

Fortschritt-Berichte VDI

VDI

Reihe 13

Fördertechnik/
Logistik

Nr. 59

Dipl.-Ing. Denis Vukovic,
Dortmund

Methodik zur 3D-Analyse der Laderaumauslastung von Transport- fahrzeugen

Methodik zur 3D-Analyse der Laderraumauslastung von Transportfahrzeugen

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

Dr.-Ing.

von der Fakultät Maschinenbau
der Technischen Universität Dortmund
genehmigte Dissertation

Dipl.-Ing. Denis Vukovic

aus

Titisee-Neustadt

Dortmund, 2021

Tag der mündlichen Prüfung: 18.02.2021

1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Rolf Jansen
2. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Bernd Künne

Fortschritt-Berichte VDI

Reihe 13

Fördertechnik/
Logistik

Dipl.-Ing. Denis Vukovic,
Dortmund

Nr. 59

Methodik zur
3D-Analyse der
Laderaumauslastung
von Transport-
fahrzeugen

VDI verlag

Vukovic, Denis

Methodik zur 3D-Analyse der Laderraumauslastung von Transportfahrzeugen

Fortschr.-Ber. VDI Reihe 13 Nr. 59. Düsseldorf: VDI Verlag 2021.

208 Seiten, 89 Bilder, 20 Tabellen.

ISBN 978-3-18-305913-36, ISSN 0178-9562,

€ 71,00/VDI-Mitgliederpreis € 63,90.

Für die Dokumentation: Digitale Transportlogistik – Straßengüterverkehr – Nachhaltigkeit – Auslastungsgrad – Volumenauslastung – Laderraumanalyse – 3D-Sensoren – Tiefenbildkamera – Messverhalten – Bewertungssystematik

Den Themenschwerpunkt der Arbeit bildet die sensorische Erfassung von 3D-Laderraumdaten mittels mehrerer Tiefenbildsensoren, um die Volumenauslastung von Transportfahrzeugen quantifizieren zu können. Die herausgearbeiteten Inhalte sind für Ingenieure, Logistiker und Wissenschaftler als besondere Wissensgrundlage anzusehen, um die unvermeidbaren Transportfahrten fortan ökonomischer und ökologischer durchführen zu können. Anhand einer detaillierten Analyse werden die Auslastungsdefizite verdeutlicht und die ungenutzten Leistungspotenziale aufgezeigt. Aufbauend auf verschiedenen Versuchsreihen erfolgt die Systemauslegung zur Generierung der erforderlichen 3D-Laderraumdaten. Die erarbeiteten Erkenntnisse werden anschließend in eine Auswertungssystematik überführt und im Rahmen eines Praxisszenarios validiert. Die Arbeitsergebnisse bilden einen innovativen Beitrag, um zukünftig eine höhere Transporteffizienz zu erzielen.

Bibliographische Information der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet unter <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Bibliographic information published by the Deutsche Bibliothek

(German National Library)

The Deutsche Bibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliographie (German National Bibliography); detailed bibliographic data is available via Internet at <http://dnb.ddb.de>.

D290 (Diss. Technische Universität Dortmund)

© VDI Verlag GmbH · Düsseldorf 2021

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe (Fotokopie, Mikrokopie), der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, im Internet und das der Übersetzung, vorbehalten.

Als Manuskript gedruckt. Printed in Germany.

ISSN 0178-9562

ISBN 978-3-18-305913-3

Danksagung

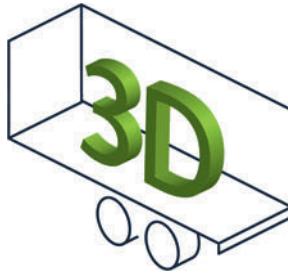
Die vorliegende Dissertation entstand im Rahmen meines Promotionsstudiums an der Technischen Universität Dortmund und neben meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Angestellter am Institut für Distributions- und Handelslogistik (IDH) des VVL e. V., Dortmund. Mein besonderer Dank gilt an erster Stelle meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Rolf Jansen, der mir die Möglichkeit, das Vertrauen, die Unterstützung und insbesondere die erforderlichen Freiräume bei der Durchführung des Promotionsvorhabens gegeben hat. Ferner danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Bernd Künne für die Übernahme des Koreferats und die finale Begleitung meiner Arbeit. Hierzu gehört vor allem auch die geleistete Hilfestellung bei der Organisation und Vollziehung der Promotionsprüfung in einer pandemiegeprägten Zeit, die für alle Beteiligten eine neue, wenn auch verzichtbare Erfahrung mit sich gebracht hat.

Eine wesentliche Herausforderung bei der Erstellung der Arbeit war es, mehrere fachlich angrenzende sowie fachfremde Themenbereiche zielgerichtet zusammenzuführen. Für die anfängliche Einordnung und Eingrenzung der erforderlichen Inhalte danke ich meinen ehemaligen Bürokollegen. Der fachliche und kollegiale Austausch haben es erst ermöglicht, die entsprechenden Ideen und Lösungsansätze zu konkretisieren. Für den praktischen Versuchsteil möchte ich mich zudem beim „Laborteam“ bedanken. Die Bereitstellung der verschiedenen Prüf- und Versuchseinrichtungen (Klimakammer, Schwingtisch, Ablaufbahn etc.) bildeten die Basis, um die umfangreichen Messdatenreihen generieren und auswerten zu können.

Schließlich möchte ich einen besonderen Dank an meine Familie aussprechen, die mir diesen Werdegang ermöglicht und mich bei der Umsetzung meiner Ziele immer unterstützt hat. An dieser Stelle sind insbesondere meine „bessere Hälfte“ sowie unser „kleiner Racker“ zu erwähnen. Sie haben bei der Entstehung dieser herausfordernden (Freizeit)Arbeit alle Strapazen und Entbehrungen auf sich genommen. Die gegenseitige Unterstützung bei den durchgemachten Höhen und Tiefen bleibt unvergessen. Danke!

Denis Vukovic

Dortmund, im März 2021



Eine Laderaumaufnahme sagt mehr als tausend Worte.

In Anlehnung an Fred R. Banard, 1921: „Ein Bild sagt ...“.

Für

A. B. T. V. S. L.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung.....	VIII
Abstract.....	IX
Abkürzungsverzeichnis	X
1 Einführung	1
1.1 Motivation und Problemstellung	1
1.2 Zielsetzung.....	4
1.3 Struktur der Arbeit	6
2 Darstellung des konzeptionellen Analyseumfeldes	9
2.1 Leistungscharakteristik des Straßengüterverkehrs.....	9
2.2 Transportleistung im Spannungsfeld der Nachhaltigkeit.....	12
2.3 Bedeutung und Potenziale der digitalen Transformation.....	18
2.4 Eingrenzung des Untersuchungsrahmens	20
3 Theorie und Praxis zur Laderaumauslastung.....	24
3.1 Analyse der Datenlage	24
3.1.1 Datengrundlage für die Auslastungsanalyse	24
3.1.2 Zielgrößen zur Kennzahlenbestimmung	27
3.2 Beschreibung des Laderaumprofils	29
3.2.1 Charakterisierung der Ladeobjekte	29
3.2.2 Spezifizierung der Laderaumbeschaffenheit.....	32
3.2.3 Eingrenzung des Belastungsprofils im Laderaum	35
3.3 Entwicklungsstand und Technologieauswahl.....	35
3.3.1 Lösungsansätze zur Erfassung der Volumendaten	36
3.3.2 Eingrenzung der 3D-Messverfahren	40
3.4 Spezifizierung der Arbeitsinhalte	44
4 Konzeptionelle Grundlagen zur Datengenerierung.....	46
4.1 Architektur und Funktionsweise der eingesetzten Hardware	46
4.1.1 Technischer Aufbau der Tiefenbildkamera	47
4.1.2 Messprinzip der Tiefenbildkamera	49
4.1.3 Generierung der Bilddaten.....	53
4.2 Geometrische Modellierung der Tiefenbildkamera	55
4.2.1 Relevante Bezugssysteme und Modellparameter für den Abbildungsvorgang	55
4.2.2 Koordinatenüberführung in das Bezugssystem der Tiefenbildkamera.....	59
4.2.3 Kameramodell zur projektiven Transformation.....	61
4.2.4 Berücksichtigung von Verzeichnungsfehlern	63
4.2.5 Bestimmung der Pixelkoordinaten.....	65

4.2.6	Zusammenfassung der Modellgleichungen	67
4.3	Messgenauigkeit der Tiefenbildkamera.....	70
4.3.1	Genauigkeitsvergleich der intrinsischen Kameraparameter	71
4.3.2	Genauigkeitsanalyse der Tiefenwerte.....	78
5	Experimentelle Untersuchungen zum Messverhalten.....	85
5.1	Messabweichungen bei der Datengenerierung	85
5.1.1	Allgemeine Einschränkungen einer ToF-Tiefenbildkamera	85
5.1.2	Einordnung der Einflussfaktoren.....	90
5.1.3	Eingrenzung der identifizierten und relevanten Einflussfaktoren	92
5.2	Einfluss der Temperatur	97
5.2.1	Bestimmung der einwirkenden Temperaturbereiche.....	97
5.2.2	Untersuchung des temperaturbezogenen Einlaufverhaltens.....	100
5.2.3	Untersuchung des Kameraverhaltens durch externen Temperatureinfluss	104
5.3	Einfluss der Materialien.....	109
5.3.1	Eingrenzung der relevanten Oberflächenmaterialien	109
5.3.2	Untersuchung des materialbedingten Reflexionsverhaltens.....	111
5.3.3	Untersuchung des Tiefenwertes in Abhängigkeit vom Einfallswinkel	115
5.4	Einfluss der Kameraanordnung	119
5.4.1	Kameraanordnung zur sensorischen Erfassung des Laderraums.....	120
5.4.2	Untersuchung der horizontalen Kameraneigung	121
5.4.3	Untersuchung der vertikalen Kameraverschiebung	125
5.5	Einfluss der mechanischen Transportbelastungen.....	128
5.5.1	Charakterisierung der einwirkenden mechanischen Transportbelastungen	128
5.5.2	Auswirkungen der mechanischen Belastungen auf die Kameraparameter	130
5.6	Gesamtbewertung der Versuchsergebnisse	132
6	Methodik zur Verarbeitung der Laderraumdaten	136
6.1	Aufnahme und Vorverarbeitung der akquirierten Rohdaten	136
6.1.1	Aufbau der Modellumgebung.....	137
6.1.2	Struktur der Rohdaten.....	138
6.1.3	Vorverarbeitung der Ausgangsdaten	140
6.2	Ablaufschema zur Verarbeitung der Laderraumdaten	142
6.2.1	Fusion der Einzelszenarien	142
6.2.2	Grobsegmentierung des Gesamtszenarios	144
6.2.3	Feinsegmentierung der Laderraumdaten.....	146
6.2.4	Approximation des Ladegutvolumens	148
6.3	Zusammenfassung der grafischen Verarbeitungskette	151
7	Experimentelle Systemerprobung	152
7.1	Evaluierung der Laderraumanalyse	152
7.1.1	Ausgangsszenario zur Datengenerierung	152
7.1.2	Verarbeitung der erfassten Laderraumdaten	157
7.1.3	Ergebnisanalyse	160

7.2	Bestimmung einer Auswertesystematik.....	166
7.2.1	Aufbereitung der Laderaumdaten	166
7.2.2	Auswertesystematik für den Parametervergleich	168
8	Schlussbetrachtung.....	172
8.1	Zusammenfassung und Erkenntnisgewinn	172
8.2	Ausblick und weiterer Forschungsbedarf	173
Literaturverzeichnis		177

Kurzfassung

Die digitale Transformation von Produkten, Verfahren und Prozessen nimmt im Zeitalter von cyber-physischen Systemen einen immer höheren Stellenwert ein. Unter logistischen Aspekten wird dabei insbesondere die Effizienzsteigerung entlang der Lieferkette verfolgt, um neue Leistungspotenziale zu erschließen. Die Grundlage hierfür bildet die konsequente Generierung und Bereitstellung von Sensordaten. Während bei der innerbetrieblichen Logistik bereits ausgeprägte digitale Vernetzungen vorzufinden sind, erweisen sich die außerbetrieblichen Logistikprozesse noch als sehr lückenhaft. Im Bereich der Transportlogistik ist in diesem Zusammenhang vor allen Dingen der Laderaum als eine inkonsistente Datenquelle anzusehen. Die Betrachtung der derzeitigen Transportabläufe zeigt, dass eine sensorische Erfassung der Laderaumauslastung nach wie vor nicht praktiziert wird, wodurch große Potenziale vorhandener Transportkapazitäten ungenutzt bleiben. Die konsequente Erfassung der relevanten Auslastungsdaten würde jedoch nicht nur einen erheblichen Systemvorteil für den Straßengüterverkehr mit sich bringen, sondern vor allen Dingen auch einen ökonomisch und ökologisch vertretbareren Straßengütertransport ermöglichen. Zur konsequenten Umsetzung fehlen allerdings – trotz der aktuellen technischen Entwicklungen im Nutzfahrzeugsegment – innovative Methoden und Instrumente, die es ermöglichen, den Laderaum digital zu erfassen, die volumenbezogene Auslastung zu bestimmen sowie die Transporteffizienz anforderungsgerecht zu bewerten.

Zur Behebung dieser Problematik wird im Rahmen dieser Arbeit eine Methodik zur dreidimensionalen Erfassung des Laderaums mittels mehrerer ToF-Tiefenbildsensoren entwickelt. Mithilfe einer intelligenten Aufbereitung und Verknüpfung der generierten Rohdaten wird eine 3D-Rekonstruktion der betrachteten Laderaumszenen ermöglicht, die die Basis zur Bestimmung der Volumenauslastung bildet. Neben der Systemauslegung und Datenerneuerung steht insbesondere die Bewertung des Kameramessverhaltens im Fokus. Aufbauend auf diesen Erkenntnissen folgt die Erarbeitung eines Analyseschemas, um die einzelnen Laderaumszenen zu bündeln, die relevanten Ladeobjekte zu identifizieren sowie das tatsächlich genutzte Laderaumvolumen zu ermitteln. Abschließend erfolgt die Evaluierung der erarbeiteten Methodik anhand eines Referenzszenarios. Dabei wird zusätzlich eine Bewertungssystematik eingeführt, um die Transporteffizienz in Abhängigkeit der Laderaumauslastung darzustellen.

Abstract

The digital transformation of products, procedures and processes is becoming increasingly important in the age of cyberphysical systems. From a logistical point of view, particular focus is on the increase in efficiency along the supply chain to tap new performance potential. The basis for this is the consistent generation and provision of sensor data. While there are already strong digital networks in internal logistics, external logistics processes are still very incomplete. In the area of transport logistics, the cargo space, in particular, can be viewed as an inconsistent data source. A look at the current transport processes shows that sensory recording of load capacity utilisation is still not practiced, which means that significant potentials of existing transport capacity remain unused. The consistent recording of the relevant utilisation data would not only yield a significant system advantage for road freight transport, but above all would also enable more economically and ecologically justifiable road freight transport. However, despite the current technical developments in the commercial vehicle segment, there is a lack of innovative methods and instruments for consistent implementation, making it possible to digitally record cargo space, determine volume-related capacity utilisation and evaluate transport efficiency according to requirements.

To remedy this problem, a methodology for the three-dimensional recording of cargo space through several ToF depth image sensors is the goal within this thesis. With the help of intelligent preparation and linking of the generated raw data, a 3D reconstruction of the considered cargo space scenarios will be developed, which forms the basis for determining the volume utilisation. In addition to system design and data generation, the focus is especially on evaluating the camera measurement behaviour. Building on these findings, an analysis scheme can be developed to bundle individual cargo space scenarios, identify relevant cargo objects and determine the actually used cargo space volume. Finally, the methodology developed is evaluated using a reference scenario. In addition, an evaluation system is introduced to show transport efficiency as a function of cargo space utilisation.

Abkürzungsverzeichnis

ASTM	American Society for Testing and Materials
CMOS	Complementary Metal-Oxide-Semiconductor
CV	Computer Vision
CW	Continious Wave
DIN	Deutsches Institut für Normung
EDI	Electronic Data Interchange
EG	Europäische Gemeinschaft
EPS	Expandiertes Polystyrol
EUL	Efficient Unit Loads
GFK	Glasfaserverstärkter Kunststoff
GK	Graukarte
ICP	Iterative Closest Point
IR	Infrarot
ISTA	International Safe Transit Association
ISO	International Organisation for Standardisation
KBA	Kraftfahrt-Bundesamt
KNN	K-Nearest-Neighbours
LED	Licht emittierende Diode
LiDAR	Light Detection and Ranging
MHz	Megahertz
NIR	Nahinfrarot
OBU	On-Board-Unit
PE	Polyethylen
PP	Polypropylen
PSD	Power Spectral Density
PVC	Polyvinylchlorid
RANSAC	RANdom-SAmple-Consensus-Algorithm
RGB	Rot Grün Blau (Farbraum)
RMS	Root Mean Square
SDK	Software Development Kit
SoC	System on Chip
ToF	Time of Flight
USB	Universal Serial Bus
XPS	Extrudiertes Polystyrol

1 Einführung

1.1 Motivation und Problemstellung

Der Straßengüterverkehr stellt eine wesentliche Versorgungsstütze für die Wirtschaft dar. Er sichert nicht nur einen Großteil der Wirtschaftsleistung, sondern er hält auch den Konsum der Gesellschaft gerade in Krisenzeiten aufrecht. Der klassische Transport von Gütern per Straße nimmt somit eine elementare Schlüsselfunktion innerhalb der weltweit vernetzten Transportketten ein. Der zunehmende Stellenwert des damit verbundenen Transportmittels (Lkw) verdeutlicht sich u. a. durch das jährlich ansteigende Transportaufkommen, die zunehmende Fahrleistung und den Anstieg bei den Fahrzeugzulassungen ([BMV19]; [KBA19]). Anhand des stetigen Transportzuwachses und der jährlichen Rekordwerte gerät der Straßengüterverkehr allerdings auch immer mehr an seine Kapazitätsgrenzen. In Kombination mit den zunehmenden Verkehrs- und Umweltbelastungen entstehen für den Straßengüterverkehr somit verstärkt ökonomische und ökologische Zielkonflikte ([MBW⁺15]; [SCK16]). Es wird unter anderem erwartet, dass das ansteigende Transportaufkommen durch möglichst nachhaltige und störungsfreie Transportvorgänge mit immer kürzeren Lieferzeiten bewältigt wird. Hinzu kommen verschärfte Klimarestriktionen, die in Verbindung mit den Emissionsregulierungen und dem wachsenden Nachhaltigkeitsverständnis den Straßengüterverkehr und insbesondere die Transporteure vor noch größere Herausforderungen stellen. In Anbetracht dieses Spannungsfeldes, dem der Straßengüterverkehr täglich ausgesetzt ist, sind daher dringend neue Methoden und Systeme zur Verbesserung der Transporteffizienz erforderlich. Dabei sollen nicht nur die derzeitigen Engpässe behoben, sondern insbesondere auch neue Perspektiven für die Durchführung effizienterer Transporte aufgezeigt werden. [JV17]

