur Konzeption des Referenznormals muss zunächst zwischen einem targetbasierten oder einem targetlosen Verfahren gewählt werden. Hierzu muss die Anforderungen bezüglich der Nachvollziehbarkeit berücksichtigt werden. Targetlose Ansätze, wie der in [SCH23] vorgestellte, bieten zwar eine hohe Anzahl von Referenzpunkten zur Bestimmung der extrinsischen Orientierung, allerdings ist die Auswahl und damit auch eine Zuordnung bekannter Referenzpunkte aufgrund der verwendeten Algorithmen nicht klar definiert. Weiterhin sind die zur Berechnung genutzten Referenzpunkte in keinem Referenz-KOS bekannt. Dementsprechend ist für die Funktionsabsicherung, welche nachvollziehbar erfolgen muss, ein Prozess mit einem physischen und referenzierten Normal zu wählen.

Weiterhin muss auch die Anforderung an die Genauigkeit und Integrierbarkeit beachtet werden. Aktuelle Prozesse zur extrinsischen Kalibrierung verwenden, wie in Abschnitt 2.1 dargestellt, meist ein Referenznormal, welches zentral vor dem Fahrzeug positioniert werden muss. Um die Fließmontagelinie nicht zu blockieren, sind diese Lösungen verstellbar ausgelegt, so dass sie aus der Linie herausbewegt werden können. Bedingt durch diesen Systemaufbau und die dafür notwendige Aktorik, entsteht eine mehrgliedrige Toleranzkette des Gesamtprozesses. Diese ist in Abbildung 5.5 oben dargestellt.

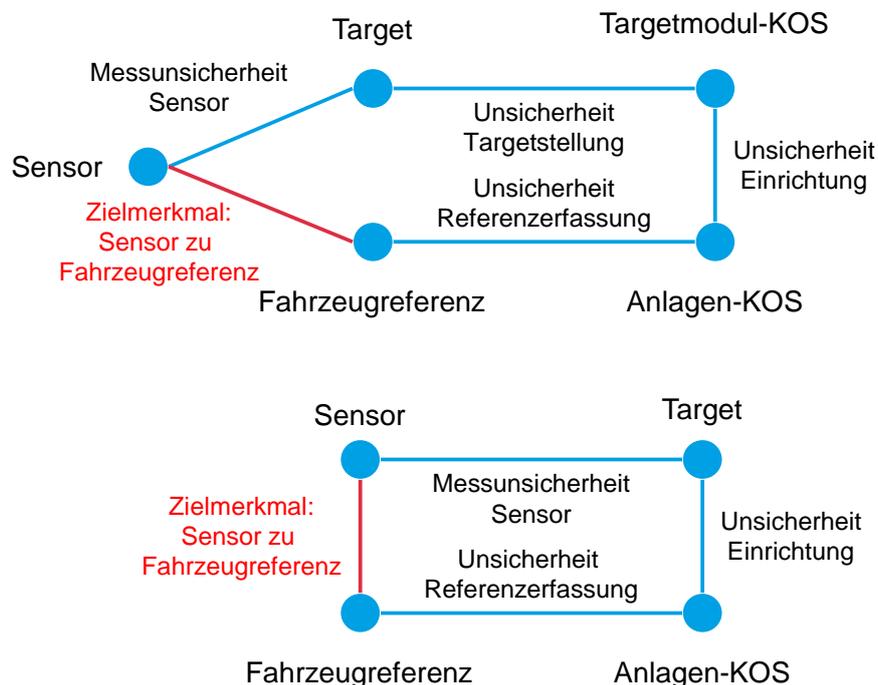


Abbildung 5.5: Toleranzketten von Inbetriebnahme (oben) und Lösungskonzept (unten)

Wie zu erkennen, hat der Aufbau zur Ausrichtung des Referenztargets einen Einfluss auf die maximal erreichbare Genauigkeit des Prozessergebnisses. Um diesen Effekt zu minimieren, wird für die Funktionsabsicherung ein Konzept ohne ein stellbares Referenznormal gewählt. Wie in Abbildung 5.5 unten dargestellt, verkürzt sich die Toleranzkette des Prozesses damit um mindestens ein Glied. Hierdurch kann die maximal erreichbare Genauigkeit im Vergleich

zum Stand der Technik gesteigert werden.

Um weiterhin, wie genannt, die Montagelinie nicht zu blockieren, muss das Referenznormal aus mehreren einzelnen Referenzmarken bestehen, sodass diese außerhalb der Fließrichtung der Fahrzeuge angeordnet werden können. Dieser Ansatz wird bereits im Stand der Forschung in verschiedenen Konzepten berücksichtigt und bietet keine Nachteile in Bezug auf die erreichbare Genauigkeit des Gesamtverfahrens (siehe Abschnitt 3.2). Die Auslegung des Referenznormals im Gesamten, als auch der Einzelmarken, hat starken Einfluss auf die Genauigkeit des Gesamtprozesses. Über die Anzahl der erfassten Referenzmarken kann eine Überbestimmung des mathematischen Problems in Gleichung (18) herbeigeführt werden, wodurch die Prozessgenauigkeit gesteigert werden kann.

Final muss die Anforderung nach Universalität berücksichtigt werden. Daraus resultierend müssen die Referenzmarken durch jeden Sensor-Typ erfasst werden können. Die Art von Referenznormal als ein von mehreren Sensor-Typen erfassbares, verteiltes Normal, wird als hybrides Multitarget beschrieben. Ähnliche Ansätze finden sich ebenfalls in verschiedenen existierenden Konzepten. Allerdings existiert kein Ansatz für die Kalibrierung von Radar, Lidar und Kamerasystemen im Verbund.

Der Kategorisierung in Abschnitt 3.2 folgend, ergibt sich mit der finalen Konzeption aus diesem Kapitel die Definition eines automatischen, dynamischen Offline-Prozesses mit dynamischer Sensorik. Zur nachvollziehbaren Referenzierung werden die in der Referenzszene verteilten Referenzmarken erfasst. Dies geschieht während der Fahrzeugbewegung in der Montagelinie und damit in mehreren Perspektiven. Wie zuvor beschrieben, werden keine Odometriedaten genutzt. Die Ermittlung der extrinsischen Orientierung erfolgt numerisch. Der Prozess ist dabei den Anforderungen genügend zum Ausschluss von nachträglichen Einflüssen als letzter Prozess der Montagelinie verortet.

## 5.2 Entwicklung des Gesamtprozesses

Die Entwicklung des Lösungskonzeptes erfolgt in den Schritten der Prozess- und Betriebsmittelentwicklung. Zunächst werden zur Entwicklung des Gesamtprozesses die im Grobkonzept definierten Teilaufgaben ausgeplant und die dazu notwendige Prozessinfrastruktur beschrieben. Im zweiten Abschnitt wird eine Lösung für das hybride Multitarget entwickelt, welches das notwendige Betriebsmittel darstellt.

Diese Entwicklungen stellen anschließend die Basis für die Entwicklung von drei Absicherungsszenarien dar. Zunächst wird zur Realisierung des Grundprozesses der Funktionsabsicherung ein Prozess zur stationären Funktionsabsicherung als Basisszenario definiert. Durch Berücksichtigung der spezifischen Herausforderungen eines dynamischen Prozesses kann dieser zu einem Prozess zur Funktionsabsicherung bei bewegtem Fahrzeug erweitert werden. Ein drittes Szenario stellt die Funktionsabsicherung ohne Referenzermittlung dar, was einen vereinfachten Anwendungsfall im Bereich des After-Markets beschreibt.

### 5.2.1 Modularer Absicherungsprozess

Nachdem durch das Grobkonzept die Anforderungen bezüglich Genauigkeit, Prozesssicherheit, Nachvollziehbarkeit, Dokumentation und Universalität adressiert wurden, können durch die Prozessauslegung die Anforderungen hinsichtlich Flexibilität und Integrierbarkeit erfüllt werden.

Zu den wesentlichen Wandlungsbefähigern zur Realisierung einer einfachen Rekonfiguration eines Systems zählen unter anderem die Modularität, Universalität und Kompatibilität. Die Modularität beschreibt dabei den Aufbau eines Systems aus standardisierten, austauschbaren Einheiten. Die Universalität bezeichnet die Gestaltung hinsichtlich verschiedener Anforderungen, in diesem Falle die Gestaltung zur Nutzung der verschiedenen Sensor-Typen sowie in einem statischen oder dynamischen Prozess. Als kompatibel werden vernetzte Systeme beschrieben, welche über einheitliche Schnittstellen verfügen. [KER21]

Folglich muss der Zielprozess modular aufgebaut werden, um eine einfache Rekonfiguration im Falle wechselnder Fahrzeugvarianten, Sensorkonfigurationen und FoVs zu ermöglichen. Hierdurch soll zu einer Weiterentwicklung der wenig wandlungsfähigen und monolithischen Prozesse des Standes der Technik beigetragen werden.

Im Folgenden werden die Teilaufgaben des Prozesses ausgeplant und diese anschließend zu Funktionsmodulen zusammengeführt. Dabei wird zwischen der Ausführung von Teilaufgaben im Fahrzeug und im Prozess unterschieden. Die Aufteilung des Gesamtprozesses in seine Module und Teilaufgaben ist in Abbildung 5.6 dargestellt.

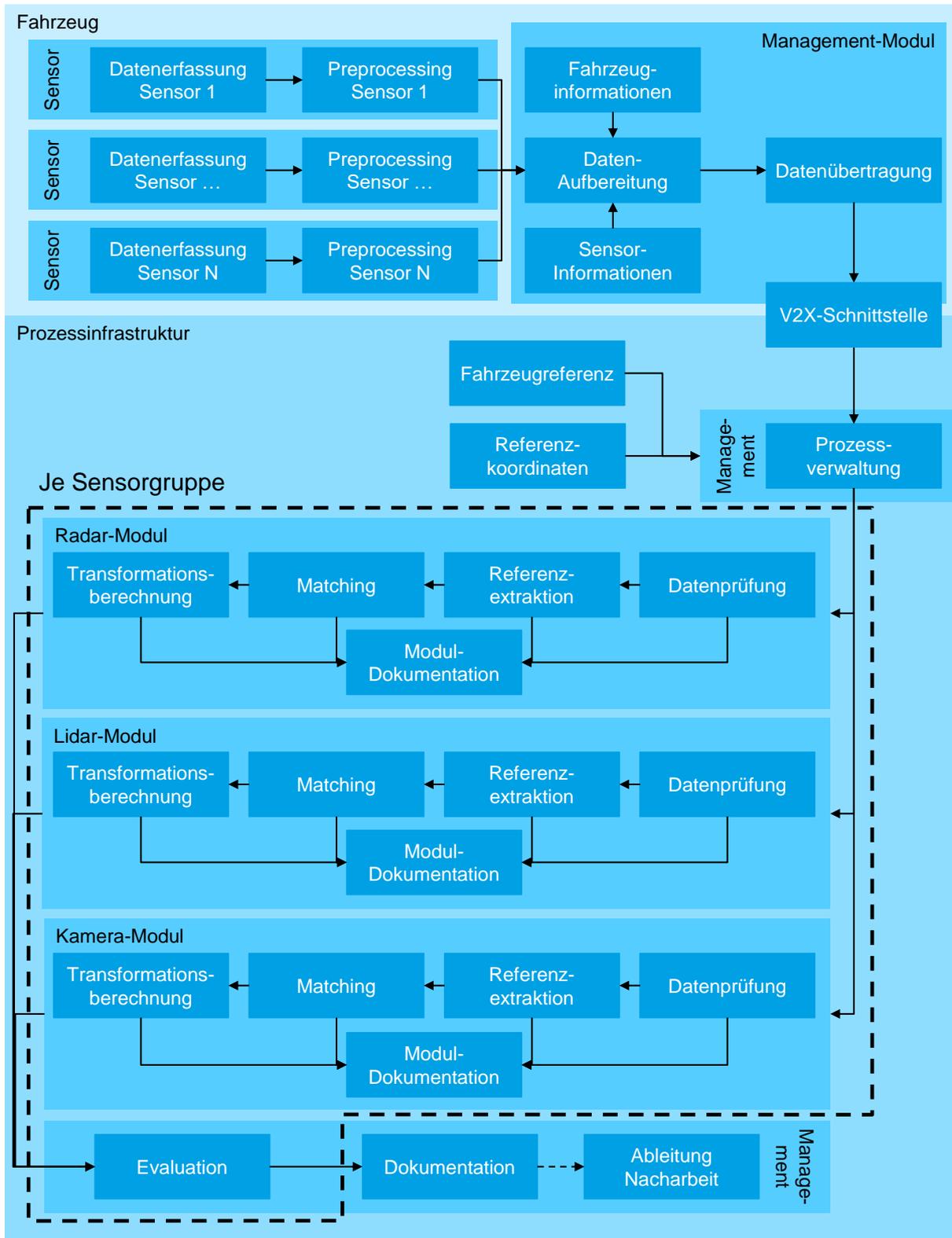


Abbildung 5.6: Aufteilung des Gesamtprozesses in Module und Teilaufgaben

### **Datenerfassung mittels umfelderfassender Sensoren**

Der erste Schritt des Prozesses ist die Erfassung der Referenzszene durch die umfelderfassenden Sensoren des Fahrzeuges. Dazu muss sich das Fahrzeug im Absicherungsbereich der Montagelinie befinden. Mittels V2X-Schnittstelle kann anschließend der Befehl zum Start der Absicherungsroutine gegeben werden.

Durch jeden Sensor, dessen Funktion abgesichert werden soll, wird eine definierte Anzahl an Messungen aufgenommen. Nach der Aufnahme erfolgt eine Datenvorverarbeitung durch jeden Sensor, bei dem die Einzelframes mittels der intrinsischen Parameter korrigiert werden.

Die so erhaltenen Rohdaten jedes Sensors werden fahrzeugintern an ein Management-Modul übertragen. Dieses Modul fasst die aufgenommenen Rohdaten, gemeinsam mit den für die Absicherung notwendigen Informationen über die Sensorik (Typ, Einstellgrenzen, Gruppe), den allgemeinen Fahrzeugdaten (Variante, ID, Anzahl der Sensoren) und der Fahrzeugreferenz zusammen.

Dieser Datensatz wird abschließend in einem kompakten Format verschlüsselt und damit unveränderlich über die V2X Schnittstelle dem Absicherungsprozess bereitgestellt.

### **Prozess-Management**

Nach Erfassung des Absicherungsbereichs und der Übertragung des Datenpaketes eines Fahrzeuges müssen auf Prozessebene die Daten zur Bearbeitung nach Sensor-Typ und Sensorgruppe (Front-View, Rear-View, etc.) aufgeteilt werden. Die Daten der Einzelsensoren werden anschließend gemeinsam mit den Koordinaten der korrespondierenden Referenzmarken durch ein zentrales Verwaltungsmodul den Modulen zur Absicherung von Radar, Lidar und Kamera übergeben. Dazu empfängt ein Prozessmanagement-Modul die Daten jedes Fahrzeuges und teilt diese zunächst nach korrespondierenden Referenzpunkten und anschließend nach Sensor-Typ auf. Hierbei darf aufgrund der Nachvollziehbarkeit der Einzelschritte keine Veränderung der Daten erfolgen. Den folgenden Modulen zur Durchführung der Absicherungsaufgabe wird also der unveränderte Rohdatensatz eines Einzelsensors sowie die Referenzkoordinaten in Form einer dreidimensionalen Punktwolke bereitgestellt.

### **Sensorspezifische Funktionsabsicherung**

Nach der Aufteilung der Sensorrohdaten erfolgt der Schritt der Funktionsabsicherung der Einzelsensoren. Hierbei muss der Prozessablauf nach Sensor-Typ unterschieden werden, da sich die Einzelfunktionen aufgrund der unterschiedlichen Erfassungsarten, Eigenschaften und damit einhergehenden Datenformaten unterscheiden.

Zur Prüfung des allgemeinen Sensorzustandes erfolgt zunächst, wie im Grobkonzept erläutert, eine Prüfung der Eingangsdaten. Diese ermöglicht eine Prüfung der Datenübertragung sowie einen ersten Rückschluss auf mögliche Beschädigungen oder Verschmutzungen des Sensors. Weiterhin wird durch diesen Schritt eine weitere Ausführung der folgenden Funktionen mit fehlerhaften Daten vermieden, da die Veränderung eines Sensors zu verfälschten Prozessergebnissen führen kann.

Bei fehlerfreien Rohdaten folgt anschließend der Schritt der Referenzextraktion. Dabei werden aus den sensorspezifischen Rohdaten die Koordinaten aller durch den Sensor erfassten potenziellen Referenzmarken als dreidimensionale Punktwolke in kartesischen Koordinaten ermittelt.

In diesen ermittelten Koordinaten können sich aufgrund der Eigenschaften der Sensoren und aufgrund von Einflüssen des Produktionsumfeldes Phantomziele befinden. Um die korrekten Korrespondenzen zwischen allen erkannten möglichen Referenzpunkten im Sensorkoordinatensystem und allen existierenden Referenzpunkten im Referenzkoordinatensystem zu bestimmen, muss ein als Matching bezeichneter Schritt durchgeführt werden. Das Ergebnis dieses Schrittes sind die Punktpaare aller erfassten Referenzmarken und ihrer korrespondierenden Koordinaten im Bezugs-KOS in Form dreidimensionaler kartesischer Koordinaten. Mittels dieser Punktpaare kann anschließend der Schritt zur Bestimmung der extrinsischen Parameter des Sensors erfolgen.

In jedem Schritt des Absicherungsmoduls muss für die Umsetzung der nachvollziehbaren Dokumentation ein Wert zur Beschreibung der Ergebnisgüte erhoben werden. Dieses Gütekriterium ist dabei abhängig von der Art der Funktion. So kann die Güte der Referenzextraktion durch die Güte der Einzelschritte dieser Funktion dargestellt werden, die Güte der Transformationsbestimmung beispielsweise durch Fehlermaße, wie den mittleren quadratischen Fehlern bezogen auf die Referenzpunkte.

Die sensorspezifische Auslegung dieser Schritte wird in Abschnitt 5.2.3 beschrieben.

### Evaluation

Nach Durchführung aller sensorspezifischen Prüfungen erfolgt die Evaluation der Prozessergebnisse. Damit stellt dieser Schritt die Konsolidierung aller sensorspezifischen Teilergebnisse und somit den Kern der Funktionsabsicherung des Gesamtsystems dar. Die Aufteilung dieses Schrittes ist in Abbildung 5.7 dargestellt.

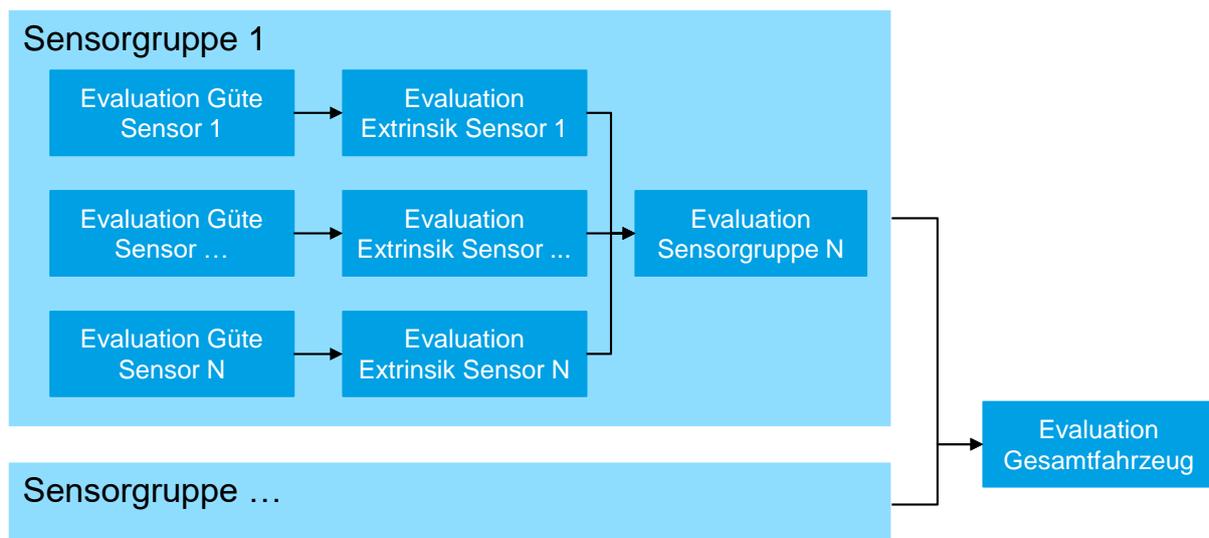


Abbildung 5.7: Evaluation des Gesamtprozesses

Zunächst erfolgt analog zur sensorspezifischen Funktionsabsicherung die Evaluation jeder Sensorgruppe. Um ein Maß für die Funktionsabsicherung zu erhalten, stellt jede Einzelfunktion eines Moduls als Ergebnis einen Gütefaktor bereit. Dieser Gütefaktor beschreibt in einem normierten Bereich zwischen 0 und 1 die Qualität der Funktionsausführung und ist damit funktionspezifisch zu definieren, wobei 0 eine schlechte und 1 die maximale Güte darstellt.

Mit diesem Gütefaktor wird zunächst für alle Sensoren einer Gruppe die Güte der Funktionsabsicherung der Einzelsensoren ausgewertet. Die Güte für einen Einzelsensor  $G_{Sn}$  ergibt sich damit nach Gleichung (27) aus dem Produkt der Einzel-Güten der zur Absicherung verwendeten Funktionen  $G_{Fn}$  (Datenprüfung, Referenzextraktion, Matching und Transformationsberechnung).

$$G_{Sn} = \prod_1^N G_{Fn} \quad (27)$$

Liegt die Gesamtgüte eines Sensors nahe 1 und weicht keine der einzelnen Gütefaktoren zu stark von ihrem Sollwert ab, kann davon ausgegangen werden, dass der Prozess ohne negativ beeinflussende Abweichungen durchlaufen wurde.

Anschließend werden die bestimmten extrinsischen Parameter evaluiert. Hierzu werden die Abweichungen jedes Sensors von seiner Solllage bestimmt. Aus den ermittelten Rotationen und der bekannten Fahrzeugreferenz wird die Abweichung unter Beachtung der maximal zulässigen Abweichungen bewertet.

Nachdem so die Güte der Einzelsensoren und die extrinsischen Parameter jedes Sensors einer Sensorgruppe bewertet wurden, können diese Ergebnisse je Sensorgruppe zusammengefasst werden. Die Güte des Gesamtfahrzeuges  $G_{Fzg}$  ergibt sich analog aus dem Produkt der Güten der Einzelsensoren  $G_{Sn}$ .

$$G_{Fzg} = \prod_1^N G_{Sn} \quad (28)$$

### Automatisierte Ableitung von Nacharbeitsumfängen

Im Falle einer geringen Güte des Gesamtprozesses kann aus den Ergebnissen der Einzel-funktionen automatisiert eine Fehlerursache abgeleitet und hieraus eine Nacharbeitsanfor-derung generiert werden. Hierzu kann zunächst wie in Abbildung 5.8 vereinfacht dargestellt eine Ursache bestimmt werden. Die zugehörigen Fehlertabellen sind in Anhang A1.1 – A1.3 dar-gestellt.

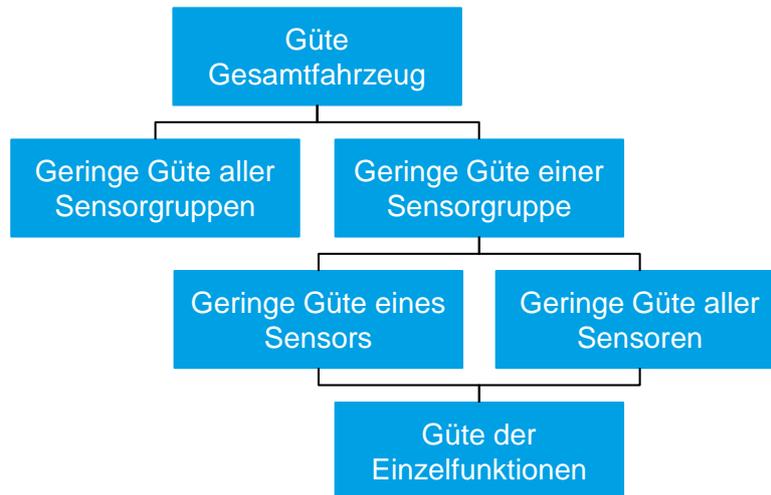


Abbildung 5.8: Unterscheidung der Fehlerursache

Im Falle einer geringen Gesamtgüte muss zunächst geprüft werden, ob diese aufgrund einer geringen Gesamtgüte aller Sensorgruppen oder aufgrund einer geringen Güte einer spezifi-schen Sensorgruppe zustande kommt.

Im ersten Fall bedeutet diese Abweichung eine gleichförmige Beeinträchtigung aller Sensoren und damit eine Ursache im Gesamtprozess, wie veränderte Referenzmarken oder Umweltein-flüsse.

Im Fall einer geringen Güte einer mehrerer oder gegebenenfalls aller Sensorgruppen kann die Ursache in der geringen Güte eines einzelnen Sensors oder in der geringen Güte aller Sen-soren der Gruppe in Frage liegen. Ist die Güte aller Sensoren der Gruppe kleiner als der Soll-wert, kann dies auf Abweichungen innerhalb der Sensorgruppe hindeuten. Sowohl im Fall der Abweichungen bedingt durch einen einzelnen Sensor, als auch bedingt durch alle Sensoren der Gruppe müssen die korrespondierenden Güten der Einzelfunktionen untersucht werden, um die Fehlerursache zu bestimmen. Hierbei kann sich am Ablauf der Funktionsabsicherung nach Abbildung 5.6 orientiert werden. Abweichungen in der Prüfung der Rohdaten sprechen für Beschädigungen, Verschmutzungen oder eine fehlerhafte Montage eines Einzelsensors oder der gesamten Sensorgruppe. Eine geringe Güte der Referenzextraktion oder des Mat-ching bei hoher Güte der Eingangsdaten kann auf eine Beschädigung der Referenzmarken oder eine Störung des Prozesses durch Umwelteinflüsse hinweisen. Eine niedrige Güte der Transformationsberechnung hingegen weist auf einen Fehler im Berechnungsprozess hin, so-fern Extraktion und Matching eine hohe Güte aufweisen.

## Dokumentation

Wie in Abbildung 5.6 erkennbar, erfolgt die Dokumentation der Einzelschritte dezentral in den einzelnen Funktionsmodulen. Abschließend wird aus den Einzeldokumentationen durch das Prozessmanagement-Modul eine für das Fahrzeug gültige Gesamtdokumentation erstellt. Dazu werden, beginnend mit den Rohdaten, die Ergebnisse aller Prozessschritte und Teilfunktionen gemeinsam mit ihrem Gütefaktor im fahrzeugspezifischen Datensatz gespeichert. Hierdurch wird ein Rückschluss auf die Ergebnisse der Einzelschritte sowie auf die Güte der Durchführung der Einzelschritte entlang der gesamten Prozesskette ermöglicht. Für den Nachweis der fehlerfreien Absicherung wird der Datensatz anschließend verschlüsselt und archiviert. Der Datensatz kann durch den OEM archiviert oder via V2X Schnittstelle direkt im Fahrzeug hinterlegt werden. Somit können Daten, wie die Fahrzeugreferenz, als auch die Orientierungen aller Sensoren für Nachweis-, Reparatur- und Einstellprozesse, nach der Auslieferung des Fahrzeuges bereitgestellt werden.

### 5.2.2 Hybrides Multitarget

Der Gesamtprozess stellt übergeordnet eine Funktion dar, welche als Eingangsdaten die durch die Sensoren erfassten Referenzmarken und die Koordinaten der Referenzmarken im Referenzkoordinatensystem erhält. Hieraus werden die extrinsischen Parameter aller Sensoren als Ausgabewerte bestimmt. Die Genauigkeit des Gesamtprozesses hängt somit von der Genauigkeit der Eingangsparameter und der Genauigkeit der Berechnungen selbst ab. Die Genauigkeit der Koordinaten der Referenzmarken ist abhängig von der initialen Einrichtung des Prozesses. Die Genauigkeit der Erfassung der Referenzmarken wird von der Ungenauigkeit der Sensorik und den Fehlern der Extraktionsalgorithmen beeinflusst. Dieser Zusammenhang ist Abbildung 5.9 dargestellt.

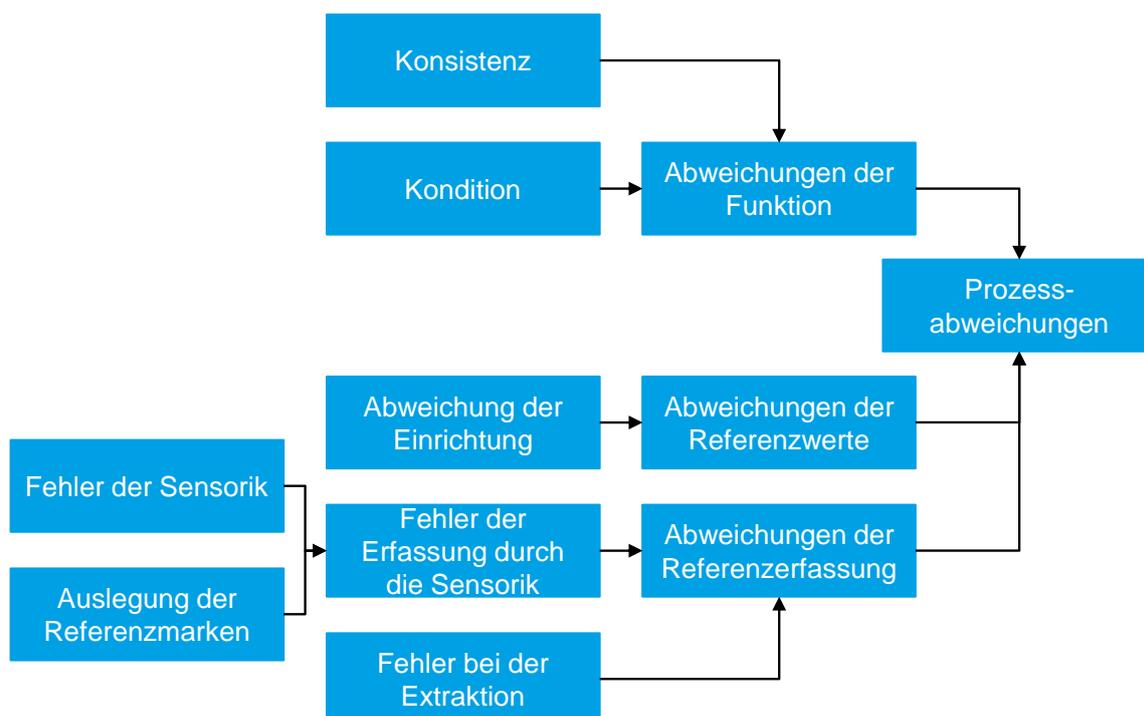


Abbildung 5.9: Abhängigkeiten der Gesamtgenauigkeit

Die Genauigkeit der Gesamtfunktion im mathematischen Sinne kann durch ihre Kondition und ihre Konsistenz beurteilt werden. Die Konsistenz einer Funktion bezeichnet die Abweichung der Lösung bei exakten Eingangsdaten [BAR23]. Diese ist lediglich abhängig von der verwendeten Funktion und kann daher nur durch die Wahl des numerischen Lösungsverfahrens beeinflusst werden.

Die Kondition beschreibt die Abweichung des Ergebnisses der Funktion vom korrekten Ergebnis bei fehlerbehafteten Eingangsdaten. Sie stellt also ein Maß der Robustheit dar. Zur Bestimmung dieser wird nach Gleichung (29) bis (33) zwischen dem relativen Eingabe- und Ausgabefehler unterschieden. [BAR23; DAH22]

$$f(x) = y \text{ und } f(\tilde{x}) = \tilde{y} \quad (29)$$

$$\text{mit } \Delta x = \tilde{x} - x \quad (30)$$

$$\text{und } \Delta y = \tilde{y} - y = f(\tilde{x}) - f(x) \quad (31)$$

$$\frac{\|f(\tilde{x}) - f(x)\|}{\|f(x)\|} = \frac{\|\tilde{y} - y\|}{\|y\|} = \frac{\|\Delta y\|}{\|y\|} \text{relativer Ausgabefehler} \quad (32)$$

$$\frac{\|\tilde{x} - x\|}{\|x\|} = \frac{\|\Delta x\|}{\|x\|} \text{relativer Eingabefehler} \quad (33)$$

Zur Beschreibung der Kondition einer Funktion kann die Konditionszahl  $\kappa$  genutzt werden, welche nach Gleichung (34) definiert ist [BAR23]. Diese Konditionszahl ist stets größer gleich 1 [DAH22]. Ist  $\kappa$  deutlich größer 1, gilt das Problem oder die Lösungsfunktion des Problems als schlecht konditioniert. [BRA19]

$$\frac{\|\Delta y\|}{\|y\|} \leq \kappa * \frac{\|\Delta x\|}{\|x\|} \quad (34)$$

Folglich muss der Fehler der Eingangsdaten möglichst minimal gehalten werden, um die Genauigkeit der Gesamtfunktion und damit auch die Kondition dieser möglichst zu optimieren. Weiterhin beeinflussen das Problem selbst sowie die Funktion die Robustheit des Verfahrens. Zusätzlich ergeben sich Optimierungspotenziale in der Art der Berechnung der Lösung auf numerischer Ebene.

Zur Optimierung der Genauigkeit des Gesamtverfahrens müssen zunächst die Eingangsparameter optimiert werden. Dazu müssen die Einzelmarken so ausgelegt werden, dass deren Lage zum Referenzkoordinatensystem mit einem präzisen Messmittel zur Einrichtung des Prozesses wiederholbar genau bestimmbar ist.

Weiterhin muss die Genauigkeit der Koordinaten der erfassten Referenzmarken im Sensorkoordinatensystem als zweiter Eingangsparameter möglichst hoch sein. Diese ist abhängig von der Genauigkeit der Erfassung durch die Sensorik und der Genauigkeit der Extraktion der erfassten Marken aus den Sensordaten. Dies wird über die sensorspezifischen Effekte und damit die Auslegung und Anordnung der Einzelmarken beeinflusst.

Zusammengefasst ist die Genauigkeit des Prozesses, neben numerisch bedingten Einflüssen, welche nur bedingt verändert werden können und zudem vergleichsweise klein sind, stark abhängig von der Auslegung und Anordnung der Referenzmarken. Im Folgenden wird daher auf Basis des definierten Multitargets zunächst die Auslegung der Einzelmarken und anschließend die Anordnung dieser beschrieben. Darauffolgend können die Algorithmen zur Referenzextraktion entwickelt werden.

### Auslegung der Einzelmarken

Bei der Auslegung der Einzelmarken muss die deutliche Erfassbarkeit durch alle Sensor-Typen, die Robustheit gegenüber Umwelteinflüssen sowie die Integrierbarkeit in die Fließmontagelinie und die wiederholbar präzise Einmessbarkeit im Referenz-KOS berücksichtigt werden. Weiterhin müssen sensorspezifische Anforderungen, bedingt durch die unterschiedlichen Wirkprinzipien der Sensoren, berücksichtigt werden. Daher werden basierend auf sensorspezifischen Effekten zunächst optimale Referenzstrukturen für Radar, Lidar und Kamera ausgelegt und diese anschließend kombiniert.

Für die Zielerfassung mittels Radarsensor muss aufgrund des Wirkprinzips ein metallisches Target verwendet werden. Die Genauigkeit der Zielerfassung bei Radarsensoren ist stark von der Intensität der reflektierten Welle und dem Winkel des Ziels relativ zum Sensor abhängig (siehe Abschnitt 2.2.2). Häufig werden zur Kalibrierung von Radarsensoren daher metallische Cornerreflektoren verwendet [DOM19; WIN15a]. Diese stellen näherungsweise optimale Retroreflektoren dar, bei denen durch eine rechtwinklige Anordnung von drei metallischen Flächen zueinander der Winkel der eintreffenden Welle dem Winkel der reflektierten Welle entspricht. Dieses Prinzip ermöglicht eine starke Reflexion der elektromagnetischen Wellen. Dieser Effekt tritt auch bei einem Winkelversatz auf, sodass eine näherungsweise ideale Reflexion in Bereichen bis  $\pm 15^\circ$  möglich ist. Eine Darstellung der Reflexion mit ein- und ausgehender Welle eines Cornerreflektors findet sich in Abbildung 5.10:

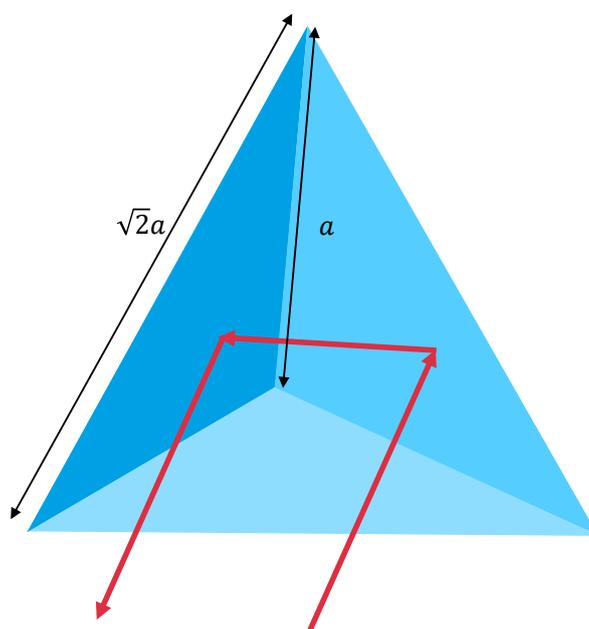


Abbildung 5.10: Cornerreflektor zur Radardetektion

Der die Intensität bei der Zielerfassung beschreibende Radarquerschnitt (RCS)  $\sigma$  eines Cornerreflektors ergibt sich nach Gleichung (35) aus der Seitenlänge  $L$  der Dreiecksflächen [WIN15a]:

$$\sigma = \frac{3\pi L^4}{4\lambda^2}, \text{ mit } L = \sqrt{2}a \quad (35)$$

Cornerreflektoren stellen somit eine gute Möglichkeit der Zieldetektion im Produktionsumfeld dar, da die zu empfangende Radarsignatur deutlich größer ist, als Signaturen von Störobjekten im Produktionsumfeld. Weiterhin wird die empfangene Signalstärke aufgrund der Winkelunabhängigkeit nur wenig von der Ausrichtung des Targets relativ zur Nulllinie des Sensors beeinflusst. Damit ist diese Art Reflektor gut geeignet, um einen in der Produktionsumgebung markanten Referenzpunkt zu realisieren, welcher nur wenig durch die Orientierung des Sensors beeinflusst wird.

Nachteilig ist die Möglichkeit destruktiver Interferenzen, welche aufgrund sehr starker Reflexionen bei exakt mittiger Ausrichtung zum Radarsensor auftreten kann und damit die empfangene Signalstärke reduziert [SCH23]. Aufgrund der geringen Wahrscheinlichkeit dieses Grenzfalls, kann dieser Effekt vernachlässigt werden.

Für die Erfassung durch Lidarsensoren besteht auf Materialebene lediglich die Anforderung einer guten Reflektivität an das Target. Somit scheiden transparente Werkstoffe aus. Stark reflektierende Oberflächen können ebenfalls nicht genutzt werden, da diese zu Phantomzielen führen können. Analog zu Radarsensoren besteht auch bei Lidarsensoren eine Korrelation zwischen Erfassungswinkel und Abweichung der Messwerte. Aufgrund der scannenden Abtastung ist für die Genauigkeit der Detektion weiterhin die Target-Geometrie wesentlich. Wie in Abbildung 5.11 vereinfacht dargestellt, kann aufgrund der Abtastung des Raumes in mehreren Scanebenen bei der Objektrekonstruktion rechteckiger Strukturen ein maximaler Messfehler auftreten, wenn die Objektkante genau zwischen zwei Scanebenen (schwarz) liegt. Die abgetasteten Bildpunkte (rot) ermöglichen dann nur eine fehlerbehaftete Rekonstruktion des Objektes (rot), was anschließend, wie dargestellt, zu einem fehlerhaften Targetmittelpunkt (rotes X) führt. Aufgrund dieses Effektes werden in der Forschung runde Referenzmarken verwendet, welche wie dargestellt dieses Problem aufgrund ihrer Geometrie umgehen [PER17]. Die Anzahl der erfassten Punkte sinkt aufgrund der räumlichen Verteilung der Lichtstrahlen über den Öffnungswinkel des Sensors mit zunehmendem Abstand zum erfassten Ziel. Dies stellt eine Herausforderung für die Extraktion des Targets aus den Sensordaten dar. Für die Auslegung einer runden Referenzmarke ist daher die Größe so zu wählen, dass bei gegebener Winkelauflösung des Sensors und bekanntem Arbeitsabstand ausreichend Punkte zur Rekonstruktion des Mittelpunktes abgetastet werden können.