Eine Herausforderung, die in diesem Zusammenhang eine besondere Relevanz einnimmt, ist die verhältnismäßig schlechte Auslastung der Laderaume. Durch die optimierte Ausnutzung der Laderaume würden sich bspw. weitere Skaleneffekte hinsichtlich der Transporteffizienz generieren lassen, die sich langfristig in Form von geringerem Kraftstoffverbrauch, reduzierten Emissionen und weniger durchzuführenden Transportfahrten bemerkbar machen würden. Aufgrund dieser Zusammenhänge rücken Methoden und Maßnahmen zur Umsetzung einer besseren Laderaumauslastung verstärkt in den Handlungsfokus – insbesondere unter dem Aspekt, dass es derzeit an quantitativen Belegen zur Erfassung der tatsächlichen Laderaumauslastung mangelt. [JV17]

Die am weitesten verbreiteten Bezugsgrößen zur Bewertung der Laderaumkapazität eines Transportmittels basieren entweder auf der Erhebung des Transportaufkommens in t oder

auf der Erfassung der Transportleistung in tkm. Diese vielmals zitierten und verwendeten Basisgrößen beziehen sich allerdings lediglich auf die Gewichtsangaben eines Transports und besitzen somit nur eine begrenzte Aussagekraft hinsichtlich des realen Transportgeschehens. In Bezug auf die tatsächlichen Laderaumkapazitäten eines Transportmittels sind die Tonnageangaben daher nur als eine von mehreren Grenzgrößen zur Bestimmung der Laderaumauslastung anzusehen. Die Defizite dieser derzeit isolierten Kapazitätsbetrachtung werden vor allem durch die zunehmende Veränderung der Güterstruktur deutlich. Das heißt: Ein Großteil der heutigen zu transportierenden Güter weist eine immer geringere Massedichte auf (s. Elektronikartikel, Kleidungstücke etc.) ([Abe05], S. 4). Durch diesen Effekt kommt das Gewichtsproblem bei der Laderaumauslastung oftmals gar nicht mehr zum Tragen, sondern vielmehr tritt bei der Verladung der Güter das Laderaumvolumen als restriktiver Faktor in den Vordergrund. Dies bedeutet de facto, dass zur genauen Bestimmung der Laderaumauslastung und des damit verbundenen Transportaufkommens nicht nur die gewichtsmäßige Beladung eines Transportmittels berücksichtigt werden muss, sondern dass folgerichtig auch die Integration der volumenbezogenen Auslastungsdaten erforderlich ist. Die hierfür relevanten Volumendaten werden bei den derzeit praktizierten Transporten allerdings nicht konsistent erfasst, was wiederum eine praktikable Anwendung und Auswertung der Volumenauslastung – obwohl dies dringend erforderlich wäre – nahezu unmöglich macht ([Kil10], S. 219; [McK15], S. 244; [San17b]). Vom Kraftfahrt-Bundesamt werden zwar meldepflichtige Daten bezüglich der gewichts- und volumenbezogenen Laderaumauslastung erhoben; allerdings weisen die Volumenangaben bei einer detaillierten Analyse deutliche Schwankungen und Lücken auf, sodass diese Werte einen großen Interpretationsspielraum eröffnen ([Nag08], S. 161; [Kie12], S. 20). Im Umkehrschluss lässt sich daraus schließen, dass die derzeit für den Laderaum erfassten Volumendaten nur einen begrenzten Informationswert besitzen und als ungenügend einzustufen sind – vor allen Dingen im Zeitalter der digitalen Transportlogistik und den damit verbundenen Potenzialen (Stichwort: Transportlogistik 4.0).

Die automatisierte sensorische Volumenerfassung und die Datenanalyse des Laderaums bieten daher ein hohes Leistungsvermögen, um die vorhandenen Laderaumkapazitäten besser ausnutzen zu können. Die derzeitigen Auswertedefizite hängen jedoch insbesondere damit zusammen, dass zur Erfassung der volumenbezogenen Laderaumauslastung momentan keine geeignete Auswertemethodik existiert. Dadurch wird nicht einmal die Grundvoraussetzung zur konsistenten Datenerhebung und -auswertung gewährleistet. Hinzu kommt, dass die Generierung einer validen Datenbasis die konkrete Vermessung der physischen Ladeobjektflächen voraussetzt und dies wiederum den Einsatz einer adäquaten Messtechnik im Laderaum erfordert. Die Betrachtung der aktuellen Sensorlösungen im Laderaum zeigt jedoch auf, dass diese technischen Voraussetzungen nicht vorzufinden sind (oder gar ganz fehlen).

In Bezug auf diese Problematik gilt es allerdings zu berücksichtigen, dass inzwischen eine Vielzahl an unterschiedlichen Messverfahren existiert, die eine 3D-Erfassung des Laderaums prinzipiell ermöglichen würden [BFC18]. Insbesondere die Betrachtung der damit verbundenen Lösungsansätze zeigt, dass sich 3D-Tiefenbildsensoren für den Laderaumeinsatz als besonders aussichtsreich erweisen würden. Somit lässt sich konstatieren, dass die erforderliche Sensorik zur Umsetzung einer zentimetergenauen Volumenvermessung im Laderaum zwar existiert, diese jedoch noch keine Praxisreife besitzt, da die praktikable Umsetzung mit weiteren Herausforderungen verbunden ist. Hierzu gehören insbesondere die vom Laderaum ausgehende Störanfälligkeit der Bildsensoren sowie die damit verbundene Messgenauigkeit. Diese Einflussparameter müssen zum einen vorab systematisch identifiziert und zum anderen bezüglich des Messverhaltens analysiert werden. Zur konkreten Bestimmung dieser Einflussfaktoren sowie der damit verbundenen Wirkzusammenhänge wurden jedoch bisher noch keine laderaumspezifischen Voruntersuchungen durchgeführt. Anhand der Untersuchungsergebnisse wäre es insbesondere möglich, Rückschlüsse auf die Qualität der generierten Laderaumdaten zu ziehen. Neben dem Messverhalten und der Datengenerierung stellt die adäquate Auf- und Weiterverarbeitung der Laderaumdaten eine weitere wesentliche Herausforderung dar. Damit aus den generierten Rohdaten der betrachteten Laderaumszene eine einheitliche volumenbezogene Auslastung abgeleitet werden kann, ist eine auf den Laderaum abgestimmte Datenaufbereitung erforderlich. Das hierfür erforderliche Analysesystem, die dazugehörenden Verarbeitungsschritte sowie die damit verbundenen Auswertemethoden und Zielgrößen liegen jedoch noch nicht vor.

In Anbetracht der aufgeführten Herausforderungen und der gestellten Erwartungen an den Straßengüterverkehr ist zu erkennen, dass hinsichtlich der Laderaumauslastung noch ein erhebliches Verbesserungspotenzial besteht, um zukünftig effizientere und ökologisch tragbarere Transporte generieren zu können. Derzeit fehlen jedoch praktikable Auswertemethoden, Analysesysteme und Erfassungsinstrumente, die den betroffenen Akteuren – gerade im Hinblick auf die vorhandene Auslastungsproblematik – eine fortschrittlichere und wirtschaftlichere Transportplanung und -durchführung ermöglichen. Damit eine verbesserte Auslastung der vorhandenen Laderaumkapazitäten realisiert werden kann, ist ein interagierendes Erfassungssystem erforderlich, das eine echtzeitnahe Verknüpfung und Aufbereitung der Laderaumdaten ermöglicht. Dies impliziert wiederum wissenschaftlich-technische Vorarbeiten, um die erforderlichen Rahmenbedingungen zu erörtern sowie die dazugehörenden Anforderungskriterien festzulegen, damit darauf aufbauend eine praktikable Methodik zur digitalen Laderaumauswertung entwickelt und experimentell erprobt werden kann.

1.2 Zielsetzung

Die aufgeführten Problemstellungen zeigen bereits auf, dass sich die Erfassung der Laderaumdaten und die volumenbezogene Auswertung als vielschichtige und zugleich anspruchsvolle technische Herausforderung erweisen. Zur Problemlösung müssen nicht nur die logistischen Anforderungen berücksichtigt werden, sondern es bedarf vor allem der Einbindung weiterer Fachexpertisen. Im Kontext der vorliegenden Arbeit und der damit verbundenen Zielstellung – Entwicklung einer Methode zur Untersuchung der Laderaumvolumenauslastung – erfordert dies insbesondere Fachkenntnisse aus dem Bereich des maschinellen Sehens (Computer Vision). Dadurch wird bereits deutlich, dass das Hauptaugenmerk der Arbeit bei der digitalen Transformation des Laderraums liegt, um durch die Generierung, Aufbereitung und Auswertung von sensorbasierten 3D-Tiefenbilddaten eine präzisere Bewertung der tatsächlichen Laderaumauslastung zu ermöglichen (s. Abbildung 1.1).



Abbildung 1.1: Dreistufiges Zielschema der Arbeit

Zur digitalen dreidimensionalen Aufbereitung einer betrachteten Laderaumszene wird die simultane Verwendung mehrerer aktiver Tiefenbildsensoren angestrebt. Einen wesentlichen Vorteil beim Einsatz dieser Sensortechnik bildet die berührungslose und sekundenschnelle Datengenerierung. Einen Aufgabenschwerpunkt, der mit dieser Art der Datengenerierung zwingend einhergeht, bildet die Untersuchung der Datengüte, also die Frage, inwieweit sich der Sensoreinsatz im Laderaum eignet und wie sich eventuelle Einflussfaktoren auf die Qualität der generierten Rohdaten auswirken. Aufbauend auf den generierten Daten ist es in einem nächsten Schritt erforderlich, die zur Ermittlung des Ladevolumens generierten 3D-Bilddaten systematisch zu verarbeiten. Dies erfordert wiederum die Erarbeitung eines entsprechenden Laderaumanalysesystems, das mittels der entsprechenden Operatoren und Auswertetechniken die Möglichkeit bietet, die einzelnen Laderaumszenen zu bündeln, die Ladeeinheit im Laderaum zu identifizieren sowie irrelevante Teilszenarien

zu extrahieren. Zur funktionalen Interpretation der betrachteten Laderaumszene ist es des Weiteren erforderlich, die ausgewerteten Daten in ein Bewertungsinstrument zu implementieren, um diese anschließend im Rahmen eines transportmittelübergreifenden Kennzahlensystems nutzen zu können.

Aus transportlogistischer Sicht bezieht sich der zu generierende Datenmehrwert insbesondere auf die kontinuierliche Steigerung und Optimierung der Transportmitteleffizienz, um einen ressourcenschonenden Transporteinsatz gewährleisten, planen und bewerten zu können. Die Effizienz eines Transports wird im Wesentlichen durch die Fahrzeuggeladung beeinflusst – insbesondere unter den Aspekten, dass eine laderaumoptimierte Kapazitätsnutzung u. a. das Verkehrsaufkommen vermindert, die Umweltbelastungen reduziert sowie die erforderlichen Ressourcen schont. Zur Umsetzung von transparenten, bewertbaren und laderaumoptimierten Transportkapazitäten ist es daher erforderlich, die entsprechenden Laderaumgrößen zu erfassen und kontinuierlich auszuwerten. Eine wesentliche Grundvoraussetzung für den zukünftigen Aufbau eines Laderaumanalyse- und -monitoringsystems bildet die Bestimmung und Nutzung anwendungsgerechter Messgrößen, die es im Rahmen dieser Arbeit zum einen zu generieren und zum anderen auch zu definieren gilt. Erst dadurch können die damit verbundenen Wirkzusammenhänge bei der Datenerhebung aufgezeigt werden, um daraus ableitend einen anforderungsgerechten und zielführenden Maßstab für einen transportmittelübergreifenden Nachhaltigkeitsvergleich auszugestalten, der insbesondere die bisher fehlende räumliche Laderaumauslastung einbezieht.

Die Ausgangsbasis zur Durchführung einer Laderaumvolumenanalyse bildet die funktionale Auslegung eines Laderaumerfassungssystems. Mit der Umsetzung dieser vielseitigen Aufgabenstellung gehen wiederum unterschiedliche zu erfüllende Teilaufgaben einher, deren erforderliche Untersuchungen sowie die damit verbundenen Zielsetzungen folgende Kernfragen beinhalten:

- Welche 3D-Sensoren eignen sich grundsätzlich für den Laderaumeinsatz? Und wie wirkt sich der Sensorbetrieb im Laderaum auf die Datengenerierung aus?
- Welche Maßnahmen und Auswertmethoden sind erforderlich, um anhand der generierten Laderaumdaten das tatsächlich genutzte Laderaumvolumen ermitteln zu können?
- Wie lassen sich die aufbereiteten Laderaumdaten in ein Bewertungsinstrument integrieren, um eine individuelle Effizienzbewertung des Transportmittels in Abhängigkeit der Laderaumauslastung zu ermöglichen?

1.3 Struktur der Arbeit

Die vorliegende Arbeit besteht aus acht Kapiteln und setzt sich aus zwei Kernteilen zusammen (s. Abbildung 1.2). Der erste Teil befasst sich mit dem konzeptionellen Bezugsrahmen der Arbeit. Darin werden zunächst die Problemstellungen im logistischen Arbeitskontext beschrieben und die wissenschaftlich-technischen Grundlagen aufgearbeitet. Aufbauend auf diesem Grundverständnis wird im zweiten Teil der Arbeit das Funktionsprinzip der Sensorik erläutert und der erforderliche Lösungsraum aufgespannt. Anhand der systematischen Analyse der Laderraumbedingungen erfolgt anschließend die schrittweise Auslegung des angestrebten Laderraumerfassungssystems.

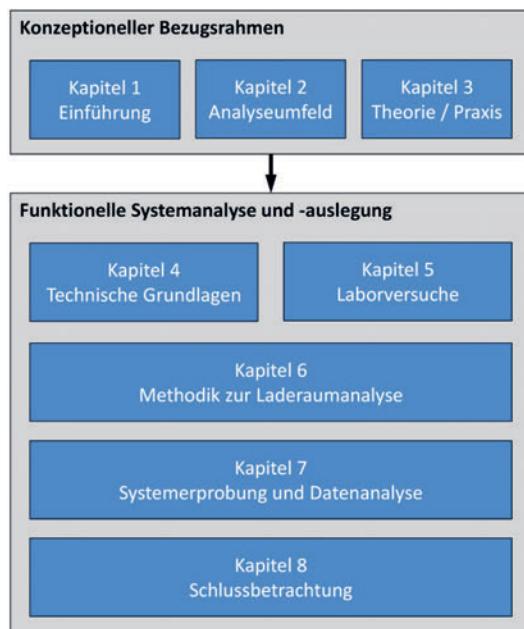


Abbildung 1.2: Gliederung der Arbeit

Die Inhalte der jeweiligen Einzelkapitel lassen sich dabei wie folgt zusammenfassen:

Kapitel 1 „Einführung“ gibt einen ersten Einblick in das Thema dieser Dissertation. Neben der ersten Problemkizzierung werden die Zielsetzung sowie der inhaltliche Umfang der Arbeit beschrieben.

Kapitel 2 „Darstellung des konzeptionellen Analyseumfeldes“ beschreibt den logistischen Bezugsrahmen dieser Arbeit. Dabei wird auf die Bedeutung des Straßengüterverkehrs eingegangen und dessen Hauptfunktionen werden erläutert. Durch den Vergleich verschiede-

ner statistischer Daten lässt sich die Entwicklung dieses Transportsektors skizzieren und erste Handlungsfelder werden aufgezeigt. Dabei wird ersichtlich, dass der Straßengüterverkehr verstärkt in den Fokus der Nachhaltigkeit rückt und der Einfluss der Digitalisierung voranschreitet. Basierend auf dem damit einhergehenden Grundverständnis wird abschließend der Untersuchungsrahmen eingegrenzt, um darauf aufbauend den erforderlichen Lösungsraum der Arbeit darstellen zu können.

Kapitel 3 „Theorie und Praxis zur Laderaumauslastung“ erläutert die arbeitsrelevanten Laderaumspezifika, welche für die weitere Systemauslegung von Bedeutung sind. Hierzu wird die Thematik der Laderaumauslastung vertieft und es werden die relevanten Laderaumparameter strukturiert. Anhand des ausgewählten Untersuchungsumfeldes lassen sich anschließend die ersten Rahmenbedingungen und Systemgrenzen zur Bestimmung der Laderaumvolumenauslastung festlegen. Ferner werden verschiedene Lösungsansätze aufgeführt und die typischen Herausforderungen beschrieben, um ein geeignetes Messsystem zur Bestimmung der Volumenauslastung umsetzen zu können.

Kapitel 4 „Konzeptionelle Grundlagen zur Datengenerierung“ vertieft schrittweise die Architektur und Funktionsweise der ausgewählten 3D-Tiefenbildkamera. Anhand eines allgemeinen Kameramodells werden die erforderlichen Parameter zur Datenerfassung zwischen Bild- und Objektraum beschrieben. Die enthaltenen Modellparameter bilden die Ausgangsbasis, um später das Messverhalten der eingesetzten Tiefenbildkamera analysieren zu können.

Kapitel 5 „Experimentelle Untersuchungen zum Messverhalten“ befasst sich im Detail mit der Analyse der Einflussfaktoren, denen die Tiefenbildkamera bei der Datenakquisition im Laderaum ausgesetzt ist. Damit eine realitätsgtreue Messanalyse durchgeführt werden kann, werden zunächst die laderaumtypischen Einflussparameter identifiziert und klassifiziert. Anschließend werden die jeweiligen Versuchsaufbauten beschrieben und die Laborergebnisse ausgewertet. Anhand festgelegter Referenzwerte wird ein Datenvergleich durchgeführt und die Versuchsergebnisse werden hinsichtlich ihrer Relevanz für die Systemauslegung bewertet.

Kapitel 6 „Methodik zur Verarbeitung der Laderaumdaten“ beschreibt die erforderlichen Operatoren, um eine adäquate Prozesskette zur Verarbeitung der erfassten Laderaumdaten bestimmen zu können. Hierfür wird zunächst auf eine Laderaummodellumgebung zurückgegriffen, die es ermöglicht, die verschiedenen Auswertetechniken und Verarbeitungsmethoden zu erproben. Anhand der Erkenntnisse werden anschließend die einzelnen Arbeitsschritte zu einem exemplarischen Ablaufschema zusammengefasst. Die erarbeitete Verarbeitungskette bildet die Ausgangsbasis, um die Volumenauslastung im Laderaum bestimmen und erproben zu können.

Kapitel 7 „Experimentelle Systemerprobung“ validiert die erarbeitete Messmethodik und das Auswertereprinzip anhand eines Praxisszenarios. Ferner werden die generierten Laderaumdaten in ein Bewertungsinstrument integriert; d. h., die erfassten Daten werden in ein Kennzahlensystem überführt, um darauf aufbauend eine ganzheitliche Bewertung in Abhängigkeit von der Laderaumkapazität zu ermöglichen.

Kapitel 8 „Schlussbetrachtung“ führt die wesentlichen Erkenntnisse der Arbeit zusammen. Ferner wird ein Ausblick auf weitere Entwicklungsfelder sowie den zukünftigen Forschungsbedarf gegeben.

Die aufgeführte Problemstellung und die Strukturierung der Arbeit verdeutlichen bereits, dass in den einzelnen Kapiteln umfassende Grundlageninhalte aus verschiedenen Fachgebieten (u. a. Logistik, Physik, Informatik, Mathematik) aufbereitet und zusammengeführt werden müssen. Aufgrund der individuellen Wissensumfänge wird zur Reduzierung der jeweiligen Themenkomplexe im weiteren Arbeitsverlauf weitgehend auf die gesonderte Beschreibung von grundlegenden Fachtermini sowie auf die ausführliche Darstellung von technischen Mechanismen, physikalischen Wirkprinzipien oder mathematischen Beweisführungen verzichtet. Zur thematischen Vertiefung wird an den relevanten Stellen auf die entsprechenden Grundlagenwerke und/oder die einschlägige Fachliteratur verwiesen.

2 Darstellung des konzeptionellen Analyseumfeldes

Zur besseren Einordnung der beschriebenen Problemstellung wird in den folgenden Abschnitten eine Charakterisierung des Straßengüterverkehrs anhand seines Leistungsprofils sowie seiner Systemeigenschaften vorgenommen. Durch diese strukturierte Aufarbeitung soll ein einheitliches Grundverständnis für die wesentlichen Kernprobleme geschaffen und ein gemeinsames Analyseumfeld dargestellt werden. Ferner wird es hierdurch ermöglicht, den oftmals weit gefassten Transportsektor mit seiner Vielzahl an unterschiedlichen Begrifflichkeiten¹ und Anwendungsfeldern im erforderlichen Forschungskontext zu präzisieren und die arbeitsrelevanten Zusammenhänge für die Teilbereiche der Nachhaltigkeit sowie der Digitalisierung aufzuzeigen. Anhand der damit einhergehenden Vorauswahl an Transportszenarien und -variablen lassen sich wiederum die einzelnen Systemeigenschaften des Straßengüterverkehrs genauer bestimmen, um darauf aufbauend die erforderlichen Anforderungskriterien für die Systemauslegung zu konkretisieren und den entsprechenden Lösungsraum aufzuspannen.

2.1 Leistungscharakteristik des Straßengüterverkehrs

Der Güterverkehr in Deutschland hat in den letzten Jahren neue Höchstwerte erreicht. Das Transportaufkommen ist im Jahresvergleich von 2010 zu 2018 um 16,9 % auf inzwischen über 4,4 Mrd. t gestiegen.² Dabei werden etwa 3,7 Mrd. t allein vom Straßengüterverkehr befördert, was einem Modal-Split-Anteil von über 84 % entspricht. [BMV19] Der Straßengüterverkehr nimmt somit eine wesentliche Versorgungsstütze bei der täglichen Güterbelieferung ein. Zur Bewertung des Straßengüteranteils wird neben dem Transportaufkommen auch die Transportleistung als Indikator herangezogen. Die vom Statistischen Bundesamt erhobenen Daten zeigen auf, dass die Transportleistung des Straßengüterverkehrs im Jahr 2018 auf einen neuen Rekordwert von über 500 Mrd. tkm angestiegen ist (s. Abbildung 2.1). Die nähere Betrachtung von Transportaufkommen und -auslastung zeigt vor allen Dingen auf, dass sich die beiden Kennzahlen ungleich entwickelt haben. Dies ist insbesondere darauf zurückzuführen, dass sich die durchschnittliche Transportdistanz in den letzten Jahren stets reduziert hat und ein Großteil der zu befördernden Güter durch den Nahverkehr erbracht wird – vorwiegend mit Distanzen von unter 50 km ([Hüt16], S. 49).

¹ Für die transportlogistischen Kernbegriffe wird an dieser Stelle auf die Definitionen von Jehle, Ihde und Clausen verwiesen ([Jeh80]; [Ihd01]; [CG13]).

² Angaben enthalten die Verkehrszweige Eisenbahnverkehr, Binnenschifffahrt, Luftverkehr, Straßenverkehr und Rohrleitungen.

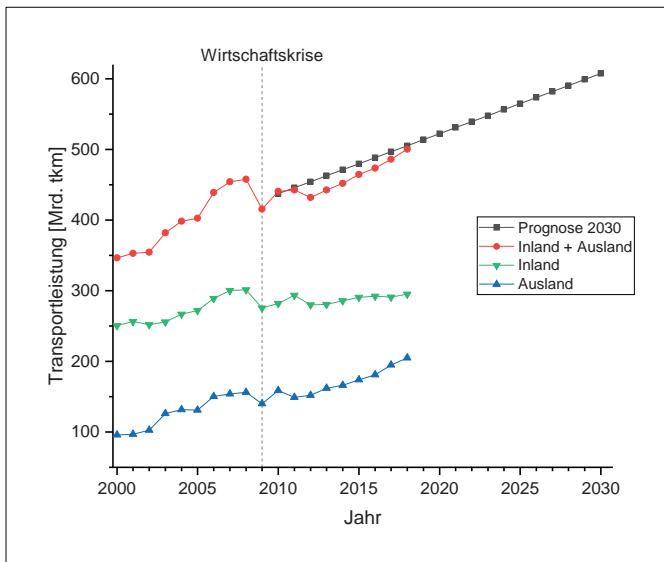


Abbildung 2.1: Entwicklung der Transportleistung beim Straßengüterverkehr (Angaben nach ([BMV16]; [BMV18]; [BMV19]))

Bei der Beförderung der Güter auf deutschen Straßen gilt es zudem zu berücksichtigen, dass für den Transport sowohl deutsche als auch ausländische Lastkraftfahrzeuge eingesetzt werden. Bei der separaten Betrachtung der erfassten Daten wird ersichtlich, dass der Anteil der deutschen Lastkraftfahrzeuge das Vorkrisenniveau bisher nicht überschritten hat. Zur Erreichung der neuen Rekordwerte haben insbesondere die ausländischen Lastkraftfahrzeuge beigetragen. Im Vergleich zur Transportleistung im Jahr 2000 hat sich deren Leistungsanteil mehr als verdoppelt und ist insbesondere in den letzten acht Jahren sehr stark angestiegen. Zurückzuführen ist diese Entwicklung zum einen auf den zunehmenden Transitverkehr und zum anderen auf den EU-Beitritt der mittel- und osteuropäischen Länder. Diese Beitrittsländer haben die Wettbewerbssituation auf dem Transportmarkt durch die deutlichen Lohnunterschiede verschärft. Deutsche Transportunternehmen haben daher im Zuge des Konkurrenzdrucks einen Großteil ihrer Transportflotte in die neuen EU-Länder ausgelagert. Durch diese Maßnahme können die Transportunternehmen preiswerte re Gesamtkonditionen anbieten, die sich in Summe auf eine günstigere Transportleistung auswirken. Diese Entwicklung verdeutlicht nicht nur den voranschreitenden Strukturwandel des Transportgewerbes, sondern auch die zunehmende Wettbewerbssituation im deutschen und europäischen Straßengüterverkehrssektor. ([Zan18], S. 82)

Tabelle 2.1: Entwicklung relevanter Straßengüterverkehrsdaten (Angaben nach ([BAG15]; [BMV19]; [KBA19]))

Gegenstand der Nachweisung	2000	2010	2018*	18/00 ¹
Transportaufkommen [Mrd. Tonnen]	3,2	3,1	3,8	+18,8 %
Modal-Split-Anteil [%]	83,5	82,3	84,5	+1,2 %
Transportleistung [Mrd. tkm]	346,3	440,6	500,2	+12,8 %
Modal-Split-Anteil [%]	67,8	70,3	71,7	+5,8 %
Transportleistung Lkw-Inland [Mrd. tkm]	250,6	281,9	295,2	+17,8 %
Transportleistung Lkw-Ausland [Mrd. tkm]	95,7	158,7	205	+114,2 %
Fahrzeugbestand [Mio. Stück]	2,69	2,56	3,24	+20,4 %
Leerfahrtanteil Lkw [%]	41,1	37,6	37,1	-4,0 %
Länge Straßennetz [Tsd. km]	230,8	231,0	229,8	-0,4 %
Staulänge Autobahn [Tsd. km]	300	400	1.500	+400 %
Auslastungsgrad Ladefahrten [%]	68,0	59,7	56,4	-17,1 %

*Zum Teil lagen für 2018 nur vorläufige Werte vor; ¹ prozentuale Veränderungen zum Bezugsjahr 2000 (2000 = 100)

Einer weiterer Aspekt, den es im vorliegenden Kontext zu berücksichtigen gilt, sind die infrastrukturellen Rahmenbedingungen bezüglich des Verkehrsnetzes und der damit verbundenen Fahrleistung. Deutschland verfügte im Jahr 2018 über ein überörtliches Straßennetz von insgesamt 229 826 km. Davon entfielen 22 % auf Bundesfernstraßen, 38 % auf Landesstraßen und 40 % auf Kreisstraßen [BMV19]. Ausgehend von den letzten zehn Jahren hat sich die vorhandene Straßeninfrastruktur nur unwesentlich verändert. Die größten Zuwächse waren bei den Bundesautobahnen zu verzeichnen (+3,9 %). Durch die zeitgleiche Herabstufung einzelner Bundesfernstraßen zu Landes-, Kreis- oder Kommunalstraßen konnten dadurch jedoch keine Zuwächse bei der Gesamtlänge des Straßennetzes ausgewiesen werden. Im Vergleich zum Jahr 2000 ist durch die Herabstufungen sogar ein Rückgang um 0,4 % zu verzeichnen. Im selben Zeitraum wurde hingegen die Gesamtlänge der Bundesautobahnen um 12,2 % erhöht. Zeitgleich sind der Fahrzeugbestand der Lastkraftfahrzeuge sowie die damit verbundene Fahrleistung deutlich angestiegen (+20,4 %). Dabei muss jedoch zusätzlich auch die Entwicklung des motorisierten Personenverkehrs (Pkw-Aufkommen) berücksichtigt werden. Der Bestand der Pkw ist inzwischen 14-mal so hoch wie der Anteil der Lastkraftfahrzeuge [BMV19]. Dabei betrug die Gesamtfahrleistung in Deutschland 736,0 Mrd. km, wovon der Anteil der Lastkraftfahrzeuge bei 11,1 % lag und der Pkw-Anteil bei 85,6 %. Ferner wurden auf den deutschen Autobahnen im Jahr 2018 etwa 32,9 Mrd. km durch mautpflichtige Lkw zurückgelegt, davon entfielen 18,1 Mrd. km auf in Deutschland zugelassene Lastkraftfahrzeuge [BAG20]. Bezogen auf die gesamte Fahrleistung auf den deutschen Autobahnen (249,4 Mrd. km) ergibt dies einen Lkw-Anteil von 13,2 %. In diesem Zusammenhang ist auch die Entwicklung der Staulängen zu betrachten. Im Zeitraum von 2000 bis 2018 hat sich die jährliche Staulänge auf den deutschen Autobahnen von ca. 300 000 auf über 1 500 000 km erhöht [ADA20]. Bezogen auf die Straßen Nutzung bedeutet dies, dass es auf ca. 30 % aller Autobahnkilometer mindestens einmal täglich zu einem stark stockenden oder gar stillstehenden Verkehrsfluss kommt. In Anbetracht dieser Verkehrsentwicklung zeigt der Vergleich der Leer- und Lastfahrten beim

Straßengüterverkehr eine unverhältnismäßige Stagnation beziehungsweise eine negative Entwicklung auf. Die Leerfahrten haben sich in den vergangenen 18 Jahren zwar minimal um 4 % verbessert, allerdings weisen diese nach wie vor einen nicht zu vernachlässigbaren Leerfahrtenanteil auf, der umgerechnet bei ca. 6,5 Mio. Leerkilometern liegt. Die Betrachtung der Auslastung bei den durchgeführten Ladungsfahrten führt sogar eine Verschlechterung von 17,1 % seit dem Jahr 2000 auf. Nach den aktuellen statistischen Angaben bleiben somit beim Straßengütertransport etwa 43,6 % des verfügbaren Ladevermögens ungenutzt, was wiederum ein erhebliches Leistungspotenzial darstellt, welches es auszuschöpfen gilt. ([KBA06]; [KBA11]; [KBA19])

Anhand der aufgeführten Angaben lässt sich aufzeigen, dass der Güterverkehr nach wie vor vom Lkw-Transport auf der Straße dominiert wird. Der kontinuierliche Transportleistungsanstieg im Straßengüterverkehr hat inzwischen zu einer starken Überbelastung der Verkehrsinfrastruktur und zu einem hohen Ressourcenverbrauch geführt. Gemäß der aufgeführten Daten werden 33 % der Lkw-Fahrleistung auf 5,7 % der deutschen Straßen erbracht, die zu einem Drittel mit größtenteils leeren Lastkraftfahrzeugen (s. Auslastungsgrad und Leerfahrtenanteil) „verstopft“ sind – ein Umstand, den es dringend zu verbessern gilt. Verschärft wird diese prekäre Gesamtsituation durch die zukünftigen Entwicklungen im Straßengüterverkehr. Die Nachfrage nach Transportleistungen im Straßengüterverkehr ist unmittelbar an die jeweilige Wirtschaftslage gekoppelt [HO16].³ Gemäß den damit verbundenen Prognosen geht das zuständige Bundesministerium (BMVI) von einem weiterhin wachsenden Güterverkehrsaufkommen aus. Bis zum Jahr 2030 wird für den nationalen Straßengüterverkehr ein Anstieg der Transportleistung auf etwa 607,4 Mrd. tkm erwartet ([BMV16], S. 55). Die vom BMVI im Jahr 2016 herausgegebenen Prognosedaten kongruieren dabei weitgehend mit den erfassten Daten der letzten Jahre (s. Abbildung 2.1, lineare Interpolation der Prognosedaten). Diese Wachstumszahlen rücken in Verbindung mit dem Energie- und Ressourcenverbrauch des Straßengüterverkehrs noch weiter in den Fokus der betroffenen Akteure. In Zeiten steigender Ölpreise, überlasteter Straßen und drohenden Klimawandels ist es daher erforderlich, weitere Lösungswege für den Straßengüterverkehr zu erarbeiten, die sowohl die bereits vorhandenen Transportkapazitäten besser nutzen als auch zukünftig einen nachhaltigeren und effektiveren Straßengütertransport ermöglichen.

2.2 Transportleistung im Spannungsfeld der Nachhaltigkeit

Die Leistungscharakteristik des Straßengüterverkehrs hat gezeigt, dass der Transport per Straße eine hohe Bedeutung bei den täglichen Versorgungsprozessen einnimmt und sich

³ An dieser Stelle wird darauf verwiesen, dass die Daten der Lkw-Mauterhebung inzwischen auch als Frühindikator für den Konjunkturverlauf herangezogen werden [CBL⁺18].

dessen Einsatz zugleich auf die prekäre Verkehrssituation auswirkt. Das steigende Transportaufkommen resultiert in einem stetig höher werdenden Ressourcenverbrauch, wodurch die Präsenz des Straßengüterverkehrs verstärkt in das Spannungsfeld der Nachhaltigkeit rückt. Der physische Transport der Güter von der entsprechenden Quelle zur jeweiligen Senke ist daher in vielerlei Hinsicht mitverantwortlich für die Entstehung von Treibhausgasen, Luftschatzstoffen, Lärm, Verkehrsbehinderungen, Unfällen und Straßenverschleiß ([McK12]; [LST⁺12]; [PS12]; [RCM12]; [Zan18]). In Anbetracht der aktuellen Klimaentwicklungen erfahren die transportbedingten Umweltbelastungen im Kontext eines nachhaltigen Logistikmanagements nochmals zusätzliche Brisanz [Pfe19].

Die vom Straßengüterverkehr ausgehenden Umweltbelastungen werden in erster Linie durch die erbrachte Fahrleistung der motorisierten Transportmittel verursacht. Bei den Transportfahrten setzt vorwiegend der Verbrennungsprozess der Dieselmotoren Schadstoffe in Form von Kohlenmonoxid, Kohlendioxid, Stickoxid, Kohlenwasserstoff und entsprechende Rußpartikel frei, die sich direkt oder indirekt schädlich auf die Umwelt auswirken ([App13], S. 407). Als Messgröße dient in diesem Zusammenhang der absolute CO₂-Ausstoß in Mio. t.⁴ Zur generellen Kompensation der CO₂-Emissionen im Straßengüterverkehr wurden bereits verschiedene technische und organisatorische Effizienzmaßnahmen erarbeitet und schrittweise umgesetzt ([LBK04]; [PS12]). Hierzu gehören bspw. die Entwicklung von schadstoffärmeren Motoren (Euro 5/Euro 6), der Einsatz alternativer Antriebe, die Reduktion des Rollwiderstandes, die Optimierung der einzelnen Transporttouren und -routen sowie die Bündelungen verschiedener Transportnetze bzw. -stufen. Inwieweit sich die jeweilige Optimierungsmaßnahme auf die Effizienzsteigerung ausgewirkt hat, lässt sich an dieser Stelle nicht quantifizieren. Es lässt sich jedoch aufzeigen, dass in den vergangenen Jahren (2005 bis 2015) eine Reduktion des durchschnittlichen Kraftstoffverbrauchs um 9,8 % erzielt werden konnte, wodurch die eingesetzten Lastkraftfahrzeuge bis zu 2,8 Mio. t weniger CO₂ ausgestoßen haben ([Des19], S. 7). Diese Reduzierungen stellen zwar eine positive Entwicklung des Straßengüterverkehrs dar – allerdings wird der Transportbedarf gemäß den prognostizierten Wachstumszahlen kontinuierlich ansteigen, wodurch wiederum die Umweltbelastungen durch den Straßengüterverkehr weiterhin zunehmen werden (vgl. Tabelle 2.1).

Die erfassten Daten der Hauptemittenten in Deutschland zeigen, dass der Gesamtausstoß von Treibhausgasen in Deutschland in nahezu allen Bereichen erheblich gesenkt werden konnte (s. Abbildung 2.2). Lediglich beim Straßenverkehr sind – in Bezug auf das Basisjahr des Kyoto-Protokolls – keine Veränderungen zu verzeichnen (s. Referenzlinie bei 100 %). Der CO₂-Ausstoß im Straßenverkehr konnte zwar seit der Ratifizierung des Kyoto-Protokolls im Jahr 2005 reduziert werden, sodass er zwischenzeitlich unterhalb des ur-

⁴ Um eine Vergleichbarkeit der im Kyoto-Protokoll berücksichtigten Treibhausgase zu gewähren, wurden u. a. die Potenziale der Gase in Form von CO₂-Äquivalenten festgelegt [Sar99]. Die Angaben in dieser Arbeit beziehen sich jedoch auf die absoluten CO₂-Emissionen im Straßengüterverkehr.

sprünglichen Basisniveaus lag. Durch das stetige Verkehrswachstum ist der Ausstoß allerdings wieder auf das Ausgangsniveau von 1990 angestiegen, wodurch nahezu keine Verbesserungen mehr zu verzeichnen sind (s. Abbildung 2.2, Straßenverkehr).