Formel (36) beschreibt den Zusammenhang der Punkte  $n$  bei einem Kreisdurchmesser  $d$  und einem Abstand  $a$ , sowie einem Öffnungswinkel  $\alpha$ :

$$n = \frac{d}{a * \tan(\alpha)} \quad (36)$$

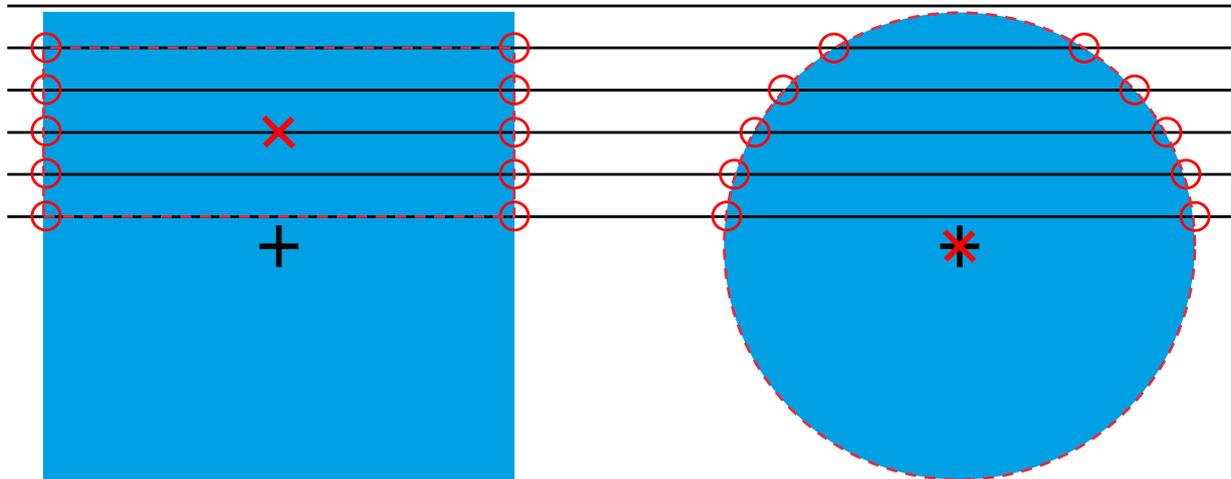


Abbildung 5.11: Vorteile einer runden Struktur zur Lidardetektion

Anders als Lidar- und Radarsensoren zeichnen sich Kameras durch eine hohe Auflösung aus. Durch die stattfindende Projektion in die Bildebene sind dabei jedoch keine direkten Tiefeninformationen verfügbar. Aufgrund des passiven Sensorkonzeptes sind sie zudem stark belichtungsabhängig. In der Kalibrierung von Kameras werden daher verschiedene Ansätze von Referenzmarken genutzt, die Muster mit möglichst hohem Kontrast aufweisen [OLS11; OPE21; OPE22]. Hierdurch können auch bei schlechten Belichtungsverhältnissen ausreichend Referenzpunkte mit einer relativ hohen Genauigkeit rekonstruiert werden. Da der Pixelfehler je Merkmalspunkt mit zunehmender Entfernung und schwächerem Kontrast steigt, ist der Arbeitsabstand hinreichend klein oder das Referenzmuster ausreichend groß zu wählen [FIE14].

Zur Realisierung eines Multitargets müssen die Ansätze für Radar, Lidar und Kamera zusammengeführt werden. Dabei ist es von Vorteil, wenn aus den Sensordaten jedes Sensor-Typen die Rekonstruktion eines gemeinsamen punktförmigen Merkmals möglich ist. Hierdurch kann im weiteren Verlauf des Prozesses gewährleistet werden, dass jeder Sensor die Zielmarke präzise an der gleichen Position erfasst.

Abbildung 5.12 zeigt das aus den Einzelüberlegungen entstehende Konzept für eine Multireferenzmarke. Dabei befindet sich der Cornerreflektor in der Mitte der kreisförmigen Struktur zur Erfassung durch den Lidar. Auf dem Außenring des Targets ist für die präzise Erfassung durch Kamerasysteme ein hoher Kontrast durch einen weißen, sowie einen schwarzen Bereich vorgesehen.

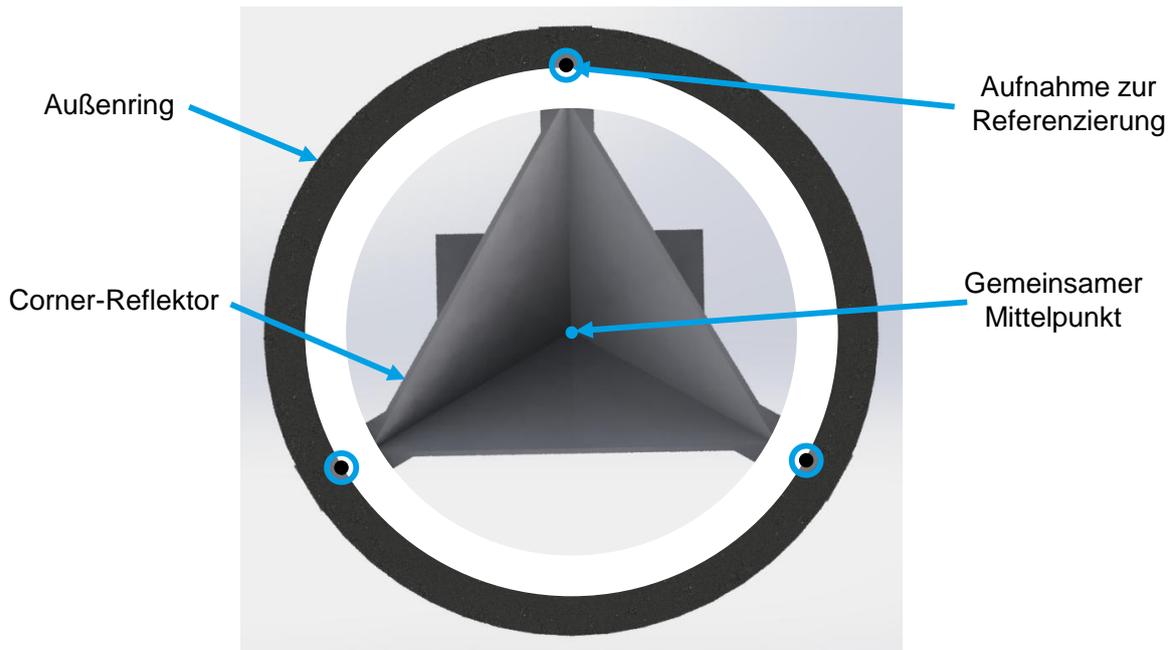


Abbildung 5.12: Frontansicht einer Multi-Referenzmarke für Radar, Lidar und Kamera

Die Erfassung des Außenrings und die Erfassung des Cornerreflektors ermöglichen die Bestimmung des gemeinsamen Mittelpunktes der Referenzmarke. Zur Bestimmung der Position dieses Mittelpunktes im Referenz-KOS verfügt die Referenzmarke über drei Präzisionsbohrungen zur Aufnahme von Referenzspiegeln zur Vermessung durch ein Laserinferometer. Dies ermöglicht die einfache und robuste Erfassung der Position und Lage jeder Referenzmarke im Referenz-KOS.

### Anzahl der Referenzmarken

Für die Auslegung des hybriden Multitargets muss neben der Auslegung der Einzelmarken auch die Anzahl der Referenzmarken definiert werden. Diese hat einen Einfluss auf die Genauigkeit und Robustheit des Gesamtprozesses. Wie in Abschnitt 5.1 beschrieben, kann die Genauigkeit mittels Überbestimmung des zu lösenden mathematischen Problems gesteigert werden. Dementsprechend sollen mehr als die mindestens zur Lösung des Problems benötigte Anzahl an Referenzpunkten erfasst werden. Der zur Lösung des Problems vorgestellte Algorithmus nach Kabsch bestimmt drei Translations-, als auch drei Rotationsparameter und damit alle extrinsischen Parameter jedes Sensors. Das in Gleichung (18) beschriebene Problem hat damit sechs Freiheitsgrade. Da im vorliegenden Anwendungsfall allerdings auch Kamerasysteme abgesichert werden müssen, muss neben den sechs extrinsischen Parametern zusätzlich ein Skalierungsfaktor bestimmt werden, was die Zahl der Freiheitsgrade auf sieben erhöht. Somit sind zur Lösung des Problems mindestens drei Punkte zu erfassen, da diese im dreidimensionalen Raum genügend Parameter zur Bestimmung der Freiheitsgrade bieten. [HOR88; SZE22]

Für eine Überbestimmung und eine damit mögliche Steigerung der Genauigkeit durch Eliminierung von Messfehlern soll mindestens die doppelte Anzahl an benötigten Referenzpunkten erfasst werden. Um zusätzlich die Robustheit des Prozesses zu steigern, soll diese Anzahl überschritten werden, um auch im Falle einer Verdeckung oder Beschädigung einer Einzelmarke im Produktionsumfeld genaue Prozessergebnisse zu ermöglichen. Da für eine Bestimmung von Rotation und Translation mindestens drei Punkte notwendig sind und die doppelte Anzahl hiervon überschritten werden soll, wird die Anzahl der je Sensorgruppe in einem gemeinsamen FoV zu erfassenden Referenzmarken auf acht festgelegt.

### Anordnung der Referenzmarken

Die Anordnung der Einzelmarken ist von der Sensorkonfiguration der abzusichernden Fahrzeuge abhängig. Sensoren einer Sensorgruppe verfügen über ein sich überschneidendes FoV, Einzelsensoren haben in der Regel nur eine minimale oder keine Überschneidung des FoV zu anderen Sensoren, wie im Demonstrationsszenario in Abbildung 2.11 gezeigt.

Die Anordnung der Referenzmarken unterscheidet sich daher je Sensorgruppe und Anwendungsfall. Für die Front- und Heck-Sensorik hochautomatisierter Fahrzeuge können, aufgrund der Notwendigkeit der Erfassung des rückwärtigen und vorausfahrenden Verkehrs, sich überschneidende FoVs getrennter Sensorgruppen angenommen werden. Diese umfassen Radar, Lidar und Kamera. Durch die Kombination aller drei Sensor-Typen stellt dies den komplexesten Fall der Funktionsabsicherung dar. Weiterhin werden zur Erfassung des seitlichen Umfeldes je nach Anwendung Radar oder Kameras verwendet. Die Anordnung der Einzelmarken für den Fall von sich überschneidenden FoVs unterschiedlicher Sensor-Typen ist in Abbildung 5.13 dargestellt.

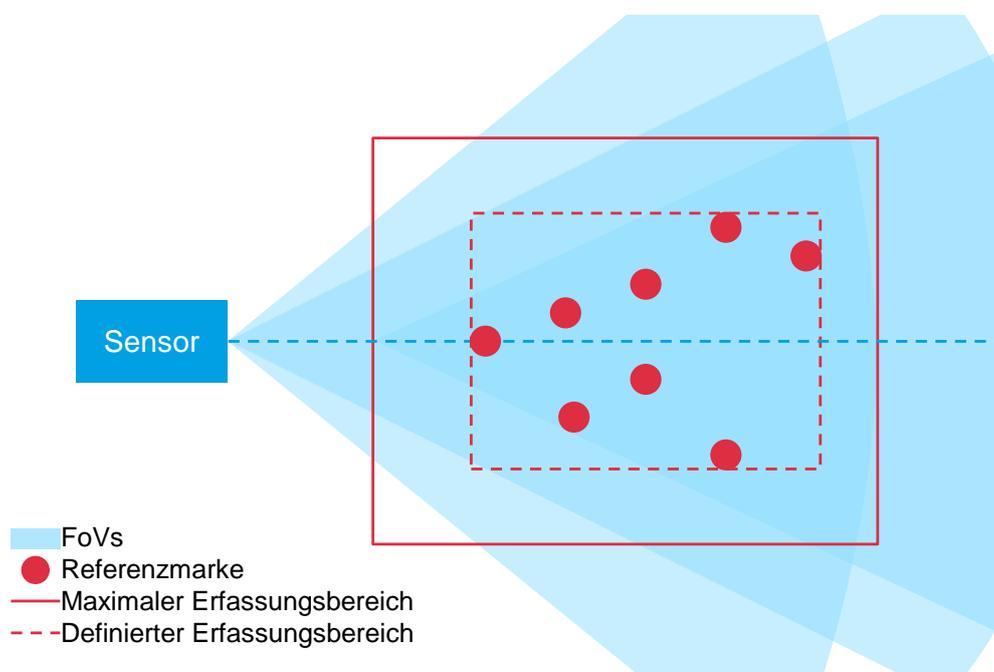


Abbildung 5.13: Anordnung der Referenzmarken für eine Sensorgruppe in der Draufsicht

Zunächst wird zur Anordnung der Referenzmarken ein maximaler Erfassungsbereich definiert. Dieser stellt das größte gemeinsame FoV aller Sensoren der Sensorgruppe dar, welches durch das jeweils kleinste FoV in horizontaler und vertikaler Ausdehnung definiert wird. Da die Sensoren selbst bei maximaler Abweichung von ihrer Soll-Orientierung im Rahmen der Montagetoleranz die Referenzmarken erfassen müssen, wird von diesem maximalen Erfassungsbereich unter Berücksichtigung dieser Abweichungen ein kleinerer Bereich definiert, welcher das mindestens zu erreichende FoV beschreibt.

Weiterhin ist bei der Anordnung der Referenzmarken, wie in Abbildung 5.13 zu erkennen, eine möglichst große Abdeckung des FoV zu berücksichtigen, da dies die Genauigkeit der Berechnung der extrinsischen Parameter erhöht. Aufgrund der in Abschnitt 2.1 beschriebenen Effekte bei der Erfassung des Umfeldes durch die Sensorik, sollten allerdings mehrere Referenzmarken in der horizontalen und vertikalen Mitte des FoV liegen, da alle drei Sensor-Typen hier am präzisesten arbeiten. Zusätzlich dürfen sich die Referenzmarken nicht überdecken und müssen einen ausreichenden Abstand zueinander aufweisen, um eine Zieltrennbarkeit vor allem für Radar- und Lidarsensoren zu gewährleisten. Diese Verteilung in horizontaler und vertikaler Ebene ist in Abbildung 5.14 zu erkennen, welche die Anordnung der Referenzmarken aus Frontansicht zeigt. Die schraffierte Fläche stellt den Bereich zwischen maximalem und minimalem Erfassungsbereich dar, die blauen Linien die Mittellinien des FoV in horizontaler und vertikaler Richtung. Heller dargestellte Referenzmarken sind weiter entfernt als dunklere.

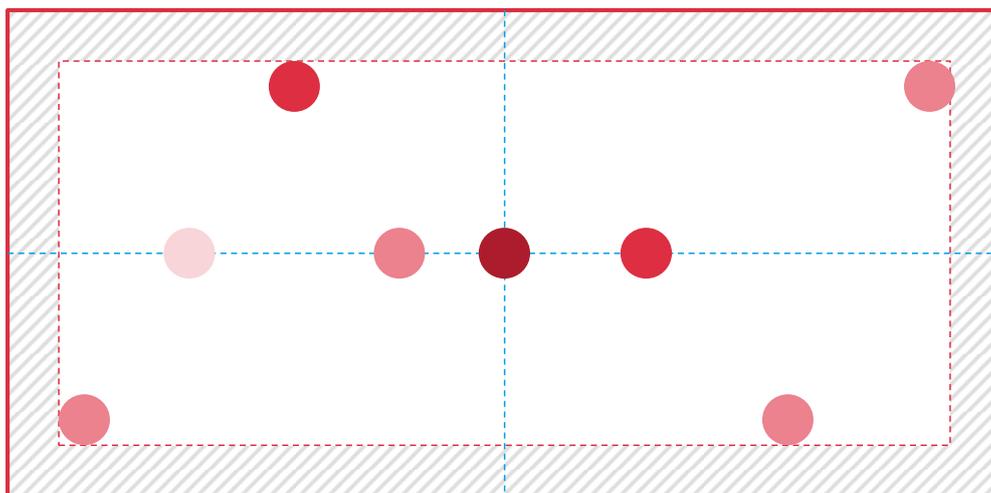


Abbildung 5.14: Multitarget in der Frontansicht

Diese Anordnung stellt aufgrund der sensorspezifischen Effekte und die Auswirkung auf die Kondition des Problems die Anordnung dar, welche die präzisesten Prozessergebnisse ermöglicht. So sind die Punkte mit dem geringsten Abstand zum Sensor gleichverteilt nahe der Mitte des FoV angeordnet, was eine möglichst präzise Erfassung dieser bedingt. Dieser Effekt ist vor allem für Radar und Lidar von Bedeutung. Weiterhin wird über die weiteren Punkte eine Abdeckung des gesamte FoV auch in den Randbereichen realisiert, was vor allem die Ermittlung der extrinsischen Parameter der Kamerasysteme adressiert.

Da sich die Einzelmarken zum Teil direkt in der Mitte des FoV befinden und somit ein passieren der Anordnung durch ein Fahrzeug nicht möglich ist, kann für die Funktionsabsicherung in der Fließmontagelinie eine alternative Anordnung gewählt werden. Diese ist in Abbildung 5.15 dargestellt. Wie hier zu erkennen, sind die Einzelmarken so angeordnet, dass sich diese nicht im Förderweg der Linie befinden. Die Marken, welche nahe der Mitte des FoV positioniert sind, wurden dabei unterhalb des Fahrzeugniveaus positioniert, die weiteren Marken befinden sich seitlich der Förderstrecke.

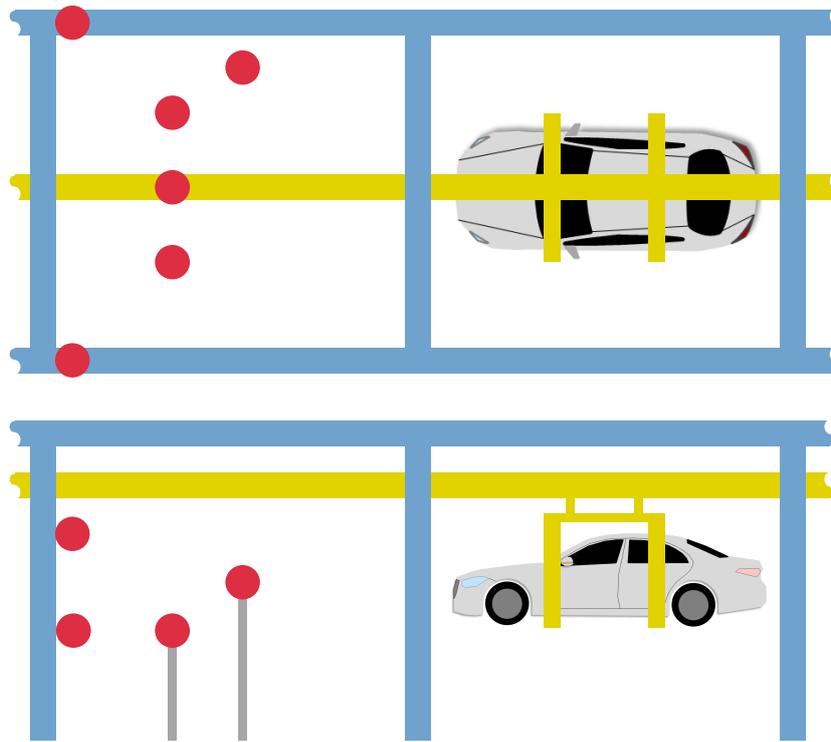


Abbildung 5.15: Anordnung der Einzelmarken in der Fließmontagelinie

### 5.2.3 Sensorspezifische Funktionsabsicherung

Auf Basis der definierten Auslegung der Einzelmarken sowie der Anordnung dieser im Erfassungsbereich des Fahrzeuges, kann abschließend der letzte Prozessschritt der Funktionsabsicherung entwickelt werden. Dieser Abschnitt stellt damit den zweiten Teil der Prozessentwicklung dar, welcher von den Eigenschaften des Produktes sowie den Eigenschaften des bis hierhin definierten Betriebsmittels beeinflusst wird.

Wie zu Beginn beschrieben, umfasst der Kernprozess die Prüfung der Eingangsdaten, die Target-Extraktion und die abschließende Berechnung des Ergebnisses. Die Target-Extraktion umfasst dabei die Extraktion der Position der Referenzmarken aus den Sensordaten und das anschließende Zuordnen der Punktkorrespondenzen. Die Extraktion folgt dabei einem dreistufigen Verfahren. Es werden zunächst die als „global“ bezeichneten Vorpositionen der Referenzmarken im FoV mittels Region-of-Interest (ROI) bestimmt. Anschließend werden in einer feineren Lokalisation die „regionalen“ Positionen der Referenzmarken in der ROI bestimmt. Dies erfolgt spezifisch für jeden Sensor-Typ. Final wird die „lokale“ Position der Referenzmarke im Sensorkoordinatensystem bestimmt. Die folgende Ergebnis-Auswertung umfasst die Auswertung der berechneten Punktkorrespondenzen, die abschließende Berechnung der extrinsischen Parameter und die Bewertung der Ergebnisse. Da sich diese Schritte je Sensor-Typ stark unterscheiden, wird deren Entwicklung im Folgenden jeweils getrennt erläutert.

#### Radar

Radarsensoren stellen als Rohdaten, wie in Abschnitt 2.2.2 erläutert, einen sogenannten Radar-Cube bereit, welcher die Intensitäten und Geschwindigkeiten der einzelnen Winkel-Entfernungszellen enthält. Im Bereich der Kalibrierung und Funktionsabsicherung dieser Sensoren stellt vor allem die Erkennung der Zielmarken unter den in der Produktionsumgebung vorhandenen Störkonturen eine Herausforderung dar. Weiterhin können durch Reflexionen an statischen und auch dynamischen Objekten sogenannte Phantomziele entstehen, welche aus den Messdaten entfernt werden müssen. Der gesamte Ablauf der Absicherungspipeline ist in Abbildung 5.16 dargestellt.

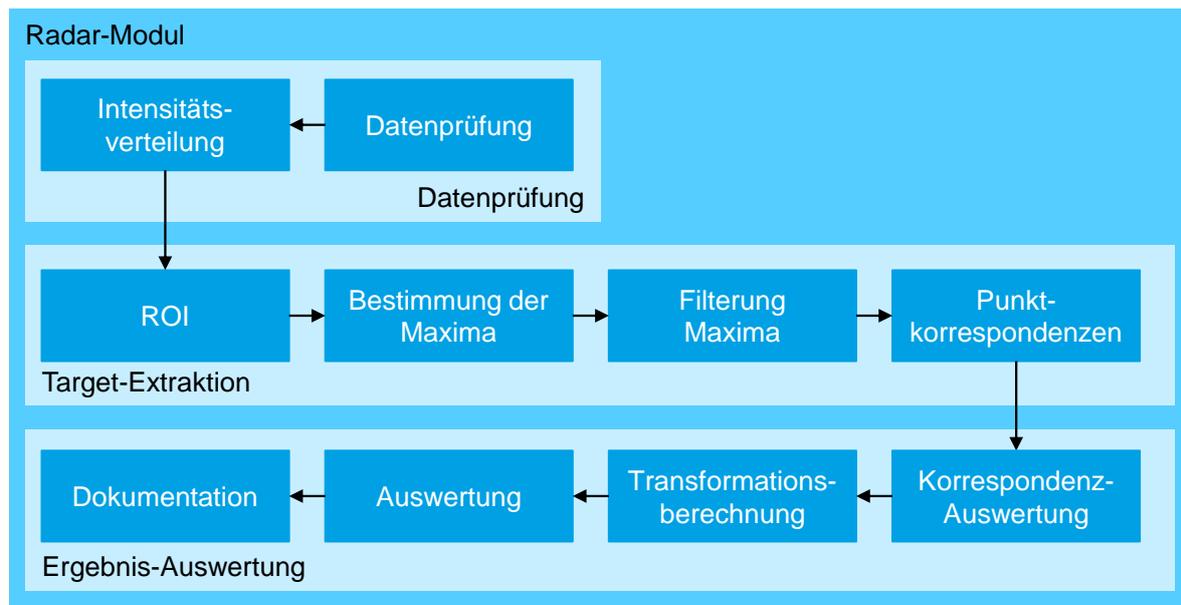


Abbildung 5.16: Funktionsabsicherung der Radarsensorik

Zur Beurteilung der grundlegenden Funktionsfähigkeit der Sensoren werden in einem ersten Schritt die Vollständigkeit sowie die Intensitätsverteilung der Rohdaten geprüft. Unvollständige oder nicht vorhandene Daten weisen auf ein Kommunikationsproblem oder auf eine starke Beschädigung des Sensors hin. Aus der Verteilung der Intensitäten der empfangenen elektromagnetischen Wellen kann ein Rückschluss auf die Funktionsfähigkeit des Sensors getroffen werden. Ist die Verteilung der Intensitäten verglichen mit dem Soll linear, kann dies auf eine Überdeckung oder eine Beschädigung des Radoms hindeuten. Aufgrund der Kenntnis der Erfassung mehrerer Cornerreflektoren muss sich die Häufigkeitsverteilung der Intensitäten dynamisch unterscheiden.

Nach einer positiven Datenprüfung müssen die Mittelpunkte der Referenzmarken als Eingangswerte der Transformationsberechnung aus den Rohdaten extrahiert werden. Hierzu können die bekannten Informationen über die Auslegung und die Anordnung der Einzelmarken genutzt werden. Bezüglich der Auslegung der Einzelmarken kann die näherungsweise ideale Reflexion der Corner-Reflektoren genutzt werden. Für die Extraktion kann damit angenommen werden, dass eine Referenzmarke jeweils durch ein lokales Maximum der empfangenen Signalintensität repräsentiert wird. Zusätzlich kann die Anordnung der Referenzmarken im Referenz-KOS genutzt werden, um hieraus im Sinne einer Mustererkennung ausschließlich die relevanten Maxima zu extrahieren.

Um die Menge der Rohdaten zunächst zu reduzieren, wird auf diesen eine ROI definiert. Diese definiert den Bereich des FoV, in dem sich die Referenzmarken nach Berücksichtigung der maximalen Abweichung aufgrund der zulässigen Montagetoleranzen befinden. Weiterhin können die Dimensionen der ROI durch Kenntnis der Reflektivität der Cornerreflektoren sowie durch die erfasste Geschwindigkeit aller Winkel-Entfernungszellen erweitert werden. Im stationären Fall werden durch die ROI nur Winkel-Entfernungswerte größer einer Zielintensität mit einer Geschwindigkeit von null extrahiert. Für den dynamischen Fall kann als Geschwindigkeit ein Intervall im Bereich der Fahrzeuggeschwindigkeit oder Bandgeschwindigkeit genutzt werden, sodass alle weiteren Objekte hoher Reflektivität entfallen.

In diesen vorgefilterten Daten müssen anschließend die Maximalwerte der Winkel-Entfernungs-Zellen ermittelt werden, welche einen Cornerreflektor repräsentieren können. Hierzu können verschiedene Filter-Algorithmen verwendet werden, welche anwendungsabhängig auszuwählen sind.

Nach der Extraktion aller potenziellen Mittelpunkte der Referenzmarken liegen diese Daten als Punktwolke in kartesischen Koordinaten vor. Um hieraus die Berechnung der extrinsischen Parameter nach Kapitel 5.1 zu realisieren, müssen durch ein als Matching bezeichneten Schritt den Punkten im Sensor-KOS ihre korrespondierenden Koordinaten im Referenz-KOS zugeordnet werden. Hierdurch können detektierte Phantomziele nochmals entfernt werden, falls diese eine zu große Distanz zu den Referenzpunkten aufweisen. Durch die Extraktion der Punkte in Form einer Punktwolke kann ab diesem Schritt die Transformationsberechnung unabhängig des Sensor-Typs durch den in Abschnitt 5.1 vorgestellten Algorithmus durchgeführt werden. Somit kann die Funktionsabsicherung für 2D- als auch für 3D-Radare analog erfolgen.

Zur Beurteilung der Ergebnislüte des Radar-Moduls müssen für jede Einzelfunktion Gütekriterien definiert werden, welche anschließend, wie beschrieben, miteinander verkettet werden. Für die Datenprüfung kann hierzu die Größe der erfassten Datenmenge verwendet werden. Durch die Kenntnis des verwendeten Sensors ist bekannt, welche Datenmenge pro Frame zu erwarten ist. Diese Datenmenge kann auf einen Wertebereich von 0-100 normiert werden und dies als Bemessungszahl verwendet werden. Für die Bewertung der Intensitätsverteilung kann die Histogramm-Differenz eines Soll- mit dem Ist-Histogramm genutzt werden. Die Histogramm-Differenz gibt dabei den Unterschied zweier Histogramme in Form einer positiven Zahl an, wobei die Größe der Zahl das Maß der Unterschiedlichkeit darstellt.

Nach der Beurteilung der Rohdaten können für die Gütekriterien der Extraktionsfunktionen direkt deren Ergebnisse verwendet werden. Die Anzahl der bestimmten Maxima kann einen Rückschluss auf die Durchführung der Funktion geben. Die Anzahl der zu extrahierenden Referenzmarken stellt hierbei den Sollwert dar. Werden mehr oder weniger Maxima als ein Referenzwert bestimmt, stellt dies eine Abweichung und damit ein Maß der Güte der Funktion dar. Für die Bewertung der Korrespondenzbestimmung kann ein Distanzmaß der Punkte im Sensor-KOS zu den Punkten im Referenz-KOS verwendet werden. Ist die Distanz der Punktmenge zur Referenzpunktmenge größer als ein durch die Montagetoleranzen zu erwartender Maximalwert, bedeutet dies entweder ein abweichungsbehaftetes Funktionsergebnis, beispielsweise aufgrund fehlerhaft detektierter Referenzmarken, oder einen mit einer hohen Abweichung verbauten Sensor.

Analog kann für die Transformationsfunktion ein Distanzmaß der final transformierten Punktmenge zur Referenzpunktmenge verwendet werden. Durch die mit Abweichungen erfassten Referenzpunkte wird nie eine fehlerfreie Transformation ermittelt werden können. Dieser Restfehler bedeutet fehlerhaft erfasste Referenzmarken oder fehlerhafte Ergebnisse der Extraktionspipeline.

Das Ergebnis der Funktionsabsicherung von Radarsensoren ergibt sich somit einerseits aus der final ermittelten Abweichung des Sensors zum vorgegebenen Sollwert. Dieser kann beispielsweise durch eine vorgegebene Fahrzeugreferenz, wie die geometrische Fahrachse, re-

präsentiert werden. Weiterhin ergibt sich die Gesamtgüte der Funktionsabsicherung als Bemessungskriterium der Prozessdurchführung nach der Definition in Abschnitt 5.2.1 aus der Verkettung der Güte der Einzelschritte.

### Lidar

Lidarsensoren stellen das erfasste Umfeld im Gegensatz zu Radarsensoren als kartesische Punktwolke dar. Das abgetastete Umfeld wird damit nicht kontinuierlich, sondern als räumlich verteilte Datenmenge repräsentiert. Dabei wird jedem erfassten Punkt, in Abhängigkeit des Sensors, zusätzlich zu den Koordinaten die erfasste Reflektivität oder die Reflexionsintensität als vierte Dimension zugeordnet. Im Bezug zur Kalibrierung und Funktionsabsicherung stellt ebenfalls die Erkennung und Extraktion der Zielmarken in der Produktionsumgebung die Kernherausforderung dar. Im Produktionskontext können diese durch Störobjekte verdeckt werden, Phantomziele oder Reflexionen können aufgrund des Sensorprinzips nicht auftreten. Speziell für die Lidarsensorik müssen in allen abgetasteten Punkten des Umfeldes alle Punkte, welche einer Referenzmarke zuzuordnen sind, erkannt und extrahiert werden. Der Ablauf der Absicherungspipeline für Lidarsensoren ist in Abbildung 5.17 dargestellt.

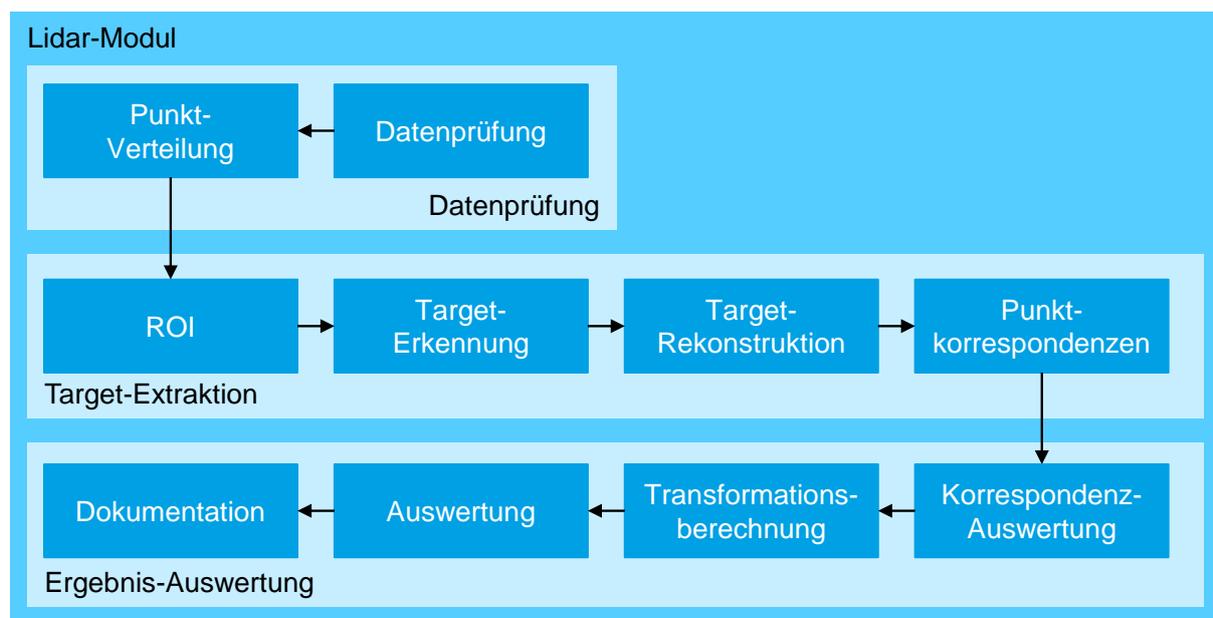


Abbildung 5.17: Funktionsabsicherung der Lidarsensorik

Zur Beurteilung der grundlegenden Funktionsfähigkeit der Sensoren wird analog der Datenprüfung bei Radarsensoren zunächst die Vollständigkeit der Daten geprüft. Zur Prüfung der Funktionsfähigkeit des Sensors kann bei Lidarsensoren die Häufigkeitsverteilung der erfassten Punkte im Raum geprüft werden. Hierzu können jeweils getrennt voneinander die Verteilungen in X-, Y- und Z-Richtung genutzt und deren Abweichungen mit einem definierten Soll verglichen werden. Bei einer abweichenden Verteilung der Punkte kann dies auf eine Verschmutzung oder Beschädigung der Lidar-Optik, oder im Falle eines integrierten Lidars auf Verschmutzungen oder Beschädigungen, beispielsweise der Frontscheibe, hinweisen. Bei vollständigen und fehlerfreien Eingangsdaten müssen aus diesen die Mittelpunkte der erfassten Referenzmarken extrahiert werden. Hierzu wird ebenfalls zunächst eine ROI definiert, um

die Menge der zu verarbeitenden Punkte zu reduzieren. Die Grenzwerte der ROI bei Lidar-sensoren sind dabei rein geometrisch, somit stellt die ROI eine Begrenzung des FoV dar. Folgend müssen in der so reduzierten Datenmenge die Punkte der einzelnen erfassten Referenzmarken bestimmt werden. Dabei muss berücksichtigt werden, dass einzelne Referenzmarken, durch Störobjekte bedingt, nur teilweise erfasst werden können und die resultierende Punktmenge die Marke damit unvollständig wiedergibt. Aufgrund der räumlichen Verteilung der Punktwolke müssen mittels Clustering-Algorithmen räumliche Zusammenhänge aller Punkte der Punktmenge ermittelt werden. Hierdurch wird die Punktwolke in Teilmengen unterteilt, welche anschließend um Ausreißer bereinigt werden. Zur Definition der finalen Target-Cluster können die bereinigten Punktmenge anschließend auf Basis der bekannten geometrischen Form der Einzelmarken bewertet werden. Cluster, welche in X-, Y- oder Z-Richtung eine definierte Ausdehnung überschreiten, können folglich nicht eine Referenzmarke mit bekanntem Durchmesser repräsentieren. Weiterhin muss das Verhältnis der Ausdehnung in horizontaler und vertikaler Richtung aufgrund der kreisförmigen Ziele näherungsweise gleich sein. Diese Schritte zur Target-Erkennung sind in Abbildung 5.18 dargestellt.

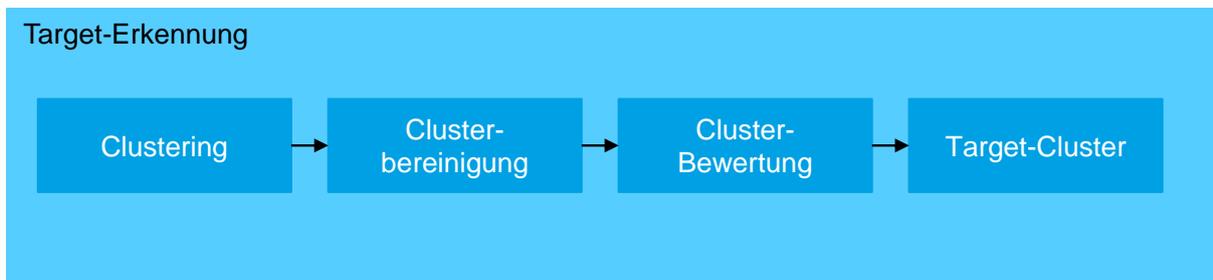


Abbildung 5.18: Target-Erkennung für Lidar-Daten

Die damit als potenzielle Referenzmarken definierten Target-Cluster können teilweise unvollständig sein. Daher muss zur Extraktion des Mittelpunktes im Anschluss für jedes Cluster eine Target-Rekonstruktion durchgeführt werden. Hierbei muss in jedem Target-Cluster ein Kreis-Fitting durchgeführt werden. Kann in einem Cluster kein Kreis rekonstruiert werden, oder weicht der rekonstruierte Radius von dem der Referenzmarken ab, ist es wahrscheinlich, dass das Cluster keine Referenzmarke repräsentiert. Bei positiver Übereinstimmung stellt der Mittelpunkt des rekonstruierten Kreises den Mittelpunkt der erfassten Referenzmarke dar.

Nach diesem Schritt liegen alle potenziellen Mittelpunkte in kartesischen Koordinaten vor, sodass zur Berechnung der extrinsischen Parameter analog die Schritte der Verarbeitungspipeline für Radarsensoren verwendet werden können. Entsprechend folgt ein Matching der extrahierten potenziellen Mittelpunkte und der korrespondierenden Punkte im Referenz-KOS, wodurch falsch kategorisierte Mittelpunkte entfallen. Abschließend kann die Berechnung der extrinsischen Parameter erfolgen.

Wie eingangs erläutert, stellt die Beurteilung der Ergebnisgüte des Lidar-Moduls einen wesentlichen Beitrag zur Funktionsabsicherung dar. Für die Datenprüfung kann hierzu ebenfalls die Größe der erfassten Datenmenge verwendet werden, welche analog zum Radar auf einen definierten Wertebereich normiert werden kann. Für die Bewertung der Punktverteilung kann die Histogramm-Differenz zwischen Soll- und Ist-Histogramm für die Verteilung in X-, Y- und Z-Richtung genutzt werden.

Für die Gütekriterien der Extraktionsfunktionen können die Ergebnisse der Schritte der Target-Erkennung, Target-Rekonstruktion und dem Matching genutzt werden. Der Schritt der Target-Erkennung liefert somit die Anzahl der als passend bewerteten Cluster, der Schritt der Target-Rekonstruktion die Anzahl und den Radius der rekonstruierten Targets. Für den Schritt der Korrespondenzbestimmung sowie der Transformationsfunktion kann analog zu Radarsensoren das Distanzmaß der Punkte im Sensor-KOS zu den Punkten im Referenz-KOS verwendet werden.