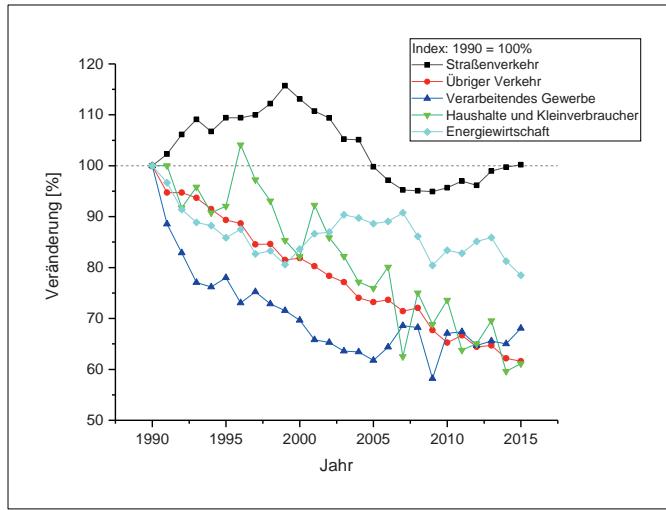


Abbildung 2.2: Entwicklung des CO₂-Ausstoßes bei den Hauptverursachern in Deutschland (Angaben nach [UBA19])

Mitverantwortlich für diesen Anstieg ist neben dem Personenverkehr insbesondere auch der Straßengüterverkehr. Seit 2005 haben sich allein im Straßengüterverkehr die CO₂-Emissionen um 10 % auf über 52 Mio. t erhöht, wodurch der Straßengüterverkehr einen Anteil von etwa 30 % an den Gesamtemissionen des Straßenverkehrs trägt ([Des19], S. 7).

Um die CO₂-Emissionen im Straßengüterverkehr dennoch zu reduzieren und eine nachhaltige Entwicklung zu fördern, sind weitere Maßnahmen erforderlich, die insbesondere die konsequente Umsetzung zielführender Verbesserungspotenziale beinhalten. Ein Ansatz zur Optimierung dieser diffizilen Herausforderung ergibt sich durch die nähere Betrachtung und Bewertung der getätigten Transportfahrten. Von besonderem Interesse ist dabei die Relation zwischen tatsächlicher Kapazitätsnachfrage und dem möglichen Kapazitätsangebot. Das Verhältnis dieser beiden Parameter spiegelt die Auslastung der getätigten Transporte wider. Im vorliegenden Fall handelt es sich um den gewichtsabhängigen Auslastungsgrad hinsichtlich der Transportleistung (tkm). Die Entwicklung der hierzu erfassten statistischen Amtsdaten zeigt, dass sich der Auslastungsgrad – im Vergleich zu den anderen transportrelevanten Indikatoren – negativ entwickelt hat (s. Abbildung 2.3).

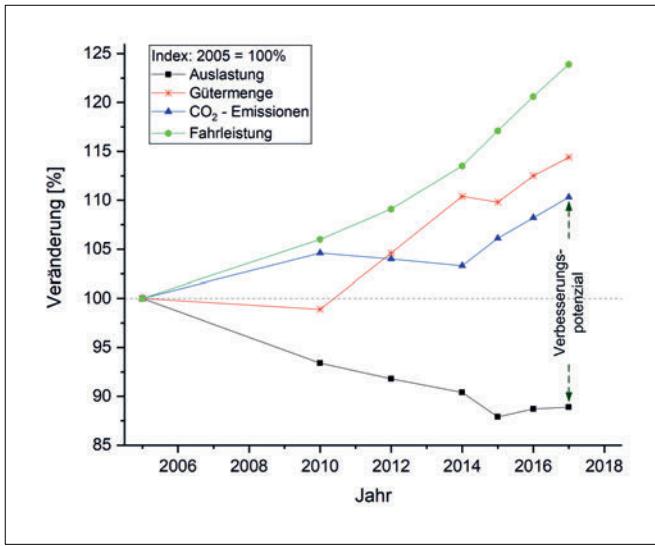


Abbildung 2.3: Entwicklung der transportrelevanten Parameter im Zeitraum von 2005 bis 2017 (Angaben nach ([Des19]; [KBA19]))

Im Zeitraum von 2005 bis 2015 war eine Verschlechterung des Auslastungsgrades um 9 % zu verzeichnen. In Anbetracht des zeitgleich angestiegenen Fahrzeugbestandes sowie der erhöhten Fahrleistung und Transportmenge kann dadurch letztendlich von einer Angebotskapazität ausgegangen werden, die über der tatsächlichen Transportleistungsnachfrage liegt. Die daraus resultierende Überkapazität führt folglich zu einem schlechteren Auslastungsgrad der eingesetzten Transportmittel. Dies hat wiederum zur Folge, dass die erforderliche Fahrleistung, die zur Erbringung der vorhandenen Transportleistung notwendig ist, ebenfalls angestiegen ist – ein Umstand, den es eigentlich zu vermeiden gilt. Im Umkehrschluss bedeutet dies wiederum, dass dieselbe Transportleistung mit einer deutlich niedrigeren Fahrleistung erbracht werden könnte, wenn die Auslastung entsprechend erhöht werden würde ([Sch04], S. 147).

Diese Zusammenhänge zeigen auf, dass der Auslastungsgrad ein wesentlicher Faktor für die Transporteffizienz ist. Die Entwicklungen der letzten Jahre verdeutlichen allerdings auch, dass dieses Leistungspotenzial zunehmend vernachlässigt wurde. Es ist primär festzustellen, dass bei den durchgeföhrten Transporten ein Großteil der vorhandenen Kapazitäten ungenutzt bleibt. In Kombination mit der Entwicklung der anderen transportrelevanten Parameter (s. Kapitel 2.1) ergibt sich in Summe eine deutliche Transportverschwendug, der es bspw. durch eine bessere Laderaumauslastung in Kombination mit einer entsprechenden Monitoringfunktion entgegenzuwirken gilt.

Die Erhöhung der bisherigen Transportauslastung ist aus mehreren Gründen erstrebenswert. Durch die Anpassung der Angebotskapazität an die vorhandene Transportleistungsnachfrage lassen sich nicht nur die Fahrleistungen der einzelnen Lkw reduzieren, sondern insbesondere auch der Kraftstoffverbrauch sowie der daran gekoppelte CO₂-Ausstoß minimieren. Die in Abbildung 2.4 aufgeführten Kennlinien zeigen, dass mit zunehmender Fahrzeug-/Laderaumgröße und höherem Auslastungsgrad der CO₂-Ausstoß gezielt reduziert werden kann.

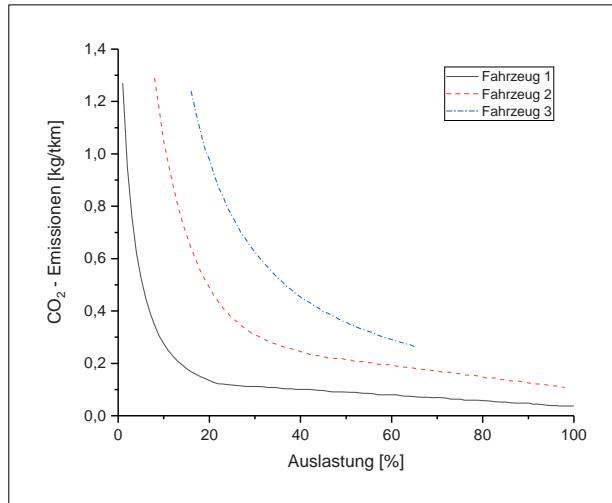


Abbildung 2.4: Relation von CO₂-Emissionen und Auslastungsgrad (Angaben nach ([LBB04], S. 36))

Zwar ist bei einer besseren Auslastung auch zwangsweise von einem höheren Kraftstoffverbrauch auszugehen; allerdings nimmt durch die sinkende Anzahl der grundsätzlich erforderlichen Transporte auch die insgesamt zurückzulegende Transportstrecke ab. Dadurch wird wiederum eine anteilige Entkopplung von Verkehrs- und Fahrleistung erzielt, sodass die erbrachte Transportleistung (tkm) schneller gesteigert werden kann als die umweltbelastende Fahrleistung des Transportmittels ([DS08], S. 204). Durch die Verbesserung der Auslastung lässt sich somit nicht nur die eigentliche Transporteffizienz steigern, sondern darüber hinaus werden mittels der reduzierten Transportfahrten auch die Transportkosten gesenkt, dem Straßenverschleiß und der Infrastrukturbearbeitung entgegengewirkt sowie eine verbesserte Verkehrssicherheit erzielt. Der Auslastungsgrad der Transportmittel ist somit als ein zentraler Stellhebel anzusehen, den es unter den Aspekten der ökologischen und ökonomischen Transportoptimierung zu verbessern gilt ([McK12]; [San17b]).

In Bezug auf die erforderliche Auslastungserfassung bestehen im Straßengüterverkehr jedoch erhebliche Diskrepanzen [McK10]. Wie bereits zuvor erwähnt, wird der transportspe-

zifische Auslastungsgrad als das Verhältnis einer Eingangs- zu einer Ausgangsgröße angesehen ([Nag11], S. 58; [MG07]). Auf der Laderraumebene existieren in diesem Kontext vier Dimensionsgrößen, die jeweils zur Bewertung der Ladungsfahrten herangezogen werden. Neben der bereits erwähnten und vorwiegend genutzten transportleistungsbezogenen Auslastung (tkm) gehören ferner die gewichtsbezogene (t), die flächenbezogene (m^2) sowie die volumenbezogene (m^3) Auslastung dazu. Die Betrachtung der statistischen Angaben verdeutlicht bereits, dass zur Transportbewertung vorwiegend nur eine einheitliche Bezugssgröße verwendet wird (tkm). In der Praxis führt diese isolierte Größenbetrachtung allerdings oftmals zu unzutreffenden Annahmen, was wiederum zu Fehlinterpretationen bei der tatsächlichen Auslastung führt (s. Kapitel 3.1).

Als Praxisbeispiel sei ein mit Gütern beladener Laderraum aufgeführt, der gemäß der Transportdokumentation eine gewichtsmäßige Auslastung von 60 % aufweist. Gemäß dieser Angabe wäre davon auszugehen, dass hinsichtlich der maximalen Beladung noch eine Restkapazität von 40 % zur Verfügung steht. Da der Laderraum in diesem Fallbeispiel mit hochwertigen Gütern beladen worden ist, die eine geringe Ladegutdichte aufweisen, so ist das Laderraumvolumen jedoch bereits zu 80 % ausgeschöpft. Durch die Ausschöpfung des vorhandenen Volumens können für die restlichen 20 % des vorhandenen Laderraumvolumens folglich nur noch 15 % des Ladungsgewichts zugeladen werden. In diesem Fall ist somit nicht das Gewicht, sondern das genutzte Volumen als restriktiver Faktor anzusehen, wodurch die Gewichtsbegrenzung gar nicht voll ausgeschöpft werden kann.⁵

Anhand der aufgeführten Verladesituation lässt sich die vorhandene Kernproblematik bei der Erfassung und der Bewertung des Auslastungsgrades sehr gut veranschaulichen. Sie zeigt, dass die isolierte Betrachtung einer einzelnen Auslastungsgröße stets das Potenzial von Fehlinterpretationen hinsichtlich des tatsächlichen Laderraumzustands birgt. Die daraus abgeleiteten Kennzahlen besitzen somit nur eine begrenzte Aussagekraft hinsichtlich der vorhandenen Laderraumkapazität, wodurch sich deren tatsächliche Nutzung wiederum nur bedingt verbessern lässt. Ein deutlich höherer Informationswert ergibt sich, wenn zur Einschätzung des tatsächlichen Laderraumbeladungszustands mehrere Dimensionsgrößen verknüpft werden. In einzelnen Studien konnte hierzu aufgezeigt werden, dass sich bspw. bei der kombinierten Nutzung von Ladungsgewicht, -höhe oder -volumen ein deutlich besseres Gesamtbild der Ladesituation generieren lässt ([McK03]; [LBK04]; [PB12]). Die daraus resultierenden Angaben sind folglich präziser, wodurch letztendlich auch die Umsetzung vielversprechender Verbesserungsmaßnahmen deutlich vereinfacht wird. Eine weitere Erkenntnis, die aus diesen Studien sowie aktuellen Auslastungsuntersuchungen hervorgeht, ist, dass das Ladevolumen immer mehr eine restriktive Größe darstellt (Stichwort: Gü-

⁵ Eine weitere thematische Vertiefung hinsichtlich des Auslastungsgrades findet in Kapitel 3 statt.

terstruktureffekt⁶) und die nach wie vor fehlende Erfassung konsistenter Ladevolumenwerte als eine inakzeptable Datenlücke innerhalb des Straßengüterverkehrs angesehen wird ([Kil10], S. 219; [LBK04], S. 42; [Lum04], S. 15; [McK15], S. 244). Die Umsetzung einer adäquaten Methodik zur Erfassung der entsprechenden Laderaumdaten erhält somit eine zunehmende Bedeutung innerhalb der Transportlogistik.

2.3 Bedeutung und Potenziale der digitalen Transformation

Anhand der Erläuterungen aus den vorherigen Abschnitten lässt sich bereits erkennen, dass die Komplexität der Transportabläufe stetig zugenommen hat. Zur Bewältigung und Steuerung der Transportprozesse hat folglich die Informationsverarbeitung innerhalb der Logistik zunehmend an Bedeutung gewonnen. Damit geht auch ein kontinuierlicher Ausbau der erforderlichen Informationstechnologien innerhalb der Transportbranche einher und dies mit dem Ziel, effizientere Maßnahmen zu implementieren, die die Arbeitsabläufe noch effektiver und transparenter gestalten ([Bog08], S. 55). In der Literatur wird dieser Prozess als sogenannte „digitale Transformation“ bezeichnet [BCD05].

Prägend für den IT-Einzug im Straßengüterverkehr war insbesondere der dispositionsbedingte Datenaustausch mittels sogenannter EDI-Systeme (Electronic Data Interchange) [PRC97]. Deren grundlegende Funktionsumfänge wurden durch die Integration von Telematiksystemen in den Transportmitteln deutlich erweitert. Der Begriff Telematik ist als ein zusammengesetztes Kunstwort aus Telekommunikation und Informatik anzusehen, das primär im deutschsprachigen Raum genutzt wird, wohingegen sich im englischen Sprachraum der Begriff Intelligent Transportation System (ITS) etabliert hat ([Bäu18], S. 19).⁷ Den Kern der eingesetzten Telematiksysteme bilden die in den Transportmitteln integrierten On-Board-Units (OBU). Sie ermöglichen es, die von den verschiedenen Sensoren erfassten Quelldaten zu bündeln, um diese anschließend mittels der vorhandenen Informations- und Kommunikationstechnologie zu versenden ([BO11], S. 339; [Sus05], S. 173). Die OBU bildet somit die Basiseinheit, um bspw. ein aktives Transportmonitoring betreiben zu können ([LBK04], S. 82). Inzwischen haben sich die telematischen Systeme so weit etabliert, dass sich je nach technischer Systemspezifikation verschiedene Nutzeneffekte für die unterschiedlichsten Interessenfelder generieren lassen ([Bäu18], S. 20). Anhand von Echtzeitinformationen kann bspw. in Abhängigkeit von der jeweils aktuellen Verkehrslage die bestmögliche Transportroute bestimmt werden, um so gleichzeitig den Kraftstoffverbrauch zu reduzieren sowie den Verwaltungsaufwand bei der Auftragsbearbeitung zu ver-

⁶ Der Güterstruktureffekt umschreibt den Anstieg von hochwertigen Konsum- und Produktionsgütern in den modernen Industrienationen, wohingegen der Anteil von klassischen Massengütern stagniert oder sinkt ([A-be05], S. 4). Dies wirkt sich folglich auch auf die Dichte der Ladegüter aus (s. Kapitel 3.2).

⁷ Im Rahmen dieser Arbeit werden beide Begriffe synonym verwendet.

einfachen. Zur Umsetzung der verschiedenen telematischen Anwendungsfunktionen sind unterschiedliche Systeme erforderlich, die sich in verschiedene Anwendungsbereiche unterscheiden lassen. Hierzu gehören in erster Linie die vom Gesetz vorgeschriebenen klassischen Systeme wie z. B. Tachografen und Mautsysteme. Hinzu kommen die von den Fahrzeugherstellern angebotenen Flottenlösungen bezüglich der Fahrzeugdiagnose und -wartung. Anhand der ausgelesenen Daten lassen sich bspw. stichhaltige Fahranalysen hinsichtlich des Fahrverhaltens, der gefahrenen Kilometer, des Kraftstoffverbrauchs sowie der Fahr- und Pausenzeiten durchführen. [Mül11] Die automatische Übertragung, Auswertung und Archivierung der erfassten Daten bilden somit einen wesentlichen Grundstein innerhalb des Straßengüterverkehrs, um insbesondere den administrativen und informativen Aufwand zu verringern sowie die Prozessabläufe zu beschleunigen.

Neben den klassischen Telematikfunktionalitäten werden die digitalen Entwicklungen im Bereich der Nutzfahrzeugindustrie zunehmend durch den Einsatz von Fahrerassistenzsystemen erweitert. Je nach Wirkweise wird dabei zwischen Assistenzsystemen mit informationsgebender, kontinuierlich wirkender und systemeingreifender Funktion unterschieden ([GSS15], S. 29). Bei den informationsgebenden Assistenzfunktionen werden die Fahrer primär durch Warnhinweise unterstützt, bspw. in Form einer Verkehrszeichenanzeige oder Müdigkeitsdetektion. Sie wirken somit nur indirekt über den Fahrer auf die Fahrzeugführung ein. Im Gegensatz dazu beeinflussen der Spurhalteassistent oder die adaptive Geschwindigkeitsregelung unmittelbar die Fahrzeugsteuerung über einen längeren Zeitraum. Als weitere fortgeschrittene Assistenzstufe lassen sich die eingreifenden Notfallfunktionen zusammenfassen. Deren Wirkung obliegt in Notsituationen nicht der menschlichen Kontrolle. Insbesondere, wenn vom Fahrer keine rechtzeitige Steuerreaktion mehr zu erwarten ist, kommen an dieser Stelle aktive Ausweich- oder Notbremssysteme zum Tragen. ([GSS15], S. 29) Die beschriebenen Assistenzfunktionen zeigen nicht nur eine zunehmende Technisierung des Lkws auf, sondern insbesondere auch die nächste Entwicklungsstufe in Bezug auf den (teil-)automatisierten Straßengüterverkehr. Durch die vollständige sensorische Erfassung des Fahrzeugs und der Fahrumgebung wird das Ziel verfolgt, sowohl die Fahrer als auch die gesamte Logistikbranche auf die bevorstehenden autonomen Transportmittel zu sensibilisieren. Als Beispiel ist an dieser Stelle die derzeitige Erprobung des Platooning zu erwähnen [Bal16]. Hierbei werden einzelne Lastkraftwagen mittels eines im Hintergrund agierenden digitalen Steuerungssystems zu einem autonom fahrenden Fahrzeugverbund zusammengeschlossen. Die wesentlichen Ziele dieses Fahrsystems sind es, die erforderliche Verkehrsfläche zu verringern, den Treibstoffverbrauch eines einzelnen Fahrzeugs durch die aerodynamischen Vorteile des Kolonenzugs zu senken sowie die Verkehrssicherheit durch die teilautonome Steuerung zu erhöhen. ([Kel16]; [JV17])

Die beschriebenen Telematik- und Assistenzsysteme zeigen die zunehmende Digitalisierung und Automatisierung innerhalb des Straßengüterverkehrs auf. Dabei konzentriert sich

die digitale Technisierung primär auf die motorisierte Transporteinheit, in die inzwischen Hunderte verschiedenartiger Sensortypen für die mobile Datenerfassung und -verarbeitung eingebaut sind ([JS18]; [WHL^{*}15]). Im Vergleich hierzu erweist sich die Datenerfassung auf der Laderraumebene als äußerst lückenhaft. Das daraus resultierende Datenungleichgewicht führt wiederum zu Defiziten bei der Ausschöpfung der vorhandenen Leistungspotenziale und Transportkapazitäten. Zwar existieren verschiedene Telematiklösungen für den Laderraum; allerdings liegt hierbei der Schwerpunkt – im Vergleich zu den inzwischen hoch entwickelten und rollenden Lkw-Datenzentren – vorwiegend auf rudimentären Sensorfunktionen. Hierzu gehören vorwiegend Lösungen, die bspw. den Zustand der Laderraumtemperatur und die Laderraumtür (offen/geschlossen) überwachen oder den Koppelzustand und den Reifendruck des Sattelanhängers beziehungsweise dessen Wartungsintervalle überprüfen [Sch15]. Des Weiteren existieren Sensorlösungen zur Gewichtsüberwachung (Achslast, Nutzlast), zur Batterieüberprüfung sowie zur Aufzeichnung der Anhängerlaufleistung ([Ver19] S. 22). Eine vollständige sensorische Erfassung des Laderraums zur Auslastungserfassung, wie sie im Rahmen dieser Arbeit angestrebt wird, ist in der Praxis allerdings noch nicht vorzufinden. Der erforderliche Handlungsbedarf, um die vorhandene Datenlücke im Laderraum zu schließen, wurde jedoch inzwischen erkannt. Aus diesem Grund existieren vermehrt prototypische Lösungsansätze, die sich bspw. mit der Identifikation der freien Ladefläche befassen ([Ver19], S. 19; [BFC18]). Eine ganzheitliche Erfassung des Laderraums zur konsistenten Bestimmung und Übermittlung der tatsächlich genutzten Laderraumkapazitäten lässt sich durch den derzeitigen Ansatz jedoch nicht umsetzen.⁸ Die wissenschaftlich-technische Erarbeitung eines Sensorsystems, das zur Erfassung, Auswertung und Übertragung der volumenbezogenen Laderraumdaten herangezogen werden kann, stellt somit einen konkreten Forschungsbedarf dar.

2.4 Eingrenzung des Untersuchungsrahmens

Anhand der bisher aufgeführten Inhalte wurden sowohl die Herausforderungen als auch die Anforderungen an einen effizienteren Straßengütertransport aufgezeigt. Ferner wurde hervorgehoben, dass unter der präziseren Einbeziehung des Auslastungsgrades noch ein erhebliches Verbesserungspotenzial bei den Transporten besteht. Da die bisherige Betrachtungsweise des Straßengüterverkehrs jedoch sehr allgemein aufgeführt wurde, wird zur weiteren Eingrenzung und Vertiefung dieser Arbeit eine systematische Segmentierung des Untersuchungsrahmens vorgenommen – insbesondere hinsichtlich der relevanten Ladungsformen.

Für diese gezielte Themeneingrenzung wird nochmals die bereits erwähnte Transportleistung des Straßengüterverkehrs näher betrachtet. Neben der erbrachten Leistung stehen ins-

⁸ Ein vertiefender Einblick in die aktuellen Lösungsansätze wird in Kapitel 3.3.1 gegeben.

besondere die Güterarten, welche primär per Straße transportiert werden, im Interessensfokus. In Bezug auf die zu ermittelnde Laderaumauslastung betrifft dies die detaillierte Betrachtung der möglichen Ladungsformen. In den statistischen Amtserhebungen werden hierfür Daten von unverpackten Massengütern (trocken/flüssig), Behältern oder Wechselaufbauten (groß/klein), palettierten Gütern, gebündelten Gütern sowie anderen Gütern erfasst [Eur05]. Diese Systematik wurde 2005 von der Europäischen Kommission vorgegeben, um primär eine bessere Vergleichbarkeit der Güterverkehrsstatistik aus den verschiedenen europäischen Ländern zu erhalten sowie eine grenzüberschreitende Datenkompatibilität gewährleisten zu können. Anhand dieser Ausgangsbasis wurde im Rahmen einer vertieften Recherche die jährliche Transportleistung der jeweiligen Ladungsform näher analysiert. Der Vergleich der ausgewerteten Daten zeigt, dass durch den Transport von palettierten Gütern die höchste Transportleistung erbracht wird. Diese Dominanz erstreckt sich über die gesamte Aufzeichnungsperiode (Auszüge s. Abbildung 2.5).

Neben der tatsächlichen Transportleistung sind in den statistischen Daten auch Angaben zur Auslastung der jeweiligen Ladungsformen hinterlegt. Eine Betrachtung der vorhandenen Daten zeigt, dass die Transporte mit Wechselaufbauten/Behältern verhältnismäßig zwar die schlechtesten Auslastungen aufweisen (s. Linien im Diagramm), allerdings in Relation zur Transportleistung einen durchaus geringen Anteil bei der Gesamtleistung einnehmen. Eine deutlich größere Auswirkung hat der schlechte Auslastungsgrad der palettierten Güter. Anhand der aufgetragenen Daten wird deutlich, dass beim Transport von palettierten Gütern das Verhältnis von tatsächlicher (s. Säulen im Diagramm) zu möglicher (s. Säulen + Linien im Diagramm) Transportleistung deutlich ausgeprägter ausfällt. Die Grafik zeigt zudem, dass beim Transport der palettierten Güter die Hälfte des vorhandenen Auslastungspotenzials ungenutzt bleibt (ca. 51 %). Daraus lässt sich nicht nur auf einen zweifelsfreien Handlungsbedarf rückschließen, sondern die Statistiken belegen zudem auch ein enormes Verbesserungspotenzial. Das langfristige Ziel muss sein, das vorhandene Laderaumpotenzial besser auszuschöpfen, um zukünftig pro Transportmittel/Laderraum eine höhere Transportmenge befördern zu können. In Bezug auf die zu betrachtende Ladungsform stellen somit palettierte Güter – aufgrund ihrer hohen Systemrelevanz – den Kernbestandteil für die weitere Themenausarbeitung dar.

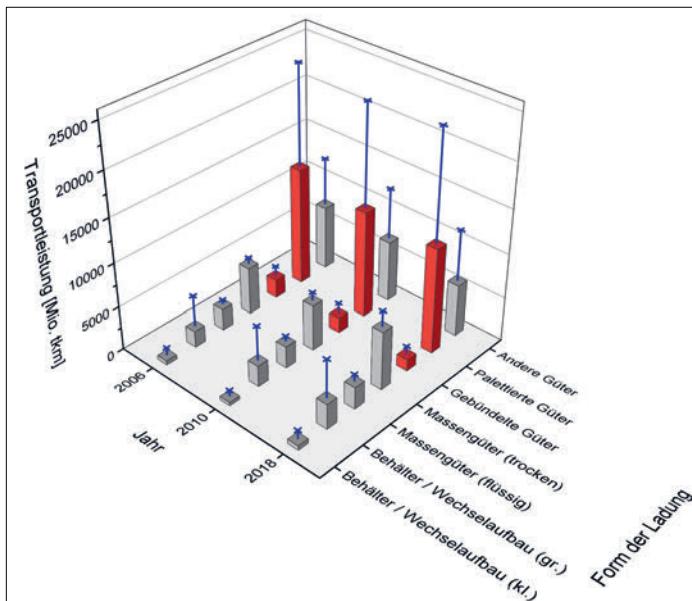


Abbildung 2.5: Vergleich der tatsächlichen und möglichen Transportleistung nach der Ladungsform (Angaben nach ([KBA06]; [KBA11]; [KBA19]))

Neben den palettierten Gütern existieren auch Ladungsformen, die ohne Ladungsträger in gebündelter Form transportiert werden. In der Regel handelt es sich hierbei um Massengut (bspw. Granulat), welches für den Transport in ein entsprechendes Schüttgutgebinde (Säcke, FIBC, Fässer etc.) umgefüllt wird. Diese gebündelten Ladegüter weisen hinsichtlich Form, Größe und Masse eine starke Ähnlichkeit mit den palettierten Gütern auf, wodurch diese in den weiteren Arbeitsverlauf miteinbezogen werden. Zur vereinfachten Handhabung der jeweiligen Termini werden die ausgewählten Ladungsformen (gebündelt/palettiert) im Folgenden auch als Ladeobjekte verallgemeinert.⁹

Tabelle 2.2: Eingrenzung der Ladungsform

Ladungsform	Palettierter Ware	Gebündelte Ware

⁹ Die Begriffsvereinfachung „Ladeobjekt“ oder nur „Objekt“ kommt insbesondere bei der späteren Auslegung und Analyse der Erfassungsmethodik zum Tragen und wird im Folgenden auch synonym für die Begriffe „Ladegut“ und „Ladeeinheit“ verwendet.

Durch die getroffene Auswahl bei der Ladungsform lässt sich folglich auch eine Eingrenzung hinsichtlich der relevanten Transportmittel vornehmen. Für den adäquaten Transport der Ladeobjekte stehen lediglich Transportmittel (Lkw) zur Verfügung, die über einen entsprechenden Planen- oder Kastenaufbau verfügen (s. Tabelle 2.3). Diese konventionelle Fahrzeugkategorie weist nicht nur den höchsten Fahrzeugbestand auf, sondern bietet zudem auch das Potenzial, mit einer besseren Auslastung der Fahrzeuge die Gesamtanzahl der Transporte zu reduzieren, wodurch im Idealfall eine Senkung der Transportleistung bei steigender Transportmenge erzielt werden könnte.

Tabelle 2.3: Eingrenzung der Aufbautypen

	Leichte Lkw	Mittelschwere Lkw	Schwere Lkw
Aufbautyp Planenaufbau			
Aufbautyp Kastenaufbau			

Die hier ausgewählten Systemkomponenten (Ladungsform, Aufbautyp) werden in den folgenden Kapiteln als Grundlage für die Auslegung der Laderaumerfassung genutzt. Diese Vorauswahl ermöglicht es, die erforderlichen Verarbeitungsschritte gezielt auf eine systemrelevante Anwendung abzustimmen. Weitere erforderliche Detaillierungen sowie Ergänzungen werden in den nächsten Kapiteln schrittweise vorgenommen und erläutert.

3 Theorie und Praxis zur Laderaumauslastung

Im vorherigen Kapitel wurden die logistisch-technischen Hintergründe zur Auslastung im Straßengüterverkehr in einer ersten Instanz umrissen. Um die Herausforderungen und Handlungsfelder für die Auslastungserfassung im Laderaum präzisieren zu können, wird in den folgenden Abschnitten der aktuelle Stand von Theorie und Praxis näher betrachtet. Hierzu gehören die Analyse der aktuellen Datenlage, die Bestimmung der allgemeinen Laderaumbeschaenheit sowie die Beschreibung des derzeitigen Entwicklungsstandes bei der sensorischen Laderaumerfassung. Anhand der inhaltlichen Aufbereitung der jeweiligen Themenbereiche wird es anschließend möglich, eine gezielte Aufgabenkonkretisierung vorzunehmen sowie die erforderlichen Arbeitsinhalte systemspezifisch einzugrenzen.

3.1 Analyse der Datenlage

Die bisher aufgeführten Informationen zum Straßengüterverkehr beruhen im Wesentlichen auf statistischen Amtserhebungen in Form von Makrodaten. Diese Datenform bildet die Planungsbasis für viele wirtschaftliche und verkehrspolitische Entscheidungen. Im Folgenden soll daher die Aussagekraft dieser Daten analysiert und bewertet werden. Hierzu wird zum einen auf das grundlegende Prinzip der Datenerhebung eingegangen und zum anderen ein Vergleich zu erhobenen Mikrodaten aus einzelnen Studienergebnissen durchgeführt, um potenzielle Defizite aufzuzeigen sowie den Bedarf an weiteren Zielgrößen und Kennzahlen hervorheben zu können.

3.1.1 Datengrundlage für die Auslastungsanalyse

An der Bereitstellung der umfangreichen statistischen Daten für den Transportsektor sind in der Regel mehrere Meldestellen beteiligt. Neben den Angaben vom Statistischen Bundesamt (Destatis) werden Melddaten auch durch das Kraftfahrt-Bundesamt (KBA), das Bundesamt für Güterverkehr (BAG) und die Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) erfasst und ergänzt [BMV19]. Die hier betrachteten Auslastungsdaten werden allein vom Kraftfahrt-Bundesamt erhoben und veröffentlicht. Zusätzlich erfolgt eine Datenweiterleitung an das Statistische Amt der Europäischen Gemeinschaft (Eurostat), um bspw. einen internationalen Datenvergleich hinsichtlich des Transportaufkommens zu ermöglichen. Bei der Aggregation und Repräsentation der relevanten Daten gilt es zu berücksichtigen, dass auf nationaler Ebene zum Teil unterschiedliche Restriktionen gelten – bspw. existieren in den einzelnen Ländern Unterschiede beim zulässigen Gesamtgewicht oder der Gesamtlänge der Fahrzeuge. Zur Vereinheitlichung der Datenerhebung wurde die Erfassungssystema-

tik von den Behörden schrittweise und zeitversetzt angepasst. Durch diese Neuordnung der EU-Vorgaben kommt es insbesondere bei älteren Daten zu Inkonsistenzen, wodurch wiederum die Analyse von längeren Perioden erschwert wird. Die folgenden Ausführungen konzentrieren sich daher im Wesentlichen auf die statistischen Angaben aus dem Zeitraum 2002–2018 (s. auch Angaben in den statistischen Veröffentlichungen) [KBA19].

Die Erhebung der betrachteten Verkehrsdaten repräsentiert eine amtliche Leistungsstatistik, die im Verkehrsstatistikgesetz (VerkStatG) und in der EU-Verordnung 70/2012 festgelegt ist ([BfJ16]; [Eur15]). Die Auswahl der in die Stichprobenerhebung¹⁰ einbezogenen Kraftfahrzeuge erfolgt durch das Zentrale Fahrzeugregister (ZFZR) des KBA. Für die angeschriebenen Fahrzeughalter besteht somit eine Auskunftspflicht. Zur Datenerhebung wird das Formblatt „Fragebogen zur Güterverkehrsstatistik“ herangezogen (in Papierform oder digital). Die relevanten Erhebungsmerkmale sind im besagten Verkehrsstatistikgesetz festgelegt und sind in Tabelle 3.1 aufgelistet.

Tabelle 3.1: Erhebungsmerkmale der Güterverkehrsstatistik (s. § 7 VerkStatG) [BfJ16]

1. Fahrzeurelevante Merkmale:
a.) Alter des Lastkraftfahrzeugs
b.) Zulässiges Gesamtgewicht und Nutzlast
c.) Motorleistung
d.) Radachsenkonfiguration
e.) Fahrzeug- und Aufbauart
f.) Bundesland der Zulassung
g.) Wirtschaftszweig des Fahrzeughalters
h.) Einsetzbarkeit im Kombinierten Verkehr
i.) Schadstoffemissionen nach Emissionsklassen
2. Fahrtenrelevante Merkmale:
a.) Verkehrsart
b.) Stand Kilometerzähler (Start/Ende)
c.) Art des beförderten Gutes
d.) Gefahrenklasse bei Gefahrgut
e.) Gewicht des Gutes
f.) Leerfahrten mit Orts-, Staats- und Distanzangaben
g.) Ladungsfahrten mit Orts-, Staats- und Distanzangaben
h.) Verlade- und Abladestellen mit Orts- und Staatsangaben
i.) Frachttarif
j.) Auslastungsgrad des Rauminhalts
k.) Im Transit durchquerte Länder

Anhand der erfassten Daten zu den jeweiligen Erhebungsmerkmalen wird vom KBA unter anderem eine aggregierte Datenbasis hinsichtlich der Anzahl der Last- und Leerfahrten, der Fahrzeug- und Aufbautypen, der gefahrenen Kilometer etc. vorgenommen. Aus diesen Angaben lässt sich wiederum eine Vielzahl von Indikatoren für den Straßengütertransport ableiten. Für den vorliegenden Arbeitskontext sind insbesondere die Angaben zum Auslastungsgrad von Interesse. Anhand der vom KBA erfassten Daten werden u. a. Auslastungs-

¹⁰ Die Stichprobe des KBA basiert auf einer Auswahl von höchstens fünf von tausend Fahrzeugen (5 Promille) ([KBA19], S. 90).

angaben in Verbindung mit dem Ladungsgewicht und dem Ladevolumen zur Verfügung gestellt. Um die Aussagekraft dieser Daten besser einordnen zu können, wird als Nächstes die Datenerhebung näher betrachtet.

Wie aus der Tabelle 3.1 hervorgeht, werden zur Bestimmung der gewichtsmäßigen Auslastung das tatsächliche Ladungsgewicht sowie die Nutzlast des Transportmittels abgefragt (s. Erhebungsmerkmale 2e und 1b). Mit dieser Datenabfrage sind somit absolute Zahlenwerte mit jeweils fester Einheit verbunden (Tonnen, Kilometer). Anhand dieser Datenbasis lassen sich anschließend Auslastungssindikatoren generieren sowie weitere statistische Auswertungen aufführen. Dabei gilt es zu berücksichtigen, dass die für die gewichtsabhängige Auslastungsbestimmung erforderlichen Werte stets als Absolutzahlen vorliegen, d. h., sie können entweder aus den Lieferscheinen, den Fahrzeugpapieren, dem digitalen Tachogramm oder den Wiegeeinheiten abgelesen oder vollständig aus dem Dispositionssystem gefiltert und übermittelt werden. Die Datenqualität der gewichtsabhängigen Auslastung kann daher als äußerst hoch und aussagekräftig eingestuft werden.

Diese Datenevidenz ist bei den Volumenangaben nicht geboten. Gemäß der vorgegebenen Vorgehensweise bei der Datenerhebung wird – im Gegensatz zur gewichtsabhängigen Auslastung – der Auslastungsgrad des Rauminhalts direkt abgefragt, d. h., es wird eine konkrete Prozentangabe abgefragt. Eine fundierte Übermittlung dieses Erhebungsmerkmals setzt voraus, dass im Idealfall alle erforderlichen Volumendaten vom Übermittler selbst zusammengetragen werden, um anschließend die Volumenauslastung berechnen und übermitteln zu können. Für die betroffenen Transporteure ist damit zusätzlicher Arbeitsaufwand verbunden, der bei dem ohnehin schon hohen Zeitdruck nicht immer gewährleistet werden kann. Dadurch ist es nicht verwunderlich, dass bei der näheren Betrachtung der rückgemeldeten Daten der Abfragepunkt „Auslastungsgrad des Rauminhalts“ je nach Stichprobe mit 55 % bis 70 % unbeantwortet bleibt, wodurch diese Angaben mit einer grundsätzlichen Unsicherheit behaftet sind ([Nag08], S. 161). Des Weiteren eröffnet dieser Abfragepunkt Raum für Fehlinterpretationen bei der Datenerfassung. Begleitstudien auf Mikroebene haben gezeigt, dass es durch unterschiedliche Praxisauffassungen oftmals zu deutlichen Fehlangaben bezüglich des Rauminhalts kommt ([Kie12], S. 20). Als konkretes Beispiel wird an dieser Stelle der klassische Transport von palettierten Gütern aufgeführt. In der Praxis wird ein Lkw, der seine Ladefläche vollständig mit Paletten beladen hat, in der Regel als komplett ausgelastet angesehen. Gemäß dieser Auffassung kommt es schließlich dazu, dass die maximale Ausnutzung der Ladefläche auch als hundertprozentige Auslastung des Laderaums angesehen wird. Diese Fehlinterpretation wird folglich auch so faktisch im Erhebungsbogen festgehalten und an die entsprechende Meldestelle weitergeleitet.