Das Ergebnis der Funktionsabsicherung von Lidarsensoren ergibt sich damit ebenfalls aus der Beurteilung der Güte der Einzelschritte und aus der final ermittelten Abweichung des Sensors zum vorgegebenen Sollwert.

### Kamera

Im Gegensatz zu Radar- und Lidarsensoren wird die Erfassung des Umfeldes durch Kameras stärker durch Umwelteinflüsse, wie wechselnde Belichtungsverhältnisse, beeinflusst. Zudem findet bei der Umfelderkennung durch Kameras eine Skalierung der Merkmale in die Bildebene statt, wodurch Tiefeninformationen verloren gehen. Weiterhin stellen Kameras das erfasste Umfeld entweder in Form eines schwarz-weiß Bildes oder im Farbraum dar. Die erfasste Datenmenge repräsentiert das erfasste Umfeld in Form von über die Entfernung skalierten, mit Farbinformationen ergänzten Pixeln in horizontaler und vertikaler Anordnung.

Wie auch bei Radar- und Lidarsensoren müssen in diesen Daten die kreisförmigen Referenzmarken erkannt und deren Mittelpunkt im Sensorkoordinatensystem bestimmt werden. Hierbei können ebenfalls Verdeckungen durch Störobjekte im Produktionsumfeld auftreten, sodass einzelne Referenzmarken entweder nur teilweise oder nicht erfasst werden können. Der Ablauf zur Extraktion der Referenzmarken aus den Bildern einer Kamera sowie die Berechnung der extrinsischen Parameter ist in Abbildung 5.19 dargestellt.

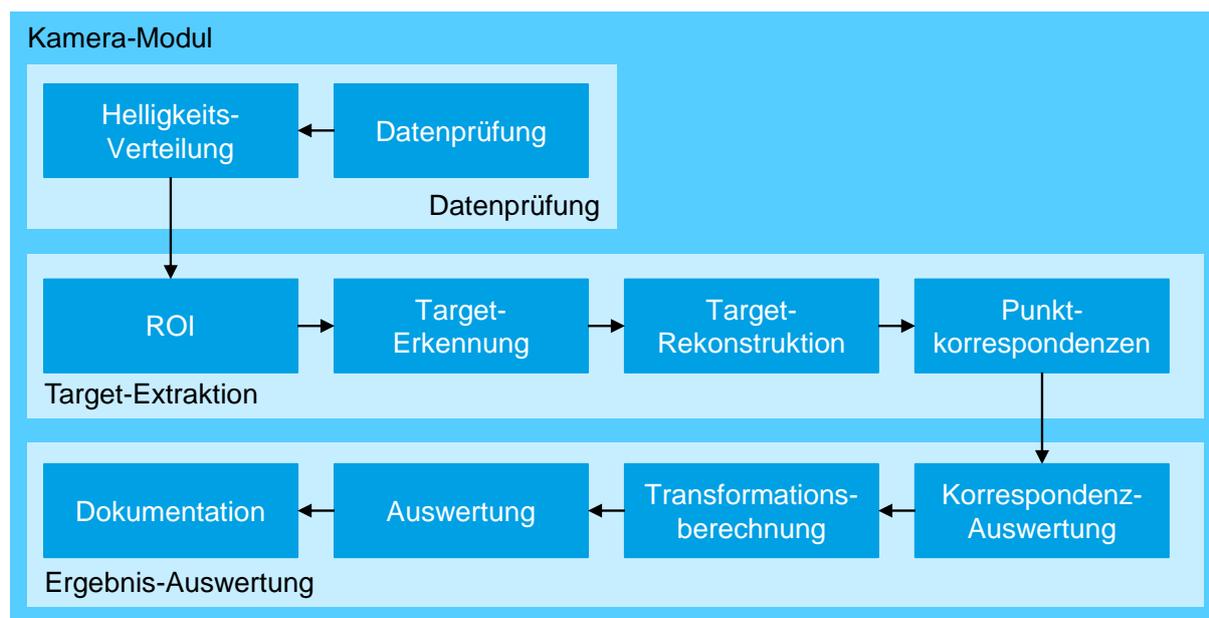


Abbildung 5.19: Funktionsabsicherung von Kameras

Auch bei der Kamera müssen zur Prüfung der Funktionsfähigkeit der Sensoren und Datenverbindungen zunächst die empfangenen Daten auf Vollständigkeit geprüft werden. Um daraufhin

die Datenqualität zu bestimmen, können die Helligkeitsverteilung des Bildes und der Kontrastumfang genutzt werden. Durch einen Abgleich dieser Parameter werden fehlerhafte Aufnahmen sowie verschmutzte, beschädigte, teilweise oder komplett verdeckte Sensoren detektiert. Nach diesen Datenprüfungen wird anschließend analog zur Extraktionsmethodik der vorigen Sensoren die Datenmenge mittels ROI reduziert. Wie bei Lidarsensoren ist die ROI dabei rein geometrisch und damit als eine Begrenzung des FoV zu verstehen.

Zur Target-Erkennung werden ebenfalls die bekannten Informationen aus der Auslegung der Referenzmarken genutzt. So können spezifisch für Kamerasysteme der hohe Kontrast der Ringe der Referenzmarken und die Kreisform als Merkmale verwendet werden. Die Einzelschritte der Target-Erkennung sind in Abbildung 5.20 abgebildet.

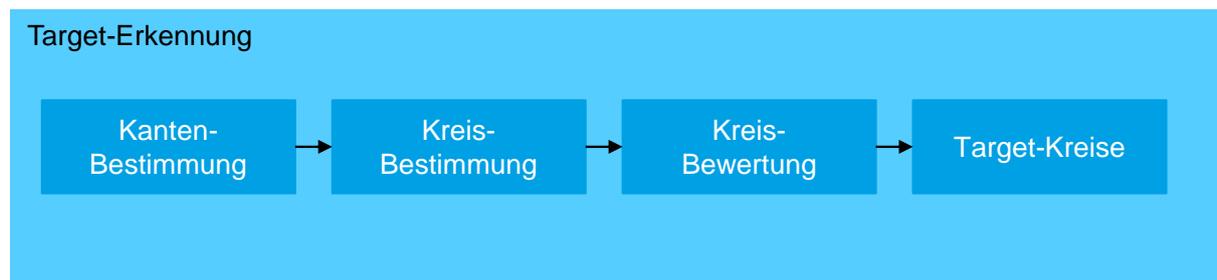


Abbildung 5.20: Target-Erkennung in Bilddaten

Zur Extraktion der relevanten Bildbereiche mit hohen Kontrastunterschieden, welche die Ringe der Referenzmarken enthalten, muss zunächst eine Kantendetektion durchgeführt werden. Da diese Kanten sämtliche Bereiche mit einem hohen Kontrastunterschied beschreiben, müssen in diesen alle Kanten extrahiert werden, welche einen Kreis oder einen Teil eines Kreises repräsentieren. Die so bestimmten potenziellen Konturen der Referenzmarken müssen anschließend nach ihrer Größe, Lage und Abstand zueinander bewertet werden, um falsch erkannte Konturen zu entfernen. Da die Größe der Referenzmarken im Bild, wie beschrieben, über den Abstand des Sensors zur Referenzmarken skaliert wird, muss zur Bewertung der Kreisgröße ein Intervall genutzt werden, welches die minimale und maximale Größe der Referenzmarken im Bild nach Arbeitsabstand beschreibt. Weiterhin ist die Anordnung aller Referenzmarken zueinander aus der Target-Auslegung bekannt, daher können die potenziellen Referenzmarken mittels ihrer Lage im Bild sowie dem Abstand der Kreismittelpunkte zueinander bewertet werden. Ergebnis der Target-Erkennung ist folglich eine Liste mit potenziell erfassten Referenzmarken, deren Mittelpunkten und Radien.

Zu diesen erkannten Mittelpunkten werden anschließend, analog zum Vorgehen bei Radar und Lidar, die Korrespondenzen zu den Referenzmarken im Referenz-KOS bestimmt. Mit den so bestimmten korrespondierenden Punktpaaren können anschließend die extrinsischen Parameter über das Vorgehen nach Gleichung (18) mittels SVD berechnet werden. Hierzu muss spezifisch für Kamerasysteme das Vorgehen nach [EAD13; MAD04] genutzt werden, da die fehlenden Entfernungsinformationen sowie die skalierten Daten keine Berechnung mittels dem Vorgehen nach Kabsch zulassen.

Zur Beurteilung der Güte des Absicherungsprozesses sind auch bei der Funktionsabsicherung für Kameras Gütekriterien zu definieren. Analog zu Radar und Lidar werden bei der Datenprü-

fung die normierte Größe der erfassten Datenmenge sowie Differenz der ermittelten Helligkeitsverteilung und des Kontrastumfangs genutzt.

Bezüglich der Funktionen zur Targetextraktion werden zur Beschreibung der Güte der Target-Erkennung ebenfalls die Ergebnisse der Einzelschritte verwendet. Somit kann für die Güte der Kantenbestimmung die Anzahl der detektierten Kanten, für die Güte der Kreisbestimmung die Anzahl der detektierten Kreise und für das Ergebnis der Extraktion die Anzahl der extrahierten Kreise nach Bewertung durch Radius, Anordnung und Abstand zueinander verwendet werden. Zur Beschreibung der Korrespondenzbestimmung und der Berechnung der extrinsischen Parameter werden ebenfalls das Distanzmaß der Punkte und die extrinsischen Parameter verwendet.

Hierdurch ergeben sich auch für Kamerasysteme die final ermittelte Abweichung des Sensors zu seiner Soll-Orientierung sowie die Verkettung der einzelnen Gütekriterien.

#### **5.2.4 Statischer, dynamischer und referenzfreier Prozess**

Nachdem in den vorangegangenen Abschnitten die Positionen der Referenzmarken im Sensor-KOS für jeden Sensor ermittelt wurden, folgt in diesem abschließenden Schritt die Konzeption des Evaluationsschrittes. Dieser teilt sich, wie in Abschnitt 5.2.1 erläutert, in die Evaluation der Daten- und Berechnungsgüte und die Evaluation der berechneten extrinsischen Parameter auf.

Die bis hierhin beschriebenen Prozessschritte können bei bekannter Fahrzeugreferenz statisch, also bei sich nicht bewegendem Fahrzeug und Referenzmarken, oder dynamisch, am bewegten Fahrzeug erfolgen. Zudem besteht die Möglichkeit, die Funktionsfähigkeit der umfelderfassenden Sensorik ohne eine bekannte Fahrzeugreferenz, wie in Abschnitt 3.2 erläutert, zu prüfen. Zwischen den drei Arten der Funktionsabsicherung bestehen dabei wesentliche Unterschiede bei der Ermittlung und Auswertung der extrinsischen Parameter, da diese durch den unterschiedlichen Bezug von Fahrzeug zu Multitarget beeinflusst werden. Aus diesem Grund werden im Folgenden Lösungskonzepte für alle drei Absicherungsszenarien vorgestellt. Der Ablauf der Prozesse folgt der Aufteilung der Gesamtaufgabe in Abschnitt 5.1.1 und Abbildung 5.3.

##### **Statische Funktionsabsicherung**

Im statischen Fall wird das hybride Multitarget durch die umfelderfassenden Sensoren des Fahrzeuges erfasst. Der Bezug der Sensoren zum Multitarget kann in diesem Fall als fest angenommen werden. Durch die mehrfache Erfassung des statischen Szenarios wird eine Menge an Orientierungen berechnet. Diese schwanken aufgrund der Messungenauigkeit der Einzelsensoren um ihren wahren Wert. Daher muss im Prozessergebnis durch die Verwendung statistischer Methoden diese Schwankung bestmöglich kompensiert werden. So können in der Menge der bestimmten extrinsischen Parameter Ausreißer identifiziert und eliminiert werden. Als Ergebnis des Prozesses kann der Mittelwert aller Aufnahmen als Ergebnis genutzt werden.

Durch die statische Position des Fahrzeuges im Referenzsystem genügt die einmalige Kenntnis der Fahrzeugreferenz. Diese wird als gegeben vorausgesetzt und kann beispielsweise wie in [OTT21] beschrieben, über ein System zur Vermessung der Hinterachsgeometrie, oder

durch ein geeignetes System zur Fahrzeuglageerfassung und Wiedererkennung der Fahrzeugreferenz bereitgestellt werden. Dabei muss diese Referenz in einem gemeinsamen KOS mit Bezug zum Multitarget übergeben werden. Der Prozessablauf der statischen Funktionsabsicherung ist Abbildung 5.21 dargestellt:

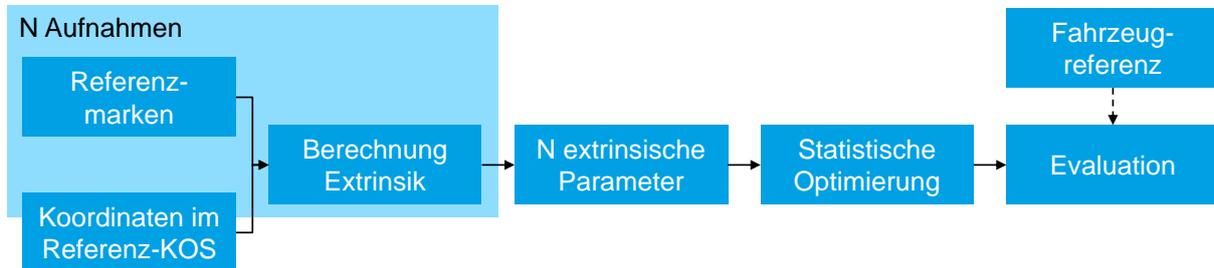


Abbildung 5.21: Statische Funktionsabsicherung

Für die Evaluation der extrinsischen Parameter bei bekannter Fahrzeugreferenz kann der Ansatz der PSE aus Abschnitt 3.2 verwendet werden. Dieser stellt mit der kürzesten Toleranzkette die präziseste Evaluationsmethodik dar. Die Evaluation erfolgt dabei, wie in Formel (37) beschrieben, als die Differenz der aus der Fahrzeuginbetriebnahme bekannten Transformation  ${}_{IBN}^M \mathbf{T}_{Si}$  eines Sensors  $Si$  zur Fahrzeugreferenz  $M$  und derselben Transformation aus der Funktionsabsicherung  ${}_{ABS}^M \mathbf{T}_{Si}$ . Der Betrag dieser Differenz muss für ein positives Prozessergebnis innerhalb einer definierten Toleranz  $T$  liegen.

$$\left| {}_{IBN}^M \mathbf{T}_{Si} - {}_{ABS}^M \mathbf{T}_{Si} \right| \leq T \quad (37)$$

### Dynamische Funktionsabsicherung

Für den Fall der dynamischen Funktionsabsicherung besteht die Herausforderung, dass sich das Setup aus Fahrzeug und Referenznormal kontinuierlich verändert und damit kein konstanter Bezug zwischen Sensorsystem und Multitarget besteht. Weiterhin handelt es sich bei der umfelderfassenden Sensorik automatisierter Fahrzeuge um asynchrone Multisensorsysteme. Bei diesen sind die Start- und Aufnahmezeitpunkte der Sensoren nicht taktgleich, sodass die erfassten Daten nicht direkt aufeinander abgebildet werden können [WIN15a].

Durch die unbekanntenen Bewegungen des Fahrzeuges und die unterschiedlichen Erfassungsraten der Einzelsensoren besteht eine erschwerte Vergleichbarkeit der extrinsischen Parameter. Dieser Effekt auf den Gierwinkel zweier Sensoren einer Sensorgruppe ist in Abbildung 5.22 dargestellt. Die blauen Kurven beschreiben Daten hinsichtlich Sensor 1, Rote Kurven Sensor 2 und Gelbe Kurven die Bewegung der Fahrzeugreferenz im Raum.

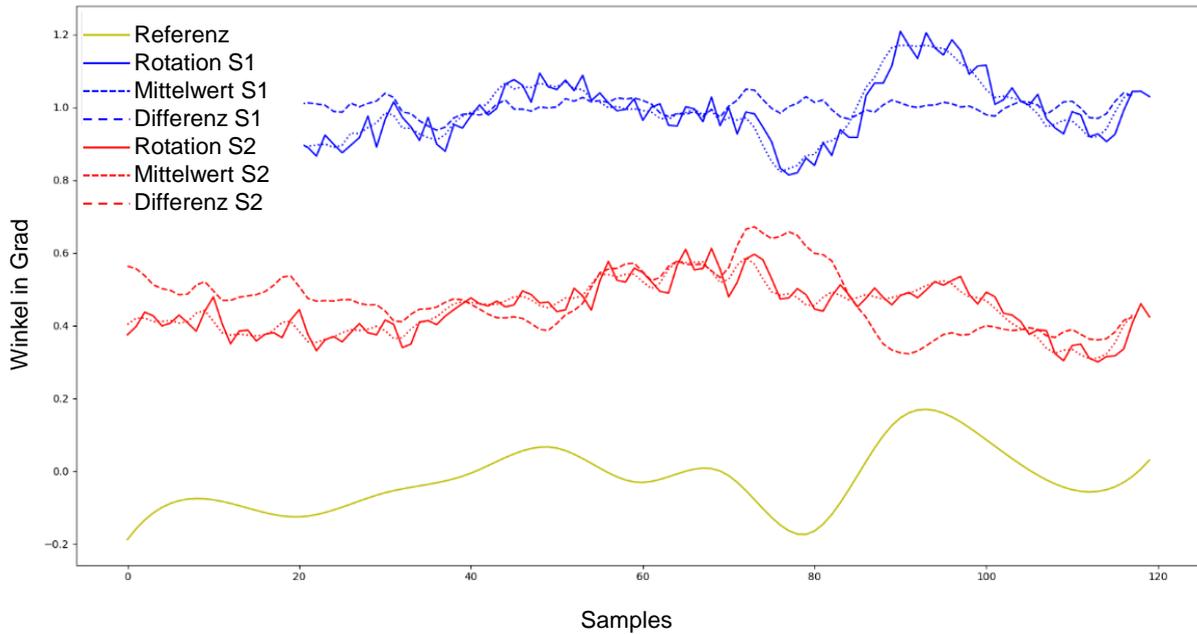


Abbildung 5.22: Referenzfassung zweier Sensoren bei unterschiedlichen Erfassungsraten und Startzeitpunkt

Sensor 1 erfasst die Referenzmarken dabei mit einem Offset von  $1^\circ$ , Sensor 2 erfasst die Referenzmarken mit einem Offset von  $0,5^\circ$  und einer um 30% reduzierten Framerate verglichen mit Sensor 1. Weiterhin beginnt Sensor 2 um 4 Frames verzögert mit der Aufnahme der Referenzmarken. In Gelb dargestellt ist der Gierwinkel des Fahrzeuges über die Zeit. Wie zu erkennen, ist die Vergleichbarkeit der Einzelwinkel auch mit Bezug zur Fahrzeugreferenz beeinträchtigt. Die gestrichelten Linien in der jeweiligen Farbe geben die Differenz des Gierwinkels der Einzelsensoren zum Gierwinkel der Fahrzeugreferenz an. Durch den zeitlichen Versatz im Winkelverlauf lässt sich aus dieser Messreihe eine Winkeldifferenz von  $1,001^\circ$  für Sensor 1 und von  $0,4790^\circ$  für Sensor 2 bestimmen. Die Abweichungen zum wahren Wert betragen folglich  $0,001^\circ$  und  $0,021^\circ$ .

Um diese Abweichung zu kompensieren, muss der zeitliche Versatz der extrinsischen Parameter bestimmt werden. Diese Erweiterung des statischen Prozesses ist in Abbildung 5.23 dargestellt.

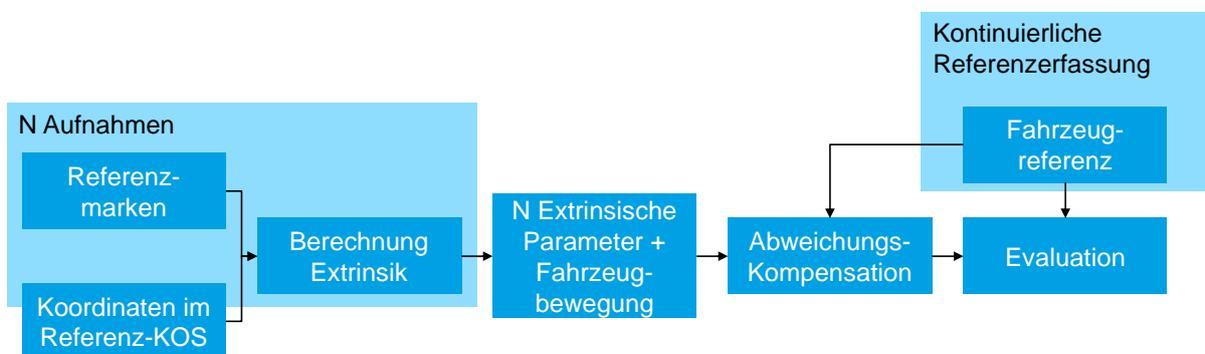


Abbildung 5.23: Dynamische Funktionsabsicherung

Da die Bewegung des Fahrzeuges jeden Sensor und die Fahrzeugreferenz zu jedem Zeitpunkt gleichförmig beeinflusst, ist zunächst eine Verschiebung der Messwerte der Einzelsensoren

notwendig, sodass der zeitliche Versatz bestmöglich eliminiert wird. Dies kann mittels Berechnung der Korrelation der Verläufe der Einzelwinkel durchgeführt werden. Anschließend kann die Bewegung der Fahrzeugreferenz, beziehungsweise die Abweichungen der Sensororientierungen von dieser, durch einfache Differenzbildung eliminiert werden.

Zur Evaluation der extrinsischen Parameter kann nach erfolgter Kompensation der Abweichungen analog zum statischen Prozess vorgegangen werden.

Wie auch bei der statischen Funktionsabsicherung kann die Fahrzeugreferenz durch das in [OTT21] beschriebene Konzept kontinuierlich, auch bei bewegtem Fahrzeug, in einem gemeinsamen KOS bereitgestellt werden.

### Referenzfreie Funktionsabsicherung

Einen Sonderfall der Funktionsabsicherung stellen Anwendungsfälle im Aftermarket dar. So kann im Rahmen einer technischen Überprüfung oder durch eine Reparatur im Schadensfall die Überprüfung und Rekalibrierung der umfelderfassenden Sensoren notwendig werden. Da Technologien zur Erfassung der Fahrzeugreferenz aufgrund der hohen Investitionskosten für diesen Bereich oftmals unwirtschaftlich sind und alternative Technologien keine hinreichende Genauigkeit bieten, sind alternative Methoden zur Kalibrierung und Funktionsabsicherung ohne direkte Kenntnis der Fahrzeugreferenz erforderlich.

Um diese Herausforderung zu adressieren, können die drei Ansätze der MCPE, FCPE und PSE um den Ansatz der FCPSE (Fully Connected Pose and Structure Estimation) erweitert werden. Dieser beschreibt ein redundantes Vorgehen, bei welchem, wie in Abbildung 5.24 dargestellt, sowohl die Transformation der Sensoren zueinander, als auch der Bezug der Sensoren zur Fahrzeugreferenz bestimmt werden kann. Hierdurch wird für jede Sensorgruppe eine doppelte geschlossene kinematische Kette erzeugt, wodurch Abweichungen im Kalibrierprozess festgestellt werden können. Die Abweichungen der Einzeltransformationen der Sensoren zueinander sollten dabei nicht wesentlich größer als die Abweichung der Sensoren zueinander über die Fahrzeugreferenz sein.

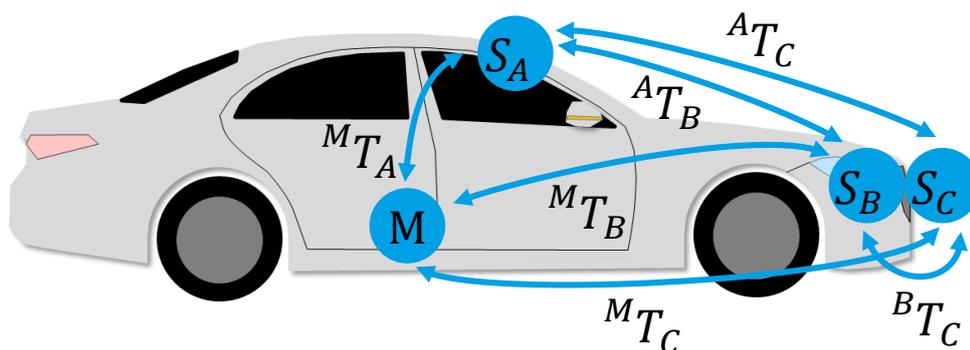


Abbildung 5.24: Bewertung der extrinsischen Parameter mittels FCPSE

Im Gegensatz zum statischen und dynamischen Prozess ist hierbei keine Kenntnis der Fahrzeugreferenz sowie keine Kenntnis der Position der Referenzmarken notwendig. Wie in Abschnitt 3.2 beschrieben, kann durch die statische Erfassung gemeinsamer Referenzpunkte durch zwei Sensoren direkt die extrinsische Beziehung des Sensorpaars zueinander bestimmt werden. Werden hierbei, wie bei der statischen Funktionsabsicherung, mehrere Datenframes

aufgenommen, kann die Genauigkeit des Prozessergebnisses ebenfalls per Abweichungskompensation optimiert werden. Die Evaluation der extrinsischen Parameter erfolgt dann analog zum statischen Prozess, allerdings ohne Abgleich zur Fahrzeugreferenz und mit geringerer Genauigkeit, da die zweifache Messunsicherheit der Sensoren eingetragen wird.

Der Ablauf des Prozesses zur referenzfreien Absicherung ist in Abbildung 5.25 dargestellt.

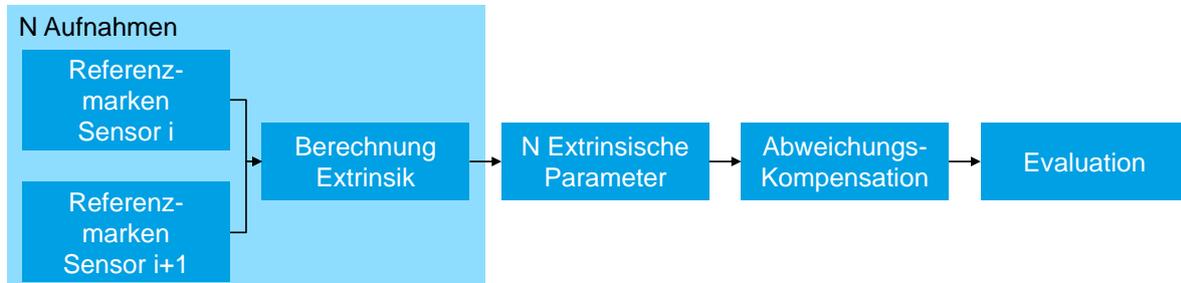


Abbildung 5.25: Referenzfreie Funktionsabsicherung

Bei Verwendung der Methode der FCPSE kann zur Evaluation die Abweichung der kinematischen Kette zweier Sensoren berechnet werden. Wie in Formel (38) beschrieben, wird die Differenz der Transformation  ${}_{ABS}^{Si}T_{Si+1}$  eines Sensors  $Si$  und eines Sensors  $Si + 1$  der gleichen Sensorgruppe zur Transformation der Sensoren zur Fahrzeugreferenz bestimmt, welche sich aus der Verkettung der Einzeltransformationen der Sensoren zur Referenz ergibt. Die Transformationen stammen dabei aus dem Absicherungsprozess, da durch die fehlende Fahrzeugreferenz keine Vergleichbarkeit mit den Ergebnissen der Inbetriebnahme möglich ist.

$$\left| {}_{ABS}^{Si}T_{Si+1} - ({}_{ABS}^M T_{Si} * {}_{ABS}^M T_{Si+1}) \right| \leq T \quad (38)$$

### 5.2.5 Zentrale Datenstruktur

Zur Implementierung des Gesamtprozesses auf Basis der bis hierhin beschriebenen Einzelmodule und Funktionen, muss eine modulare Prozessinfrastruktur entwickelt werden, welche die Aufteilung der Daten nach der Logik in Abschnitt 5.2.1 und eine Orchestrierung der Einzelmodule ermöglicht. Zur Realisierung einer wandlungsfähigen Infrastruktur müssen die Einzelmodule kompatibel zueinander sein [KER21], was nur über die Nutzung eines gemeinsamen Datenformates mit standardisierten Schnittstellen realisierbar ist.

Wie aus Abbildung 5.6 ersichtlich wird, müssen alle erfassten und verarbeiteten Daten je Fahrzeug, welches den Prozess durchläuft gesammelt dokumentiert und abschließend archiviert werden. Dementsprechend wird eine Datenstruktur definiert, welche die Daten je Fahrzeug gruppiert. Das vereinfachte Klassendiagramm zum Entwurf der Struktur und ihrer Attribute ist in Abbildung 5.26 abgebildet.

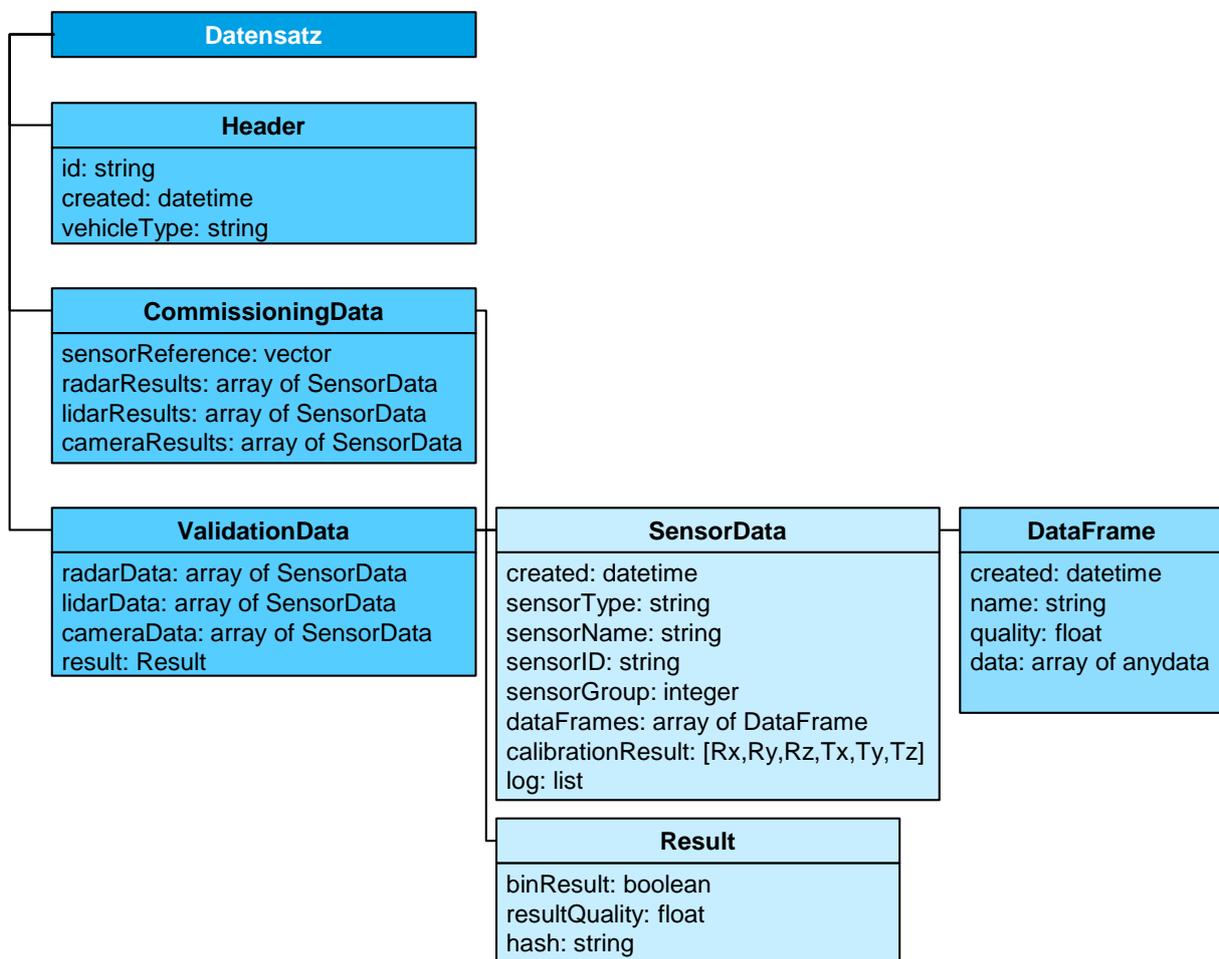


Abbildung 5.26: Übergreifende Datenstruktur

Der zur Funktionsabsicherung genutzte Datensatz eines Fahrzeuges besteht dabei, wie dargestellt, zunächst aus drei wesentlichen Attributen. Der Header beschreibt dabei die wesentlichen Attribute des Fahrzeuges und des Datensatzes. Hierzu umfasst er Daten zur Fahrzeug-ID, einen Zeitstempel zur Dokumentation der Erstellung sowie die Beschreibung des Fahrzeugtyps.

Als Ergebnis der Fahrzeug-Inbetriebnahme enthält der Datensatz in der Klasse „CommissioningData“ die Fahrzeugreferenz als Ergebnis der Inbetriebnahme und die zum Abgleich notwendigen extrinsischen Parameter der Einzelsensoren. Die Fahrzeugreferenz wird dabei nach [OTT21] als Vektor im Fahrzeug-KOS beschrieben. Die extrinsischen Parameter werden als Roll-, Pitch- und Yaw-Winkel hinterlegt.

Die Daten des Prozesses der Funktionsabsicherung sind in der Klasse „ValidationData“ zusammengefasst. Diese enthält hierzu in mehreren Attributen die Daten der Einzelsensoren, aufgeteilt nach Radar, Lidar und Kamera. Diese Sensordaten enthalten neben einem Zeitstempel, der Beschreibung von Sensor-Typ, -name und -ID, die zugeordnete Sensorgruppe, die einzelnen Datenframes und die extrinsischen Parameter des Einzelsensors. Die einzelnen Datenframes repräsentieren dabei immer einen Datensatz je Sensor und Prozessschritt. So kann ein Datenframe jeweils die Sensorrohdaten, aber auch spezifische Ergebnisse eines Prozessschrittes enthalten, beispielsweise die kartesischen Koordinaten der ermittelten Referenzpunkte im Sensor-KOS. Die Unterscheidung der Daten kann mittels des Attributs „name“ erfolgen. Weiterhin verfügt die Klasse über ein Attribut „quality“ zur Zuordnung der Güte der Einzelfunktionen.

Die extrinsischen Parameter jedes Sensors werden im Format der Einzelwerte angegeben und beschreiben die drei Rotations- und Translationsparameter. Zur Erfassung der Einzelergebnisse der Funktionsabsicherung und zur Dokumentation der Güte der Einzelschritte verfügt die Klasse über ein Log-Attribut, in welchem diese Kennwerte hinterlegt werden können.

Zusätzlich wird in der Klasse „Result“ sowohl das binäre Ergebnis der Funktionsabsicherung, als auch die Gesamtgüte des Gesamtprozesses dokumentiert. Zur Absicherung gegen Datenmanipulation enthält das Ergebnis einen Hashwert, welcher aus den Eingangsdaten und dem Prozessergebnis berechnet wird.



### 5.3 Abgleich der Anforderungen

Dem Vorgehen aus Abschnitt 4.1 folgend gilt es, vor der eigentlichen Validierung der finalen Lösung die Erfüllung der konzeptionellen Anforderungen auf Vollständigkeit zu prüfen. Hierzu werden in diesem Abschnitt die einzelnen Anforderungen aufgeführt und deren Adressierung im Rahmen des entwickelten Lösungskonzeptes betrachtet.

*Genauigkeit:* Die Anforderung der Genauigkeit beschreibt die Erreichung einer hinreichenden Wiederholgenauigkeit.

Im Rahmen des entwickelten Lösungskonzeptes wurde diese Anforderung konzeptionell durch die Entwicklung eines Verfahrens zur Funktionsabsicherung auf Basis bekannter Referenzmarken adressiert. Durch die Entwicklung eines hybriden Multitargets, welches den sensor-spezifischen Anforderungen genügend ausgelegt wurde, wurde ein Konzept mit möglichst kurzen Toleranzketten realisiert. Hierdurch können wesentliche Nachteile von bereits bestehenden Lösungen des Standes der Technik vermieden werden. Im Rahmen einer Abweichungsbetrachtung wurden Optimierungspotenziale wie eine gute Konditionierung des mathematischen Problems berücksichtigt. Weiterhin wurden über den Gesamtprozess hinweg verschiedene Möglichkeiten zur Abweichungskompensation vorgesehen, beispielsweise bei der Erkennung und Extraktion der Referenzmarken in den Sensorrohdaten, als auch bei der Berechnung der extrinsischen Parameter durch eine Überbestimmung der Anzahl von Referenzmarken und Kompensationsmechanismen in der Evaluation.

Das Erreichen einer hinreichenden Genauigkeit kann erst im Rahmen der finalen Validierung bestätigt werden.

*Prozesssicherheit und Robustheit:* Für den Einsatz des Verfahrens in der Produktionsumgebung muss der Prozess robust gegenüber Einflüssen seitens Produkt, Prozess und Betriebsmittel sowie durch das Prozessumfeld gestaltet werden.

Diese Anforderung wurde im finalen Lösungskonzept durch die Auslegung des Multitargets sowie die Anordnung und Anzahl der Referenzmarken adressiert. Hierdurch wurde die Möglichkeit geschaffen, bereits vor der Berechnung der extrinsischen Parameter auf Basis der Datenauswertung und definierten Gütekriterien Veränderungen an Produkt und Betriebsmittel zu definieren. Weiterhin ist der Prozess durch eine überbestimmte Anzahl an Referenzmarken robust gegenüber Veränderungen und die teilweise Verdeckung des Betriebsmittels. Umwelteinflüsse werden durch die Auslegung der Einzelmarken bestmöglich kompensiert.

Die Prozesssicherheit kann im Rahmen der finalen Validierung durch Erzeugung von Störungen und Abweichungen nachgewiesen werden.

*Nachvollziehbarkeit und Dokumentation:* Zur Realisierung der zukünftig geforderten Nachvollziehbarkeit des sicherheitskritischen Prozesses der Funktionsabsicherung muss das Prozessergebnis und seine Teilschritte nachvollziehbar dokumentiert werden.

Diese Anforderung wurde durch die Entwicklung einer zentralen Datenstruktur adressiert. Die Datenstruktur dokumentiert sowohl das Prozessergebnis, als auch die Einzelergebnisse je Sensor und die Güte der einzelnen Prozessschritte für jedes Fahrzeug. Die Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse der Prozessschritte wird durch die Verwendung eines targetbasierten Ansatzes adressiert. Somit weist der Prozess eine bessere Nachvollziehbarkeit auf, als vergleichbare targetlose Ansätze. Die finale Dokumentation jeder Funktionsabsicherung kann fälschungssicher und fahrzeugspezifisch archiviert werden.

*Universalität:* Der Lösungsprozess muss alle Sensor-Typen adressieren.

Durch die Entwicklung des hybriden Multitargets und der modularen Prozessstruktur können sowohl Radar- und Lidarsensoren, als auch Kameras abgesichert werden. Die Referenzmarken sind durch jeden Sensor-Typen präzise erfassbar und werden sensorspezifisch verarbeitet. Durch die Nutzung generischer kartesischer Koordinaten nach der Referenzextraktion ist der Lösungsprozess ab diesem Schritt unabhängig vom jeweiligen Sensor-Typ. Durch die flexiblen Anordnungsmöglichkeiten und die präzise Einmessstrategie der Einzelmarken werden sich überschneidende, als auch getrennte FoVs berücksichtigt.

Die Universalität wird im Rahmen der finalen Validierung nachgewiesen.

*Flexibilität und Wandlungsfähigkeit:* Vor dem Hintergrund der stetigen Weiterentwicklung der Fahrzeuge muss der Lösungsprozess flexibel und anpassungsfähig sein. Dies betrifft die Prozess- und die Betriebsmittelebene. So müssen einzelne Funktionen des Prozesses und auch die Anordnung der Referenzmarken einfach änderbar sein.

Durch die Entwicklung eines modularen Prozesses mit definierten Schnittstellen und einer zentralen, standardisierten Datenstruktur weist die Prozessebene ein hohes Maß an Flexibilität und Wandlungsfähigkeit auf. Bei Änderungen der Anzahl, Art und Anordnung der umfelderfassenden Sensoren, kann durch den einfachen Austausch der spezifischen Prozessmodule flexibel auf diese Änderungen reagiert werden. Weiterhin kann durch eine Anpassung der Anzahl und Anordnung der Referenzmarken auf diese Änderungen reagiert werden, sodass eine einfache Rekonfiguration von Prozess und Betriebsmittel möglich ist.