Diese Form der Datenerhebung zeigt somit erhebliche Schwächen auf. Bei den gemeldeten Volumenangaben ist daher von einer generellen Dateninkonsistenz auszugehen, die sich oftmals auch in der anzutreffenden Unschärfe zwischen den Makrodaten des KBA und den

Mikrodaten anderer empirischer Untersuchungen zeigt. Bei verschiedenen Verkehrsuntersuchungen, in denen studienbegleitend die Auslastungsdaten erfasst wurden, wird unter anderem ersichtlich, dass die statistischen Angaben stets eine höhere Auslastung aufzeigen, als die Auslastungsergebnisse der jeweiligen Studie¹¹ ([Arn10], S. 32; [KBA19], S. 8; [LBK04], S. 44; [McK10]; [SMB13], S. 118). Unter Berücksichtigung dessen, dass die statistischen Daten des KBA ohnehin auf Basis einer Stichprobe von 5 Promille hochgerechnet werden, sind die derzeit aufgeführten Volumenangaben – in Kombination mit dem beschriebenen Fehlerpotenzial bei der Datenermittlung – als äußerst unzureichend zu bewerten.¹² Da bei der gewählten Erhebungsform gänzlich auf absolute Volumenangaben verzichtet wird, ist auch kein Direktvergleich mit den erfassten Gewichtsangaben möglich – bspw. in Form von tkm vs. m³km. Dabei treffen die genannten Defizite nicht nur auf die amtliche Datenerhebung zu, sondern diese zwingend erforderliche Datenermittlung wird auch firmenintern nur sehr selten praktiziert. Die strikte Erfassung der volumenbezogenen Laderaumauslastung innerhalb des Transportsektors kann somit als quasi inexistent aufgefasst werden.

Die Diskrepanzen bei der Datenerhebung verdeutlichen nochmals den Handlungsbedarf. Dabei ist insbesondere auf das grundsätzliche Fehlen einer geeigneten Messmethodik zu verweisen, sodass eine konsistente Volumenerhebung und -auswertung erst gar nicht praktiziert werden kann. Die Generierung einer validen Datenbasis setzt die konkrete Messung der physischen Eigenschaften voraus. Für die absolute Gewichtsermittlung sind bspw. Wiegeeinheiten erforderlich, sodass für die Volumenbestimmung entsprechende Messsysteme und Auswertungsformen als eine wesentliche Grundvoraussetzung für die qualitative Datenerhebung angesehen werden müssen. Dies insbesondere unter dem Aspekt, dass diese Problemstellung schon lange existiert und adäquate Lösungsansätze nach wie vor fehlen beziehungsweise immer mehr gefordert werden ([BFC18], S. 29; [Kil10], S. 219; [LBK05], S. 115; [Nag08], S. 161).

3.1.2 Zielgrößen zur Kennzahlenbestimmung

Die inhaltliche Aufbereitung der Datenlage hat gezeigt, dass die Bestimmung der volumenabhängigen Laderaumauslastung die Erfassung der absoluten Volumina erfordert. Zwar wird die gewichtsbezogene Auslastung in Abhängigkeit von den gefahrenen Kilometern (tkm) als derzeit verbreitetste Basisgröße angesehen, allerdings nehmen in Bezug auf die tatsächliche Verladesituation die fehlenden Volumenangaben einen immer höher wer-

¹¹ Bei der jeweiligen Datenerhebung gilt es zudem zu berücksichtigen, dass die KBA-Daten von den Betroffenen selbst erfasst werden, wohingegen bei den durchgeföhrten Begleitstudien die erforderlichen Daten in der Regel von geschultem (neutralem) Fachpersonal ermittelt und eingetragen werden.

¹² Ergänzend zum Stichprobenumfang ist zu erwähnen, dass die Befragung nur auf ausgewählte Lastkraftfahrzeuge mit mehr als 3,5 t Nutzlast oder mehr als 6 t zulässiger Gesamtmasse zutrifft. Die inzwischen auf den Straßen dominierenden und nicht mautpflichtigen sog. „leichten Nutzfahrzeuge“ (Klasse N1 bis 3,5 t Nutzlast) bleiben bei dieser Erhebungsform unberücksichtigt.

denden Stellenwert in der Transportpraxis ein. Um die vorhandene Diskrepanz zu beheben, wird mittels der angestrebten Messmethodik eine weitgehend automatische Bestimmung der fehlenden Volumendaten angestrebt. Eine wesentliche Grundlage hierfür bilden die konkrete Spezifizierung der erforderlichen Zielgrößen sowie die damit verbundene Kennzahlenaufbereitung, auf die im Folgenden näher eingegangen wird.

In Bezug auf die erforderliche Volumenanalyse ist das Erfassungssystem so auszulegen, dass eine dreidimensionale Interpretation der jeweiligen Laderaumsituation vorgenommen werden kann. Dabei liegt das Primärziel bei der Bestimmung des tatsächlichen Ladungsvolumens als eine hinreichend genaue Absolutzahl.¹³ Für den weiteren Arbeitsverlauf werden daher Absolutzahlen als Einzelzahlen angesehen, die sich entweder direkt über das System ermitteln (Messung) oder mathematisch errechnen lassen (Bildung von Summen, Differenzen etc.) ([Mal79], S. 5). Die für die Laderaumanalyse zu berücksichtigenden Einzelzahlen enthalten somit eine absolute Größe mit fester Einheit – bspw. in Form des Ladevolumens [m^3], der Ladefläche [m^2] oder der Ladehöhe [m].

Anhand dieser Basisgrößen lassen sich durch die Kombination weiterer – zum Teil bereits vorhandener – Einzelzahlen Verhältniszahlen in Form von klassischen Kennzahlen aufstellen. In der Literatur wird dabei zwischen Index-, Gliederungs- und Beziehungszahlen unterschieden ([Sys90], S. 23). Für den vorliegenden Laderaumfall rücken insbesondere Gliederungs- und Beziehungszahlen in den Anwendungsfokus. Als Gliederungszahl wird unter anderem das Verhältnis einer Teilmenge aufgefasst, die sich auf eine Gesamtmenge bezieht – bspw. das Ladegutvolumen im Verhältnis zum gesamten Laderaumvolumen. Als Beziehungszahl werden hingegen Größen mit unterschiedlicher Dimension zueinander ins Verhältnis gesetzt – bspw. das Laderaumvolumen im Verhältnis zur maximalen Nutzlast. Anhand der ermittelten Volumenangaben lassen sich somit verschiedene Absolutangaben ermitteln und laderaumrelevante Kennzahlen generieren.¹⁴ Bezüglich der Arbeitszielstellung werden durch die sensorische Ermittlung der genannten Absolutgrößen folgende volumenbezogene Laderaumkennzahlen angestrebt:

- **Auslastungsgrad Laderaumvolumen:** Hierbei wird das von den Ladeeinheiten tatsächlich beanspruchte Laderaumvolumen (V_{LE}) ins Verhältnis zum gesamten Laderaumreferenzvolumen (V_{LR}) gesetzt.
- **Auslastungsgrad Ladefläche:** Hierbei wird die von den Ladeeinheiten tatsächlich beanspruchte Ladefläche (A_{LE}) ins Verhältnis zur gesamten Laderaumreferenzfläche (A_{LR}) gesetzt.

¹³ In Bezug auf die erste Systemerprobung wird bei den Maßangaben zur Volumenbestimmung ($L \times B \times H$) eine Messgenauigkeit bei den Ladeobjekten von ± 2 cm angestrebt.

¹⁴ Eine erweiterte Auswertung der verschiedenen Absolutzahlen und Kennzahlen findet später im Rahmen der Systemerprobung und Datenauswertung statt (s. Kapitel 7).

Die systematische Aufbereitung der Zielgröße zeigt, dass sich durch eine Absolutmessung des Laderaums die Datenqualität hinsichtlich der Volumenauslastung deutlich verbessern lässt. Zudem lassen sich anhand solch einer validen Datenbasis auch weitere Transportauswertungen vornehmen, sodass durchaus präzisere Bewertungen von den jeweils durchgeführten Fahrten ermöglicht werden können (s. Kapitel 7.2). Mit dem konsequenten Ausbau und der Bereitstellung dieser Daten lässt sich somit eine zielführende Kontrolle und Analyse der Laderaumbeladung vollziehen, um langfristig eine noch effizientere Planung und Steuerung des Straßengüterverkehrs zu ermöglichen – bspw. in Form eines echtzeitnahen Laderaummonitorings.

3.2 Beschreibung des Laderaumprofils

Für die Bestimmung der volumenbezogenen Zielgrößen nimmt der Laderaum eine zentrale Rolle ein. Er beschreibt im Wesentlichen die Schnittstelle zwischen den zu betrachtenden Ladeobjekten und dem anzubringenden Sensorsystem für die Datenerfassung. Anhand der vorgegebenen Begrenzungen durch die Vorder-, Rück- und Seitenwände gibt der Laderaum zudem eine feste Systemgrenze vor, innerhalb derer das Messsystem auszulegen ist. Für die adäquate Systemauslegung ist es daher von besonderem Interesse, alle innerhalb dieser Systemgrenze anzutreffenden Gestaltungsparameter aufzuführen, die entweder direkt für die Systemauslegung von Relevanz sind oder die indirekt Einfluss auf die Datenakquisition nehmen könnten. In Anbetracht der bisherigen Lösungsansätze (s. Kapitel 3.3.1) bleiben diese Analyseschwerpunkte weitgehend unberücksichtigt, insbesondere hinsichtlich der Beschaffenheit der Ladeobjekte und des Fahrzeugaufbaus sowie bezüglich der wechselnden Laderaumbedingungen während des Transports. Zur Einordnung und Eingrenzung der relevanten Merkmale werden in den nächsten Abschnitten die einzelnen Be trachtungsbereiche analytisch aufbereitet. In Bezug auf die Systemauslegung betrifft dies insbesondere die Spezifikation der relevanten Ladeobjekt- und Laderaumprofile, d. h. die Betrachtung der geometrischen, mechanischen und materiellen Eigenschaften.

3.2.1 Charakterisierung der Ladeobjekte

Für die korrekte sensorische Erfassung des Laderauminhalts ist es in einer ersten Instanz erforderlich, das Merkmalsprofil bezüglich der zu betrachtenden Ladeobjekte zu konkretisieren. Als Ausgangsbasis hierfür dient die getroffene Eingrenzung hinsichtlich der Ladungsformen (palettiert/gebündelt). Die nähere Betrachtung zeigt, dass hierbei eine Vielzahl an Kombinationsmöglichkeiten existiert. Die resultierende Materialvielfalt ergibt sich insbesondere durch die unterschiedliche Zusammensetzung bei den Packmitteln, Packstücken oder Ladungsträgern. Dies erschwert die Charakterisierung und Analyse der Ladeeinheiten erheblich, insbesondere unter Berücksichtigung aller einzelnen Verpackungs- und

Materialeigenschaften. Für eine repräsentative Charakterisierung der relevanten Ladeobjekte wurden im Rahmen dieser Arbeit daher 300 verschiedene Anlieferungen von unterschiedlichen palettierten/gebündelten Gütern nach dem Zufallsprinzip ausgewählt und systematisch evaluiert und zwar mit dem Fokus, die jeweiligen Objekteigenschaften äußerst realistisch und praxisnah abbilden zu können.

Im Rahmen der Analyse wurden zuerst die Ladeobjektmaterialien eingegrenzt. Die Be- trachtung der Ladeobjekte offenbarte eine überaus große Materialvielfalt. Zur Über- sichtserstellung wurde daher eine systematische Eingrenzung hinsichtlich der Grundmate- rialien vorgenommen. Zur ersten Einordnung dienten u. a. die vorgegebenen Materialkate- gorisierungen einzelner Normen aus dem Bereich der Verpackungslogistik (s. DIN 55405). Anhand dieser Vorgaben wurden die betrachteten Ladeobjektmaterialien den Grundmateri- alien Holz, Kunststoff, Metall und Papier zugeordnet. Diese gewählte Grundordnung er- möglicht es, im Rahmen der späteren Versuchsdurchführung weitere Materialspezifize- rungen vorzunehmen (Details s. Kapitel 5.3). ([DIN14]; [Kaß11], S. 19)

Zur weiteren Charakterisierung der Ladeobjekte erfolgte eine Eingrenzung hinsichtlich der geometrischen Objekteigenschaften. Für die Erfassung der Volumenauslastung sind die geometrischen Konturen der Ladeobjekte von besonderer Relevanz. Sie hängt primär von der Länge, Breite und Höhe des jeweiligen Ladeobjekts ab. Theoretisch könnten sich dadurch verschiedenste Konturformen ergeben. Die durchgeführte Ladeobjektanalyse zeigte allerdings, dass bei den palettierten Gütern durchweg von einer quaderförmigen Grund- form ausgegangen werden kann, d. h., freie oder unregelmäßige Objektkonturen werden im Rahmen dieser Arbeit ausgeschlossen.¹⁵ Mit in die Betrachtung werden zudem zylinder- förmige Ladeobjekte aufgenommen, die sich insbesondere bei Bildung von gebündelten Ladegütern ergeben (Fässer, Papierrollen etc.). Für die weitere Systemauslegung wird der Fokus somit auf quader- und zylindrförmige Ladeobjekte gelegt.

Im Kontext der Auslastungsbestimmung sind ferner auch das Gewicht und die Höhe der Ladeobjekte von Interesse. Basierend auf den erfassten Datenreihen wurde daher eine ver- tiefte Auswertung hinsichtlich der Ladeeinheitenabmessungen vollzogen. Dies bestätigte im Wesentlichen die Auswirkungen des bereits erwähnten Güterstruktureffekts. Dabei wei- sen die Ladegüter eine zunehmend geringere Dichte auf, d. h., das Gewicht eines durch- schnittlichen Ladeguts sinkt und die Ladeguthöhe (-volumen) nimmt zu (vgl. Abbildung 3.1).

¹⁵ Dies hängt u. a. mit den standardisierten Vorgaben hinsichtlich der Ladungsträgerform und des Laderaum- aufbaus zusammen (beides quaderförmig).

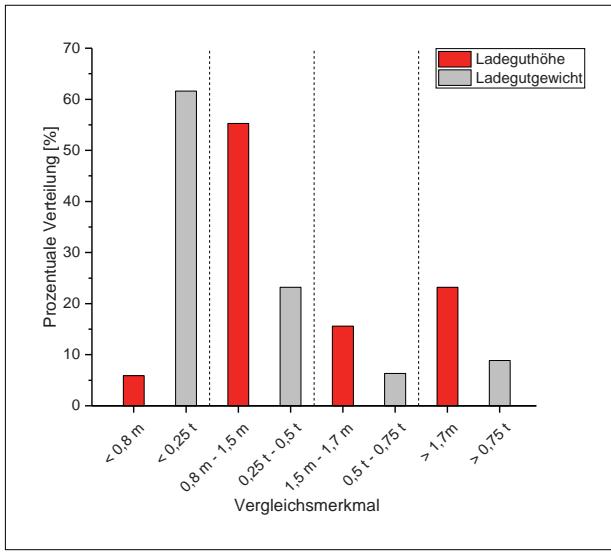


Abbildung 3.1: Vergleich der Ladeguthöhe und des Ladegutgewichts

Die Auswertung der erfassten Objektdaten ergab im Durchschnitt ein Ladegutgewicht von 0,29 t und eine Ladeguthöhe von 1,38 m, woraus eine Ladegutdichte von 0,22 t/m³ resultiert.

Das Volumen der Ladegüter wird im Wesentlichen durch die Ladegutfläche und -höhe bestimmt. Bei der Betrachtung der palettierten Ladegüter gilt es zu berücksichtigen, dass das Flächenmaß der verwendeten Paletten gemäß DIN 55510 auf die Abmessungen eines normierten Grundmoduls (400 mm x 600 mm) abgestimmt ist [DIN05]. Anhand dieser Basis lassen sich durch ein ganzzahliges Mehrfaches oder eine ganzzahlige Teilung des Grundmoduls die restlichen Palettenabmessungen modularisieren (bspw. 600 mm x 800 mm, 800 mm x 1200 mm oder 1000 mm x 1200 mm) ([JHP09], S. 324). Darüber hinaus sind die Ladeflächen der Transportmittel auf diese modularen Vorgaben ausgerichtet, sodass sich beim Transport von palettierten oder gebündelten Waren grundsätzlich eine bestmögliche Ausnutzung der vorhandenen Ladefläche erzielen lässt ([HSD18], S. 20).

In Bezug auf die Ladeguthöhe gibt es keine direkten Vorgaben, sondern es existieren vorwiegend Empfehlungen. Bei der Bildung und Verladung der Ladeeinheiten sollte jedoch stets die maximale Ausnutzung der Laderaumhöhe angestrebt werden ([HSD18], S. 20). Je nach Ladungsgewicht und Flächenmodulgröße können beim Transport einzelner (palettierter) Ladeobjekte nur bestimmte Höhen eingehalten werden. Für eine bessere Auslastung besteht zudem die Möglichkeit, einzelne Ladeeinheiten zu stapeln. Gemäß den EUL-

Höhenempfehlungen variieren die Angaben zwischen 1200 mm (EUL 1) und 2400 mm (EUL 2). Die Abkürzung EUL steht dabei für Efficient Unit Loads und verfolgt das Ziel, die Dimensionen der zu transportierenden Ladeeinheiten so auszustalten, dass der vorhandene Laderaum möglichst effizient genutzt werden kann.

Anhand des erarbeiteten Merkmalsprofils wird deutlich, dass die Ladeobjekthöhe ein wesentliches Erfassungsmerkmal darstellt, um die Volumenauslastung ermitteln zu können. Die Bestimmung eines entsprechenden Höhennutzungsprofils stellt somit ein wesentliches Zielkriterium dieser Arbeit dar. Anhand der daraus generierten Datenbasis lassen sich nicht nur die Missverhältnisse zwischen den theoretischen Idealvorstellungen und den realen Beladungszuständen verdeutlichen, sondern es kann dadurch zusätzlich das Potenzial für neue Gestaltungsformen bei der Ladeeinheitenbildung aufgezeigt werden (s. Kapitel 8.2).

3.2.2 Spezifizierung der Laderaumbeschaffenheit

Das steigende Transportaufkommen ist auch an den Anstieg von Neuzulassungen bei den Lastkraftwagen gekoppelt; dies zeigt sich insbesondere am Anteil der zugelassenen Fahrzeuge mit Planen- oder Kastenaufbau [KBA19]. Im Rahmen dieser Arbeit werden bei der Betrachtung der relevanten Transportfahrzeuge der Motorwagen und die Anhängerfahrzeuge gleichermaßen behandelt. Für die Bestimmung des Beschaffenheitsprofils wird somit auf die explizite Erwähnung der Anhängeraufbauten verzichtet.

Durch die Festlegung des Fahrzeuggestells – bspw. hinsichtlich des zulässigen Gesamtgewichts – werden sowohl die geometrischen Randbedingungen des Laderaums als auch die Möglichkeiten der Zuladung des Aufbaus festgelegt. Die Fahrzeugauswahl beeinflusst somit in hohem Maße das Potenzial für die effiziente Beförderung der Ladeobjekte. Insbesondere für die Bestimmung der Laderaumauslastung ist es in diesem Zusammenhang erforderlich, eine generelle Übersicht bezüglich der Laderaumtypen sowie der Beschaffenheit zu geben. [App13]

Anhand der gesetzlich vorgegebenen Fahrzeugsbreiten und -höhen ergeben sich bei den zu betrachtenden Planen- und Kastenaufbauten bereits eindeutige geometrische Begrenzungen (s. EU Richtlinie 96/53/EG). Anhand dieser Restriktionen weisen die Fahrzeuggestelle eine rechteckförmige Aufbauplätze auf, sodass stets von einem quaderförmigen Laderaum auszugehen ist. Die Größe bzw. das Volumen des Laderaums wird durch die vorgegebenen Längen-, Breiten- und Höhenmaße definiert, die wiederum von der eigentlichen Fahrzeuggröße abhängen. Eine exemplarische Übersicht der verschiedenen Fahrzeugklassen sowie die dazugehörigen Laderaumangaben sind in Tabelle 3.2 enthalten.¹⁶ Die Untertei-

¹⁶ Die jeweiligen Angaben können je nach Fahrzeugtyp und Aufbaustandard minimal variieren und repräsentieren somit weitgehend gebräuchliche Durchschnittswerte. Sonderfahrzeuge und Spezialaufbauten bleiben im Rahmen dieser Betrachtung unberücksichtigt.

lung Fahrzeugklassen erfolgt dabei gemäß der vorgegebenen Systematisierung des Kraftfahrt-Bundesamtes [KBA18].

Tabelle 3.2: Spezifikation der Fahrzeugklassen inkl. der zugehörigen Aufbautypen

Fahrzeugklasse/-typ	Nutzlast	Lade-fläche	Lade-volumen	Fläche/ Volumen	Nutzlast/ Volumen
N1 	3,5 t	1,1 t	8,5 m ²	17,9 m ³	0,48 m ² /m ³
N2 	7,5 t	2,5 t	15,1 m ²	33,2 m ³	0,45 m ² /m ³
N2 	12 t	5,5 t	17,6 m ²	41,8 m ³	0,42 m ² /m ³
N3 	25 t	12 t	17,9 m ²	46,4 m ³	0,38 m ² /m ³
N3 	40 t	24 t	35,7 m ²	92,8 m ³	0,38 m ² /m ³
N3 	40 t	24,5 t	33,7 m ²	87,7 m ³	0,38 m ² /m ³

Aus den aufgelisteten Laderaumdaten wird ersichtlich, dass für jeden Fahrzeugtyp und jede Fahrzeugklasse unterschiedliche Laderaumdimensionen sowie darauf abgestimmte Nutzlasten existieren. Anhand der Angaben lässt sich zudem für jede Laderaumgröße das Verhältnis von zulässiger Nutzlast zum vorhandenen Laderaumvolumen bestimmen. Hieraus ergibt sich – analog zu den vorherigen Ladegutdaten – die spezifische Dichte für die optimale Beladung des Laderaums. Ein Vergleich der Werte zeigt, dass die spezifische Laderaumdichte bei den kleineren Fahrzeugen stark abnimmt, d. h.: Die Ladung muss hierdurch für die optimale Laderaumausnutzung auch deutlich leichter sein. Ein Vergleich zwischen der Fahrzeugklasse N3 und N2 zeigt, dass die Ladungsdichte bis zu einem Faktor von 3,7 variieren kann. Des Weiteren lässt sich anhand dieser Angaben für jeden Laderaum eine gewichts- und volumenabhängige Auslastungskennlinie bestimmen [SH12]. Diese wurde im vorliegenden Fall exemplarisch für die Fahrzeugklasse N2/7,5 t erarbeitet (s. Abbildung 3.2). Ausgehend von der spezifischen Laderaumdichte ($0,075 \text{ t/m}^3$) lässt sich eine optimierte Laderaumauslastung realisieren. Es kann also durch Einhaltung dieser Werte eine hundertprozentige Gewichts- und Volumenauslastung erzielt werden. Aufgrund der inhomogenen Ladegutzusammensetzung ist dies in der Praxis allerdings selten der Fall, sodass die Ladungsdichte variiert bzw. nicht den Idealvorgaben entspricht. Bei einem Ausgangswert, der unter $0,075 \text{ t/m}^3$ liegt, lässt sich zwar noch eine hundertprozentige Volumenauslastung realisieren, allerdings muss zur Einhaltung des maximal zulässigen Grenzwertes das Gesamtgewicht geringer sein, wodurch sich bspw. bei einer Ladungsdichte von

$0,04 \text{ t/m}^3$ nur noch eine Gewichtsauslastung von ca. 53 % realisieren lässt (s. Beispiel in Abbildung 3.2).

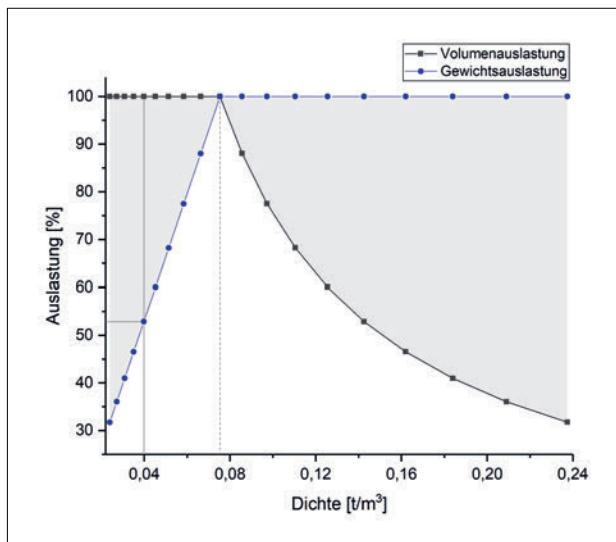


Abbildung 3.2: Auslastungskennlinien für den Laderaum vom Fahrzeugtyp N2/7,5 t

Analog verhält es sich bei steigender Ladungsdichte: Je größer die Ladungsdichte wird, umso geringer fällt die Volumenauslastung aus. Anhand dieser Kennlinie lässt sich aufzeigen, dass der Gewichtseinfluss bei Volumentransporten dominiert.¹⁷ Ausgehend vom idealen Beladungszustand fällt die Gewichtsauslastung stark ab (linear). Die Volumenauslastung nimmt hingegen schwächer ab (exponentiell), wodurch sich wiederum ein besseres Auslastungsverhältnis (Gewicht/Volumen) erzielen lässt.

Anhand des erarbeiteten Laderaumbeschaffenheitsprofils wird deutlich, dass die Abstimmung von Ladeobjekt- und Laderaumdichte entscheidenden Einfluss auf die optimale Auslastung des Laderaums einnimmt. Die gezielte Erfassung und Optimierung der damit verbundenen Angaben nimmt nicht nur einen hohen Stellenwert bei der Transportplanung ein, sondern ermöglicht es zudem, weitere Optimierungsmaßnahmen bei der Ausgestaltung der Aufbautypen und der Ladeobjekte zu erarbeiten. In Bezug auf die Auswertemethodik der Laderaumdaten wird daher neben dem bereits erwähnten Höhenprofil (s. Kapitel 3.2.1) ergänzend auch die Umsetzung einer laderaumbezogenen Flächen- und Volumenanalyse angestrebt.

¹⁷ Dies hängt jedoch vom jeweiligen Laderaumtyp ab (s. spezifische Laderaumdichte der anderen Fahrzeuge).

3.2.3 Eingrenzung des Belastungsprofils im Laderaum

Bei der bisherigen Betrachtung der relevanten Laderaum- und Transportszenarien wurde stets die Annahme getroffen, dass es sich um statische Momentaufnahmen handelt. Bei realen Transporten ist jedoch davon auszugehen, dass sich die physikalischen Rahmenbedingungen innerhalb des Laderraums mit der Zeit verändern. Für die angestrebte Integration des Sensorsystems ist es also zusätzlich erforderlich, die im Laderaum zu erwartenden Bedingungen hinsichtlich ihrer Bedeutung für die Datenerfassung/Systemauslegung zu bewerten. Hierfür wird erneut auf vorhandene Normvorgaben Bezug genommen (s. DIN 30786-1), in denen bspw. die während des Transports einwirkenden Belastungen systematisch kategorisiert werden [DIN15].

Als Transportbelastungen werden im Allgemeinen alle möglichen physikalischen, chemischen oder sonstigen Einflussquellen angesehen, die simultan und im Kollektiv während des Transports im Laderaum auftreten ([BH02], S. 50). Hinsichtlich des Verursachungsprinzips lassen sich die einzelnen Belastungen wie folgt unterscheiden ([BP97], S. 8; [Sch89], S. 32):

- mechanisch-statische Einwirkungen (Zug-, Druck-, Torsionskräfte)
- mechanisch-dynamische Einwirkungen (Stöße und Schwingungen in horizontaler sowie vertikaler Richtung)
- klimatische Einwirkungen (Temperatur, rel. Luftfeuchte, Sonnen-/UV-Strahlung)
- biotische Einwirkungen (Schimmel-, Bakterien-, Pilzbefall)
- sonstige Einwirkungen (Staub, Schmutz, Gase, Dämpfe)

Von den genannten Einflussgrößen gehören die mechanischen Schwingungen und Stöße sowie die Temperatureinwirkungen zu den am häufigsten und insbesondere auch zu den dominierenden Belastungsformen innerhalb des Laderraums ([GK07], S. 39). Für die weitere Konzeption und experimentelle Erprobung des Erfassungssystems bedeutet dies, dass Messuntersuchungen bezüglich dieser drei Einflussgrößen vollzogen werden müssen. Die jeweils relevanten Wertebereiche werden – analog zur Materialeingrenzung – in den jeweiligen Kapiteln für die Versuchsdurchführung vertieft (s. Kapitel 5.2 und Kapitel 5.5).

3.3 Entwicklungsstand und Technologieauswahl

Zur Bestimmung der angestrebten Zielgrößen sind ein Messverfahren und ein Auswertesystem erforderlich, welche die systematische Datenaufbereitung der gesamten Laderaumumgebung ermöglichen. In den nächsten Abschnitten werden daher bereits existierende Ansätze für die Laderaumerfassung vorgestellt und die jeweiligen Vor- und Nachteile auf-

gezeigt. Anhand der eingeordneten Zielstellungen erfolgt anschließend die wissenschaftlich-technische Betrachtung der potenziellen Messverfahren, um ein geeignetes 3D-Messprinzip für die weitere Systemauslegung definieren zu können.

3.3.1 Lösungsansätze zur Erfassung der Volumendaten

Die Studie „CO₂-Reduktion und Energieeffizienz im Straßengüterverkehr“ ist als eine erste Ausarbeitung anzusehen, in der u. a. Auslastungsdaten vom deutschen Straßengüterverkehr auszugsweise erfasst, analysiert und veröffentlicht wurden [LBK04]. Zwar lag der eigentliche Arbeitsfokus auf der Ermittlung der CO₂-Effizienz im Straßengüterverkehr; allerdings konnte anhand der empirischen Datenerhebung auch ein generelles Optimierungspotenzial bei der Auslastung der Transportfahrzeuge identifiziert werden. Anhand der erarbeiteten Projekterkenntnisse bildete die Studie insbesondere die Grundlage für eine Patentschrift, in der erstmalig das Grundprinzip für eine Auslastungserfassung des Laderaums beschrieben wurde. Die Patentschrift „Vorrichtung und Verfahren zur Erfassung der Ausnutzung eines bewegbaren Laderaums“ (Patent DE102005001480B3)¹⁸ bildete somit wiederum die Ausgangsbasis für zahlreiche weiterführende Lösungsansätze, die sich speziell mit der volumenbezogenen Auslastungserfassung auseinandersetzen (s. Abbildung 3.3 a). In dem genannten Patent wird eine Vielzahl sensorischer Einsatzmöglichkeiten skizziert. [Bau06] Daraus ergeben sich wiederum zahlreiche Kombinationsmöglichkeiten für den Sensoreinsatz. Allerdings wird in der Patentschrift weder auf ein konkretes Messverfahren eingegangen noch die Systemeignung für den Praxiseinsatz beurteilt. Die Patentschrift weist somit eine Sammlung von sehr weit gefassten Lösungsansätzen auf, die einen großen, allgemeingültigen Funktionsumfang einschließen. Sie liefert allerdings keine Inhalte, die konkrete technologische Funktionsprinzipien aufzeigen, um die erforderliche Datengenerierung und -verarbeitung zu bewerkstelligen.

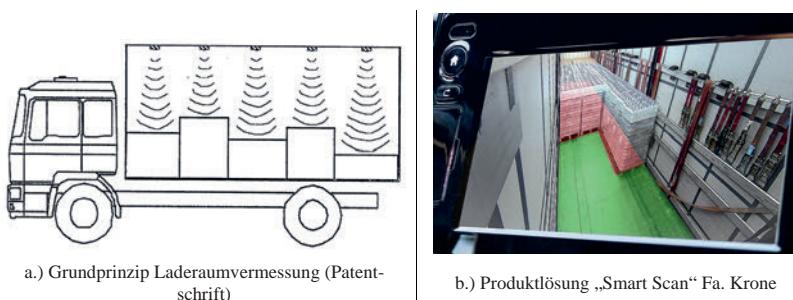


Abbildung 3.3: Lösungsansätze zur „Vermessung“ des Laderaums ([Bau06]; [Kro18])

¹⁸ Das Patent wurde am 26.10.2006 offengelegt, wobei die Schutzrechte inzwischen erloschen sind.

Die offenen Fragestellungen aus der Patentschrift sind somit als eine hilfreiche Ausgangsbasis anzusehen, um diesbezüglich weitere vertiefende Forschungsarbeiten voranzutreiben. Einen konkreten Ansatz hierfür verfolgten die Forschungsprojekte „Lokaler Transportauftragsmarkt für selbstständige Nachauftragnehmer (TransMat)“ [Ric10] und „Intermodales Transport Routing Informations-System (IMORTIS)“ [Poe12]. Im Projekt „TransMat“ wurden gemäß dem aufgeführten Grundprinzip zur Laderaumvermessung Ultraschallsensoren im Dach eines Transportfahrzeugs der Klasse N1 verbaut, um ausgehend von der Laderaumdecke die jeweilige Höhe der Ladeobjekte im Laderaum erfassen zu können ([Ric10], S. 86). Diese Vorgehensweise wurde im Projekt „IMORTIS“ vertieft, mit der Erkenntnis, dass sich der Einsatz von Ultraschallsensoren aufgrund des Installationsaufwands, der Sensorkosten sowie der Messfehler durch Abschattungseffekte als sehr problematisch herausstellte ([Poe12], S. 44). Daraus kann der Rückschluss gezogen werden, dass die alleinige Höhenvermessung im Laderaum mittels Ultraschall- oder Radarwellen – anhand der derzeitigen technischen Möglichkeiten und Grenzen – nicht ausreicht, um eine detaillierte Laderaumanalyse durchführen zu können.¹⁹ Durch diese Erkenntnisse wurden für den weiteren Projektverlauf von „IMORTIS“ die Ultraschallsensoren durch eine moderne Tiefenbildkamera ersetzt. Mittels der Kamera konnten somit Tiefenbilder generiert werden, anhand derer wiederum die Volumenangaben einzelner Ladeobjekte ermittelt werden konnten. Als wesentliche Schwachstelle dieser Vorgehensweise und zur deutlichen Abgrenzung zum Untersuchungskontext dieser Arbeit ist an dieser Stelle zu erwähnen, dass durch die gewählte Kameraanordnung nur ein begrenzter Teil des Laderaums erfasst werden konnte und somit bei dieser Vorgehensweise nur eine Teilauswertung des Laderaums möglich ist. Die erfassten Daten konnten primär „nur“ für die Bestimmung der freien Lademeter im hinteren Bereich des Laderaums herangezogen werden ([Poe12], S. 53). Anhand der ermittelten freien Ladefläche können zwar Rückschlüsse auf das restliche Ladevolumen gezogen werden; allerdings ist das System nicht dafür ausgelegt, das tatsächliche Ladevolumen direkt zu ermitteln. Beispielsweise können die Ladeobjekte an der Stirnwand durch die Abschattung der davor positionierten Ladeobjekte erst gar nicht erfasst werden. Es kann somit festgehalten werden, dass eine einzige Kamera nicht dafür ausreicht, eine vollständige Laderaumerfassung zu erzielen. Das bedeutet: Die Kameraanordnung und -anzahl bildet ein entscheidendes Kriterium für die Systemauslegung.

Mit der Integration einer Kamera in den Laderaum verfolgt die Fa. Krone (Hersteller von Lkw-Anhängern und Sattelaufiegern) einen ähnlichen Ansatz. Bei der Produktstudie „Smart Scan“ [Kro18] befindet sich die Kamera ebenfalls am hinteren Ende des Laderaums. Im Vergleich zum Projekt „IMORTIS“ handelt es sich dabei allerdings um eine neuere Kameratechnologie, wodurch der Erfassungsbereich erweitert werden konnte. Trotz

¹⁹ Einen ähnlichen Ansatz wie in den beiden genannten Projekten verfolgte die Fa. Ubigrate mit der patentierten Produktlösung „LoVoTrack“. Diese wird hier der Vollständigkeit halber erwähnt, allerdings nicht weiter vertieft ([GN10], S. 7).

dieser Verbesserung ist von dieser festen Position nach wie vor keine vollständige Erfassung des Laderraums möglich: Auch hier werden die Laderaumaufnahmen zur Ermittlung der Freifläche herangezogen (s. Abbildung 3.4 b). Eine direkte Bestimmung des beladenen Laderaumvolumens ist in diesem Fall nach wie vor nicht realisierbar.

Im Rahmen der bisherigen Betrachtung wurden vorwiegend Erfassungssysteme berücksichtigt, die innerhalb des Laderraums angebracht werden. Im Gegensatz hierzu existieren inzwischen jedoch auch zahlreiche Lösungen, die die erforderlichen Volumenangaben nicht im Laderaum ermitteln, sondern die Frachtvermessung mittels stationärer Messsysteme davor durchführen, also an der Laderampe oder im Verladebereich (s. Abbildung 3.4). Dieser Ansatz wird an dieser Stelle der Vollständigkeit halber erwähnt. Aufgrund der damit verbundenen Systemnachteile wird diese Lösungsvariante aber nicht weiter berücksichtigt.

Ein wesentlicher Nachteil der stationären Messsysteme im Verladebereich ist, dass die erfassten Daten in das Transportmanagementsystem eingepflegt und mit den Transportmitteldaten abgeglichen werden müssen, sodass die tatsächliche Auslastung nicht direkt ermittelt werden kann, was bei Fehl- oder Falschbeladungen zu Folgefehlern im System führen kann. Des Weiteren ist dabei zu berücksichtigen, dass im Nachgang zur eigentlichen Verladung nicht darauf rückgeschlossen werden kann, wo sich das vermessene Ladegut tatsächlich im Laderraum befindet und wie der Laderraum beladen wurde. Bei einer Stapelung der Ladegüter im Laderraum (bspw. Doppelstockverladung) ist u. a. kein direkter Ist-Abgleich mit dem tatsächlichen Ladegut im Laderraum bzw. mit dem Laderaumszenario möglich. Dadurch können keine konkreten Aussagen über den tatsächlichen Flächen- oder Volumennutzungsgrad getätigten werden. Ein weiterer erheblicher Nachteil ist der Aspekt, dass bei dieser Art der Vermessung bei jeder Verladestelle entlang der Transportroute solch ein stationäres System vorhanden bzw. installiert sein muss. In der Regel ist bei einem Großteil der Transporte jedoch davon auszugehen, dass mehr Knotenpunkte als Transportmittel existieren und somit der Anteil an erforderlichen Messsystemen überwiegen würde. Aus wirtschaftlicher Sicht und aufgrund der Datenqualität ist es daher vorteilhafter, wenn jedes Transportmittel über ein eigenes integriertes Messsystem verfügt. Dies vereinfacht insbesondere den Abgleich der tatsächlichen Ist-Daten aus dem Laderraum. Zur Veranschaulichung dienen beispielhaft die Fahrten eines Spediteurs, der 16 Lkw besitzt und zur Be- und Entladung 28 unterschiedliche Stationen anfährt. Die sensorische Ausstattung der 16 Transportmittel wäre bei diesem Vergleich mit einem deutlich geringeren Aufwand verbunden als die erforderliche Aufrüstung aller 28 Verladestationen.