*Integrierbarkeit:* Da der Lösungsprozess im Brownfield Anwendung finden wird, muss dieser einfach in bestehende Prozesslandschaften integriert werden können. Hierzu muss die Lösung einen geringen Flächenbedarf aufweisen. Umbauten und Einschränkungen der Taktreihenfolge im EoL sollten vermieden werden. Weiterhin soll zur Realisierung einer wirtschaftlichen Lösung das Inline-Konzept adressiert werden.

Durch die Entwicklung des hybriden Multitargets und die damit verbundene beliebige Anordnung der Referenzmarken ist eine Integration im Brownfield möglich. Bei optimierter Anordnung besteht nur ein geringer Flächenbedarf, sodass der Prozess am Ende der Produktionslinie verortet werden kann. Durch die Integrationsmöglichkeiten der Referenzmarken sowie die modulare Prozessarchitektur, ist eine Umsetzung des Inline-Szenarios möglich. So kann der entwickelte Prozess zur Funktionsabsicherung beispielsweise im Abfahrbereich des EoL, implementiert und bei „durchrollendem“ Fahrzeug ausgeführt werden. Die Einzelmarken sind

einfach zu referenzieren, wodurch eine wirtschaftliche Instandhaltung und Wartbarkeit gewährleistet wird.

Somit sind alle Anforderungen zunächst durch das entwickelte Lösungskonzept adressiert. Für die Anforderungen bezüglich der Genauigkeit ist eine abschließende Validierung notwendig. Hierbei kann die Erfüllung der Anforderungen hinsichtlich Prozesssicherheit, Dokumentation, Nachvollziehbarkeit und Universalität ebenfalls nachgewiesen werden.



## 6 Implementierung

Für die abschließende Validierung wird das entwickelte Lösungskonzept prototypisch implementiert. Dies wird in einem realitätsnahen Technologiedemonstrator durchgeführt, welcher in Abbildung 6.1 links dargestellt ist und fünf Takte einer Überkopfförderstrecke umfasst. In dieser befindet sich ein Testfahrzeug, das um einen FMCW-Radar, einen MEMS-Lidar sowie ein Kamerasystem umfassend Multi-Purpose-Kamera (MPC), Weitwinkel- und Monochrom-Kamera erweitert wurde. Die Einzelsensoren werden durch einen im Fahrzeug verbauten Zentralrechner verwaltet, der über eine drahtlose Schnittstelle verfügt. Somit ist eine Extraktion der Sensorrohdaten aller Sensor-Typen möglich. Die Sensoren sind auf einer verstellbaren Grundplatte am Front-End des Fahrzeuges montiert, wie in Abbildung 6.1 rechts zu erkennen. Weiterhin ist im Demonstrator unter der Hinterachse des Testfahrzeuges die in der späteren Validierung verwendete Radadaptionseinheit zur Erfassung der Fahrzeugreferenz in Form der geometrischen Fahrachse des Testfahrzeuges zu erkennen.



Abbildung 6.1: Technologiedemonstrator zur prototypischen Implementierung

Zur Implementierung der Prozess-Software steht weiterhin ein zentrales Rechencluster zur Verfügung, welches die Sensordaten des Testfahrzeuges über die V2X-Schnittstelle des Fahrzeugrechners empfangen kann.

In den folgenden Abschnitten sind die Einzelschritte der Implementierung beschrieben. Dabei wird zunächst auf die Umsetzung des hybriden Multitargets eingegangen. Auf Basis der Auslegung dieses Betriebsmittels werden anschließend die Implementierung der zentralen Prozessinfrastruktur und die Realisierung des modularen Absicherungsprozesses erläutert. Im Anschluss wird die Implementierung der Targetextraktion und Funktionsabsicherung als Kernelemente des Prozesses beschrieben. Dabei wird auch die Umsetzung der definierten Gütekriterien und die damit einhergehende Realisierung der geforderten Nachvollziehbarkeit und Dokumentation erläutert.

Die Implementierung des Zielprozesses stellt die Funktionsabsicherung als letzten Prozess der Endmontage dar. Dies bedeutet die Verortung des Prozesses nach Abschluss aller Nacharbeits- und Finalisierungsprozesse am Ende der Montagelinie. Die Referenzmarken können daher in einer optimalen Konfiguration angeordnet werden. Der Prozess wird nach dem Konzept der statischen Funktionsabsicherung aus Abschnitt 5.2.4 umgesetzt, da dieser Ansatz aufgrund der kürzesten Toleranzketten den präzisesten darstellt. Die für die Absicherung not-

wendige Fahrzeugreferenz wird mittels der in [OTT21] vorgestellten Radadaptionseinheit erfasst.

Die Eigenschaften der verwendeten Sensoren sind in Tabelle 4 dargestellt.

Tabelle 4: Eigenschaften der verwendeten Sensoren

	FMCW Radar	Lidar	MPC	Monochrom-Kamera	Weitwinkel-Kamera
<b>FoV Horizontal</b>	180°	90°	60°	60°	106°
<b>FoV Vertikal</b>	-	45°	36°	36°	73°
<b>FoV Entfernung</b>	65 m	1-100 m	-	-	-
<b>Auflösung Horizontal</b>	5,1°-0,1°	0,25°	1920 px	1920 px	1600 px
<b>Auflösung Vertikal</b>	-	500 scanlines	1080 px	1080 px	1200 px
<b>Auflösung Entfernung</b>	0,237 m	k.A.	-	-	-

## 6.1 Hybrides Multitarget

Zur Implementierung des hybriden Multitargets wird das Konzept aus Abschnitt 5.2.2 umgesetzt. Hierzu ist zunächst mit Kenntnis der verwendeten Sensoren und des Abstandes zwischen Fahrzeug und Multitarget die Größe der Referenzmarken zu definieren. Diese ergibt sich im verwendeten Sensor-Setup aus der Auflösung des verwendeten Lidarsensors, da diese geringer ist, als die Auflösung der verwendeten Kameras. Als Abstand zwischen Fahrzeug und Multitarget wird eine Distanz von 6 m gewählt, um die Bildung von destruktiven Interferenzen des Radarsensors zu vermeiden und das Messrauschen des Lidar für kurze Arbeitsabstände aufgrund der geringen Laufzeiten zu minimieren.

Für die korrekte Targeterfassung durch den Lidarsensor werden mindestens drei Punkte pro Referenzmarke benötigt. Für ein reproduzierbares Ergebnis sollte die Zahl der abgetasteten Punkte höher liegen, sodass mindestens acht Punkte gewählt werden. Mit einer Winkelauflösung von  $0,25^\circ$  des Lidar bei einem Abstand von 5 m zur vordersten Marke ergibt sich damit ein Innendurchmesser von mindestens 131 mm für die Ringscheibe. Zur Abdeckung des FoV auch über den Parameter der Entfernung wird eine Tiefe der Anordnung von 3 m definiert. Dies stellt einen Kompromiss zwischen genutzter Fläche und erreichbarer Genauigkeit dar. Bei einer Verteilung der Referenzmarken in einem Bereich von 5-8 m ergibt sich ein Außendurchmesser von 210 mm.

Mit der Definition des Durchmessers der Referenzmarken von 131 – 210 mm kann die Größe des Cornerreflektors festgelegt werden. Dieser muss innerhalb des Rings der Referenzmarke liegen, ohne von diesem verdeckt zu werden. Hieraus ergibt sich eine Kantenlänge von 131 mm, womit der RCS bei  $45,62 \text{ m}^2$  liegt.

Die Referenzmarken wurden im 3D-Druck mittels Multi Jet Fusion (MJF) Verfahren gefertigt. Hierdurch sind die Referenzmarken präzise, robust, leicht und kosteneffizient zu fertigen. Abbildung 6.2 zeigt eine der in der Implementierung verwendeten Referenzmarken. Gut zu erkennen ist der innenliegende Cornerreflektor, der zweifarbige Außenring mit hohem Kontrast sowie die auf dem Außenring liegenden Passungen zum Einmessen der Referenzmarke im Referenz-KOS mittels Laserinferometer.



Abbildung 6.2: Umsetzung der Referenzmarken

Abschließend muss die Anordnung der Referenzmarken zur Realisierung eines Multitargets festgelegt werden. Da das Multitarget als letztes Element im EoL verortet ist, kann die Anordnung frei bestimmt werden. Hierdurch kann eine optimale Anordnung der Einzelmarken realisiert werden, sodass eine maximale Genauigkeit erreicht werden kann.

Hierzu stellt der Radarsensor mit seiner vom FoV abhängigen Winkelauflösung die erste limitierende Randbedingung dar. Da die Auflösung von Radarsensoren im Zentrum des FoV am höchsten ist, werden die Einzelmarken zunächst so angeordnet, dass sich diese horizontal und vertikal möglichst zentral im FoV der Radarsensoren befinden. Zudem ist der Abstand der Referenzmarken zueinander zu berücksichtigen, um eine Zieltrennfähigkeit bei der Auswertung der Radardaten zu ermöglichen und die Bildung von Phantomzielen zu verhindern.

Für die Definition der Anordnung bezüglich Lidar und Kamera besteht die Anforderung, das gesamte FoV abzudecken. Somit müssen die verbleibenden Referenzmarken horizontal, vertikal und in Entfernungsrichtung verteilt werden. Wesentlich ist hierbei eine möglichst unsymmetrische Anordnung, um lineare Abhängigkeiten und damit Singularitäten bei der Lösung des, durch die Koordinaten der Einzelmarken formulierten Gleichungssystems, zu vermeiden. Somit werden die Referenzmarken auf verschiedene horizontale und vertikale Ebenen aufgeteilt und über den definierten Raum von 5-8 m verteilt. Abbildung 6.3 stellt die finale Anordnung dar. Diese folgt einer möglichst optimalen Anordnung nach Abschnitt 5.2, wonach die Einzelmarken über das FoV verteilt angeordnet werden und die Marken mit dem geringsten Abstand in der Mittel des FoV liegen.

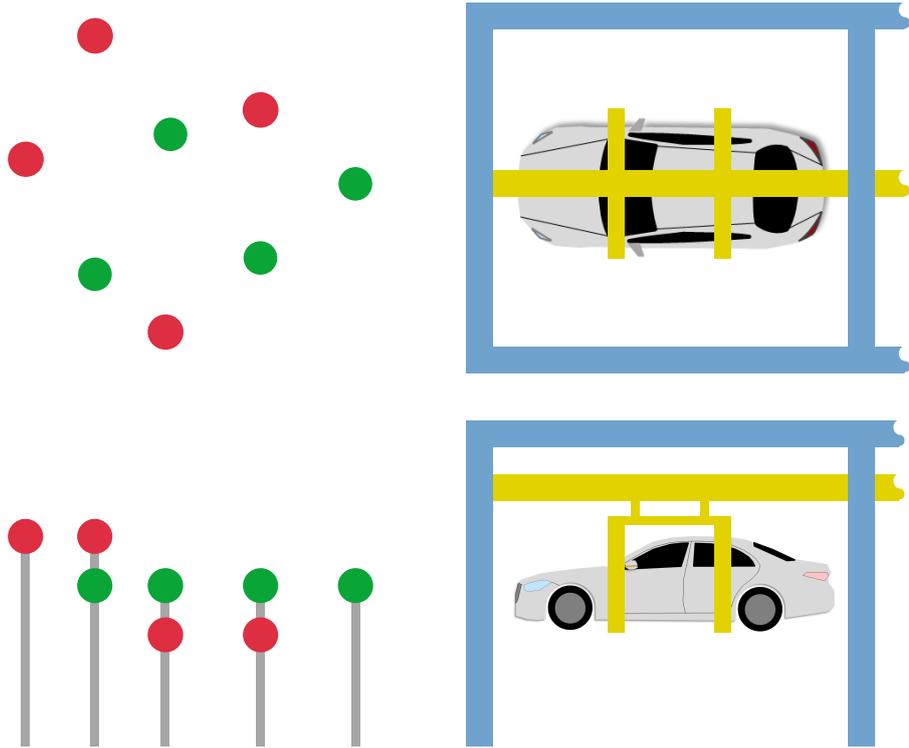


Abbildung 6.3: Implementierung der Target-Anordnung

## 6.2 Zentrale Prozessinfrastruktur

Die Implementierung des modularen Absicherungsprozesses erfordert eine Prozessarchitektur, welche eine Orchestrierung und parallele Ausführung der einzelnen Prozessmodule ermöglicht. Weiterhin muss der durch jedes abzusichernde Fahrzeug erzeugte Datensatz mittels V2X-Schnittstelle an diese übertragbar sein. Zur Realisierung einer solchen Infrastruktur, ist die containerisierte Implementierung der definierten Prozessmodule in einem Cloud- oder Edge-System sinnvoll.

Dazu wird das im Technologiedemonstrator vorhandene Rechencluster genutzt. Auf Basis der Sandboxing-Software Docker [DOC24] wird eine Prozessinfrastruktur aufgesetzt, welche für jedes Fahrzeug eine eigene Software-Instanz als Container startet, in dem der gesamte Absicherungsprozess für den zugehörigen Datensatz orchestriert wird. Dazu werden für jeden Sensor eines Fahrzeuges die in 5.2.1 definierten Softwaremodule mittels dem Rechenframework Ray [RAY24] gestartet. Durch Nutzung dieses dezentralen Rechenansatzes wird die Ausführung der verschiedenen Absicherungsfunktionen über die bestehenden Rechenressourcen verteilt und die Ergebnisse der Einzelfunktionen abschließend zusammengeführt. Durch die Containerisierung wird die Anforderung der Modularität und Wandlungsfähigkeit berücksichtigt. So können Fahrzeugtypen- und -variantenunabhängig spezifische Absicherungs-Services implementiert werden, welche die individuellen Anforderungen der Einzelsensoren adressieren. Hierdurch ist es möglich, sämtliche Fahrzeugderivate und -varianten sowie Sensorkonfigurationen auf einer zentralen Plattform abzusichern. Änderungen können direkt als neue Container-Versionen realisiert und mittels Docker und Ray einfach implementiert werden.

Die Implementierung des Gesamtsystems und die unterliegende Containerisierung werden in Abbildung 6.4 deutlich. Nachdem ein Fahrzeug den Absicherungsbereich passiert hat und den definierten Umfang an Sensordaten aufgenommen hat, werden diese in der in Abschnitt 5.2.5 konzipierten Datenstruktur gespeichert und drahtlos mittels V2X-Schnittstelle an die Prozessinfrastruktur übertragen. In einem als Container-Manager bezeichneten Softwaremodul werden die aus der Fahrwerks-Geometrievermessung vorliegenden Daten der Fahrzeugreferenz dem Datensatz angefügt. Anschließend wird für das individuelle Fahrzeug ein Container zur Ausführung des Absicherungsprozesses gestartet und der gesamte Datensatz an diesen übergeben.

In diesem Software-Container wird der fahrzeugspezifische Datensatz zunächst durch einen Prozess-Manager analysiert und aufgeteilt. In einem Modul zur Prozessorchestrierung wird der Datensatz auf die einzelnen Sensordaten aufgeteilt. Auf Basis der Sensor-Datensätze wird gemeinsam mit den Daten der Fahrzeugreferenz sowie den Referenzkoordinaten des hybriden Multitargets für jeden Sensor ein dezentraler Ray-Service gestartet. In diesen Services werden die dem jeweiligen Sensor-Typ entsprechenden Module zur Funktionsabsicherung unabhängig voneinander ausgeführt. Diese führen für jeden Frame des Datensatzes jeweils die Schritte zur Targeterkennung, -extraktion und Berechnung der extrinsischen Parameter durch.

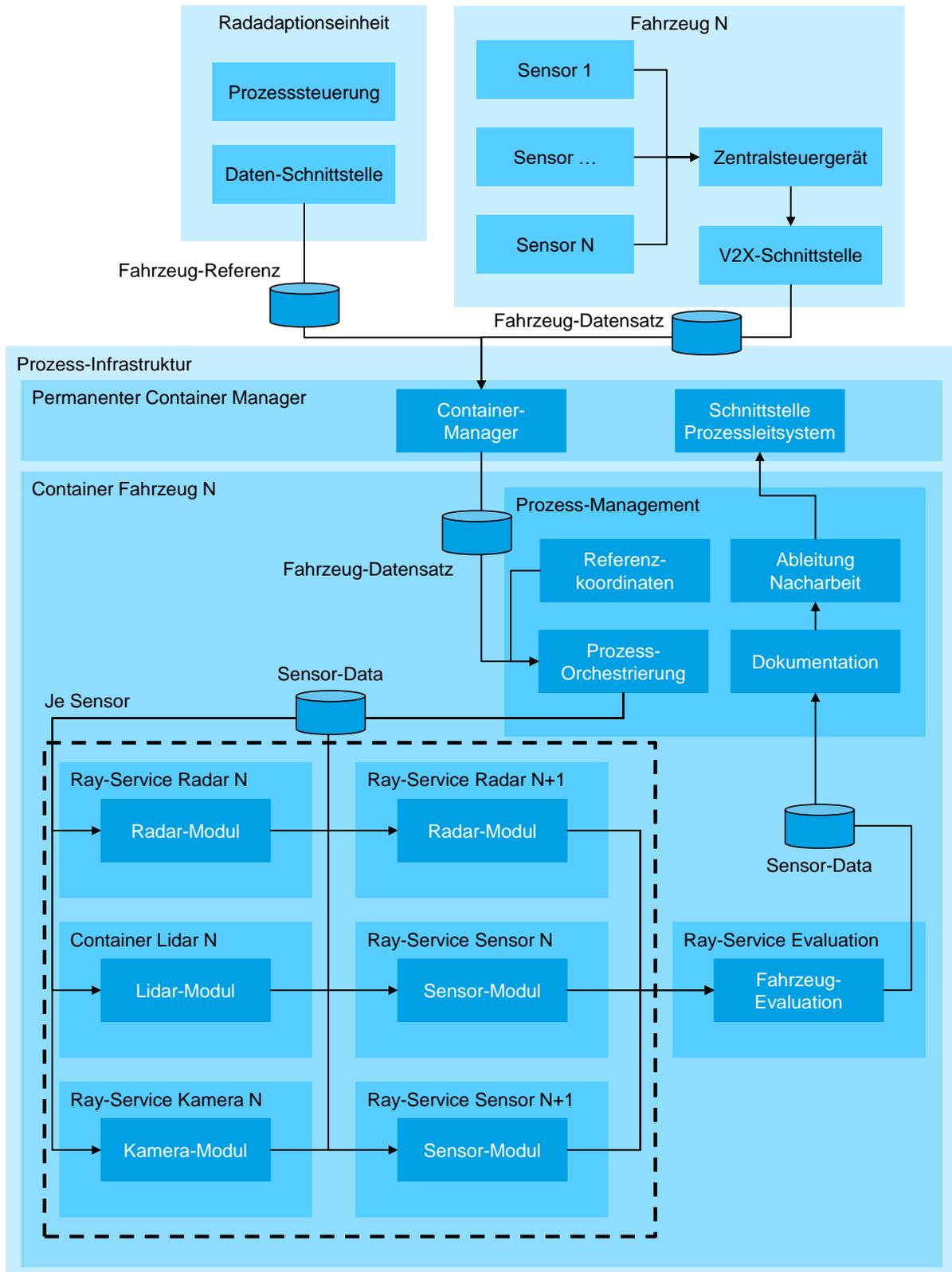


Abbildung 6.4: Implementierung der Prozessinfrastruktur und Containerisierung

Nachdem alle gestarteten Module auf Basis der Sensordaten, Fahrzeugreferenz und Referenzkoordinaten die extrinsischen Parameter und die zugehörigen Gütefaktoren berechnet haben, werden die Ergebnisse aller Services in einem überlagerten Evaluationservice konsolidiert. Dieser wertet die Ergebnisse der Einzelsensoren aus und bestimmt ein binäres Ergebnis der Funktionsabsicherung. Anschließend wird aus den Güteparametern der Einzelsensoren eine Gesamtgüte berechnet. Abschließend berechnet der Service ein binäres fahrzeugspezifisches Ergebnis und überträgt dieses wieder zurück in das Prozessmanagement-Modul, welches eine Archivierung des Datensatzes zur Prozessdokumentation durchführt und bei Bedarf eine Anweisung zur Nacharbeit des Fahrzeuges bereitstellt.

Mit der finalen Dokumentation des Prozessergebnisses und der Archivierung der Absicherungsdaten wird der Container geschlossen und damit die Ressourcen freigegeben.

Durch die dezentrale Datenverarbeitung stellt diese Art der Implementierung eine taktzeitunkritische Möglichkeit der Datenverarbeitung zur Verfügung. Während die Funktionsabsicherung für jedes Fahrzeug durchgeführt wird, kann dieses den Absicherungsbereich verlassen, nach Finalisierung der fahrzeugspezifischen Evaluation kann eine passende Nacharbeit eingeleitet oder das Fahrzeug zur Auslieferung finalisiert werden.

### 6.3 Targetextraktion und Bestimmung der extrinsischen Parameter

Für die Funktionsabsicherung in den sensorspezifischen Services müssen die Schritte der Targetextraktion spezifisch für jeden Sensor-Typ implementiert werden, da sich die Erfassungsprinzipien und somit die Art der Rohdaten unterscheiden. Damit beschreibt dieser Abschnitt die Implementierung der spezifischen Ray-Services für jeden Sensor-Typ. Die Implementierung folgt jeweils den entwickelten Konzepten aus Abschnitt 5.2.3 im Sinne abgeschlossener Softwaremodule, sodass sich diese für eine beliebige Anzahl an Sensoren parallel ausführen lassen. Zunächst werden die Referenzmarken in den Rohdaten erkannt und extrahiert. Auf Basis der extrahierten Mittelpunkte der Referenzmarken und den bekannten Koordinaten der Referenzmarken im Referenz-KOS werden anschließend die extrinsischen Parameter jedes Sensors bestimmt. Parallel erfolgt die Berechnung der zugehörigen Gütefaktoren aller Schritte in den Einzelfunktionen der Targeterfassung und -extraktion.

#### Radar

Zur Funktionsabsicherung jedes Radarsensors werden die zugehörigen Radar-Daten aus dem zentralen Datensatz extrahiert und dem zugehörigen Absicherungsservice übergeben. Dieser besteht aus den Einzelschritten der Datenprüfung, des Preprocessing, der Target-Erkennung, der Target-Extraktion, der Korrespondenzermittlung und der Transformationsberechnung. Die Schritte werden in der angegebenen Reihenfolge für jeden durch den Sensor aufgenommenen Datenframe ausgeführt. Nachdem alle Frames durchlaufen wurden, terminiert das Modul und stellt als Ergebnis die Mittelpunkte der erfassten Cornerreflektoren, die extrinsischen Parameter sowie die Gütefaktoren der Einzelfunktionen bereit. Die sensorübergreifende Auswertung der Ergebnisse erfolgt im Evaluations-Modul, dessen Implementierung in Abschnitt 6.4 beschrieben ist.

Die Prüfung der Eingangsdaten erfolgt, wie bereits in der Entwicklung des Lösungskonzeptes beschrieben, auf Basis der Evaluation der Datengröße. Dies lässt einen Rückschluss auf die Datenerfassung und die Datenübertragung zu. Nach erfolgreicher Prüfung erfolgt eine qualitative Bewertung der Daten. Hierzu wird die kumulierte Histogramm-Differenz aus dem Intensitäts-Histogramm des aktuellen Frames und einem hinterlegten Soll-Histogramm mit einem festgelegten Schwellwert verglichen.

Nach der Datenprüfung werden die Eingangsdaten zunächst mittels ROI reduziert. Hierzu werden alle Daten außerhalb eines definierten Koordinaten-, Intensitäts- und Geschwindigkeitsbereichs entfernt. Die geometrischen Randbedingungen der ROI ergeben sich dabei aus der Anordnung der Referenzmarken, dem Abstand von Fahrzeug zu Multitarget, dem FoV des spezifischen Sensors, den Montagetoleranzen und den Prozessabweichungen. Die Intensitätsgrenze ergibt sich aus dem RCS der Cornerreflektoren und dem Arbeitsabstand zum Multitarget. Für den hier implementierten statischen Prozess wird die Geschwindigkeitsebene Null des Radar-Cubes gewählt.

In den so reduzierten Daten werden anschließend die Maxima der Winkel-Entfernungszellen bestimmt, da diese die Positionen der Cornerreflektoren repräsentieren. Hierzu werden die Daten zunächst mittels des Algorithmus der zweidimensionalen Constant False Alarm Rate (2D-CFAR) gefiltert. Dieser Algorithmus untersucht durchlaufend die Intensitäten aller Winkel-

Entfernungszellen. Dabei wird die Intensität der jeweiligen Testzelle (engl.: cell under test, CUT) mit der skalierten Summe einer definierten Anzahl umgebender Zellen verglichen. Liegt die Intensität der CUT über diesem Grenzwert, wird diese als lokales Maximum gewertet. Dieses Vorgehen erfolgt über den Winkel und über die Entfernung, sodass Doppelziele aufgrund mehrzelliger Reflexionen unterdrückt werden. Wie in Abbildung 6.5 zu erkennen, verbleiben die Intensitäten der so bestimmten Bereiche als Kurvenverläufe im Datensatz. Zur Bestimmung der exakten Lage der Cornerreflektoren aus diesen, sind die jeweiligen Maximalwerte dieser Bereiche zu extrahieren. Hierzu werden die Entfernungszellen der verbliebenen Daten durchlaufen und auf Basis des Kurvenverlaufes diejenigen Zellen bestimmt, welche das jeweilige lokale Maximum darstellen.

Die so entstandene Punktwolke stellt alle potenziellen Referenzmarken in einem Frame dar. Diese kann aufgrund von Reflexionen in unmittelbarer Umgebung der Cornerreflektoren weiterhin Phantomziele enthalten. Um diese zu eliminieren, wird die Punktwolke mittels einer Clusteranalyse in regionale Gruppen aufgeteilt. Hierzu wird das Clusterverfahren HDBSCAN (Hierarchical Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise) verwendet. Der Algorithmus teilt die Ausgangspunktmenge zunächst dichtebasiert auf Cluster auf. Anschließend wird ein distanzgewichteter Baum gebildet, um die Abstände der Punkte der Cluster beschreiben zu können. Aus dieser Datenstruktur wird anschließend ein hierarchischer Baum gebildet, welcher eine Analyse der Einzelcluster zulässt. Dieser Baum wird im letzten Schritt so weit wie möglich reduziert, um die Hauptcluster zu finden. In allen so bestimmten Clustern wird das jeweilige Maximum bestimmt und damit die Phantomziele in Umgebung der Referenzmarken eliminiert. Es verbleibt lediglich die Zielkoordinate im Datensatz.

In der Menge der erfassten Target-Mittelpunkte werden daraufhin die finalen Korrespondenzen der Referenzmarken im Sensor-KOS zu den Mittelpunkten der Referenzmarken im Referenz-KOS ermittelt. Dazu werden zunächst die Schwerpunkte der jeweiligen Punktmengen berechnet und aus diesen die Translation der Mengen zueinander bestimmt. Anschließend werden mittels dieser Translation die Koordinaten der potenziellen Referenzmarken in das Referenz-KOS transformiert. Durch eine Bestimmung des jeweils betragsmäßig nächsten Punktes zu jedem Punkt im Referenz-KOS mittels kNN-Klassifikation (engl.: k-nearest neighbor, kNN), werden die exakten Korrespondenzen bestimmt.

Die extrinsischen Parameter des Radars werden mittels dem Vorgehen nach Kabsch bestimmt. Hierzu wird eine zweidimensionale Implementierung des Algorithmus verwendet. Zunächst wird die finale Translation durch die Differenz der Schwerpunkte beider finalen Punktmengen berechnet, da diese nach Elimination von Falschzielen eine Rest-Abweichung enthalten können. Die Gesamt-Translation zwischen Sensor- und Referenz-KOS ergibt sich folglich aus der Summe beider Teil-Translationen. Nachdem die Translation bestimmt wurde, wird anschließend über die Berechnung der Kreuzkovarianzmatrix und der anschließenden Singulärwertzerlegung die zugehörige Rotationsmatrix bestimmt.

Nach der Auswertung aller aufgenommenen Frames, werden die extrinsischen Parameter auf Ausreißer geprüft. Dazu wird über alle Rotationen der Interquartilsabstand (IQR) berechnet. Rotationen welche außerhalb des 25% und 75% Perzentils liegen, gelten als Ausreißer. Diese Frames werden in der abschließenden Berechnung des Mittelwertes aller Rotationswinkel nicht berücksichtigt.

In Abbildung 6.5 sind die jeweiligen Daten der einzelnen Prozessschritte dargestellt. Der Prozess beginnt mit der in der oberen Zeile links dargestellten Rohdatenmenge. Gut zu erkennen sind dabei die Maxima der erfassten Cornerreflektoren sowie weitere stark reflektierende Objekte in der Produktionsumgebung. In der oberen mittleren Abbildung sind die reduzierten Daten nach Filterung mittels CFAR dargestellt, sodass hier lediglich die erfassten lokalen Maximumskurven verbleiben. Rechts dargestellt sind folglich die finalen lokalen Maxima. Zu erkennen ist die häufige Dopplung naheliegender Maxima.

In der unteren Zeile rechts ist das Ergebnis des Clusterings der Maximalwerte sowie die ausgewählten Maxima der jeweiligen Zielcluster dargestellt. In der Mitte werden die Maxima vor der Transformation und die Position der Referenzmarken als gelbe Linien aufgezeigt. Abschließend sind links die Punktkorrespondenzen nach erfolgter Translation abgebildet. Die Grafik ist vergrößert in Anhang A2 zu finden.

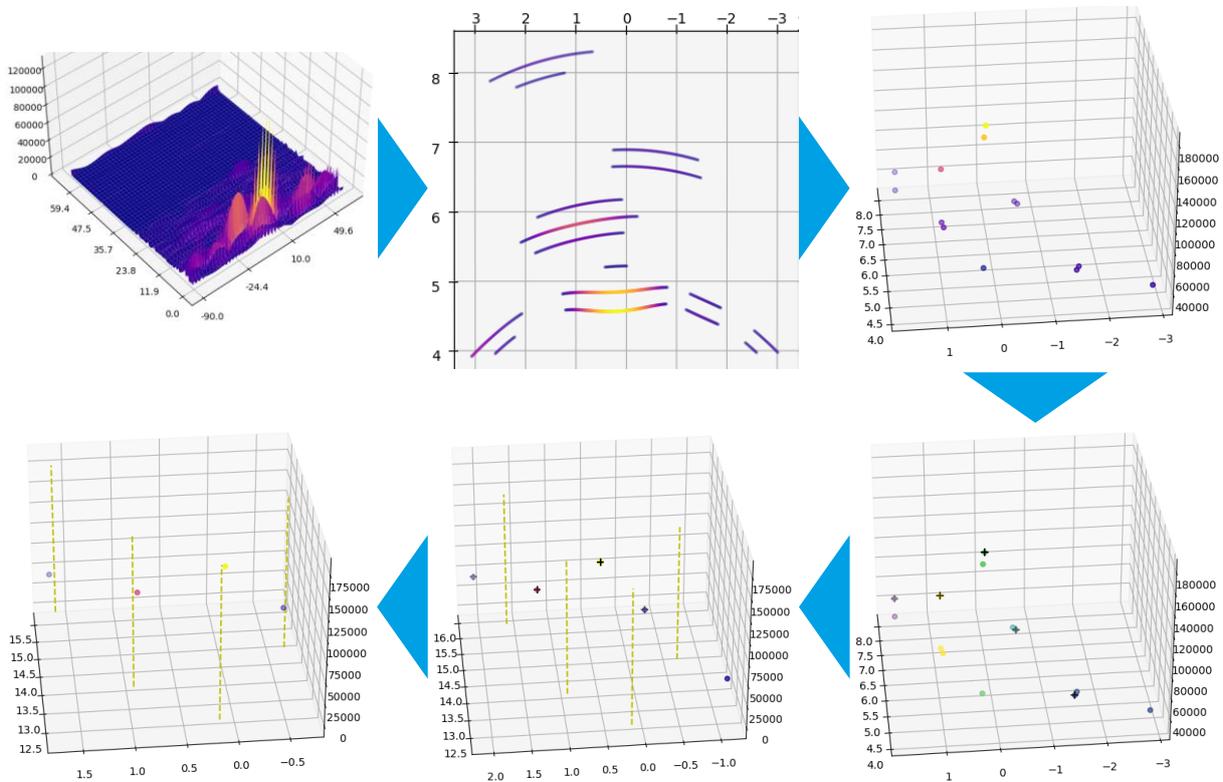


Abbildung 6.5: Schritte der Targetextraktion für den Radar

Der Gesamtablauf der Funktionsabsicherung ist im Ablaufdiagramm in Abbildung 6.6 dargestellt. Detaillierte Informationen zum Ablauf der Einzelfunktionen finden sich in den Strukturgrammen in Anhang A3.

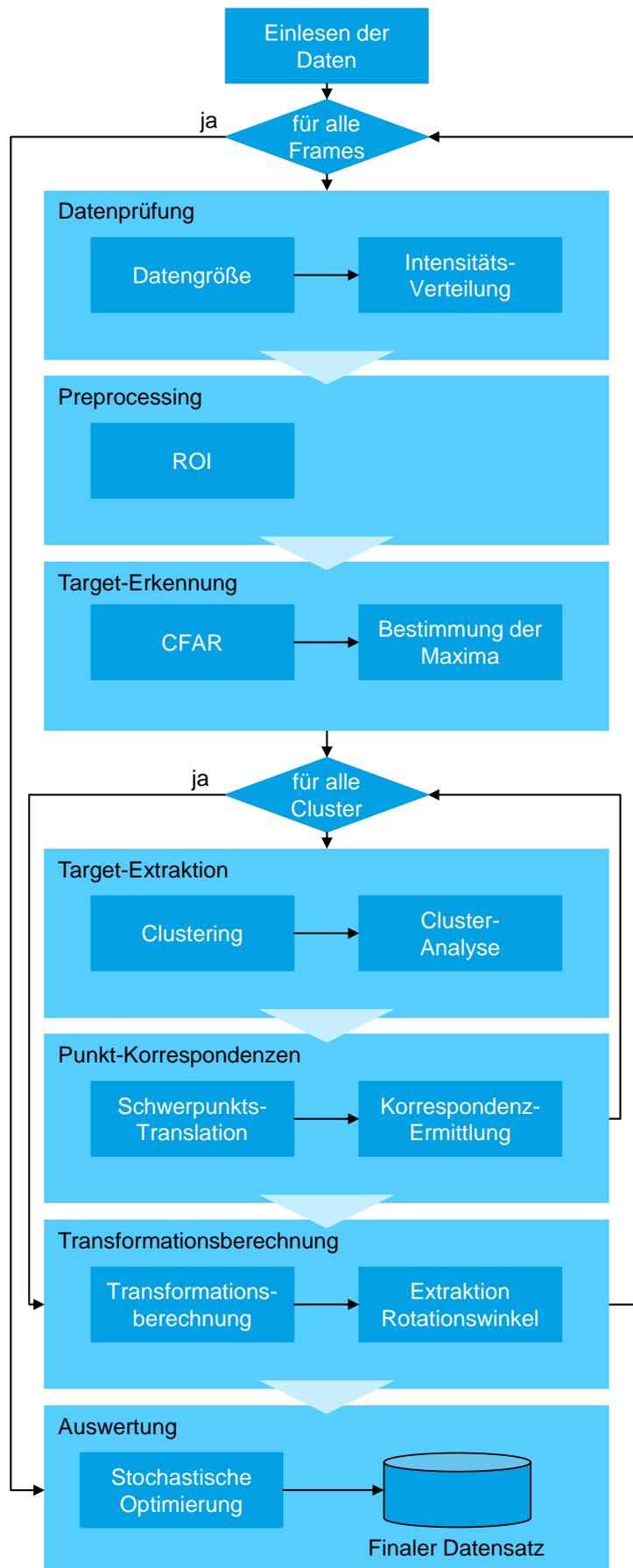


Abbildung 6.6: Ablaufdiagramm Targetextraktion und Transformationsberechnung Radar

## Lidar

Das Modul zur Funktionsabsicherung von Lidarsensoren umfasst analog dem vorangegangenen Abschnitt die Schritte der Datenprüfung, des Preprocessings, der Target-Erkennung, der Target-Extraktion, der Ermittlung der Korrespondenzen und der Berechnung der extrinsischen Parameter. Parallel werden die Güteparameter der Einzelfunktionen bestimmt. Die Schritte werden für alle Frames des durch das Modul zur Prozess-Orchestrierung übergebenen Sensor-Datensatzes durchgeführt.

Die Datenprüfung umfasst dabei die Überprüfung der Datengröße sowie die Prüfung der Punktverteilung. Für den zur Implementierung verwendeten Lidarsensor ergeben sich je Messung bis zu 125.000 Datenpunkte. Durch die Prüfung der Anzahl der Punkte je Messframe lässt sich die Vollständigkeit des Datensatzes verifizieren. Nach positiver Überprüfung der Datenmenge wird im nächsten Schritt die Punktverteilung geprüft. Hierzu werden Verteilungshistogramme jeweils für die X-, Y-, und Z-Koordinate berechnet. Diese Histogramme werden anschließend durch Berechnung der kumulierten Histogramm-Differenz gegen ein Soll-Histogramm abgeglichen. Für Abweichungen größer einem definierten Grenzwert besteht eine kritische Differenz, was auf einen Defekt, eine Verschmutzung oder eine Verdeckung des Sensors hinweisen kann. Zur Bestimmung des Fehlerfalls wird das Entfernungshistogramm ausgewertet. Bei einer starken Ausprägung der Klassen niedriger Entfernung kann auf eine Überdeckung des Sensors geschlossen werden. Weisen alle Klassen eine gleichförmige Verteilung auf, kann dies auf eine Beschädigung der Sensoroptik hinweisen. Wenn alle Entfernungswerte einer Klasse angehören, deutet dies auf eine Abdeckung des Sensors oder eine Beschädigung der Elektronik hin.

Bei positiver Datenprüfung wird die Punktwolke durch die Bildung einer ROI auf das notwendige Minimum an Punkten reduziert. Für den vorliegenden Fall wird die ROI auf einen Bereich von horizontal -3 bis 3 m, vertikal -1 bis 1 m und 2 bis 12 m in der Entfernung konfiguriert. Hierdurch wird aus den Daten die Submenge an Punkten extrahiert, welche die Referenzmarken enthält. Hintergrunddaten, der erfasste Boden und die Ränder des FoV werden entfernt. Die Grenzen der ROI ergeben sich dabei aus der Breite, Höhe und Tiefe des Multitargets zusätzlich einer Toleranz, welche sich aus den Montagetoleranzen und der Positionierunsicherheit des Fahrzeuges ergibt. Abschließend wird die reduzierte Punktmenge normiert, um die Kondition der numerischen Lösung zu steigern.

In jedem so aufbereiteten Frame werden anschließend alle Punktmengen bestimmt, welche eine potenzielle Referenzmarke enthalten können. Dies erfolgt durch ein Clustering mittels des BIRCH-Algorithmus (balanced iterative reducing and clustering using hierarchies). Der Algorithmus definiert zusammenhängende Punktmengen auf Basis eines Zielradius, einem Wert zur Festlegung von Subclustern und der Menge der gesuchten Zielcluster. Anschließend ordnet der Algorithmus alle initial gefundenen Cluster in einer Baumstruktur und reduziert diese durch Zuordnung der Cluster zueinander. Da im Gegensatz zum Radar die Punktdichte deutlich höher ist und sich diese in Abhängigkeit der Entfernung der Referenzmarken zum Sensor verändert, müssen für ein erfolgreiches Clustering verschiedene Parameter in Abhängigkeit der Eigenschaften der Punktwolke verwendet werden. Diese Parameter werden daher zunächst mittels Grid-Search bestimmt. Die Funktion analysiert hierzu eine Ausgangsmenge aller möglichen Parameter für das Clustering in allen möglichen Kombinationen und führt hierfür

ein testweises Clustering durch. Die Ergebnisse des Test-Clusterings werden anschließend gegeneinander bewertet, um die beste Paarung der Hyperparameter zu bestimmen. Für BIRCH geben diese einen Zielradius zur Definition von Clustern, einen Wert zur Festlegung der Subcluster und die Menge der gesuchten Zielcluster an.

Für alle berechneten potenziellen Target-Cluster eines Frames wird anschließend bewertet, ob es sich bei dem potenziellen Cluster um eine Referenzmarke oder um ein Störcluster handelt. Dazu wird jedes Cluster anhand der spezifischen Eigenschaften der Referenzmarken bewertet. Zunächst wird jedes Cluster auf seine Tiefe geprüft. Da bekannt ist, dass es sich bei den Referenzmarken um Strukturen handelt, welche lediglich einige Millimeter in ihrer Entfernungsausdehnung aufweisen, können Cluster mit einer größeren Tiefe entfernt werden. Daraufhin werden alle verbleibenden Cluster nach dem Verhältnis aus Breite und Höhe geprüft. Aufgrund der Kreisförmigkeit der Referenzmarken, muss dieser Quotient immer nahe eins liegen. In den verbleibenden Clustern werden abschließend mittels der kNN alle Punkte des Clusters klassifiziert und einzelne Ausreißer entfernt.

Zu finalen Klassifikation werden die bereinigten Cluster mittels RANSAC auf ihre Kreisform geprüft. Dieser Algorithmus bestimmt in mehreren Durchläufen zufällig eine feste Anzahl an Testpunkten und bestimmt für diese die passenden Kreisparameter in Form von Radius und Mittelpunkt. Die Parameter mit der größten Ähnlichkeit und Häufigkeit stellen die beste Lösung für die gesamte Punktmenge dar. [FIS87]

Die detektierten Kreise werden abschließend nach ihrem Radius bewertet. Kreise größer oder kleiner des Radius der Referenzmarken zuzüglich Toleranz stellen Störobjekte dar und werden entfernt. Der Schritt der Target-Extraktion stellt als Ergebnis die Menge der Mittelpunkte aller potenziellen kreisförmigen Referenzmarken bereit.

Die so vorliegende Menge der Target-Mittelpunkte kann weiterhin noch fehlerhaft detektierte Objekte enthalten, welche die Berechnung der extrinsischen Parameter negativ beeinflussen können. Daher werden analog zum Radar die finalen Korrespondenzen der Referenzmarken im Sensor-KOS zu den Mittelpunkten der Referenzmarken im Referenz-KOS ermittelt. Hierzu wird ebenfalls die Translation der beiden Punktmengen zueinander bestimmt und die Punktmengen übereinandergelegt und die exakten Korrespondenzen mittels kNN bestimmt.

Zur Berechnung der finalen extrinsischen Parameter wird die finale Translation durch die Differenz der Schwerpunkte beider finaler Punktmengen berechnet, da diese eine Abweichung aufgrund der fehlerhaft detektierten Punkte aufweist. Die Gesamt-Translation zwischen Sensor- und Referenz-KOS ergibt sich folglich aus der Summe beider Teil-Translationen. Anschließend werden die Rotationsparameter mittels der bereits vorgestellten Methode nach Kabsch bestimmt.

Nachdem alle aufgenommenen Frames durchlaufen wurden, folgt die Auswertung der gesamten Messreihe, da einzelne Frames durch Abweichungen in der Target-Erfassung Abweichungen in den Rotationsparametern enthalten können. Dazu wird ebenfalls auf der Menge der Rotationen um X-, Y- und Z-Achse der jeweilige IQR berechnet und Ausreißer entfernt.

Abbildung 6.7 verdeutlicht die beschriebenen Prozessschritte in der Reihenfolge der Einzel-funktionen. So ist in der oberen Zeile links die erfasste unverarbeitete Punktwolke und in der Mitte die Punktwolke nach Bildung der ROI zu erkennen. Oben rechts ist das Ergebnis nach

dem initialen Clustering abgebildet, jedes Cluster verfügt dabei über eine eigene Farbe. Auffallend ist das Störcluster im Vordergrund. In der unteren Zeile sind rechts die nach Cluster-Filtrierung verbleibenden Objekte dargestellt, welche alle Referenzmarken sowie Störobjekte enthalten. Unten in der Mitte sind die mittels RANSAC extrapolierten Mittelpunkte der erkannten Referenzmarken als rote Kreuze dargestellt. Abschließend sind links die Mittelpunkte der Referenzmarken und ihre korrespondierenden Punkte vor der Translation abgebildet. Die Grafik ist vergrößert in Anhang A4 zu finden.

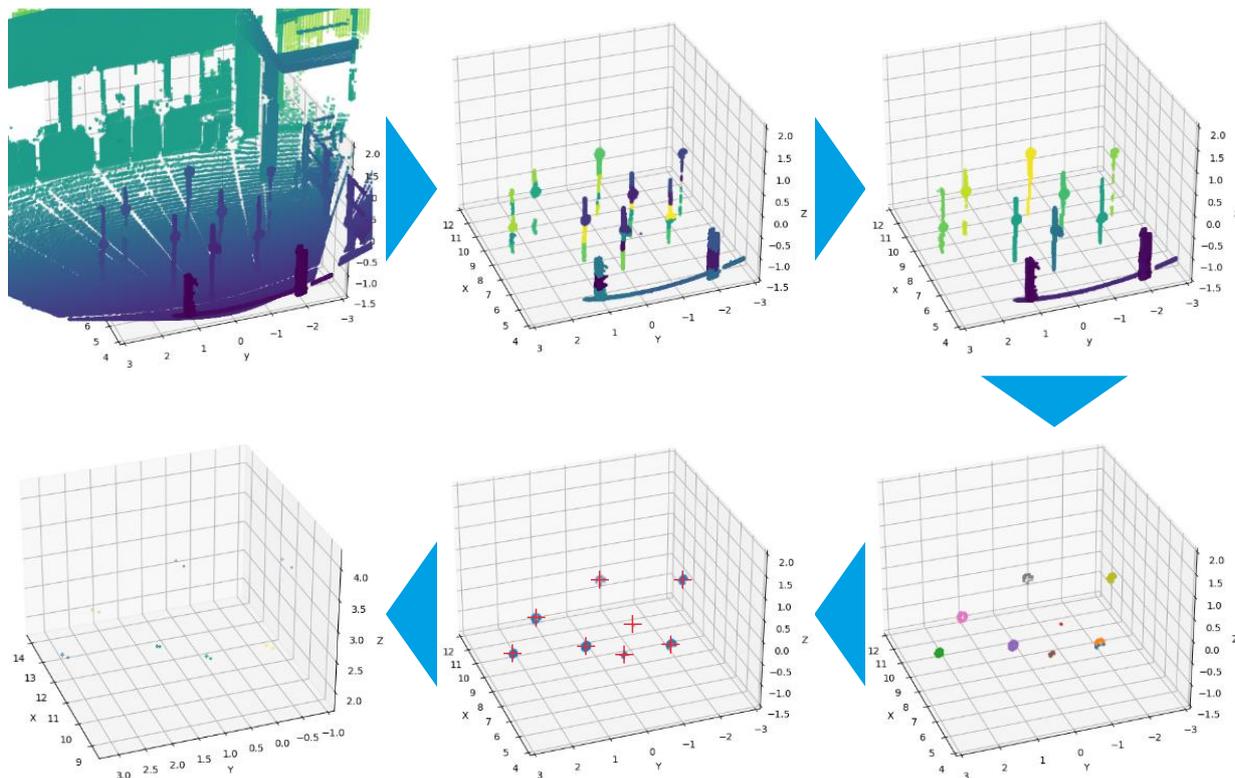


Abbildung 6.7: Schritte der Targetextraktion für den Lidar

Der Gesamttablauf der Funktionsabsicherung ist im Ablaufdiagramm in Abbildung 6.8 dargestellt. Detaillierte Informationen zu den Einzelfunktionen sind im Struktogramm in Anhang A5 abgebildet.

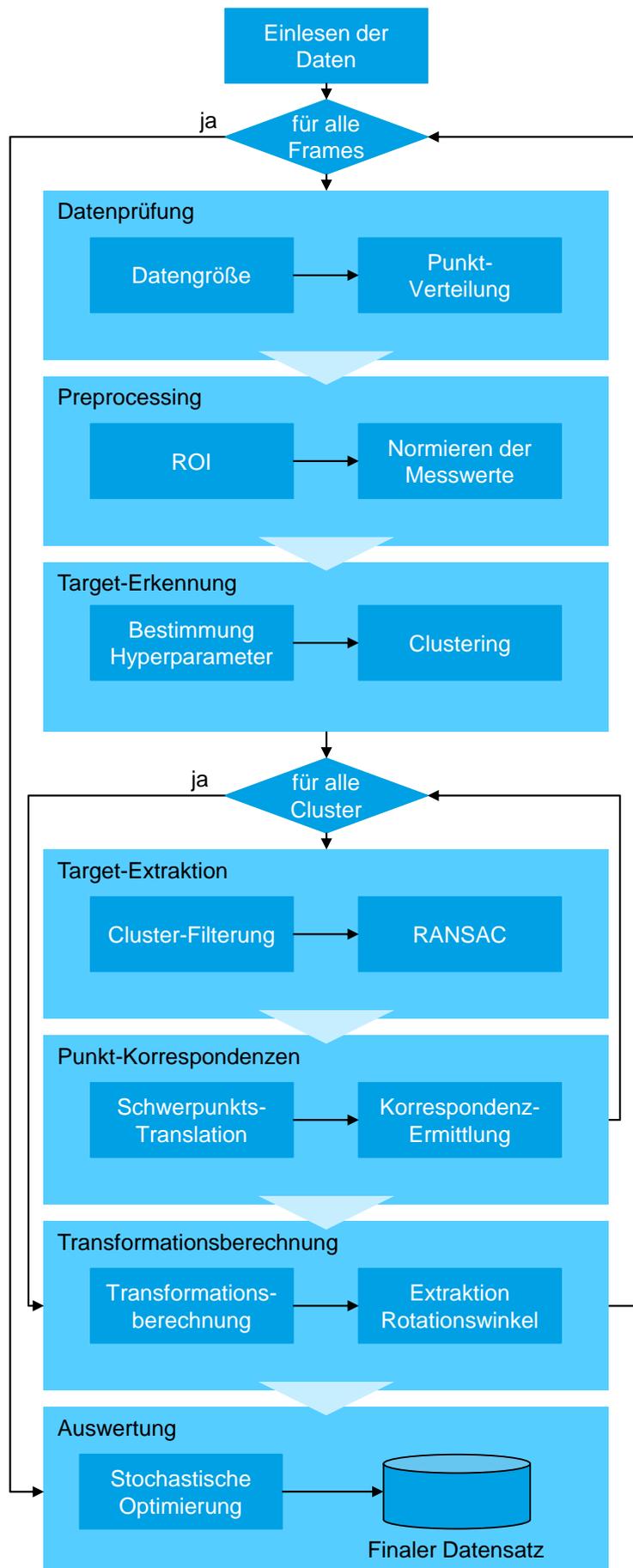


Abbildung 6.8: Ablaufdiagramm Targetextraktion und Transformationsberechnung Lidar

## Kamera

Wie auch bei Radar und Lidar ist die Funktionsabsicherung von Kameras mittels den im Lösungskonzept beschriebenen Schritten als eigenständiges, dezentral ausführbares Softwaremodul implementiert worden. In diesem Abschnitt wird aus Gründen der Übersichtlichkeit die Implementierung für die verwendete MPC beschrieben, die Implementierung für die weiteren Kameras erfolgte analog. Demnach umfassen die Schritte ebenfalls eine Datenprüfung, die Vorverarbeitung, die Erkennung der potenziellen Referenzmarken, die Extraktion der Position der Referenzmarken, die Ermittlung der Korrespondenzen zwischen den Mittelpunkten der extrahierten Referenzmarken und den Mittelpunkten dieser im Referenz-KOS und die Transformationsberechnung auf Basis dieser Korrespondenzen. Abschließend erfolgt gemeinsam mit den Ergebnissen der Radar- und Lidar-Module die Evaluation des Gesamtsystems.

Spezifisch für Kameras besteht die Datenprüfung aus der Überprüfung der Größe der empfangenen Datenmenge. Folgend wird zur qualitativen Prüfung der Eingangsdaten ebenfalls eine Histogramm-Differenz aus jedem erfassten Bild und einem Soll-Histogramm gebildet, um Abweichungen in der Helligkeitsverteilung zu detektieren. Liegt diese Differenz über einem definierten Grenzwert, wird das Histogramm ebenfalls analysiert, um einen Rückschluss auf den Fehlerfall zu erhalten. Zu weiteren Prüfung wird zusätzlich über den Michelson-Kontrast eine Kennzahl für den Kontrastwert jedes Bildes berechnet. Gemeinsam mit der Histogramm-Differenz ist hiermit ein Rückschluss auf eine mögliche Fehlerursache realisierbar. So weisen deutlich zu helle Bilder auf eine Überbelichtung hin, deutlich verdunkelte Bilder auf eine Verdeckung der Kamera, eine Verschmutzung der Kamera oder der Abdeckungen, wie Frontscheibe oder Schutzlinsen.

Im Falle einer positiven Datenprüfung folgt die Definition einer ROI zur Reduktion der zu verarbeitenden Datenmenge. Hierzu werden ebenfalls obere und untere Grenzen für X- und Y-Koordinate definiert, welche die ROI beschreiben. Diese ergeben sich analog zu den vorangegangenen Sensor-Typen.

Zur Erkennung aller potenziellen Referenzmarken in jedem Bild werden die Eigenschaften der Referenzmarken genutzt, in diesem Falle die Kenntnis der Kreisform sowie die Kenntnis der Farbe, respektive der Kontrast des Target-Rings. Auf dieser Basis werden alle Kanten in der ROI detektiert. Dies wird mittels eines Gradientenfilters umgesetzt, welcher die Änderungsrate der Helligkeit je Pixel beschreibt. Da die Helligkeit der Referenzmarken von der Umgebungshelligkeit stark beeinflusst wird, muss der Grenzwert für diese Funktion dynamisch berechnet werden. Hierzu wird dieser vorgelagert, auf Basis der Helligkeitsverteilung des aktuellen Bildes bestimmt. Anschließend werden mittels Hough-Transformation alle Kreise in einem definierten Radius-Intervall bestimmt. Die Zielwerte für oberen und unteren Radius ergeben sich dabei auf Basis der intrinsischen und extrinsischen Kameraparameter sowie der Größe der Referenzmarken, da aufgrund der Projektion in die Bildebene der Radius der Referenzmarken über die Entfernung skaliert wird.

Alle so detektierten Kreise enthalten neben den erfassten Referenzmarken zusätzlich alle kreisförmigen Kanten, welche dem Radiusintervall entsprechen. Um diese fehlerhaften Konturen zu entfernen, werden im Schritt der Target-Extraktion die Kreise nach der Helligkeit im Kreisinneren gefiltert. Entspricht der Helligkeitswert nicht einem dynamisch festgelegten Helligkeitsintervall, wird der spezifische Kreis entfernt. Weiterhin können die Kreise anhand ihrer

Lage zueinander beurteilt werden. Hierzu werden die Distanzen der verbleibenden Kreise zueinander bestimmt. Zu dicht aneinander liegende Kreise oder Kreise ohne Nachbarn werden entfernt, da es sich bei diesen ebenfalls um Störkonturen handelt.

Abschließend sind, wie auch bei den anderen Sensor-Typen, die Punkt-Korrespondenzen zu ermitteln.

Mit Kenntnis der korrespondierenden Koordinaten von Referenzmarken im Sensor-KOS und im Referenz-KOS kann anschließend die Perspective-n-Point Funktion des Bildverarbeitungsframeworks OpenCV verwendet werden. Diese berechnet auf Basis der aus der Kamerakalibrierung bekannten intrinsischen Kameraparameter sowie den korrespondierenden Punkten, die extrinsischen Parameter der Kamera. Diese enthalten sowohl die verbleibende Translation als auch die Rotation der Kamera im Bezug zum Referenz-KOS.

Analog zu Radar und Lidar werden die Ergebnisse aller Frames durchlaufen und Ausreißer entfernt. Das Gesamtergebnis ist als der Mittelwert aller Rotationen einer Dimension definiert. Die Einzelschritte der Prozesspipeline sind in Abbildung 6.9 visualisiert. In der oberen Zeile ist links das erfasste Bild, rechts das Bild nach Bildung der ROI. In der mittleren Zeile links werden alle initial detektierten Kreise dargestellt. Zu erkennen ist dabei auch eine erfasste Störkontur. In der Mitte rechts sind folglich die verbleibenden erkannten Kreise nach Filterung zu erkennen. Hier sind ausschließlich die Referenzmarken erfasst worden. Final werden in der unteren Zeile die Mittelpunkte der Kreise in Rot und die Position der Referenzmarken im Referenz-KOS in Gelb dargestellt. Hierdurch wird die Abweichung der Orientierung der Kamera zum Referenz-KOS deutlich. Die Grafik ist vergrößert in Anhang A6 zu finden.

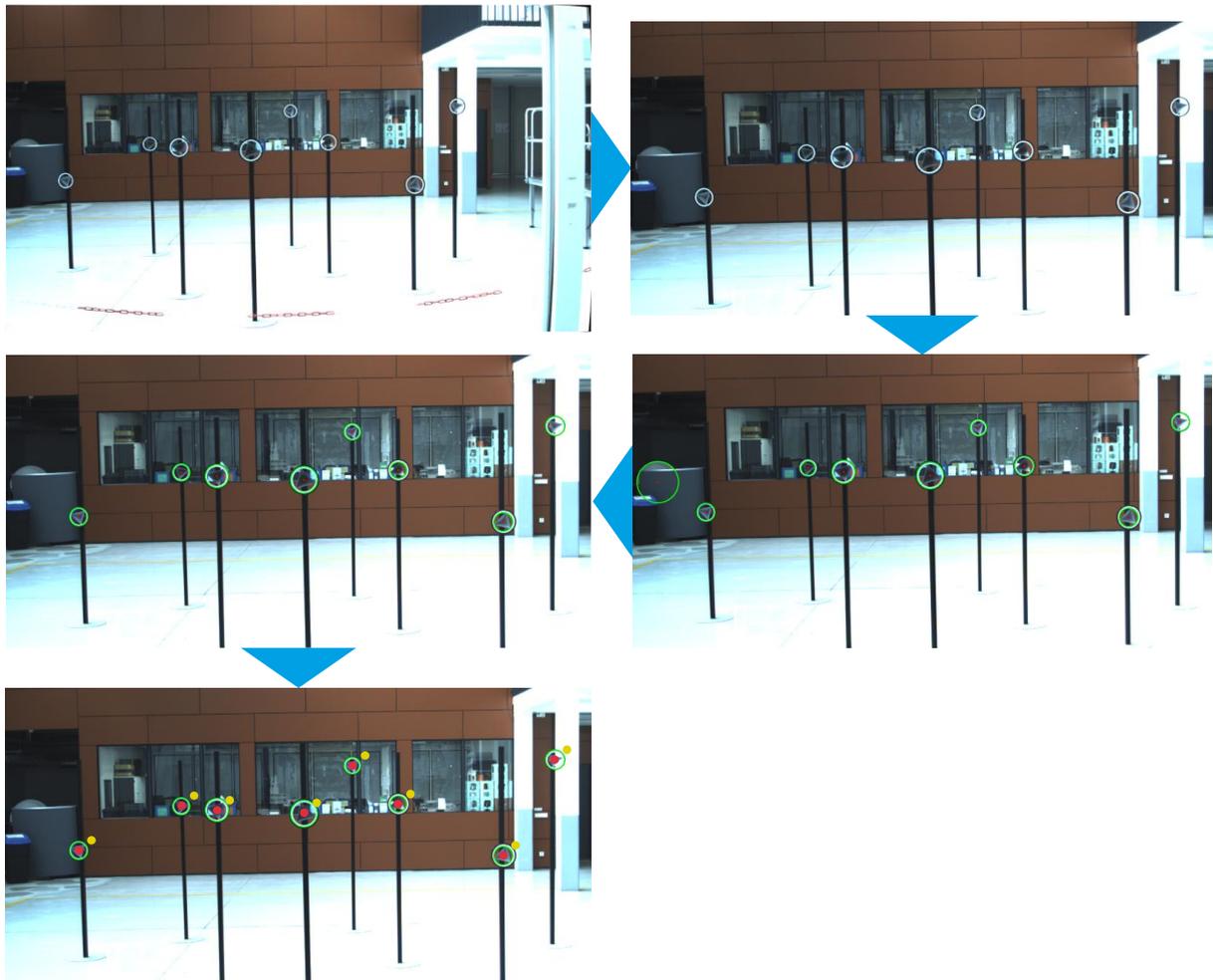


Abbildung 6.9: Schritte der Targetextraktion für die Kamera

Der Gesamttablauf der Funktionsabsicherung ist im Ablaufdiagramm in Abbildung 6.10 dargestellt. Detaillierte Informationen zu den Einzelfunktionen sind im Struktogramm in Anhang A7 abgebildet.

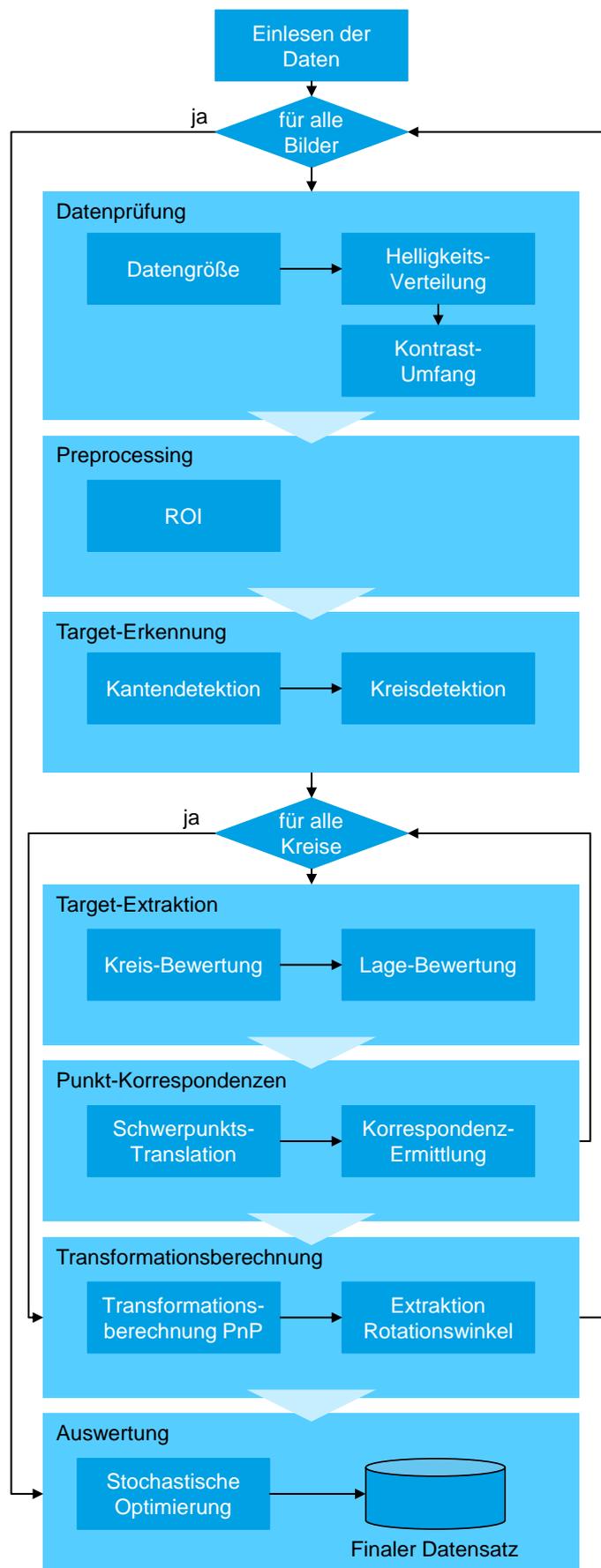


Abbildung 6.10: Ablaufdiagramm Targetextraktion und Transformationsberechnung Kamera

## 6.4 Funktionsabsicherung und Dokumentation

Nach der Berechnung der extrinsischen Parameter wird der finale Schritt der Funktionsabsicherung in einem zentralen Evaluationsmodul ausgewertet (siehe Abbildung 6.4). Hierfür liegen die extrinsischen Parameter aller Sensoren, die extrahierten Mittelpunkte aller erfassten Referenzmarken und die Güteparameter der jeweiligen Einzelschritte vor. Aus diesen wird abschließend ein Prozessergebnis der Einzelsensoren sowie die Evaluation des Gesamtfahrzeuges berechnet.

Der Gesamtablauf dieser Funktion ist im Ablaufdiagramm in Abbildung 6.11 dargestellt. Zur detaillierten Nachvollziehbarkeit der Implementierung ist, aus Gründen der Übersichtlichkeit, ein Struktogramm in Anhang A8 abgelegt.

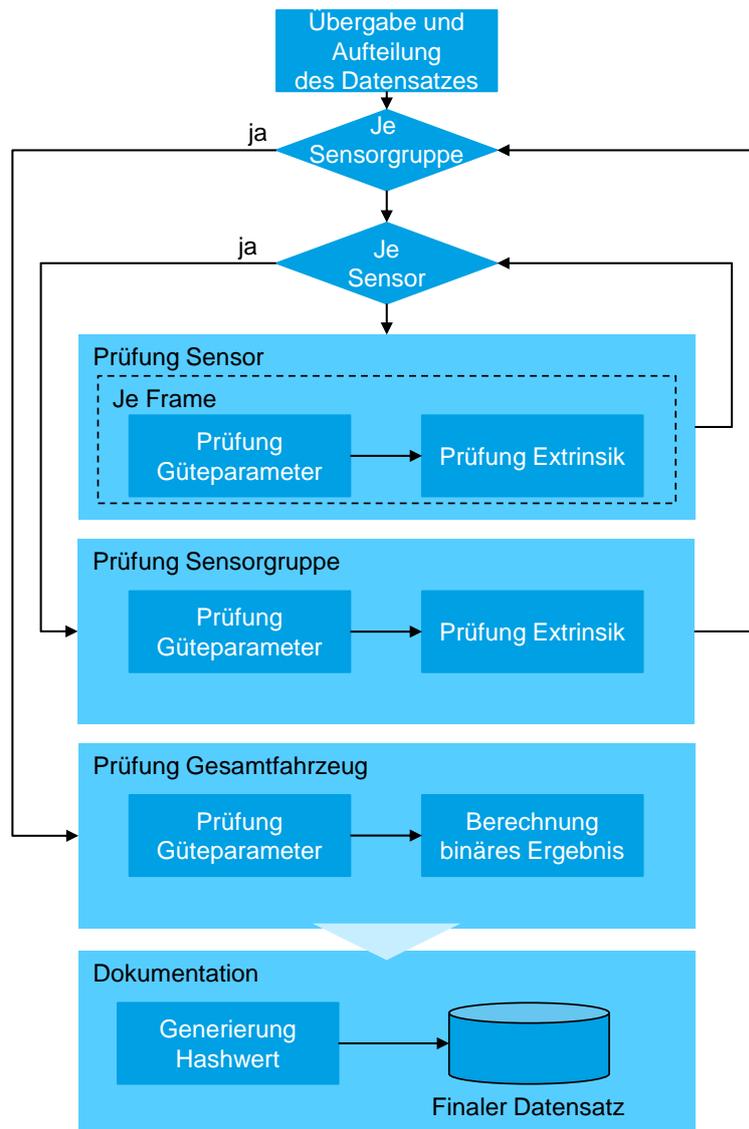


Abbildung 6.11: Ablaufdiagramm zur Evaluation

Die Beurteilung der Funktionsfähigkeit der umfelderfassenden Sensoren erfolgt in rekursiven Schritten, ausgehend von der Anzahl und Anordnung der Sensoren des abzusichernden Fahrzeuges. Demnach wird der gesamte Datensatz des Fahrzeuges in einem Top-Down Vorgehen in seine Sensorgruppen und anschließend in die den Gruppen zugehörigen Einzelsensoren aufgeteilt.

Auf der Ebene der Einzelsensoren werden zunächst die Güteparameter der Einzelfunktionen geprüft. Dazu wird über die Güteparameter der Einzelfunktionen iteriert und durch Verkettung dieser, entsprechend dem entwickelten Lösungskonzept, eine Gesamtgüte für die jeweiligen Sensoren bestimmt. Ist die Gesamtgüte geringer als ein definierter Schwellwert, werden die Güteparameter der Einzelfunktionen gemäß der Fehlertabelle in Anhang A1.1 – A1.3 analysiert und ein potenzieller Fehler abgeleitet. Dieser kann zur Einplanung eines Nacharbeitsumfanges weitergegeben werden. Liegt die Gesamtgüte über dem Schwellwert, werden anschließend die Abweichungen von Sensororientierungen der Inbetriebnahme und des Absicherungsprozesses bestimmt und, wie in Formel (37) angegeben, ein Ergebnis berechnet. Diese Schritte werden für jeden Messframe eines Sensors durchgeführt und die Ergebnisse verkettet.

Nach der Prüfung aller Sensoren einer Sensorgruppe wird folgend ein Ergebnis für die zugehörige Sensorgruppe bestimmt. Hierzu werden zunächst alle Güteparameter der Einzelsensoren betrachtet. Liegen diese innerhalb der definierten Sollwerte, wird gemäß Formel (28) eine Gesamtgüte für die spezifische Sensorgruppe bestimmt. Sofern diese ebenfalls innerhalb der vorgegebenen Grenzen liegt, erfolgt die Prüfung der extrinsischen Parameter der Einzelsensoren. Die Erfüllung der geforderten Toleranzen der Einzelsensoren liegen ab diesem Schritt als binäre Ergebnisse vor. Somit genügt eine Konjunktion dieser Werte. Sobald ein Sensor einer Sensorgruppe außerhalb der vorgegebenen Toleranzen liegt, kann keine Funktionsfähigkeit der Sensorgruppe festgestellt werden und das Gesamtergebnis fällt negativ aus.

Final erfolgt die Bewertung des Ergebnisses für das Gesamtfahrzeug. Analog zur Bewertung der einzelnen Sensorgruppen wird hier zunächst eine Verknüpfung der Güteparameter durchgeführt. Anschließend werden die binären Werte der Sensorgruppen konjugiert und damit ein binäres Ergebnis für das Gesamtfahrzeug erzeugt.

Die so erhaltenen Prozessergebnisse der Funktionsabsicherung werden anschließend archiviert. Hierzu wird aus der Verknüpfung der Güteparameter und den extrinsischen Parametern der Einzelsensoren ein Hashwert abgeleitet, welcher als Sicherheitsschlüssel für das Prozessergebnis dient. Der Datensatz kann anschließend im Fahrzeug und in einem Datenarchiv hinterlegt werden. Bei einer nachträglichen Veränderung von Teilen oder des gesamten Datensatzes ist der Hashwert nicht mehr gültig, sodass eine Manipulation festgestellt werden kann.

## 6.5 User-Interface

Für die Prozesssteuerung und zur Gewährleistung einer übersichtlichen und nachvollziehbaren Analyse der Prozessergebnisse, wurde eine grafische Nutzeroberfläche (engl.: graphical user interface, GUI) implementiert. In dieser können die Prozessergebnisse und zugehörigen Datensätze aller Fahrzeuge, die den Prozess durchlaufen haben, visualisiert werden. Zur Umsetzung wurde das Open Source Framework Plotly-Dash verwendet. Für die Datenübertragung der Prozessinfrastruktur zur GUI wird die in Abbildung 6.4 beschriebene Schnittstelle genutzt. Über diese wird der finale Datensatz jedes Fahrzeuges zur externen Archivierung bereitgestellt und kann in einer Visualisierungsoberfläche eingelesen werden.

Die Nutzeroberfläche verfügt dabei über mehrere Ebenen zur Datenvisualisierung. Abbildung 6.12 zeigt die oberste Ebene, auf der das Ergebnis eines Einzelfahrzeuges abgebildet wird. Im oberen Teil der Schnittstelle werden die Informationen des Fahrzeuges, welche aus dem Datensatz entnommen werden, dargestellt. Weiterhin wird auf der linken Seite das Fahrzeug in einer Übersichtsgrafik gezeigt, sodass die ermittelten Gierwinkel der Einzelsensoren abgelesen und interpretiert werden können. Dabei werden die Werte der Inbetriebnahme gestrichelt als Referenz und die in der Funktionsabsicherung ermittelten Werte als durchgehende Linie angezeigt. Rechts der Fahrzeugdarstellung befindet sich eine Tabelle mit den Mittelwerten, der Differenz zur Fahrzeugreferenz, der Standardabweichung und den Güteparametern sowie dem binären Ergebnis jedes Sensors.

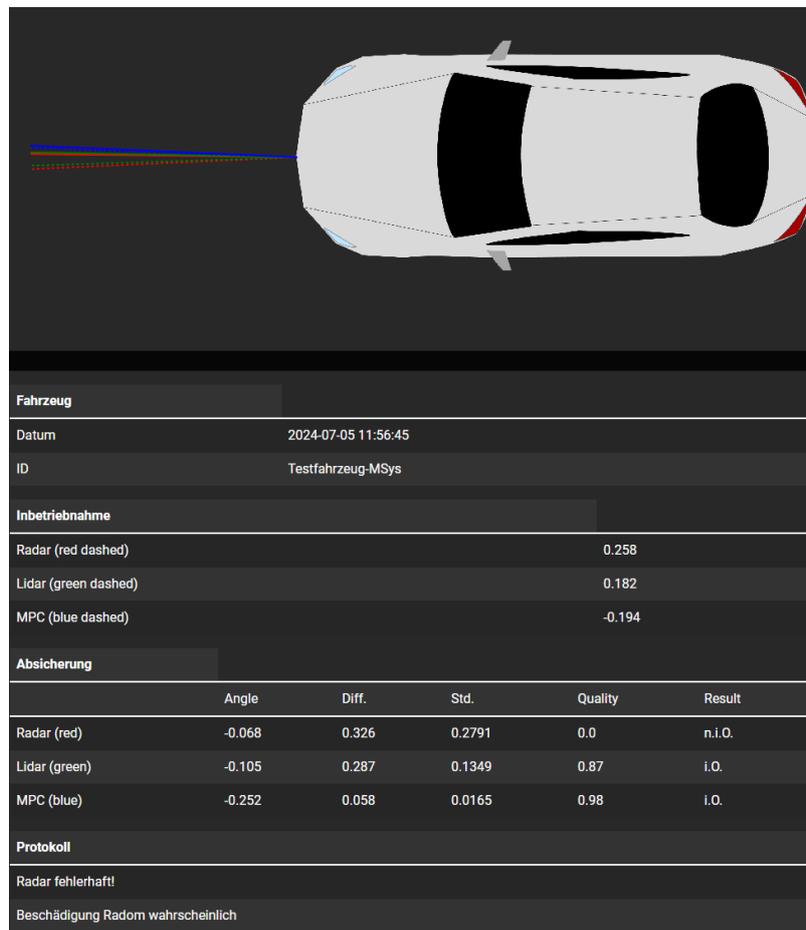


Abbildung 6.12: Übersichtsebene der Nutzeroberfläche

Unter dem Übersichtsbereich des Fahrzeuges befindet sich ein Protokollbereich, in dem mögliche Fehlerursachen der Einzelsensoren angezeigt werden. Hier ist im vorliegenden Fall die Beschädigung des Radoms des Radarsensors angezeigt, was mit dem negativen Ergebnis des Radars einhergeht.

Abbildung 6.13 zeigt die zweite Ebene der Nutzerschnittstelle. Hier können die Daten der Einzelschritte der Funktionsabsicherung für jeden Sensor visualisiert und die Teilergebnisse dieser nachvollzogen werden. Dazu befinden sich in der Kopfzeile Bedienelemente zur Auswahl der Sensoren, der Datenframes und der einzelnen Verarbeitungsschritte innerhalb der Frames. Wie zu erkennen, ist im Beispiel der Radarsensor ausgewählt. Für diesen wird in der Abbildung der erste Frame des Datensatzes und in diesem die Rohdaten der Messung angezeigt. Deutlich zu erkennen sind die Maxima der Retroreflektoren im Signalverlauf.

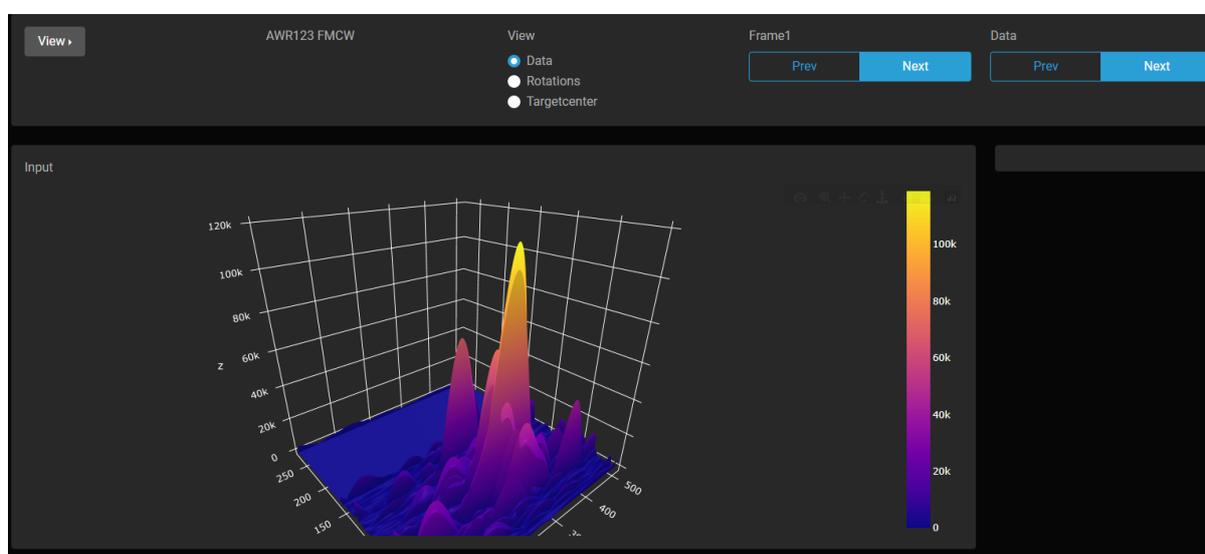


Abbildung 6.13: Datenebene des Nutzerschnittstelle

## 7 Validierung der Anforderungen

In diesem Kapitel wird die Erfüllung der in Kapitel 4 formulierten Anforderungen durch die in Kapitel 6 beschriebene prototypische Implementierung des Lösungskonzeptes validiert. Für die Durchführung dieser Validierung wird der Aufbau im beschriebenen Technologiedemonstrator verwendet. In diesem werden unter Nutzung der umfelderfassenden Sensorik, der Implementierung des hybriden Multitargets sowie der implementierten Prozessinfrastruktur verschiedene Validierungsversuche durchgeführt. Die Implementierung des Multitargets im Demonstrator ist aus Perspektive der MPC in Abbildung 7.1 zu erkennen. Die Koordinaten der einzelnen Referenzmarken im Referenz-KOS wurden mittels Laserinterferometer bestimmt. Als Referenz-KOS wird im Folgenden das globale Anlagen-KOS verwendet, in welchem auch die durch die Radadaptionseinheit erfasste Fahrzeugreferenz bereitgestellt wird.



Abbildung 7.1: Validierungsaufbau aus Perspektive der MPC des Testfahrzeuges

## 7.1 Genauigkeit und Universalität

Zunächst erfolgt die Validierung der Wiederholgenauigkeit der Bestimmung der extrinsischen Parameter aller Sensoren als wichtigste Anforderung. Der Wert der Wiederholgenauigkeit wird verwendet, da der exakte Bezug der Sensoren sowohl zur Fahrzeugreferenz, als auch zum Referenz-KOS nicht validierbar ist. So stellt beispielsweise die Ausrichtung des Bildsensors einer Kamera in Relation zu einem Referenz-KOS den konkreten Bezug dar. Die Ausrichtung des Bildsensors ist jedoch nicht direkt messbar. Es kann keine Messsystemanalyse durchgeführt werden, da Prozess- und Messmittelfähigkeit nur eingeschränkt bestimmbar sind. Weiterhin beschreiben diese Werte im vorliegenden Fall nur die Fähigkeiten der Fahrzeugsensoren, welche hier nicht Gegenstand der Validierung sind.

Zur Bestimmung der Wiederholgenauigkeit wurden mit Radar, Lidar und MPC jeweils fünf Prozessdurchläufe umfassend fünfundzwanzig Frames derselben Fahrzeugposition für drei unterschiedliche Arbeitsabstände aufgenommen. Der Absicherungsprozess wurde dazu so parametrisiert, dass dieser erst nach fünfundzwanzig Frames terminiert. Der finale Datensatz wurde mittels V2X-Schnittstelle an die Prozessinfrastruktur übertragen und im Rahmen der Implementierung ausgewertet.

Zur Auswertung der Versuche werden aus allen Messreihen jeweils der Mittelwert, die Streuung, die Standardabweichung und die Varianz berechnet. Dabei wird in diesem Kapitel aus Gründen der Übersichtlichkeit der Gierwinkel als maßgeblicher Parameter detailliert betrachtet. Alle weiteren Parameter werden diskutiert und die detaillierten Ergebnisse im Anhang dargestellt.

Zusätzlich lässt sich anhand dieser Untersuchung die Erfüllung der Anforderung der Universalität validieren. Sofern die Genauigkeitsanforderung für alle drei Sensor-Typen erfüllt werden kann, ist auch die Anforderung der Universalität erfüllt.

### Validierung der Funktionsabsicherung für Radarsensoren

Der Radarsensor erfasst die Referenzszene lediglich in Winkel und Entfernung, eine Höhenauflösung existiert, wie angegeben, nicht. Daher kann die Validierung der Wiederholgenauigkeit nur für die Rotation des Sensors um die Hochachse (Z-Achse) durchgeführt werden.

In Abbildung 7.2 ist der Verlauf des Gierwinkels für einen Prozessdurchlauf umfassend fünf- und zwanzig Messungen mit dem Radarsensor bei einem Arbeitsabstand von sechs Metern dargestellt.

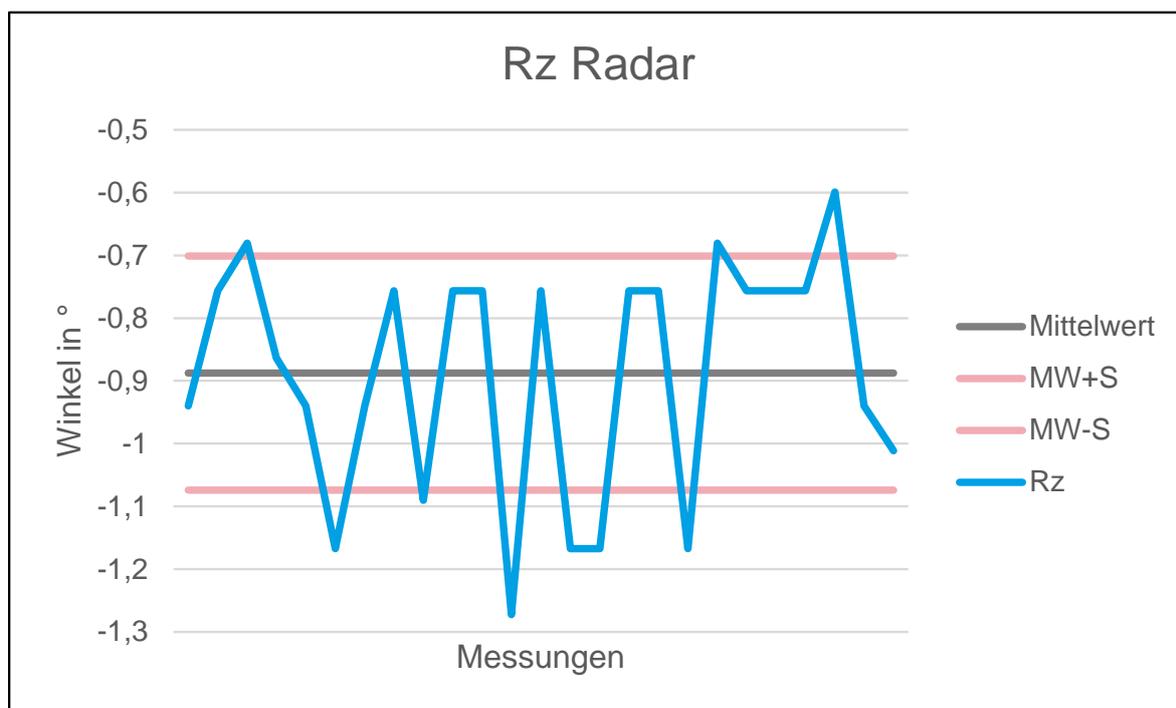


Abbildung 7.2: Gierwinkel über 25 Messframes des Radar

Der berechnete Mittelwert der Serie beträgt  $-0,8877^\circ$ . Wie im Diagramm zu erkennen, springt der Messwert des Radars hauptsächlich zwischen den Werten  $-0,7564^\circ$  und  $-1,0901^\circ$ . Dies ist durch das Messrauschen des Sensors selbst zu begründen. Die Position der Referenzmarken wird in jedem Frame neu bestimmt. Hierdurch ändern sich die zugehörigen Winkel-Entfernungszellen der einzelnen Referenzmarken im Bereich der Winkelauflösung. Dieser Effekt bedingt ein wechselndes Prozessergebnis nach Berechnung der Rotation des Sensors auf Basis der erfassten Referenzmarken. Die Standardabweichung der Messung beträgt für diese Messreihe  $0,1865^\circ$ , die Varianz  $0,0347^\circ$ . Diese Werte sind bei einer Auflösung von  $5,1^\circ$  bis  $0,1^\circ$  des Radar als präzise zu bewerten.

Zur weiteren Validierung wurde der Prozess umfassend fünf und zwanzig Aufnahmen für drei Arbeitsabstände jeweils fünf Mal wiederholt. Abbildung 7.3 zeigt die Verteilung der Messwerte dieser einzelnen Messungen, den Verlauf des Mittelwertes der Messungen und die zugehörige Standardabweichung für jeden Prozessdurchlauf. Zusätzlich wurden für die Interpretation der Ergebnisse die Anzahl der verwertbaren Frames je Prozessdurchführung zu den einzelnen Verteilungen angegeben. Maßgeblich für die Validierung ist die Prozessdurchführung bei einem Abstand von sechs Metern, da dies dem gewählten Optimalszenario entspricht.

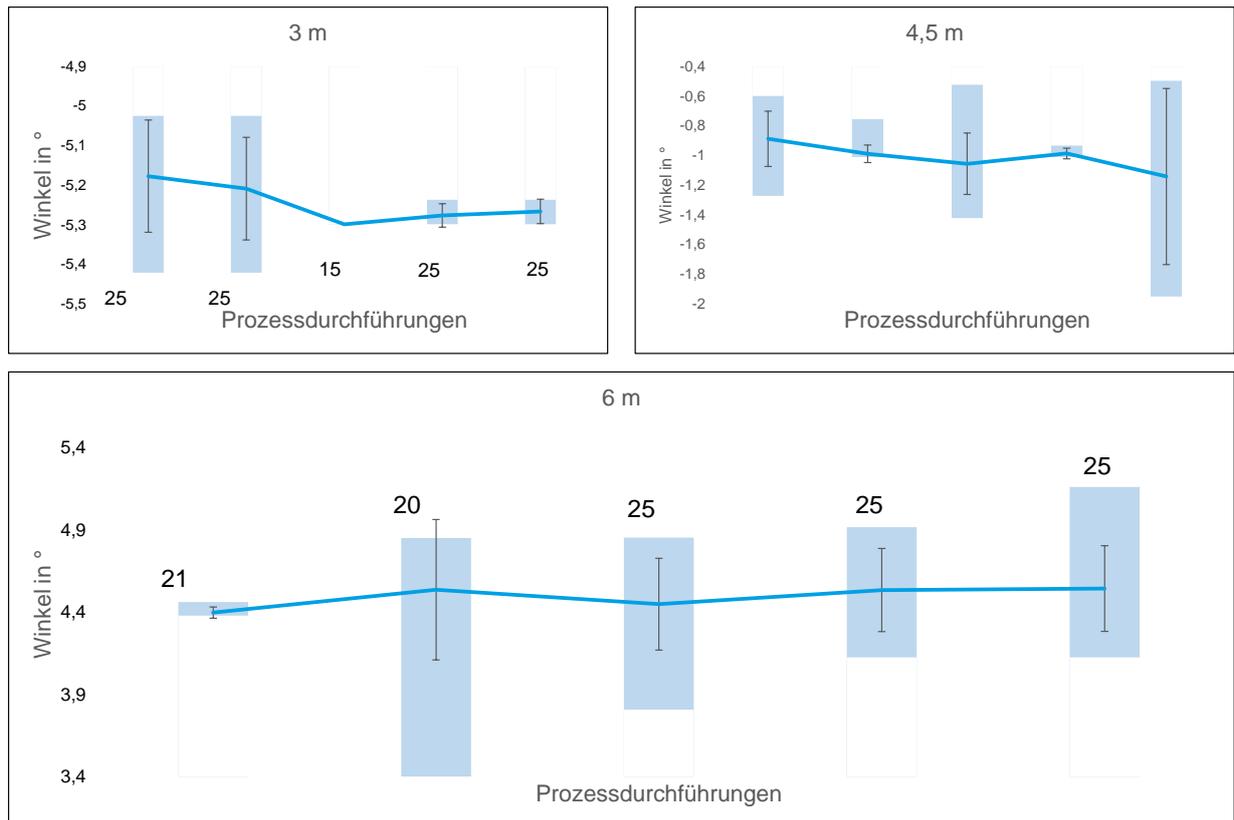


Abbildung 7.3: Gierwinkel des Radars über verschiedene Arbeitsabstände

Für die Versuche bei sechs Metern Abstand ergibt sich eine mittlere Standardabweichung von  $0,2507^\circ$  bei einem Mittelwert von  $4,6931^\circ$  über alle fünf Prozessdurchläufe. Auffallend ist die starke Abweichung der verwertbaren Frames für die erste und zweite Prozessdurchführung. Hierbei ist auch eine hohe Varianz der Spreizung zu erkennen.

Ein ähnlicher Effekt ist in den Ergebnissen der Prozessdurchführung bei drei Metern Abstand zu erkennen. Hier ist die Anzahl der verwertbaren Frames in der dritten Durchführung am geringsten, weiterhin wird hier wiederholt der gleiche Wert berechnet. Dies ist durch eine stark ansteigende Filterung der Messergebnisse zu erklären, da bei diesem geringen Arbeitsabstand der Einfluss von Störgrößen maximal ist.

Die Standardabweichungen, die maximale Streuung der Sensororientierung, sowie der Mittelwert sind in Tabelle 5 dargestellt. Bei der Interpretation der Ergebnisse sind die genannten Effekte in den Ergebnissen der Durchführungen bei drei und viereinhalb Metern Arbeitsabstand zu berücksichtigen.

Tabelle 5: Standardabweichungen des Gierwinkels unterschiedlicher Arbeitsabstände des Radar

	3 m	4,5 m	6 m
<b>Standardabweichung</b>	$0,1018^\circ$	$0,2162^\circ$	$0,2507^\circ$
<b>Maximale Streuung</b>	$0,3960^\circ$	$1,4529^\circ$	$1,7881^\circ$
<b>Mittelwert</b>	$-5,2455^\circ$	$-1,0121^\circ$	$4,4931^\circ$

Bezüglich der Genauigkeit der Bestimmung der extrinsischen Parameter des Radars kann eine Erfüllung der Anforderung festgestellt werden. Die Standardabweichungen liegen für alle drei Arbeitsabstände unter der geforderten Wiederholgenauigkeit von  $\pm 0,3^\circ$ .

### Validierung der Funktionsabsicherung für Lidarsensoren

Der Lidar erfasst die Referenzszene dreidimensional. Damit können im Prozess drei Rotationen des Sensors zum Referenz-KOS bestimmt werden. Da für die Funktionsabsicherung die Rotation um die Hochachse maßgeblich ist, wird diese im Folgenden betrachtet. Die analogen Ergebnisse für die Roll- und Pitch-Winkel sind in Anhang A9 zu finden.

Analog zum Radar wurde auch für den Lidar zunächst ein Prozess bestehend aus fünfundzwanzig Messungen bei einem Abstand von sechs Metern untersucht. Der Verlauf der Rotation sowie der sich ergebende Mittelwert und der Mittelwert plus einfacher Standardabweichung sind in Abbildung 7.4 dargestellt.

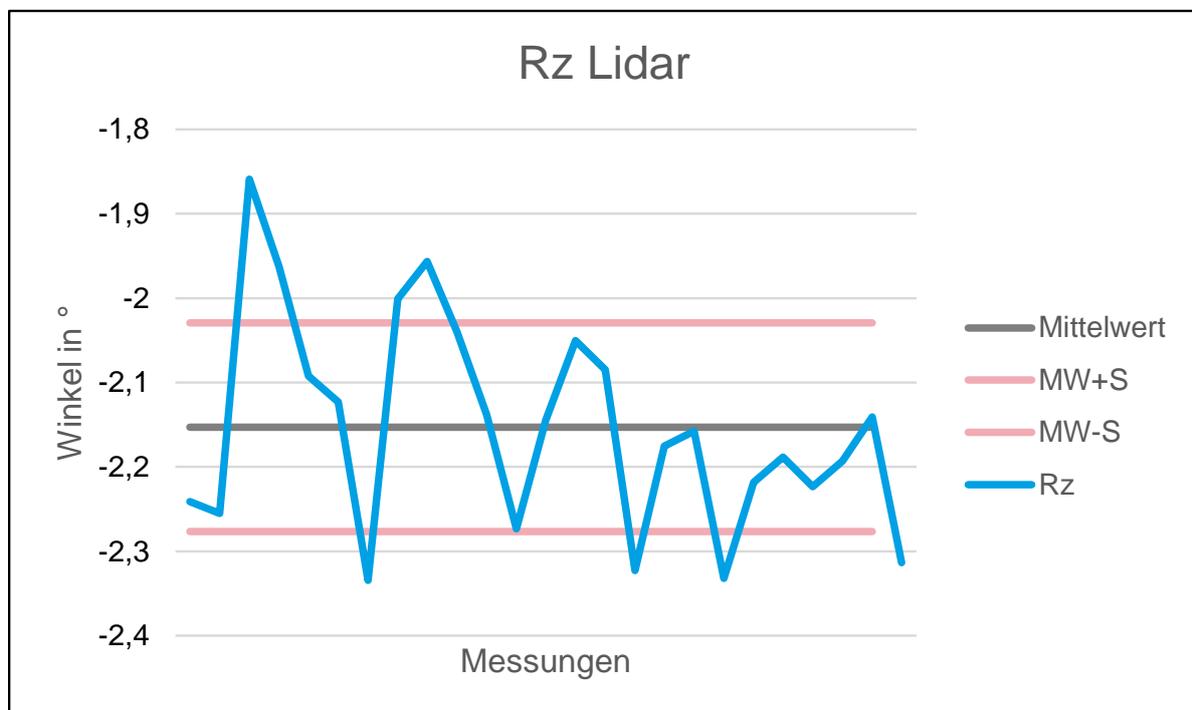


Abbildung 7.4: Rotationsparameter über 25 Messframes des Lidar

Der berechnete Mittelwert der Messung beträgt  $-2,1528^\circ$ , die Standardabweichung der Serie  $0,1236^\circ$ . Wie im Diagramm zu erkennen, bewegt sich der Rotationswert teilweise außerhalb des Intervalls von einer Standardabweichung.

Abbildung 7.5 zeigt die Verteilung des Prozessergebnisses bei unterschiedlichen Arbeitsabständen. Auch hier ist der Gierwinkel bei einem Abstand von sechs Metern maßgeblich.

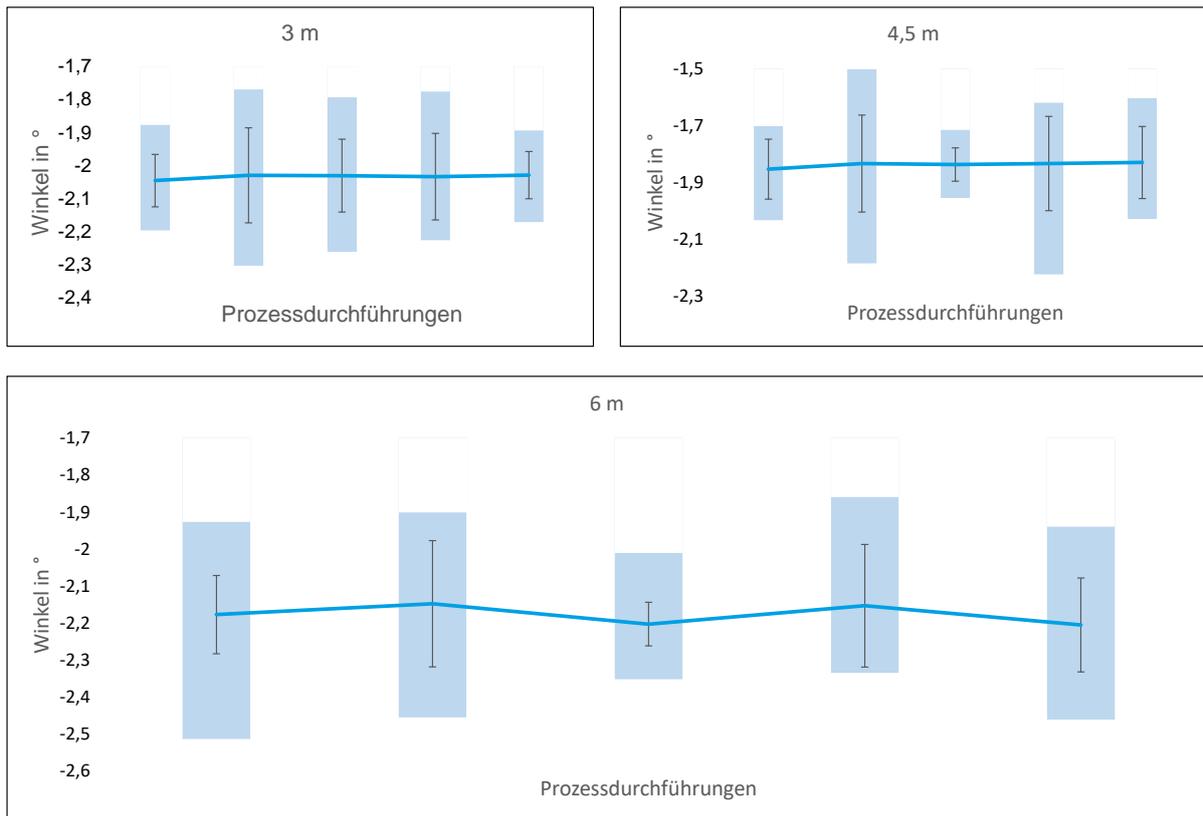


Abbildung 7.5: Gierwinkel des Lidars über verschiedene Arbeitsabstände

Betrachtet man die Orientierung des Sensors über die verschiedenen Prozessdurchführungen hinweg, wird die Veränderung der Orientierung des Fahrzeuges zu den Referenzmarken zwischen den einzelnen Messreihen deutlich. Dies spiegelt sich in den sich ändernden Mittelwerten über die drei Versuchsdurchführungen in Tabelle 6 wider. Die Standardabweichung fällt bei sinkendem Arbeitsabstand, die maximale Streuung verändert sich nur geringfügig. Dies ist mit einer steigenden Punktdichte und einer damit einhergehenden präziseren Targetextraktion zu erklären.

Tabelle 6: Standardabweichungen des Gierwinkels unterschiedlicher Arbeitsabstände des Lidar

	3 m	4,5 m	6 m
<b>Standardabweichung</b>	0,1071°	0,1255°	0,1286°
<b>Maximale Streuung</b>	0,4092°	0,4677°	0,4957°
<b>Mittelwert</b>	-2,0334°	-1,8366°	-2,1770°

Für die Validierung der Genauigkeit der Bestimmung der extrinsischen Parameter des Lidars kann ebenfalls eine Erfüllung der Anforderung von  $\pm 0,3^\circ$  Wiederholgenauigkeit festgehalten werden. Unabhängig vom Arbeitsabstand liegen die Standardabweichungen deutlich unter dem geforderten Wert.

Anhang A9 ist zu entnehmen, dass auch für die Rotation um X- und Y-Achse jeweils die geforderte Wiederholgenauigkeit von  $\pm 0,6^\circ$  unterschritten wird.

### Validierung der Funktionsabsicherung für die MPC

Für die Kamera können, auch bei zweidimensionaler Erfassung, durch die Verwendung des PnP-Algorithmus ebenfalls der Roll-, Pitch- und Yaw-Winkel berechnet werden. Wie auch bei Radar und Lidar, ist in Abbildung 7.6 nur der Verlauf des Gierwinkels dargestellt. Dieser wurde analog über fünfundzwanzig Messungen bei sechs Metern Abstand zum vorderen Target berechnet.

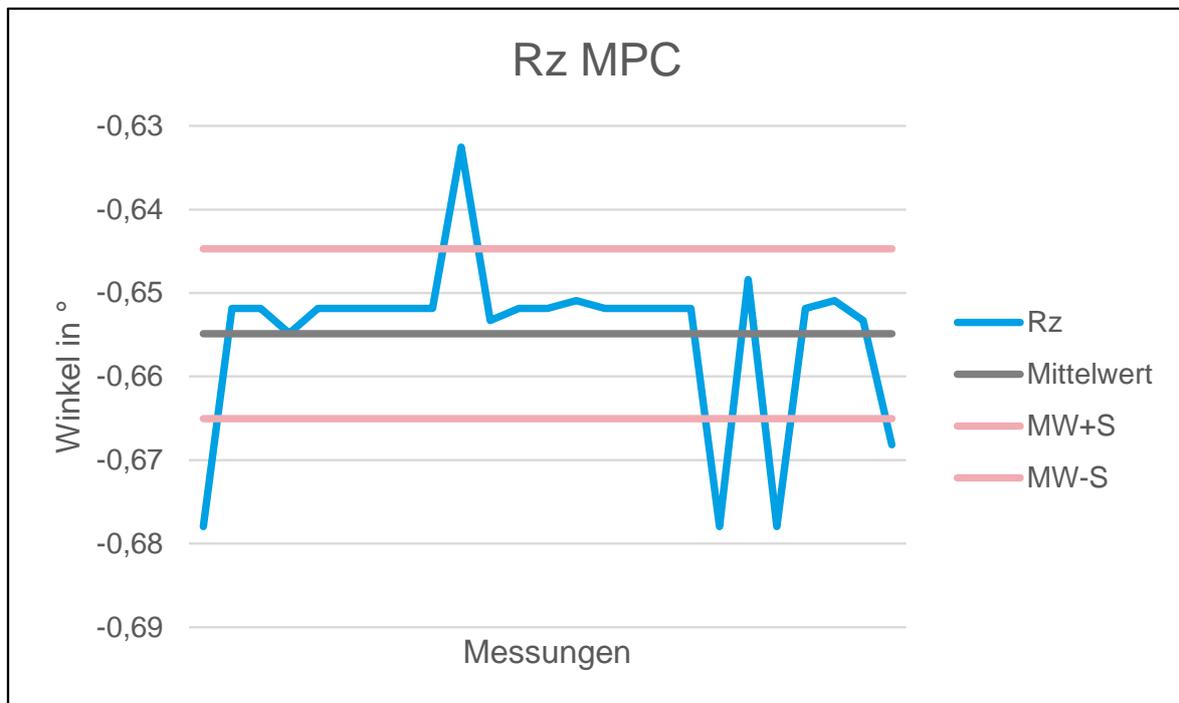


Abbildung 7.6: Gierwinkel über 25 Messframes der Kamera

Der Mittelwert beträgt  $-0,6549^\circ$ , die Standardabweichung der Serie ist mit  $0,0102^\circ$  deutlich geringer als bei Radar und Lidar. Bis auf wenige Abweichungen liegen alle Messwerte nahe dem Mittelwert. Auftretende Abweichungen liegen meist deutlich außerhalb der einfachen Standardabweichung, wodurch diese im Prozessergebnis einfach erkannt werden können. Die geringe Standardabweichung und Spreizung der Messwerte liegen in der vergleichsweise hohen Auflösung der Kamera begründet, die Varianz der Messreihe liegt mit  $0,0001^\circ$  in einem sehr geringen Bereich.

Dieser Effekt zeigt sich auch bei veränderten Arbeitsabständen. Diese sind in Abbildung 7.7 dargestellt. Die Spreizung der einzelnen Messungen, der Verlauf des Mittelwertes und die zugehörige Standardabweichung jeder Messung liegen deutlich unter den Werten für Radar und Lidar.

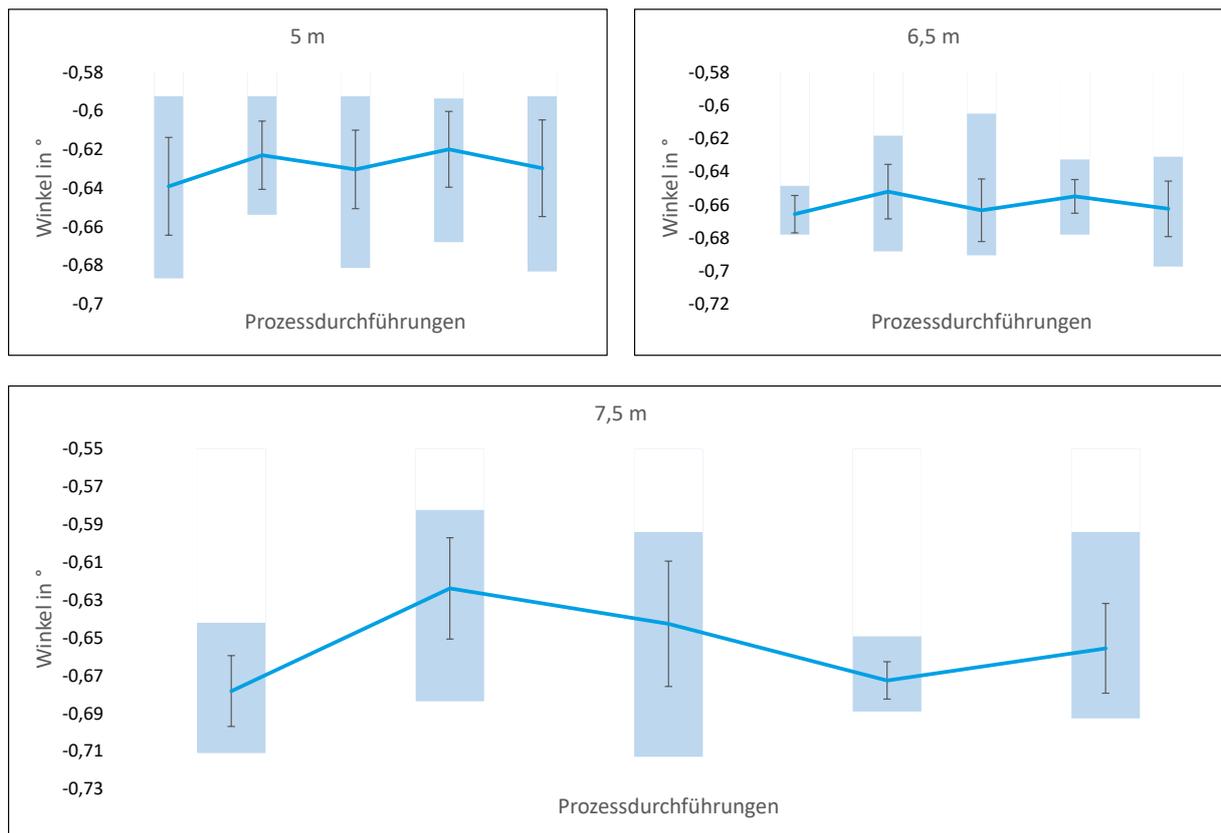


Abbildung 7.7: Gierwinkel der MPC über verschiedene Arbeitsabstände

Die mittlere Standardabweichung, die maximale Streuung und der zugehörige Mittelwert der fünfzehn Prozessdurchführungen sind in Tabelle 7 abgebildet. Die Standardabweichung ist für den definierten Arbeitsabstand am geringsten, was durch eine robuste Target-Detektion aufgrund der Auslegung des Algorithmus zurückzuführen ist. Bei kleineren und größeren Abständen schwankt das Ergebnis der Kreisdetektion aufgrund der Merkmalsverteilung je Pixel stärker, was eine höhere Standardabweichung innerhalb der Prozessergebnisse bedingt.

Tabelle 7: Standardabweichungen des Gierwinkels unterschiedlicher Arbeitsabstände der Kamera

	5 m	6,5 m	7,5 m
<b>Standardabweichung</b>	0,0216°	0,0147°	0,0225°
<b>Maximale Streuung</b>	0,0856°	0,0593°	0,0818°
<b>Mittelwert</b>	-0,6283°	-0,6596°	-0,6545°

Für die Validierung der extrinsischen Parameter der Kamera kann damit ebenfalls eine Erfüllung der Anforderung an die Wiederholgenauigkeit festgestellt werden. Die Standardabweichungen liegen aufgrund der höheren Auflösung des Sensors deutlich unter  $\pm 0,3^\circ$ .

Die Verläufe von Pitch- und Yaw-Winkel sind im Anhang A10 MPC hinterlegt. Auch hier liegt die Standardabweichung unter den geforderten  $\pm 0,6^\circ$ .

## 7.2 Analyse der Fehlereinflüsse

Ergänzend zur Untersuchung der Wiederholgenauigkeit des Prozesses, sollen zusätzlich die Einflüsse der Einzelschritte der Prozesspipeline betrachtet werden. Dazu werden die Schritte der Erfassung der Referenzmarken durch den Sensor, über die Erkennung und Extraktion der Einzelmarken, bis zur Berechnung der Rotationsparameter, mittels unterschiedlicher Versuche betrachtet. Die Durchführung erfolgt exemplarisch zunächst für den Lidar, da dieser die komplexeste Funktionsreihenfolge mit den potenziell meisten Einflussfaktoren aufweist.

Für die Untersuchung des Schrittes der Target-Extraktion wird durch den Sensor die Referenzszene einfach erfasst. Die so resultierende Punktwolke durchläuft anschließend einhundertzwanzig Mal die Funktion der Target-Extraktion. Die Verteilung der extrahierten kartesischen Koordinaten einer Referenzmarke ist in Abbildung 7.8 dargestellt:

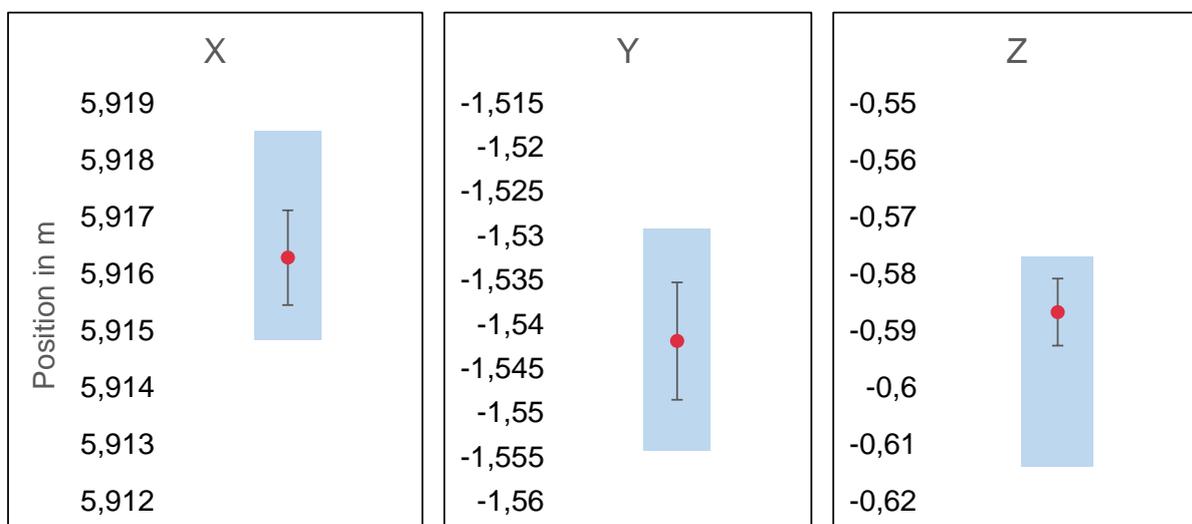


Abbildung 7.8: Verteilungen der Targetextraktion

Die Spreizung liegt für den X-Wert bei 3,689 mm, für den Y-Wert bei 25,0795 mm und für den Z-Wert bei 36,9479 mm. Die zugehörigen Standardabweichungen betragen 0,8308 mm, 6,6297 mm und 5,8945 mm. Dargestellt ist ebenfalls der sich ergebende Mittelwert. Der Effekt dieser Streuung liegt im Sensorprinzip und in der Methode der Targetextraktion begründet. So tastet der Sensor die einzelnen Referenzmarken mit einer in X-Richtung zur Y- und Z-Richtung verschiedenen Auflösung ab (siehe Tabelle 4). Weiterhin werden die Mittelpunkte der Referenzmarken, wie in Abschnitt 6.3 beschrieben, durch den RANSAC-Algorithmus bestimmt. Dieser nutzt eine zufällige Auswahl an Sample-Punkten, sodass hier auch bei Verwendung der gleichen Punktmenge schwankende Extraktionsergebnisse zustande kommen.

Die Ergebnisse der Untersuchung der Einflüsse der Funktion der Rotationsberechnung sind in Abbildung 7.9 dargestellt. Zur Einflussanalyse wurden konstante Mittelpunkte aller Referenzmarken einhundertzwanzigmal durch die Funktion zur Bestimmung der extrinsischen Parameter verarbeitet. Zu erkennen ist eine Häufigkeitsverteilung, welche jeweils nur über eine Klasse verfügt. Dieses Ergebnis ist plausibel, da die Funktion keine Abweichungen aufweist und bei konstanten Eingabewerten konstante Ausgabewerte liefert.

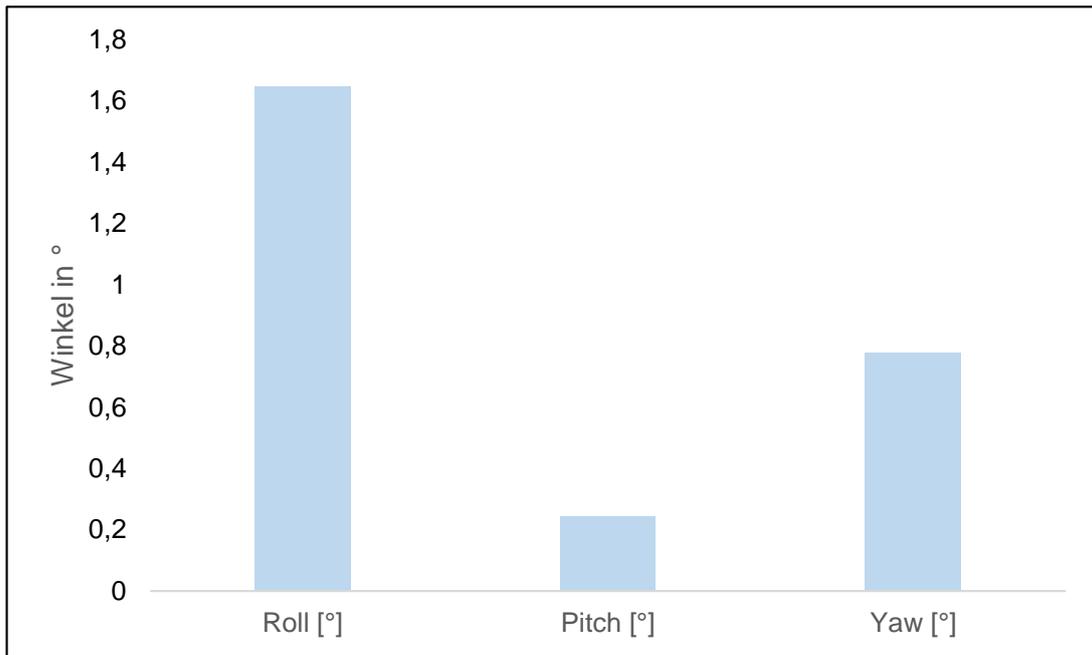


Abbildung 7.9: Verteilung der Rotationsberechnung

Der verkettete Einfluss von Targetextraktion und Bestimmung der extrinsischen Parameter wurde final in einem dritten Versuch betrachtet. Hierzu wurde eine, durch den Lidar aufgenommene, Punktwolke ebenfalls einhundertzwanzigmal verkettet durch die Funktionen der Target-Erkennung, -Extraktion und Rotationsberechnung verarbeitet. Die daraus resultierende Verteilung der zugehörigen Orientierungen ist in Abbildung 7.10 zu erkennen. Für den Rollwinkel ergibt sich bei einem Mittelwert von  $1,8197^\circ$  eine Standardabweichung von  $0,1399^\circ$  mit einer Spreizung der Werte von  $0,6820^\circ$ . Für den Nick-Winkel ergibt sich ein Mittelwert von  $0,1303^\circ$  mit einer Standardabweichung von  $0,0659^\circ$  und einer Spreizung von  $0,58179^\circ$ . Für den Gierwinkel ergeben sich schließlich ein Mittelwert von  $0,7743^\circ$  bei einer Standardabweichung von  $0,0659^\circ$  und einer Spreizung von  $0,3155^\circ$ .

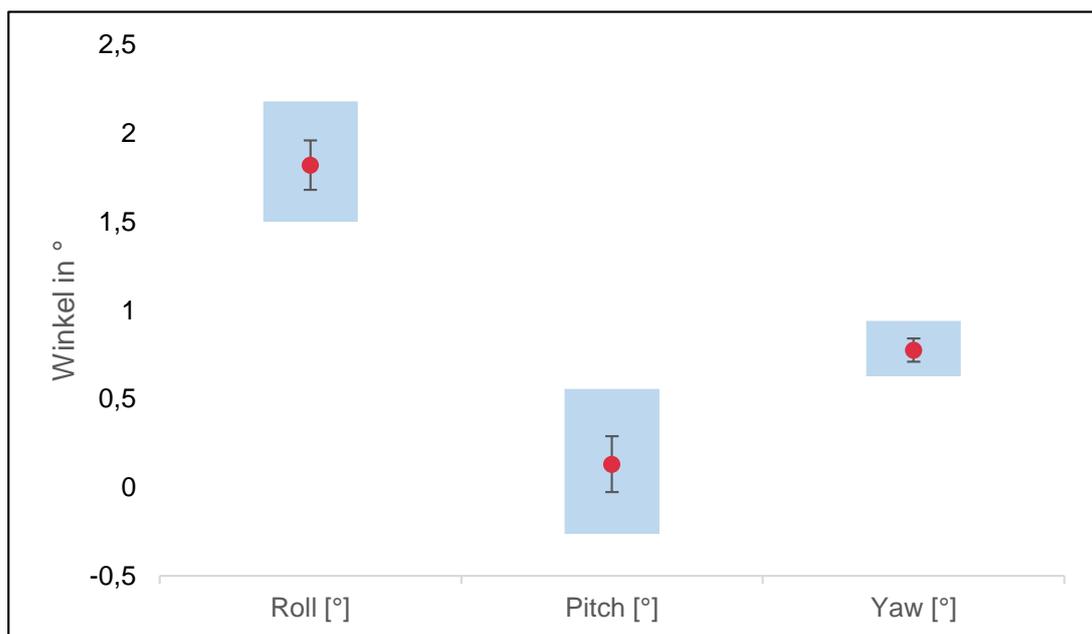


Abbildung 7.10: Verteilung des Gesamtprozesses

Aus den Untersuchungen lässt sich schließen, dass neben den Abweichungen durch die Messungenauigkeit des Sensors der Prozess auch durch die Funktionen zur Datenverarbeitung selbst beeinflusst wird. Dabei hat spezifisch für den Lidar nur die Funktion der Target-Extraktion einen Einfluss. Dieser Effekt verändert das Prozessergebnis jedoch nur geringfügig, bei gegebener Auflösung und Streuung des Sensors selbst.

Analog wurden die Untersuchungen für Radar und Kamera durchgeführt. Da hierbei bei der Targetextraktion bei der Bestimmung der extrinsischen Parameter die gleichen deterministischen Funktionen verwendet wurden, sind die Abweichungen des Prozesses für diese Sensortypen lediglich auf die Messungenauigkeit und Auflösung der Sensoren selbst zurückzuführen. Diese werden daher nicht weiter berücksichtigt.

### 7.3 Prozesssicherheit und Robustheit

Für den Nachweis der Prozesssicherheit und Robustheit wurden gezielt Störungen im Produktionsumfeld simuliert. Zu Klassifikation dieser wurde der Absicherungsprozess durchgeführt, während sich eine Person zwischen den Referenzmarken befand. Hierdurch wurde eine Referenzmarke verdeckt. Die Störung des Prozesses hat auf die Funktionen der Target-Extraktion der verschiedenen Sensor-Typen unterschiedliche Einflüsse. Radar und Lidar dürfen das Störobjekt nicht als Referenzmarke erkennen, oder müssen die Referenzmarken vom Störobjekt trennen können. Der Radarsensor erfasst die Person aufgrund der guten Reflektivität bei geringer Entfernung als weiteres Maximum, wodurch ein Falschziel entsteht. Auch dieses muss exkludiert werden.

Zur Validierung der Robustheit werden im Folgenden exemplarisch die Prozessergebnisse des Lidars bei gestörter und ungestörter Messung verglichen, da diese im Vergleich zum Radar gut lesbar sind. Dazu wird der Prozess jeweils mit und ohne Störung mit fünf Messungen durchgeführt.

Abbildung 7.11 zeigt die Erfassung der Referenzmarken durch den Lidar im Schritt des Clustering. Die Person ist deutlich zwischen den erfassten Referenzmarken zu erkennen. Durch die räumliche Nähe bedingt wird sie dem Cluster des nächsten Targets zugeordnet.

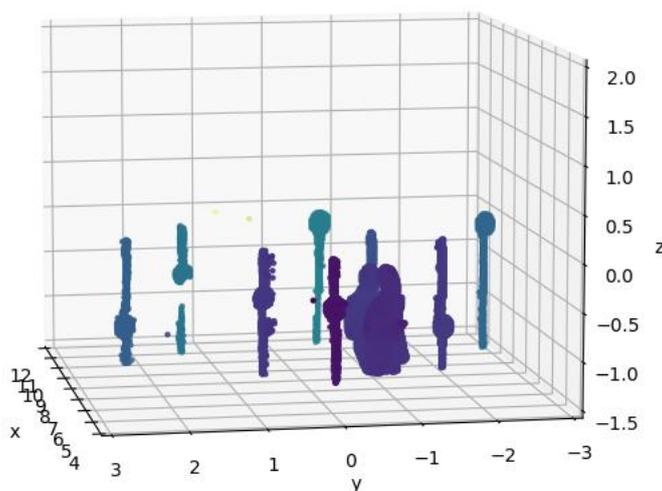


Abbildung 7.11: Punktwolke der Referenzmarken mit Person

Abbildung 7.12 stellt die Ergebnisse des Prozesses in Form von Mittelwert, Spreizung der Messwerte und Standardabweichung dar. Der Mittelwert der Prozessdurchführungen mit Person weicht dabei um lediglich  $0,0835^\circ$  von den Ergebnissen des Referenzprozesses ab. Weiterhin ist die Standardabweichung der berechneten Gierwinkel um  $0,0207^\circ$  höher, als die des Referenzprozesses. Die maximale Spreizung liegt mit  $0,5451^\circ$  um  $0,0122^\circ$  leicht über der des ungestörten Prozesses. Anhand dieser Ergebnisse lässt sich feststellen, dass der Prozess auch bei sich dynamisch bewegenden Störobjekten in der Referenzszene stabile Ergebnisse liefert.

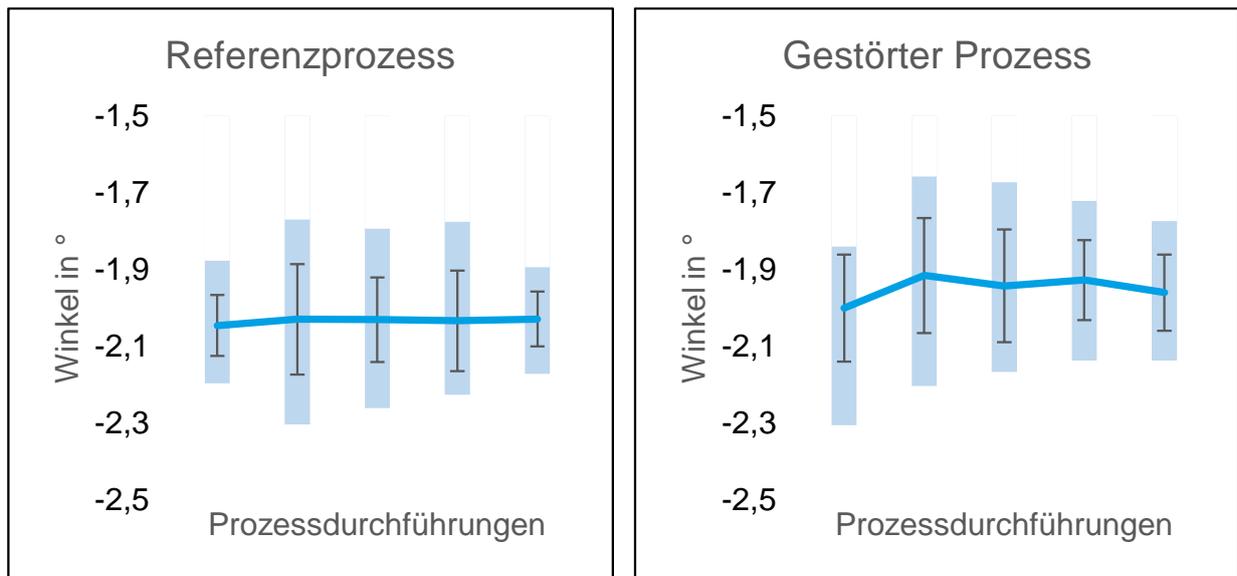


Abbildung 7.12: Vergleich der Prozessergebnisse bei gestörter Prozessumgebung

Für Radar und Kamera ergeben sich analoge Ergebnisse. Das störende Maximum wird innerhalb der Verarbeitungspipeline des Radars erkannt und im Schritt des Clustering entfernt. Bei der Targetextraktion der Kamera wird die teilweise verdeckte Referenzmarke neben der Person weiterhin detektiert und der Mittelpunkt des Außenrings der Marke bestimmt. Weitergehende Versuche haben gezeigt, dass erst ab einer Verdeckung von mehr als 50% Referenzmarken nicht mehr stabil detektiert werden kann. Aufgrund der Überbestimmung der Anzahl der Referenzmarken kann der Prozess auch in diesem Fall weiterhin ausgeführt werden.

## 7.4 Nachvollziehbarkeit und Dokumentation

Die Dokumentation und Nachvollziehbarkeit des Prozesses und seiner Einzelschritte kann entsprechend dem Lösungskonzept direkt über die zentrale Datenstruktur erfolgen. Diese enthält alle wesentlichen Daten eines Absicherungsdurchlaufes und einen Hashwert, welcher vor einer Manipulation der Daten schützt.

Zur Validierung der Datenstruktur ist diese nach erfolgtem Absicherungsprozess umfassend je fünf Messungen je Sensor als Baumstruktur in Abbildung 7.13 dargestellt.

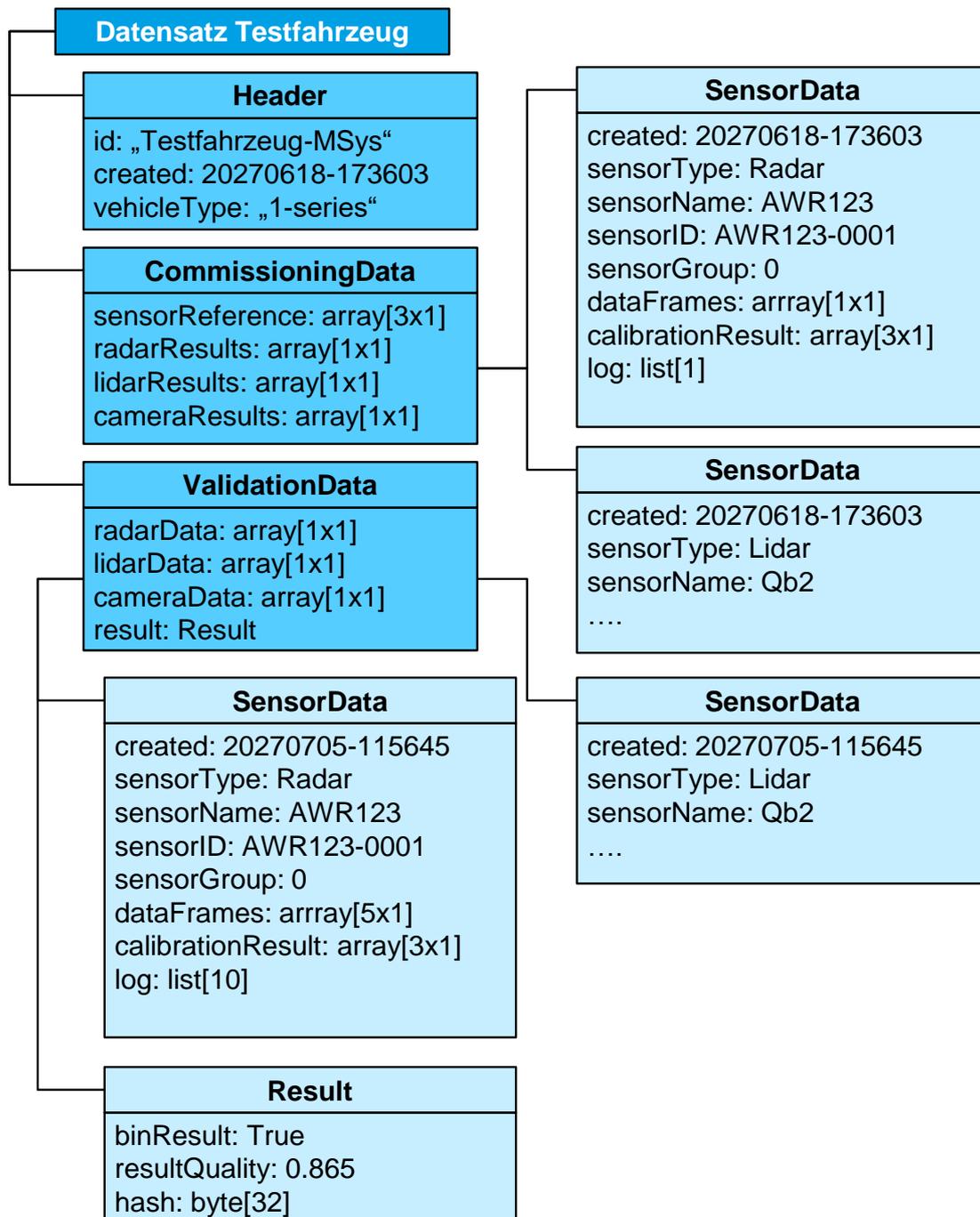


Abbildung 7.13: Zentrale Datenstruktur nach Durchführung des Absicherungsprozesses

## 8 Fazit und Ausblick

Abschließend werden die einzelnen Schritte der Arbeit zusammengefasst und ein übergreifendes Fazit gezogen. Weiterhin erfolgt ein Ausblick auf Entwicklungsmöglichkeiten und den aufbauenden Forschungsbedarf im Bereich der Fahrzeuginbetriebnahme und Funktionsabsicherung automatisierter Fahrzeuge, welche sich auf Basis der vorliegenden Arbeit ergeben.

### 8.1 Fazit

Ziel der Arbeit war die Entwicklung eines Prozesses zur Funktionsabsicherung hochautomatisierter und autonomer Fahrzeuge in der Produktion. Dazu sollte die Forschungsfrage nach einer nachvollziehbaren und technologieübergreifenden Absicherung der Funktionen automatisierter Fahrzeuge in der Montagelinie beantwortet werden. Es wurden zunächst in den Grundlagen des Betrachtungsbereiches die Grundfunktionen hochautomatisierter Fahrzeuge untersucht und auf Basis dieser die abzusichernden Merkmale definiert. Unter diesen wurden im Kontext dieser Arbeit die extrinsischen Parameter der umfelderfassenden Sensoren fokussiert, da die korrekte Funktion dieser Sensoren die Grundlage für alle weiteren Aufgaben hochautomatisierter Fahrzeuge darstellt. Zum besseren Verständnis der umfelderfassenden Sensoren wurden anschließend die notwendigen Grundlagen erläutert und aktuelle Prozesse zur Inbetriebnahme der Sensoren in der Fahrzeugproduktion erläutert.

Um dem Forschungscharakter der Aufgabenstellung gerecht zu werden, wurden im dritten Kapitel darauf aufbauend die aktuellen Ansätze aus Technik und Forschung recherchiert und bewertet. Auf dieser Grundlage wurde ein Entwicklungsbedarf abgeleitet, welche die Relevanz der Forschungsfrage unterstreicht.

Zur zielführenden Entwicklung einer Lösung und damit die Bearbeitung der Forschungsfrage zu ermöglichen, wurde im vierten Kapitel zunächst eine Vorgehensmethodik auf Basis bestehender Modelle erarbeitet. Diese wurde im folgenden Verlauf der Arbeit berücksichtigt und damit sichergestellt, dass die anschließend definierten Anforderungen an ein Lösungskonzept bestmöglich erreicht wurden.

Dieser Methodik folgend, wurde zunächst ein Grobkonzept entwickelt. Hierbei wurde die Gesamtaufgabe der Funktionsabsicherung definiert, da diese in unterschiedlichen Kontexten verschieden definiert wird. Diese Gesamtaufgabe wurde weiterhin in ihre Teilaufgaben unterteilt, um eine nachvollziehbare Entwicklung des komplexen Gesamtprozesses zu ermöglichen. Nachdem somit das Grobkonzept für einen Lösungsprozess definiert wurde, konnte anschließend ein Grobkonzept für ein den Anforderungen genügendes Betriebsmittel entwickelt werden.

Das so entstandene Grobkonzept wurde weiterhin in ein finales Lösungskonzept überführt. Hierzu wurden eine Prozessinfrastruktur und Einzelfunktionen definiert sowie die Auslegung des hybriden Multitargets durchgeführt. Abschließend an diese Entwicklung wurde für eine erste Validierung des Ergebnisses ein Abgleich mit den Anforderungen durchgeführt.

Das finale Lösungskonzept wurde danach in einem realitätsnahen Technologiedemonstrator implementiert und auf Basis dieser Implementierung verschiedene Validierungsversuche zum Nachweis der Anforderungserfüllung durchgeführt.

Bezüglich des formulierten Handlungsbedarfs konnte die Arbeit die gestellte Forschungsfrage vollumfänglich beantworten. Durch die Entwicklungen der Arbeit wurde ein System realisiert, welches in der Lage ist, für beliebige Fahrzeugtypen mit beliebigen Sensorkonfigurationen eine Funktionsabsicherung für die Sensor-Typen Radar, Lidar und Kamera durchzuführen. Dazu wurde ein hybrides Multitarget entwickelt, welches durch alle Sensor-Typen erfasst werden und durch seinen Aufbau auch in bestehende Produktionslinien integriert werden kann.

Das Ergebnis der Arbeit stellt einen, im Vergleich zum Stand der Technik und zum Stand der Forschung, universelleren, modulareren und flexibleren Prozess dar. So adressiert das Konzept alle Sensor-Typen und verschiedene Absicherungsszenarien, von einer statischen Absicherung in einem dedizierten Absicherungsbereich, bis hin zu einer dynamischen Absicherung im Fließbetrieb, welche dem beschriebenen zukünftigen Inline-Konzept gerecht wird. Weiterhin liefert der Prozess nachvollziehbare und robuste Prozessergebnisse, welche fälschungssicher dokumentiert und archiviert werden können.

Mittels der Validierungsversuche wurde gezeigt, dass damit alle definierten Anforderungen erfüllt werden konnten.

Durch die modulare Prozessinfrastruktur und das flexible Multitarget ist der Prozess überdies nicht nur in der Fahrzeugproduktion einsetzbar, sondern auch, wie beschrieben, in verschiedenen Szenarien des Aftermarket, wie beispielsweise in Werkstätten oder der technischen Überprüfung der Fahrzeuge.

Die Entwicklung stellt damit eine deutliche Weiterentwicklung des Standes der Technik dar. Im Gegensatz zu bestehenden Lösungen ist der Prozess wesentlich kosteneffizienter und kompakter. Die notwendigen Betriebsmittel sind aufgrund der Verwendung der hybriden Referenzmarken weniger komplex, weiterhin erfordert der Prozess eine deutlich geringere Fläche, da er sich direkt in bestehende Infrastrukturen integrieren lässt. Aufgrund der vollautomatischen Ausführung im Inline Betrieb entsteht ein zusätzlich geringerer Personalbedarf. Die Anpassung an verschiedene Fahrzeugvarianten ist aufgrund der modularen Systemstruktur mit einem deutlich geringeren Aufwand verbunden.

## 8.2 Ausblick und weiterer Forschungsbedarf

Die Ergebnisse dieser Arbeit stellen eine erste Lösung zur Funktionsabsicherung automatisierter Fahrzeuge in der Produktionslinie dar. Jedoch ist es im Rahmen einer Dissertation nicht möglich alle offenen und sich öffnenden Fragestellungen dieser Thematik in der Tiefe zu adressieren, oder sogar eine Lösung zu entwickeln, welche alle diese abdeckt.

Die sich auf dieser Arbeit aufbauenden Entwicklungspotenziale werden im Folgenden kurz beschrieben, um weitere Perspektiven aufzuzeigen.

### Weiterentwicklung und Optimierung

Der entwickelte Prozess zur Funktionsabsicherung weist weiterhin verschiedene Optimierungspotenziale auf. Unter anderen können sämtliche Algorithmen zur Erkennung und Extraktion der Referenzmarken optimiert werden. Speziell die Ansätze im Bereich der Lidarsensorik können im Schritt der Rekonstruktion der Referenzmarken optimiert werden. Hierdurch kann die bisher erreichte Wiederholgenauigkeit weiter gesteigert werden.

Zusätzlich können auf der Ebene der Sensorik die Parameter zur Umfelderkennung weiterentwickelt werden. Bei Radarsensoren bietet die Nutzung eines Inbetriebnahme- oder Absicherungsmodus eine Möglichkeit, die Genauigkeit der Erfassung der Referenzmarken zu steigern, was die Genauigkeit des Gesamtkonzeptes positiv beeinflussen kann.

Weiterhin kann das Konzept insofern weiterentwickelt werden, dass eine Implementierung der Methoden auf einer Ebene über der Verarbeitung von Sensorrohdaten umgesetzt werden kann. Einige Sensoren im Automobilbereich verfügen aufgrund ihrer Architektur nicht über die Schnittstellen, um Sensorrohdaten zur Verfügung zu stellen. Somit sind Softwaremodule umzusetzen, welche auf Basis von verarbeiteten Sensordaten oder auf Basis von Objektlisten eine Funktionsabsicherung durchführen können. Die Vorgehen dazu sind analog zum hier entwickelten Lösungsprozess.

Im Bereich der Auswertung der Prozessergebnisse können Funktionen zur Realisierung eines selbstlernenden Systems umgesetzt werden. Hierzu können die Ergebnisdaten aller Fahrzeuge gesammelt und ausgewertet werden. Beispielsweise können die Soll-Histogramme zur Datenprüfung automatisiert erstellt und fortlaufend optimiert werden. Zusätzlich kann durch Analyse der extrinsischen Parameter aller Sensoren eine eventuelle Prozessdrift detektiert werden, welche Rückschlüsse auf systematische Abweichungen in den vorgelagerten Vormontage- und Montageprozessen geben kann.

Abschließend bestehen Potenziale bezüglich der Verschlüsselung und Archivierung der Prozessergebnisse. Aus Perspektive der IT-Security wird dieser Punkt zunehmend an Bedeutung gewinnen. Hochautomatisierte oder sogar vollautonome Systeme stellen für den öffentlichen Bereich eine Herausforderung bezüglich der Sicherheit dar. Somit muss auch während der Produktion auf verschiedenen Ebenen sichergestellt werden, dass die Systeme nicht schon vor Auslieferung kompromittiert wurden. Eine Möglichkeit im Rahmen dieser Arbeit bietet eine noch sicherere Verschlüsselung der Fahrzeugdaten. Hierzu können auch neue Technologien der Informationstechnik, wie beispielsweise Blockchain, genutzt werden.

### **Weiterentwicklung des Konzeptes zur Sensorkalibrierung**

Wie in der Arbeit dargelegt, stellt das Konzept im Prinzip eine redundante Sensorkalibrierung dar. Dieses kann genutzt werden, um die bisher bestehenden, stark monolithischen und unflexiblen Prozesse zur Sensor-Inbetriebnahme neu zu gestalten. So kann der Ansatz des hybriden Multitargets in Kombination mit einer Technologie zur Erfassung der Fahrzeugreferenz oder der Fahrzeuglage genutzt werden, um eine Kalibrierung der Sensoren in der Fließmontage am bewegten Fahrzeug durchzuführen.

### **Entwicklung eines Prozesses für den Aftermarket**

Wie bereits in der Entwicklung des referenzfreien Prozesses beschrieben, lässt sich das Konzept auch zur Kalibrierung oder Prüfung einzelner umfelderfassender Sensoren oder Sensorgruppen am Fahrzeug nutzen. Da das System eine deutlich wirtschaftlichere Möglichkeit verglichen mit dem aktuellen Stand der Technik darstellt, ist ein Einsatz des Konzeptes vor allem im Bereich des Aftermarkets sinnvoll. Werkstätten und Prüforganisationen haben in der Regel nicht die Möglichkeit, Prüfstände mit Produktionsgüte wirtschaftlich zu betreiben, da die Anschaffungskosten für diese deutlich zu hoch sind.

Die entwickelte Lösung benötigt im Gegensatz dazu lediglich mehrere Referenzmarken, welche frei positioniert werden können. Da für automatisierte Fahrzeuge zukünftig Maßnahmen wie eine regelmäßige technische Überprüfung wie die Hauptuntersuchung oder Reparaturen im Schadensfall durchgeführt werden müssen und diese aus Gründen der Sicherheit die gleichen Anforderungen wie die Produktionsprozesse erfüllen, wird ein wesentlicher Anwendungsfall adressiert.

Durch die Anwendung des Prozesses zur Kalibrierung und Funktionsabsicherung können im Falle eines Fahrzeugschadens reparierte oder neu eingebaute Sensoren auf Basis der noch funktionsfähigen Sensoren durch die gemeinsame Erfassung des Multitargets extrinsisch auf Basis der erläuterten FCPE präzise kalibriert werden. Da diese Referenzsensoren noch zur Fahrzeugreferenz kalibriert sind, ist keine erneute Erfassung dieser notwendig.

Zusätzlich kann die in der Linie bereits erfasste und mittels Fahrzeugmerkmalen „angeheftete“ Fahrzeugreferenz durch eine zusätzliche, kostengünstige, Erfassungstechnologie zur Kalibrierung genutzt werden

Für beide Konzepte kann die entwickelte Prozessinfrastruktur genutzt werden. Diese wird dezentral in einem Cloud-Rechencluster ausgeführt, wodurch die Daten jedes beliebigen Fahrzeuges gemeinsam mit den Koordinaten der Referenzmarken an diese übertragen werden können. Die modulare Struktur des Systems ermöglicht dann eine Durchführung der Kalibrierungen in der Infrastruktur und eine anschließende Übertragung der Prozessergebnisse zurück zur ausführenden Stelle.



## V Literaturverzeichnis

- [AUD14] Audi: *Audi RS7 piloted driving concept*, <https://www.audi-mediacenter.com/en/photos/detail/audi-rs-7-piloted-driving-concept-1651>, 2014
- [AUE17] Auerbach, B.: *Bundestag beschließt Gesetz zum autonomen Fahren.*, <https://www.springerprofessional.de/automatisiertes-fahren/unternehmen---institutionen/bundestag-beschliesst-gesetz-zum-autonomen-fahren/12193302>, 2017
- [BAR23] Bartels, S.: *Numerik 3x9*, Springer, Berlin, Heidelberg, 2023
- [BEP24] BEP: *ADAS testing solutions*, <https://www.ascentialtech.com/product/advanced-driver-assistance-systems-adas/>, 2024
- [BES92] Besl, P., McKay, N.: *A method for registration of 3-D shapes*, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 14, 1992
- [BLI24] Blickfeld: *Scan Pattern*, [https://docs.blickfeld.com/cube/latest/scan\\_pattern.html](https://docs.blickfeld.com/cube/latest/scan_pattern.html), 2024
- [BLO23] Block, L.: *Ein Verfahren zur Entwicklung flexibler Fahrzeug-Software- und -Hardware-Architekturen unter Unsicherheit*, Springer Fachmedien, Wiesbaden, 2023, S. 17–62
- [BMV21] BMVi: *Entwurf eines Gesetzes zur Änderung des Straßenverkehrsgesetzes und des Pflichtversicherungsgesetzes – Gesetz zum autonomen Fahren*, StVG, 2021
- [BÖR11] Börcsök, J.: *Funktionale Sicherheit*, Grundzüge sicherheitstechnischer Systeme, Praxis, VDE-Verl., Berlin, Offenbach, 2011
- [BRA19] Bradley, P.: *Vorlesung Numerische Mathematik*, Karlsruhe, 2019
- [BRE18] Brenner, W., Hermann, A.: *An Overview of Technology, Benefits and Impact of Automated and Autonomous Driving on the Automotive Industry*, Springer, Berlin, Heidelberg, 2018
- [BRU10] Bruns, H.: *Organisation des Anlaufmanagements*, Dissertation, TU Braunschweig, 2010
- [BUN21] Bundesministerium für digitales und Verkehr: *Gesetz zum autonomen Fahren tritt in Kraft*, <https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Artikel/DG/gesetz-zum-autonomen-fahren.html>, 2021
- [BUN17] Bundesministerium für Justiz: *Gesetz über die Haftung für fehlerhafte Produkte - Produkthaftungsgesetz*, ProdHaftG, 2017
- [BUX15] Buxbaum, B., Lange, R., Ringbeck, T.: *3D Time-of-Flight (ToF)*, In: Winner, H., Hakuli, S., Lotz, F., Singer, C.: *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*, Wiesbaden: Springer Fachmedien. 2015, S. 335–346
- [CHE92] Chen, Y., Medioni, G.: *Object modelling by registration of multiple range images*, Image and Vision Computing, 10, 1992

- [CIV09] Civera, J., Bueno, D., Davison, A., Montiel, J.: *Camera self-calibration for sequential Bayesian structure from motion*, IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2009
- [CZI19] Czichos, H.: *Mechatronik*, Springer Fachmedien, Wiesbaden, 2019
- [DAH22] Dahmen, W., Reusken, A.: *Numerik für Ingenieure und Naturwissenschaftler*, Springer, Berlin, Heidelberg, 2022
- [DIE19] Dietmayer, K., Eckstein, L., Form, T., Flemisch, F., Friedrich, R., Fulger, D., Gasser, T., Harms, K., Hense, B., Müller, N., Schäfer, C., Zlocki, A.: *Automatisiertes und autonomes Fahren*, VDI-Handlungsempfehlung, 2019
- [DIN95] DIN 1319-1:1995-01: *Grundlagen der Meßtechnik - Teil 1: Grundbegriffe*, 1995
- [DIN13] DIN ISO 8855:2011: *Straßenfahrzeuge - Fahrzeugdynamik und Fahrverhalten - Begriffe*, 2013
- [DOC24] Docker, <https://www.docker.com/>, 2024
- [DOM19] Domhof, J., Kooij, J., Gavrila D.: *An Extrinsic Calibration Tool for Radar, Camera and Lidar*, IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2019
- [DUE23] Durr Assembly Products: *x-DASalign*, Test stand for driver assistance systems, [https://www.durr.com/fileadmin/durr.com/01\\_Products/09\\_Testing\\_Systems/05\\_Setting\\_of\\_Driver\\_Assistance\\_Systems/duerr-testing-flyer-x-DASalign-en.pdf](https://www.durr.com/fileadmin/durr.com/01_Products/09_Testing_Systems/05_Setting_of_Driver_Assistance_Systems/duerr-testing-flyer-x-DASalign-en.pdf), 2023
- [DUR06] Durrant-Whyte, H., Bailey, T.: *Simultaneous localization and mapping: part I*, IEEE Robotics & Automation Magazine, 13, 2006
- [EAD13] Eade, E.: *Gauss-Newton / Levenberg-Marquardt Optimization*, 2013
- [ECK17] Eckstein, L., Bock, J., Zlocki, A., Puetz, A.: *System validation of highly automated vehicles with a database of relevant traffic scenarios*, 12th ITS European Congress, Straasbourg, France, 2017
- [ELM02] Elmenreich, W.: *An Introduction to Sensor Fusion*, [https://www.researchgate.net/profile/Wilfried-Elmenreich/publication/267771481\\_An\\_Introduction\\_to\\_Sensor\\_Fusion/links/55d2e45908ae0a3417222dd9/An-Introduction-to-Sensor-Fusion.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Wilfried-Elmenreich/publication/267771481_An_Introduction_to_Sensor_Fusion/links/55d2e45908ae0a3417222dd9/An-Introduction-to-Sensor-Fusion.pdf), Wien 2002
- [ELN15] ElNatour, G., Ait Aider, O., Rouveure, R., Berry, F., Faure, P.: *Radar and vision sensors calibration for outdoor 3d reconstruction*, IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2015
- [EST05] Esteban, J., Starr, A., Willetts, R., Hannah, P., Bryanston-Cross, P.: *A Review of data fusion models and architectures: towards engineering guidelines*, Neural Computing and Applications, 14, 2005
- [FAU86] Faugeras, O., Hebert, M.: *The Representation, Recognition, and Locating of 3-D Objects*, The International Journal of Robotics Research, 5, 1986

- [FEI22] Feijter, T. de: *Jidu Robo 1 Lunar Edition Is An Advanced New Chinese EV*, <https://carnewschina.com/2022/10/28/jidu-robo-1-lunar-edition-is-an-advanced-new-chinese-ev/>, 2022
- [FIE14] Fiedler, D.: *Beiträge zur Analyse, Modellierung und Kalibrierung von Kameras und 3D-Tiefensensoren*, Dissertation, Technische Universität Dortmund, 2014
- [FIS87] Fischler, M., Bolles, R.: *Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography*, Readings in Computer Vision, 1987
- [FRA15] Franz, B., Kauer, M., Geyer, S., Hakuli, S.: *Conduct-by-Wire*, In: Winner, H., Hakuli, S., Lotz, F., Singer, C.: *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*, Wiesbaden: Springer Fachmedien. 2015, S. 1111–1121
- [GAO10a] Gao, C., Spletzer, J.: *On-line calibration of multiple LIDARs on a mobile vehicle platform*, 2010
- [GAO10b] Gao, D., Duan, J., Yang, X., Zheng, B.: *A method of spatial calibration for camera and radar*, 2010
- [GAS15] Gasser, T., Seeck, A., Smith, B.: *Rahmenbedingungen für die Fahrerassistenzentwicklung*, In: Winner, H., Hakuli, S., Lotz, F., Singer, C.: *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*, Wiesbaden: Springer Fachmedien. 2015, S. 27–54
- [GLI22] Glira, P., Weidinger, C., Weichselbaum, J.: *Continuous Target-free Extrinsic Calibration of a Multi-Sensor System from a Sequence of Static Viewpoints*, 2022
- [GOT15] Gotzig, H., Geduld, G.: *LIDAR-Sensorik*, In: Winner, H., Hakuli, S., Lotz, F., Singer, C.: *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*, Wiesbaden: Springer Fachmedien. 2015, S. 317–334
- [GRE18] Gresser, J.: *Ganzheitliche Absicherung der Inbetriebnahme*, Dissertation, Universität des Saarlandes, 2018
- [GRU21] Groß, F.: *Ganzheitliche Untersuchung der drahtlosen Vernetzung des Fahrzeugs mit der Produktionsinfrastruktur für eine zukunftsfähige Inbetriebnahme*, Dissertation, Universität des Saarlandes, 2021
- [GUE14] Guerreiro, B., Silvestre, C., Oliveira, P.: *Automatic 2-D LiDAR geometric calibration of installation bias*, Robotics and Autonomous Systems, 62, 2014
- [GUI17] Guindel, C., Beltran, J., Martin, D., Garcia, F.: *Automatic extrinsic calibration for lidar-stereo vehicle sensor setups*, IEEE 20th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2017
- [HAL10] Halterman, R. u. Bruch, M.: *Velodyne HDL-64E lidar for unmanned surface vehicle obstacle detection*, <https://apps.dtic.mil/sti/tr/pdf/ADA522822.pdf>, 2010
- [HAR03] Hartley, R., Zisserman, A.: *Multiple view geometry in computer vision*, Cambridge University Press, Cambridge, 2003

- [HEN20] Heng, L.: *Automatic Targetless Extrinsic Calibration of Multiple 3D LiDARs and Radars*, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2020
- [HOR88] Horn, B., Hilden, H., Negahdaripour, S.: *Closed-form solution of absolute orientation using orthonormal matrices*, Journal of the Optical Society of America A, 5, 1988
- [IAT16] IATF: *16949:2016 Anforderungen an Qualitätsmanagementsysteme für die Serien- und Ersatzteilproduktion in der Automobilindustrie*, Oktober 2016
- [IEC10] IEC 61508: *Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems*, 2010
- [IEE22] IEEE 2846-2022: *IEEE Standard for Assumptions in Safety-Related Models for Automated Driving Systems*, 22 April 2022
- [ISO18a] ISO 15622:2018: *Intelligent transport systems - Adaptive cruise control systems - Performance requirements and test procedures*, 2018
- [ISO18b] ISO 26262-1:2018: *Road vehicles – Functional safety*, 2018-12
- [ISO22] ISO 21448:2022: *Road vehicles — Safety of the intended functionality (SOTIF)*, 2022
- [IZQ18] Izquierdo, R., Parra, I., Fernandez-Llorca, D., Sotelo, M.: *Multi-Radar Self-Calibration Method using High-Definition Digital Maps for Autonomous Driving*, 2018
- [JEF23] Jeffs, J.: *Autonomous Vehicles Will Drive Automotive Sensor Market Growth*, <https://www.idtechex.com/en/research-article/autonomous-vehicles-will-drive-automotive-sensor-market-growth/29971>, 2023
- [JON19] Jonas, M.: *Neue Ansätze zur Umsetzung und Durchführung von Kalibrierumfängen bei der Pkw-Inbetriebnahme*, Dissertation, Universität des Saarlandes, 2019
- [KAB76] Kabsch, W.: *A solution for the best rotation to relate two sets of vectors*, Acta Crystallographica Section A, 32, 1976
- [KAM24] Kampker, A., Heimes, H.: *Elektromobilität*, Springer, Berlin, Heidelberg, 2024
- [KAR20] Kark, K.: *Antennen und Strahlungsfelder*, Springer Fachmedien, Wiesbaden, 2020
- [KER18] Kernhof, J., Leuckfeld, J., Tavano, G.: *LiDAR-Sensorsystem für automatisiertes und autonomes Fahren*, In: Tille, T.: *Automobil-Sensorik 2*, Berlin, Heidelberg: Springer. 2018, S. 29–54
- [KER21] Kern, W.: *Modulare Produktion*, Springer Fachmedien, Wiesbaden, 2021, S. 1–22
- [KHA23] Khader, M. u. Cherian, S.: *An Introduction to Automotive Lidar*, <https://www.ti.com/lit/wp/slyy150b/slyy150b.pdf?ts=1706968020387>, 2023
- [KIM19] Kim, E.-S., Park, S.-Y.: *Extrinsic Calibration between Camera and LiDAR Sensors by Matching Multiple 3D Planes*, Sensors (Basel, Switzerland), 20, 2019

- [KÖL20] Köllner, C.: *Neun Herausforderungen für die Automobilbranche*, <https://www.springerprofessional.de/mobilitaetskonzepte/transformation/neun-herausforderungen-fuer-die-automobilbranche/18653170?searchResult=4.Herausforderung%20automobil&searchBackButton=true>, 2020
- [LAW19] Lawrence, J., Bernal, J., Witzgall, C.: *A Purely Algebraic Justification of the Kabsch-Umeyama Algorithm*, Journal of research of the National Institute of Standards and Technology, 124, 2019
- [LEM22] Lempp, M., Siegfried, P.: *Automobile Disruption und die urbane Mobilitätsrevolution*, Springer International Publishing, Cham, 2022
- [LEV10] Levinson, J., Thrun, S.: *Unsupervised Calibration for Multi-beam Lasers*, 79, 2010
- [LIE22] Liedtke, T.: *Informationssicherheit, Möglichkeiten und Grenzen*, Springer, Berlin, Heidelberg, 2022, S. 89–106
- [LIU20] Liu, T., Wang, D., Mei, R., Gou, X.: *MEMS Mirror LIDAR System and Echo Signal Processing*, Communications, Signal Processing, and Systems, 654, 2020
- [LOT06] Lotter, B., Wiendahl, H.-P.: *Montage in der industriellen Produktion*, Springer, Berlin, Heidelberg, 2006, S. 11–57
- [MAD04] Madsen, K., Nielsen H. B., Tingleff, O.: *Methods for Non-Linear Least Squares Problems*, Technical university of Denmark, 2004
- [MAT15] Matthaei, R., Reschka, A., Rieken, J., Dierkes, F., Ulbrich, S., Winkle, T., Maurer, M.: *Autonomes Fahren*, In: Winner, H., Hakuli, S., Lotz, F., Singer, C.: *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*, Wiesbaden: Springer Fachmedien. 2015, S. 1139–1165
- [MAU15] Maurer, M., Gerdes, J., Lenz, B., Winner, H.: *Autonomes Fahren*, Springer, Berlin, Heidelberg, 2015
- [MCM17] McManamon, P., Banks, P., Beck, J., Fried, D., Huntington, A., Watson, E.: *Comparison of flash lidar detector options*, Optical Engineering, 56, 2017
- [MIC14] Microwavejournal: *Where Does Radar Sit in the ADAS Architecture Centralization?*, <https://www.microwavejournal.com/articles/39362-where-does-radar-sit-in-the-adas-architecture-centralization>, 2014
- [MIN22] Minshall, P.: *CASE (Connected, Autonomous, Shared and Electric): An Insight*, <https://netsoltech.com/article/case-connected-autonomous-shared-and-electric-an-insight>, 2022
- [MUE19] Mueller, R., Schirmer, L., Otto, M.: *Neue Ansätze für die Inbetriebnahme moderner Fahrzeuge*, In: *Tagungsband zur Fachtagung Mechatronik 2019*. Paderborn, Darmstadt. 2019, S. 109–114
- [MUE20] Mueller, R., Otto, M.: *Challenges for safeguarding the function of autonomous vehicles in the production*, ACI Montagesysteme, , 2020

- [MUE21] Mueller, R., Bender, B., Gericke, K., Heusel, J., Bronnhuber, T., Helms, O., Krzywinski, J., Klocke, F., Dilger, K., Ehlers, T., Lachmayer, R.: *Gestaltungsrichtlinien, Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung*, 16. Gestaltungsrichtlinien, , 2021, S. 567–828
- [MUE22] Mueller, R., Margies, L., Otto, M.: *Vernetzte Inbetriebnahme und Funktionsabsicherung hochautomatisierter Fahrzeuge in der Produktion*, In: Bertram, T., Corves, B., Janschek, K., Rinderknecht S.: VDI Mechatronik 2022, Darmstadt. 2022, S. 1–6
- [MUE23] Mueller, R.: *Montage und Inbetriebnahme von Kraftfahrzeugen*, Saarbrücken, 2023
- [MUE24a] Mueller, R.: *Montagesystemtechnik*, Saarbrücken, 2024
- [MUE24b] Mueller, R., Margies, L.: *System for the Validation of the Commissioning of Automated and Autonomous Vehicles in the Assembly Line*, 2024
- [MUE24c] Mueller, R.: *Technische Produktionsplanung*, Saarbrücken, 2024
- [NAT13] Nattermann, R., Anderl, R.: *The W-Model – Using Systems Engineering for Adaptionics*, Procedia Computer Science, 16, 2013
- [OHM10] Ohm, J.-R., Lüke, H.-D.: *Signalübertragung*, Springer, Berlin, Heidelberg, 2010
- [OLS11] Olson, E.: *April Tag: A robust and flexible visual fiducial system*, IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2011
- [OPE21] OpenCV: *Camera calibration with OpenCV*, [https://docs.opencv.org/4.5.5/d4/d94/tutorial\\_camera\\_calibration.html](https://docs.opencv.org/4.5.5/d4/d94/tutorial_camera_calibration.html), 2021
- [OPE22] OpenCV: *ArUco Markers*, [https://docs.opencv.org/4.5.5/d5/dae/tutorial\\_aruco\\_detection.html](https://docs.opencv.org/4.5.5/d5/dae/tutorial_aruco_detection.html), 2022
- [OTT21] Otto, M.: *Effizienzsteigerung und Absicherung automobiler Inbetriebnahmeprozesse*, Dissertation, Universität des Saarlandes, 2021
- [PER17] Persic, J., Markovic, I., Petrovic, I.: *Extrinsic 6DoF calibration of 3D LiDAR and radar*, European Conference on Mobile Robots, 2017
- [PET23] Petit, F.: *MEMS Spiegel für skalierbaren Lidar*, <https://www.blickfeld.com/de/blog/mems-spiegel-fur-skalierbaren-lidar/>, 2023
- [PRO19] Proff, H., Pottebaum, T., Wolf, P.: *Autonomous Driving*, Moonshot Project with Quantum leap from Hardware to Software & AI Focus, 2019
- [PUN15] Punke, M., Menzel, S., Werthessen, B., Stache, N., Hoepfl, M.: *Kamera-Hardware*, In: Winner, H., Hakuli, S., Lotz, F., Singer, C.: Handbuch Fahrerassistenzsysteme, Wiesbaden: Springer Fachmedien. 2015, S. 347–368
- [RAJ20] Raj, T., Hashim, F., Huddin, A., Ibrahim, M., Hussain, A.: *A Survey on LiDAR Scanning Mechanisms*, Electronics, 9, 2020

- [RAU14] Rauskolb, F., Berger, K., Lipski, C., Magnor, M., Cornelsen, K., Effertz, J., Form, T., Graefe, F., Ohl, S., Schumacher, W., Wille, J., Hecker, P., Nothdurft, T., Doering, M., Homeier, K., Morgenroth, J., Wolf, L., Basarke, C., Berger, C., Gülke, T., Klose, F., Rumpel, B.: *Caroline: An Autonomously Driving Vehicle for Urban Environments*, 2014
- [RAY24] Ray, <https://www.ray.io/>, 2024
- [REI14] Reif, K.: *Fahrerassistenzsysteme*, In: Reif, K.: *Automobilelektronik*, Wiesbaden: Springer Vieweg. 2014, S. 321–367
- [REI17] Reif, K.: *Grundlagen Fahrzeug- und Motorentechnik*, Springer Fachmedien, Wiesbaden, 2017
- [ROB19] Robbel, R., Maass, M., Knobel, C., Boymanns, D., Löhning, M., Ki, D., Timmons, A., O'Brien, M., Dannebaum, U., Weast, J., Dornieden B., Syguda, S., Wiltschko, T., Wittmann D., Liu, S.: *Safety first for automated driving*, 2019
- [ROB24] Robert Bosch GmbH: *Kraftfahrtechnisches Taschenbuch*, Springer Fachmedien, Wiesbaden, 2024, S. 1804–1871
- [ROR22] Roriz, R., Cabral, J., Gomes, T.: *Automotive LiDAR Technology: A Survey*, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 23, 2022
- [ROS19] Ross, H.-L.: *Funktionale Sicherheit im Automobil*, Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, München, Germany, 2019
- [RUD15] Rudert, S. u. Trumpfeller, J.: *Vollumfänglich durchdacht*, Der Produktentstehungsprozess, 2015
- [RUS01] Rusinkiewicz, S., Levoy, M.: *Efficient variants of the ICP algorithm*, 2001
- [SCH21] Scheppe, P.: *Inline Inbetriebnahme und Kalibrierung von Fahrerassistenzsystemen*. 13. Montage-Tagung 2021, Saarbrücken. 2021
- [SCH23] Scheppe, P.: *Inline Inbetriebnahme und Kalibrierung von Fahrerassistenzsystemen*, Dissertation, Universität des Saarlandes, 2023
- [SCH18a] Schiefer, P.: *IFX Day*, London, 2018
- [SCH17] Schneider, N., Piewak, F., Stiller, C., Franke, U.: *RegNet: Multimodal Sensor Registration Using Deep Neural Networks*, IEEE Intelligent Vehicles Symposium, 2017
- [SCH18b] Schubert, E.: *Klassifikation leicht verwundbarer Verkehrsteilnehmer mit hochauflösendem Automobilradar*, Dissertation, Universität Ulm, 2018
- [SIE11] Siegwart, R., Nourbakhsh, I., Scaramuzza, D.: *Introduction to autonomous mobile robots*, Intelligent robotics and autonomous agents, MIT Press, Cambridge, Massachusetts, London, England, 2011
- [SOH18] sohu: *Radar is part of the ADAS & autonomous driving revolution*, [https://www.sohu.com/a/214586162\\_99945165](https://www.sohu.com/a/214586162_99945165), 2018

- [SOL14] Soldan, S.: *Sensordatenfusionsansätze in der Thermografie zur Verbesserung der Messergebnisse*, Zugl.: Kassel, Univ., Diss., 2014, Schriftenreihe Mess- und Regelungstechnik der Universität Kassel, 3, Kassel Univ. Press, Kassel, 2014
- [STE95] Stephanis, C., Mourmouras, D.: *Trihedral rectangular ultrasonic reflector for distance measurements*, NDT & E International, 28, 1995
- [STÜ03] Stüker, D.: *Heterogene Sensordatenfusion zur robusten Objektverfolgung im automobile Straßenverkehr*, Dissertation, Carl von Ossietzky Universität, 2003
- [SÜß14] Süße, H., Rodner, E.: *Bildverarbeitung und Objekterkennung*, Springer Fachmedien, Wiesbaden, 2014
- [SZE22] Szeliski, R.: *Computer vision, Algorithms and applications*, Texts in computer science, Springer, Cham, 2022
- [TEX17] Texas Instruments: *Programming Chirp Parameters in TI Radar Devices*, Dallas 2017
- [TEX20] Texas Instruments: *Users Guide AWR1443. AWR1243, Evaluation Module (AWR1443BOOST, AWR1243BOOST) mmWave Sensing Solution*, 2020
- [THI23] Thieling, J.: *Architektur zur entwicklungsbegleitenden Modellierung und Simulation von Umfeldsensoren in Hybriden Testbeds*, Springer Fachmedien, Wiesbaden, 2023
- [TIL18] Tille, T.: *Automobil-Sensorik 2*, Springer, Berlin, Heidelberg, 2018
- [TIL20] Tille, T.: *Automobil-Sensorik 3*, Springer, Berlin, Heidelberg, 2020
- [VDA15] VDA: *Automatisierung von Fahrerassistenzsystemen zum automatisierten Fahren*, 2015
- [VDI19a] VDI: *Automatisiertes Fahren: Sensortechniken im Check*, <https://www.vdi.de/news/detail/automatisiertes-fahren-sensortechniken-im-check>, 2019
- [VDI19b] VDI 2221: *Entwicklung technischer Produkte und Systeme*, 2019
- [VDI21] VDI 2206: *Entwicklung mechatronischer und cyber-physischer Systeme*, 2021
- [VOS92] Vosselman, G.: *Relational matching*, Zugl.: Bonn, Univ., Diss, Lecture notes in computer science, 628, Springer, Berlin, Heidelberg, 1992
- [WEI24] Weidmann, W.: *Radarsensorik zur Erfassung bewegter und stationärer Objekte*, [https://www.innosent.de/fileadmin/media/doku-mente/Downloads/InnoSenT\\_Applikationsschrift\\_1\\_-\\_web.pdf](https://www.innosent.de/fileadmin/media/doku-mente/Downloads/InnoSenT_Applikationsschrift_1_-_web.pdf), 2024
- [WIL15] Wilhelm, U., Ebel, S., Weitzel, A.: *Funktionale Sicherheit und ISO 26262, Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort*, ATZ / MTZ-Fachbuch, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2015, S. 85–103
- [WIN15a] Winner, H., Hakuli, S., Lotz, F., Singer, C.: *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*, Springer Fachmedien, Wiesbaden, 2015

- [WIN15b] Winner, H.: *Radarsensorik*, In: Winner, H., Hakuli, S., Lotz, F., Singer, C.: Handbuch Fahrerassistenzsysteme, Wiesbaden: Springer Fachmedien. 2015
- [YAA15] Yaacobi, A.: *Integrated optical phased arrays for lidar applications*, Dissertation, Massachusetts Institute of Technology, 2015



## VI Anhang

### A1.1: Fehlertabellen Radar

Prüfung	Abweichung	Mögliche Ursachen
Datengröße	Größer als erwartet	Fehler bei Datenübertragung
	Kleiner als erwartet	Fehler bei Datenübertragung, Sensor beschädigt
Intensitäts- histogramm	Intensitäten kleiner	Sensor verdeckt, Sensor verschmutzt, Target verdeckt
	Intensitäten gleichverteilt	Sensor verdeckt, Sensor verschmutzt, Radom beschädigt
	Intensitäten größer	Störobjekt in Referenzszene
Anzahl der Maxima	Anzahl zu hoch	Störobjekt in Referenzszene
	Anzahl zu niedrig	Target verdeckt, Störobjekt in Referenzszene
Clusteranzahl	Anzahl zu hoch	Störobjekt in Referenzszene
	Anzahl zu niedrig	Target verdeckt, Störobjekt in Referenzszene

## A1.2: Fehlertabellen Lidar

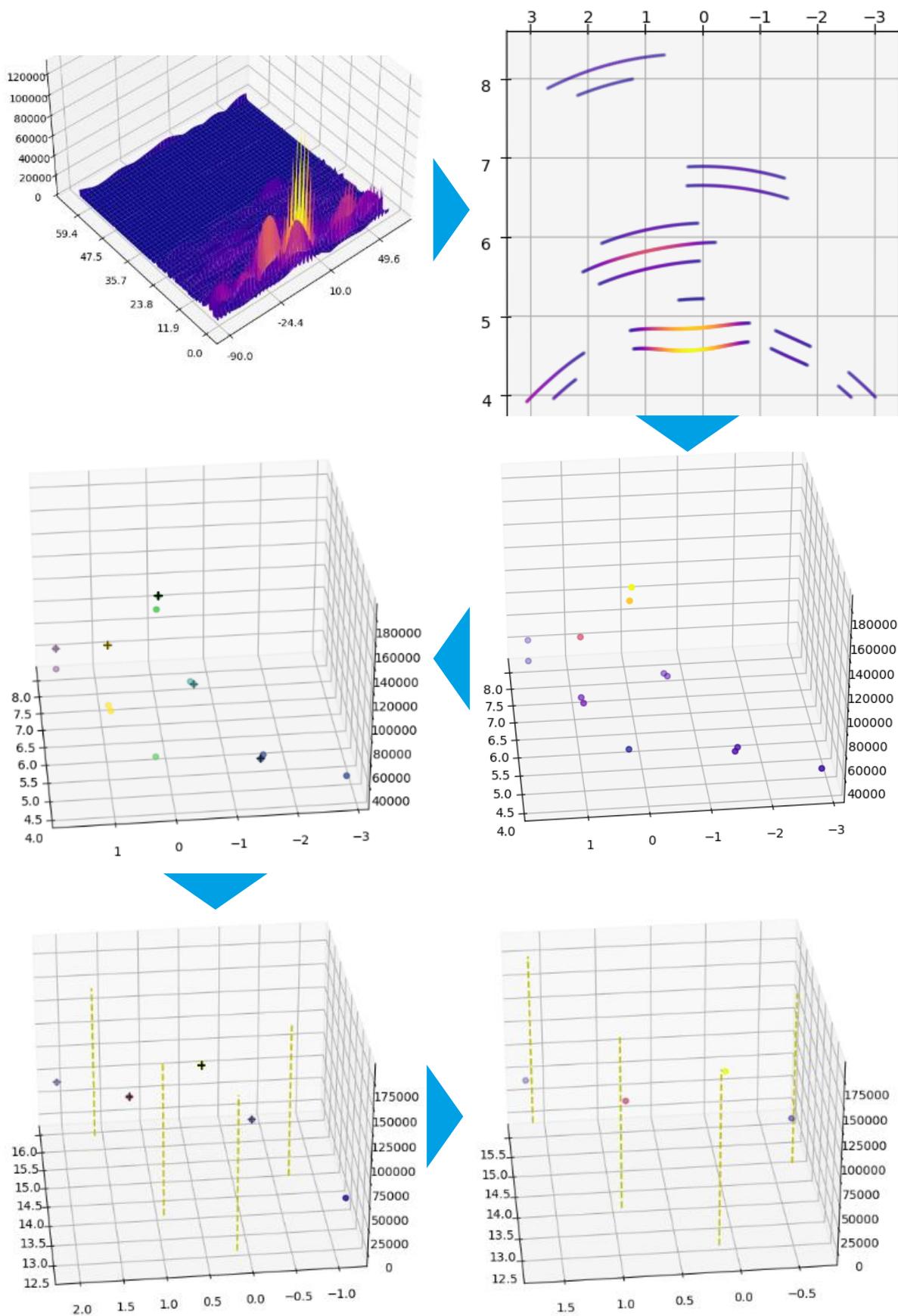
Prüfung	Abweichung	Mögliche Ursachen
Datengröße	Größer als erwartet	Fehler bei Datenübertragung
	Kleiner als erwartet	Fehler bei Datenübertragung, Sensor beschädigt
Distanz- Histogramm X	Distanzklassen kleiner	Sensor verdeckt, Sensor verschmutzt, Abdeckung beschädigt, Abdeckung verschmutzt, Störobjekt in Referenzszene
	Distanzklassen gleichverteilt	Sensor verdeckt, Sensor verschmutzt, Abdeckung beschädigt, Abdeckung verschmutzt
	Distanzklassen größer	Sensor beschädigt, Fahrzeug nicht in Referenzszene
Distanz- Histogramm Y	Distanzklassen kleiner	Sensor verdeckt, Sensor verschmutzt, Abdeckung beschädigt, Abdeckung verschmutzt, Störobjekt in Referenzszene
	Distanzklassen gleichverteilt	Sensor verdeckt, Sensor verschmutzt, Abdeckung beschädigt, Abdeckung verschmutzt
	Distanzklassen größer	Sensor beschädigt, Fahrzeug nicht in Referenzszene
Distanz- Histogramm Z	Distanzklassen kleiner	Sensor verdeckt, Sensor verschmutzt, Abdeckung beschädigt, Abdeckung verschmutzt, Störobjekt in Referenzszene
	Distanzklassen gleichverteilt	Sensor verdeckt, Sensor verschmutzt, Abdeckung beschädigt, Abdeckung verschmutzt
	Distanzklassen größer	Sensor beschädigt, Fahrzeug nicht in Referenzszene

Anzahl der Cluster	Anzahl zu hoch	Störobjekt in Referenzszene
	Anzahl zu niedrig	Target verdeckt, Störobjekt in Referenzszene

## A1.3: Fehlertabellen Kamera

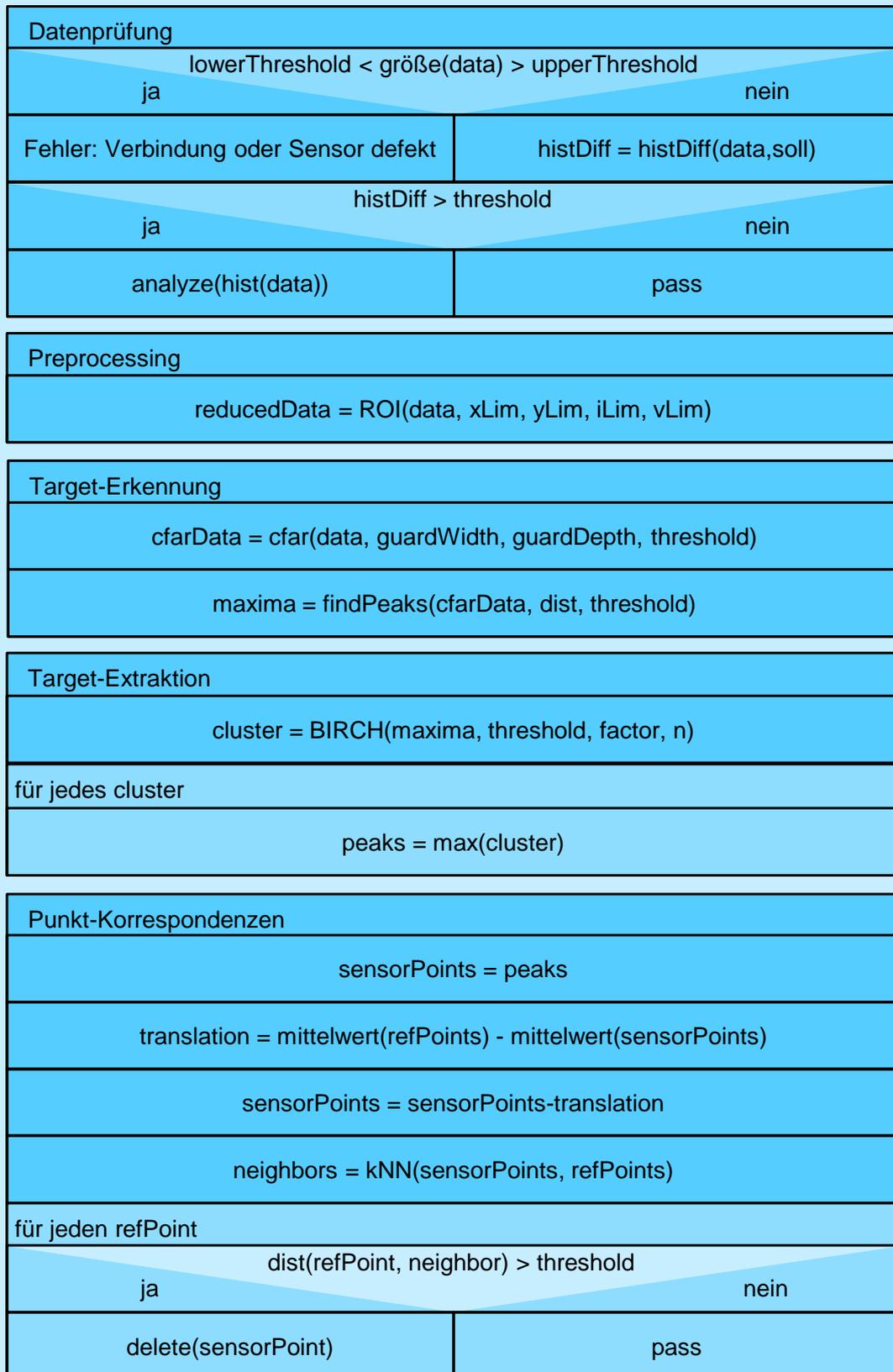
Prüfung	Abweichung	Mögliche Ursachen
Datengröße	Größer als erwartet	Fehler bei Datenübertragung
	Kleiner als erwartet	Fehler bei Datenübertragung, Sensor beschädigt
Helligkeits- histogramm	Helligkeiten zu hoch	Überbelichtung, Kamera beschädigt
	Helligkeiten gleichverteilt	Kamera verdeckt, Kamera beschädigt, Abdeckung verdeckt, Abdeckung beschädigt
	Helligkeiten zu niedrig	Kamera verdeckt, Kamera beschädigt, Abdeckung verdeckt, Abdeckung beschädigt
Kontrastwert	Kontrast zu hoch	Überbelichtung
	Kontrast zu niedrig	Unterbelichtung
Anzahl detektierter Marken	Anzahl zu hoch	Störobjekt in Referenzszene
	Anzahl zu niedrig	Target verdeckt, Störobjekt in Referenzszene

A2: Prozesspipeline Targeterkennung und Extraktion Radar

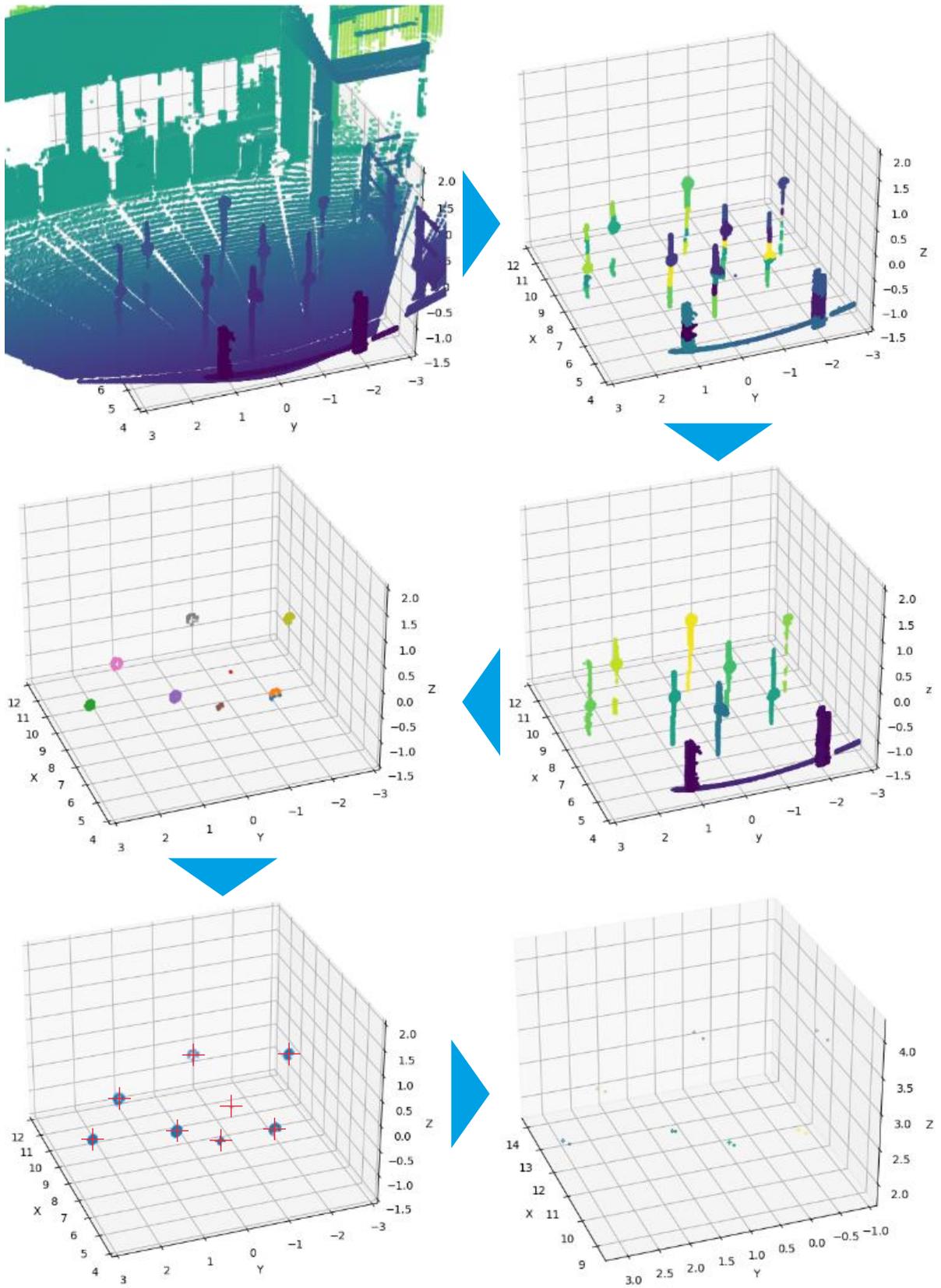


## A3: Struktogramm zur Funktionsabsicherung Radar

Für alle Frames

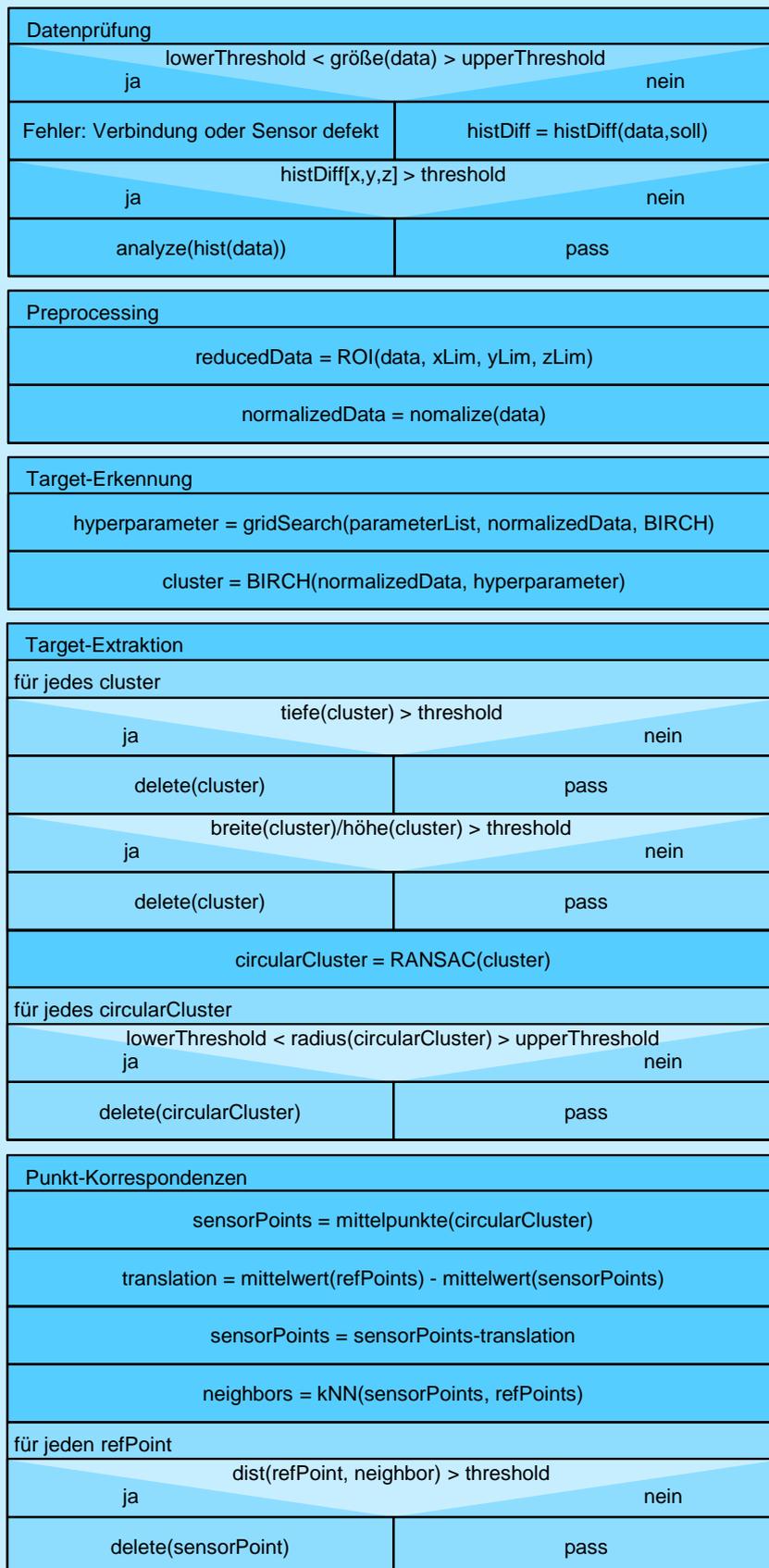


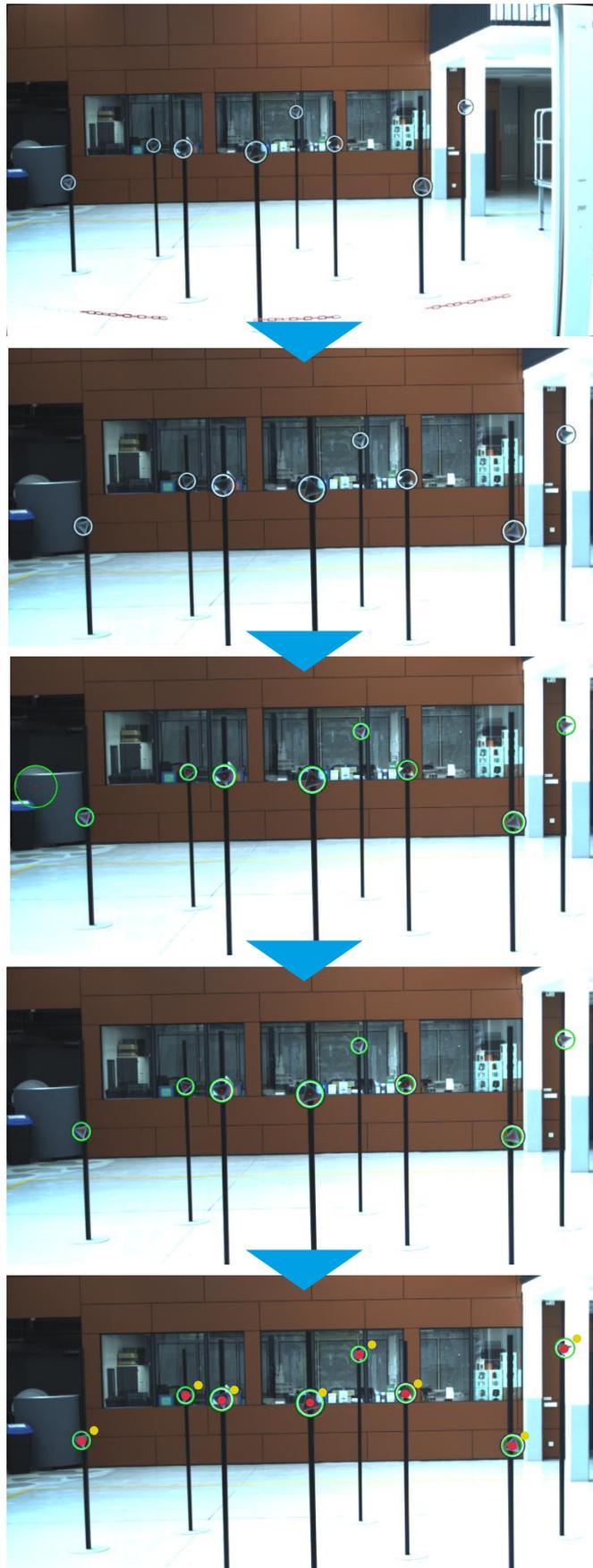
## A4: Prozesspipeline Targeterkennung und Extraktion Lidar



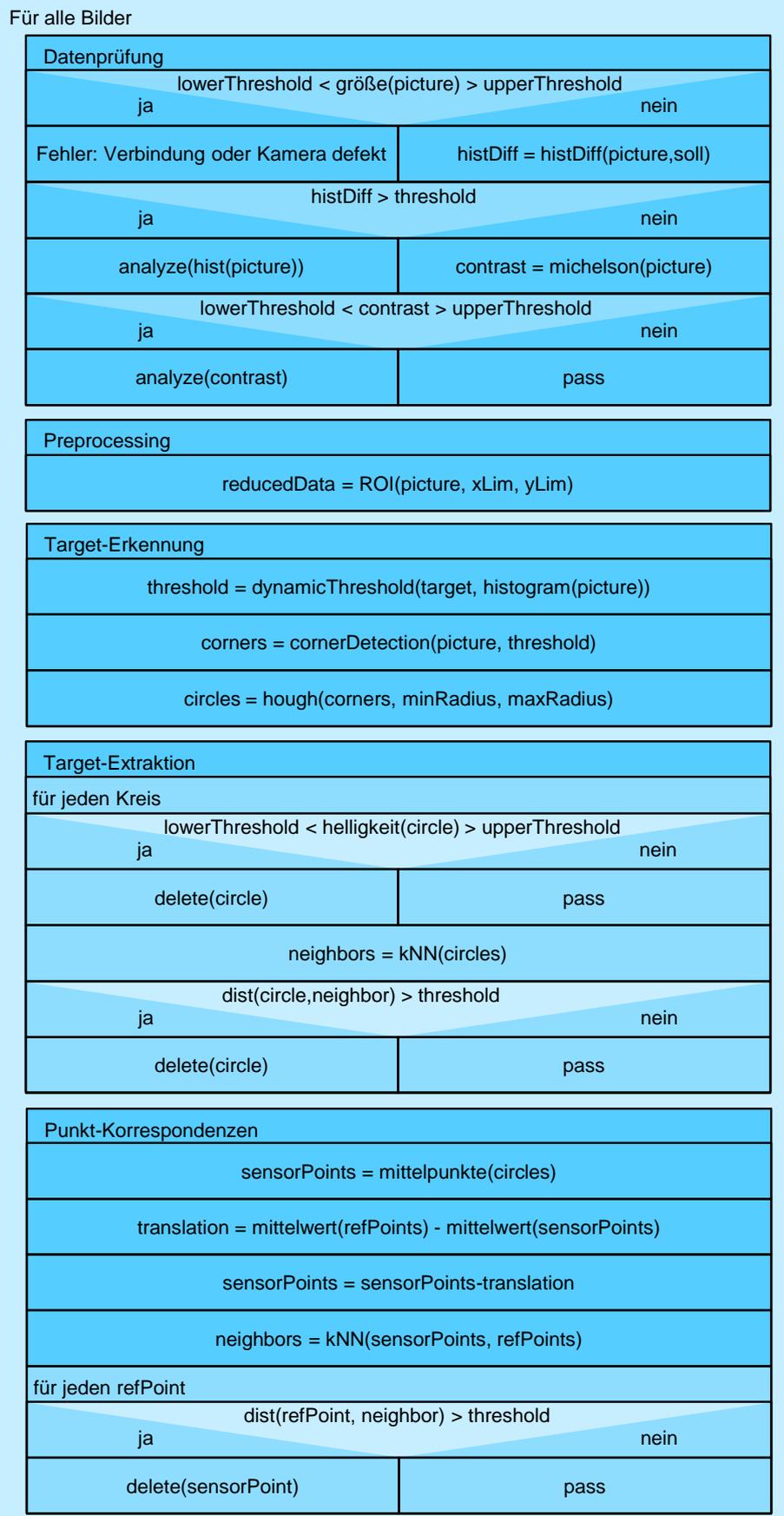
## A5: Struktogramm zur Funktionsabsicherung Lidar

Für alle Frames



**A6: Prozesspipeline Targeterkennung und Extraktion Kamera**

## A7: Struktogramm zur Funktionsabsicherung Kamera

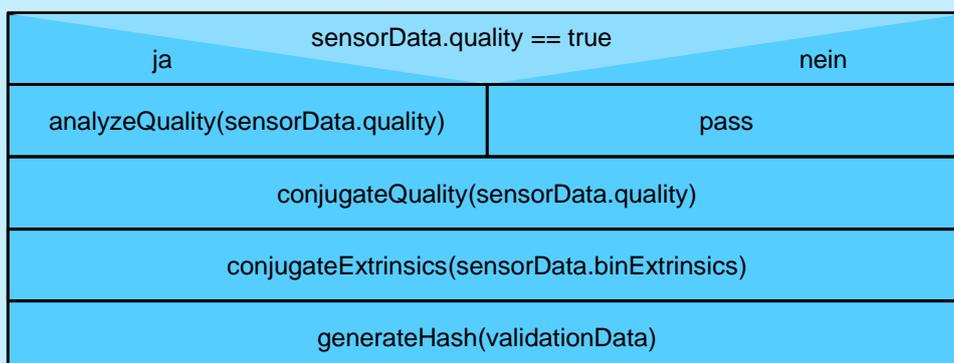
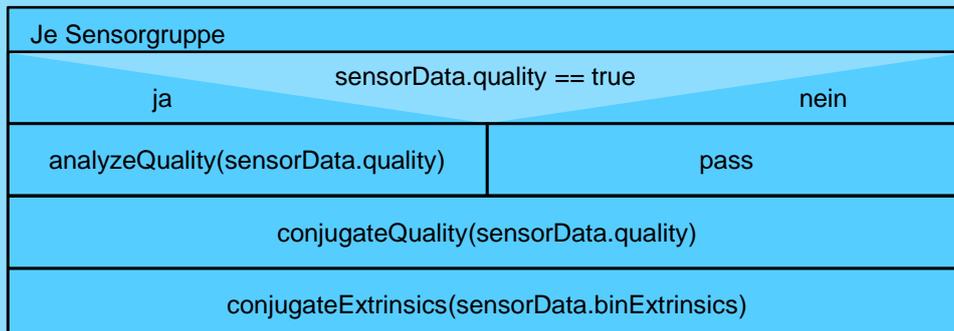
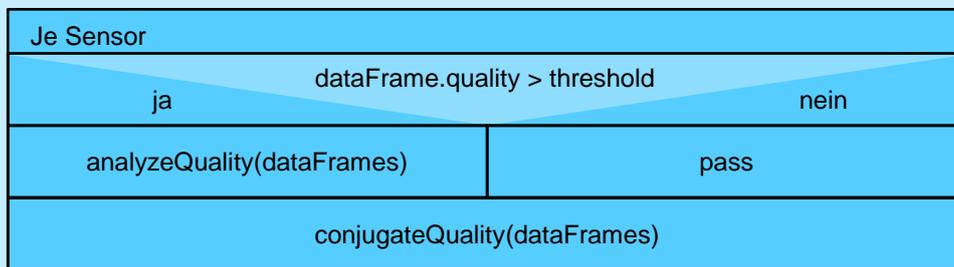
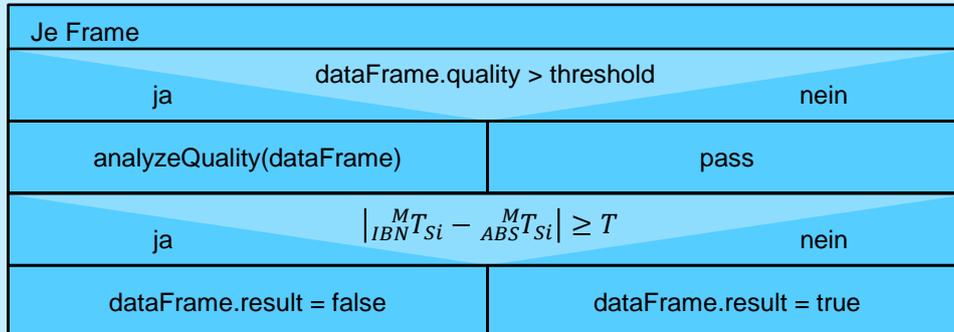


## A8: Struktogramm zur Evaluation und Funktionsabsicherung

Prüfung Gesamtfahrzeug

Für alle Sensorgruppen

Für alle Sensoren der Gruppe



**A9: Validierung der Wiederholgenauigkeit des Lidars**

Arbeitsabstand 3 m			
	Rx	Ry	Rz
Mittelwert	0,7314°	1,0424°	-2,0334°
Standardabweichung	0,4719°	0,5825°	0,1071°
Varianz	0,2317°	0,3428°	0,0123°

Arbeitsabstand 4,5 m			
	Rx	Ry	Rz
Mittelwert	0,2261°	1,5640°	-1,8366°
Standardabweichung	0,1963°	0,4115°	0,1255°
Varianz	0,0417°	0,1720°	0,0175°

Arbeitsabstand 6 m			
	Rx	Ry	Rz
Mittelwert	0,9117°	1,8725°	-2,1770°
Standardabweichung	0,2153°	0,4587°	0,1286°
Varianz	0,0482°	0,2186°	0,0169°

**A10: Validierung der Wiederholgenauigkeit der MPC**

Arbeitsabstand 5 m, 5x25 Messungen			
	Rx	Ry	Rz
Mittelwert	3,0381°	-0,7506°	-0,6283°
Standardabweichung	0,0262°	0,0323°	0,0216°
Varianz	0,0007°	0,0012°	0,0005°

Arbeitsabstand 6,5 m, 5x25 Messungen			
	Rx	Ry	Rz
Mittelwert	3,1056°	-0,7157°	-0,6596°
Standardabweichung	0,0242°	0,0106°	0,0147°
Varianz	0,0006°	0,0001°	0,0002°

Arbeitsabstand 7,5 m, 5x25 Messungen			
	Rx	Ry	Rz
Mittelwert	3,1393°	-0,7671°	-0,6545°
Standardabweichung	0,0370°	0,0277°	0,0225°
Varianz	0,0015°	0,0008°	0,0006°

## VII Betreute wissenschaftliche Arbeiten

**Justus Hoffmann:**

„Grundlagen der Radar- und LiDAR-Technik als Sensorik zur Umfelderkennung in Fahrzeugen“  
Seminararbeit, 2020

**Justus Hoffmann:**

„Integration eines Radarsensors zur Umfelderkennung und Auswertung der Sensordaten in einem Anwendungsfall der automobilen Endmontage“  
Bachelorarbeit, 2020

**Meike Schreiner:**

„Nutzung von Sensordatenfusion im Umfeld der Produktion und automobiler Anwendungen“  
Praxisarbeit, 2021

**Meike Schreiner:**

„Konzeption und Erfassung eines Multitargets zur Validierung der Kalibrierung umfelderfassender Sensorik automatisierter Fahrzeuge“  
Bachelorarbeit, 2021

**Nick Kempel:**

„Extrinsische Kalibrierung eines automobilen LiDAR-Sensors  
unter Nutzung hybrider Multitargets“  
Bachelorarbeit, 2023

**Meike Schreiner:**

„Prozess zur Funktionsabsicherung der umfelderfassenden Kameras hochautomatisierter und autonomer Fahrzeuge“  
Masterarbeit, 2024