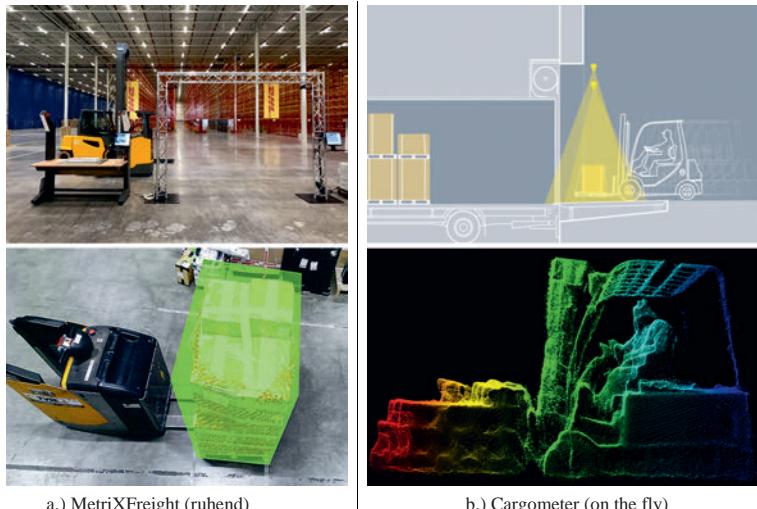


Abbildung 3.4: Praxisbeispiele für die Frachtvermessung außerhalb des Laderaums ([Car19]; [Met19b])

Ein weiterer Nachteil, der sich durch den Einsatz der stationären Messsysteme in der Verladezone/im Laderampenbereich ergibt, ist der zusätzliche Datenerfassungsschritt bei den einzelnen Ladeeinheiten. Für die konsequente Datenerfassung müssen alle zu transportierenden Ladeeinheiten vorab vermessen werden. Es muss also ein zusätzlicher Zwischenstopp bei der Verladung eingelegt werden, wodurch bspw. der Gabelstapler die Lasten zusätzlich absetzen und später wieder aufnehmen muss (s. MetriXFreight) [Met19b]. Durch diese Vorgehensweise wird zwar der Durchsatz an der jeweiligen Messstation erhöht, allerdings können sich dadurch bei der Verladung auch Engpassstellen herauskristallisieren. Dies würde wiederum weitere Messsysteme erfordern. Für die parallele Fahrzeugbeladung müssten somit weitere oder alle Verladetore bzw. Laderampen aufgerüstet werden, wodurch sich die Gesamtanzahl der erforderlichen Messsysteme und -stationen deutlich erhöhen würde. Zur Behebung dieser zwischenzeitlich bekannten Problematik existieren inzwischen Erfassungssysteme, die „on the fly“ eine Volumenmessung vornehmen können (s. Cargometer) [Car19]. Durch diesen Ansatz werden allerdings auch die Anforderungen an die einzelnen Messstationen erhöht, insbesondere hinsichtlich der erforderlichen Präzision. Dies wirkt sich folglich auf höhere Anschaffungskosten bei den teureren Sensoren (Lasertechnik) aus, was im Vergleich zur angestrebten Laderaummontage als ein weiteres Unterscheidungsmerkmal anzusehen ist.

Anhand des aufgezeigten Entwicklungsstandes und unabhängig vom Anbringungsort der Sensorik (innerhalb oder außerhalb des Laderaums) wird deutlich, dass sich der Einsatz von berührungslosen 3D-Sensoren für die Erfassung der Ladeobjekte oder des Laderaumzustandes etabliert hat. Ferner wird anhand der aufgezeigten Lösung deutlich, dass inzwischen

schen zwar vielfältige und durchaus ähnliche Lösungsansätze für die Volumenerfassung existieren. Allerdings wurde noch keine direkte und vollständige Erfassung der Daten im Laderaum erprobt, so wie sie im Rahmen dieser Arbeit angestrebt wird. Die Akquisition der Daten im Laderaum hängt im Wesentlichen vom verwendeten Messverfahren sowie den damit verbundenen technischen Spezifikationen ab. Die konkrete Auswahl eines geeigneten Sensorprinzips für den vorgesehenen Laderaumeinsatz wird daher gesondert thematisiert.

3.3.2 Eingrenzung der 3D-Messverfahren

Es gibt eine Vielzahl an unterschiedlichen Messverfahren, um 3D-Informationen für eine Messanwendung zu erfassen. Bei den zuvor aufgeführten Lösungsansätzen wurden bereits einzelne Sensormessprinzipien vorgestellt. Im folgenden Abschnitt wird hierzu eine generelle Übersicht hinsichtlich der potenziellen Messverfahren gegeben und eine Eingrenzung vorgenommen, um ein geeignetes Messprinzip für die Laderaumerfassung bestimmen zu können.

In der Literatur sind verschiedene Ansätze zur Kategorisierung der relevanten 3D-Messverfahren aufzufinden ([BR16], S. 47; [PKV⁺05], S. 232; [VMC97], S. 256). In Anlehnung an diese Vorgaben wurde für das auszuwählende Messverfahren ein Kategorisierungsschema erarbeitet (s. Abbildung 3.5). Anhand der darin festgelegten Unterscheidungsmerkmale lassen sich die entsprechenden Messverfahren für die Laderaumanwendung systematisch eingrenzen. Die damit verbundene Vorgehensweise wird im Folgenden erläutert.²⁰

Eine erste Eingrenzung hinsichtlich der auszuwählenden Messverfahren findet anhand des verwendeten Tastprinzips statt. Dabei wird zwischen berührenden (taktilem) und berührungslosen (non-taktilem) Messtechniken unterschieden ([Heh11], S. 231). Für die angestrebte Datenerfassung im Laderaum werden taktile Messverfahren kategorisch ausgeschlossen, wodurch der Fokus allein auf die berührungslosen Messverfahren gelegt wird – insbesondere aufgrund der Tatsache, dass durch berührungslos arbeitende Messverfahren mehrere Tausend Messpunkte simultan erfasst und ausgewertet werden können. Für den angestrebten Anwendungsfall ergibt sich hierdurch wiederum die Möglichkeit, im Vergleich zu den taktilen Verfahren eine deutlich schnellere Digitalisierung und Vermessung des Laderaums zu realisieren.

Durch die Festlegung auf berührungslose Messverfahren eröffnen sich weitere charakteristische Merkmale, anhand derer sich die systematische Eingrenzung fortführen lässt. Eine

²⁰ Die nachfolgend aufgeführte Gliederung und Erläuterung stellt eine für die Laderaumanwendung getroffene Vorauswahl dar und erhebt keinen Anspruch auf eine vollständige Berücksichtigung aller 3D-Messprinzipien.

wesentliche Eigenschaft bildet dabei die Wellenart des Messverfahrens sowie die damit verbundene Wellenlänge. Dabei lässt sich zwischen Schallwellen und elektromagnetischen Wellen in Form von Lichtwellen unterscheiden ([Jäh12], S. 34; [PKV⁰⁵], S. 232; [SHB⁹⁹], S. 463). Ein klassisches akustisches Messverfahren stellen bspw. die in Abschnitt 3.3.1 bereits erwähnten und im Laderaum eingesetzten Ultraschallsensoren dar. Diese Art von Abstandssensoren weist jedoch einen sehr begrenzten Erfassungskegel auf ([BHL¹²], S. 188), wodurch sich keine vollständige und hoch aufgelöste Laderaumerfassung realisieren lässt ([Poe12], S. 44). Des Weiteren kommen die Einflüsse der Oberflächenreflexion sowie die Druck- und Temperaturempfindlichkeit der Schallwellen erschwerend hinzu ([BHL¹²], S. 188). Aufgrund der damit verbundenen Limitationen werden akustische Messverfahren für die weitere Laderaumbetrachtung ausgeschlossen.

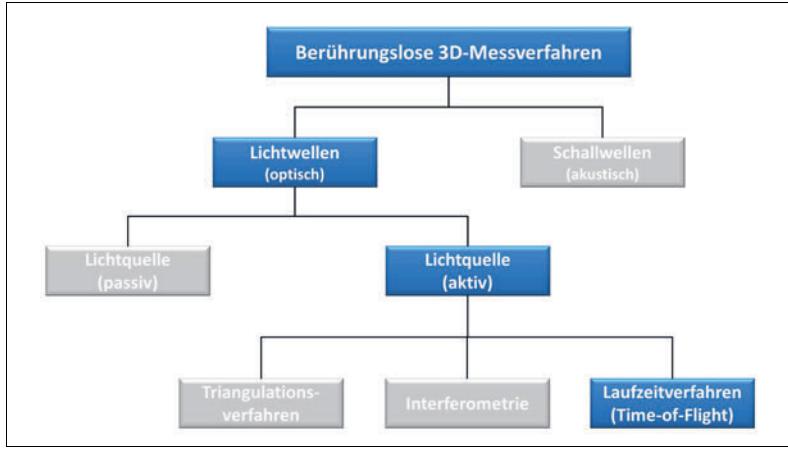


Abbildung 3.5: Kategorisierungsschema zur Verfahrenseingrenzung der berührungslosen 3D-Messprinzipien (in Anlehnung an: ([BR16], S. 47; [PKV⁰⁵], S. 232; [VMC97] S. 256))

Eine deutlich aussichtsreichere Ausgangsbasis für die Sensorauswahl ergibt sich durch die Betrachtung von Messverfahren, die auf elektromagnetischen Wellen basieren.²¹ Das Spektrum der elektromagnetischen Wellen weist im Vergleich zu Schallwellen eine sehr viel kleinere Wellenlänge auf, wodurch sich Sensorlösungen mit deutlich größerer Axial- und Lateralauflösung realisieren lassen ([SHB⁹⁹], S. 463; [Hei01], S. 4). Wie in Kapitel 3.3.1 bereits aufgezeigt wurde, rücken für die Laderaumanwendung vermehrt optische Messverfahren in den Anwendungsfokus. Durch die ausgesandten Lichtwellen lässt sich innerhalb von wenigen Sekunden eine berührungslose und flächenhafte Erfassung der relevanten Szene realisieren.

²¹ Neben Lichtwellen existieren auch Messprinzipien auf Basis von Röntgenstrahlung, Mikrowellen oder Radiowellen. Diese sind für den vorgesehenen Laderaumsatz allerdings impraktabel und werden nicht weiter vertieft. Der Fokus dieser Arbeit liegt allein auf berührungslosen optischen Messverfahren.

Wie zu erkennen ist, existieren vielfältige Messverfahren und -prinzipien in der Literatur, wodurch sich vielfältige Ansätze zur Unterteilung der optischen Messsysteme ergeben (vgl. [BPF12]; [Bla04]; [DB12]; [GBT⁰²]; [Jar83]; [STD09]; [SHB⁹⁹]; [Tiz89]). Ein charakteristisches Eingrenzungsmerkmal für den Laderaumeinsatz ergibt sich u. a. durch die anzutreffenden Umgebungsbedingungen. Einen wesentlichen Aspekt nimmt dabei die Lichtquelle des optischen Messsystems ein. In der Literatur wird diesbezüglich zwischen aktiver und passiver Lichtquelle unterschieden ([STD09], S. 570). Beim Einsatz passiver optischer Messverfahren wird zur Messwerterfassung das natürliche Umgebungslicht oder diffuses Licht verwendet – ein Ansatz, der in einem geschlossenen und zugleich dunklen Laderaum als gänzlich ungeeignet anzusehen ist. Eine Grundvoraussetzung für die erfolgreiche Datenerfassung bildet somit eine auf den Sensor abgestimmte aktive Lichtquelle. Diese ist in den entsprechenden Messsystemaufbau bereits integriert und leuchtet je nach Messprinzip die jeweils zu betrachtende Szene aus. Zum Einsatz kommen dabei entweder gepulste Laser oder modulierte LED-Lichtquellen [Bes88]. Das aktive Messsystem kann dadurch unabhängig vom Umgebungslicht agieren, wodurch sich auch die erforderliche Datenerfassung innerhalb eines dunklen Laderaums realisieren lässt.

Durch die Eingrenzung auf aktive optische 3D-Messsysteme lassen sich die relevanten Verfahren auf drei wesentliche Messprinzipien reduzieren: das aktive Triangulationsverfahren, das Laufzeitverfahren sowie die sogenannte Interferometrie ([GVS18]; [DB12], S. 96).

Interferometrische Verfahren basieren auf der Überlagerung von kohärenten Lichtwellen (Objekt- und Referenzwelle). Wesentliche Kennzeichen dieser kohärenten Strahlung bilden die Frequenzgleichheit sowie die feste Phasenverschiebung der Lichtwelle, wodurch sich hochgenaue mikroskopische Messungen im μm -Bereich realisieren lassen ([Bla04], S. 235). Damit verbunden ist ein sehr aufwendiger Messsystemaufbau, bei dem die verwendeten Komponenten häufig von äußeren Schwingungen entkoppelt werden müssen, was im Laderaum nicht realisierbar ist. Des Weiteren wirkt sich dies nachteilig auf die Kosten sowie die robuste Auslegung des Messsystems aus ([Fle03], S. 24; [Jäh12], S. 263; [Wio01], S. 3). Interferometrische Messverfahren kommen daher vorwiegend im industriellen Umfeld zum Einsatz und zwar bei Messaufgaben mit geringen Reichweiten – bspw. im Fertigungsbereich als qualitätssichernde Maßnahme, um eine 100%-Kontrolle der gefertigten Teile innerhalb von wenigen Sekunden durchzuführen ([BH10], S. 30; [BHL¹²], S. 189). Die Komplexität und der Aufwand für den Messaufbau zeigen bereits auf, dass die Interferometrie ungeeignet für die gestellte Messaufgabe ist. Der weitere Betrachtungsschwerpunkt wird daher auf aktive Triangulationsverfahren und Laufzeitverfahren gelegt.

Die Grundlage von aktiven triangulationsbasierten Messverfahren bildet eine fixierte Lichtquelle, die mit einem speziellen Muster (punkt-, linien- oder flächenförmig) die Szene oder das Objekt beleuchtet und anschließend vom Bildsensor wieder erfasst wird

([GVS18], S. 18). Durch die fest definierte Anordnung der eingesetzten Komponenten (Lichtquelle und Bildsensor) und die daraus resultierenden geometrischen Zusammenhänge (Streckenlänge und Winkelgröße) lassen sich somit die erforderlichen Tiefendaten innerhalb der betrachteten Szene bestimmen ([Fle03]; [DB12]).²² Ein weitverbreitetes aktives Triangulationsverfahren basiert auf dem Prinzip der strukturierten Beleuchtung und wurde bereits vermehrt in verschiedenen ersten Lösungsansätzen für die Laderaumerfassung erprobt ([Poe12], S. 53; [Fie14], S. 5). Als wesentlicher Nachteil dieser aktiven triangulationsbasierten Verfahren sind die sogenannten Abschattungseffekte anzusehen. Diese treten bei größerer Neigung der Objektoberfläche auf, sodass die Objekte innerhalb der betrachteten Szene zwar beleuchtet werden, allerdings vom Bildsensor nicht vollständig erfasst werden können ([Hen04], S. 12). Diese indirekte Tiefenwertbestimmung führt im Laderaum u. a. zu Fehlinterpretationen bei der Ladeobjekterfassung. Eine weitere Herausforderung stellen die Auflösung und der Messbereich von aktiven Triangulationsverfahren für die jeweilige Messaufgabe dar. Die Messgenauigkeit und -reichweite hängen unmittelbar vom Abbildungsmaßstab der Empfangsoptik, dem Basisabstand zwischen Lichtquelle und Bildsensor, dem Triangulationswinkel sowie der Wellenlänge ab ([Hei01], S. 12). Durch diese Parameterabhängigkeit lassen sich wiederum nur eingeschränkte Baugrößen realisieren. Eine Miniaturisierung der erforderlichen Systemkomponenten, um die Sensoren einheitlich zukünftig kompakt im Laderaum zu integrieren und eine entsprechende Auflösung innerhalb des erforderlichen Messbereichs gewährleisten zu können, würde sich daher bei den triangulationsbasierten Verfahren nur bedingt realisieren lassen.

Aufgrund der aufgeführten Defizite beim Triangulationsverfahren rücken direkte Tiefenmessverfahren in Form von Laufzeitverfahren (Time-of-Flight) verstärkt in den Fokus der industriellen Anwendung ([BLR15]; [RF06]). Das Messprinzip der Laufzeitmessung basiert im Wesentlichen auf der Ausleuchtung der betrachteten Szene mittels eines modulierten optischen Signals (LED-Lichtquelle). Dabei wird die Zeit des ausgesandten Lichtsignals gemessen und in Form eines Tiefenbildes ausgegeben. Durch diese Vorgehensweise wird es ermöglicht, für jeden Bildpunkt innerhalb der betrachteten Szene einen Tiefenwert auszugeben ([Lan00], S. 16). Eine ToF-Tiefenbildkamera kombiniert somit zeitgleich die Vorteile eines aktiven Tiefensensors mit den zweidimensionalen Bildinformationen einer herkömmlichen Digitalkamera. Ein weiterer Aspekt, den es bei einer ToF-Tiefenbildkamera hervorzuheben gilt, ist der deutlich geringere Aufwand bei der Datenaufbereitung. Während bei den aktiven Triangulationsverfahren ein vergleichsweise zeitintensives Abtasten und nachträgliches Aufbereiten der Laderaumdaten erforderlich ist, ermöglichen die ToF-Tiefenbildkameras eine Direktauswertung der Tiefendaten mittels der Kameraelektronik. Durch die integrierte System-on-Chip-Technologie (SoC) sind keine weiteren rechenintensiven Zwischenschritte für die Aufbereitung der Tiefenwerte erforder-

²² Eine vertiefende Beschreibung von weiteren aktiven Triangulationsverfahren ist der weiterführenden Literatur zu entnehmen ([Bes88]; [GBT'02]; [Jäh12]; [JB97]).

lich. Dies ist insbesondere für den mobilen und ressourceneffizienten Einsatz des Messsystems im Laderaum als ein zusätzlicher Vorteil anzusehen. Ferner eröffnet das ToF-Verfahren ein deutliches Miniaturisierungspotenzial bei den erforderlichen Bauteilen (s. ToF-Kameras in Smartphones), um langfristig eine dauerhafte Integration der Sensoren im Laderaum zu ermöglichen. Das Laufzeitverfahren stellt in diesem Zusammenhang ein vielseitiges optisches 3D-Messprinzip dar, das ferner die Anforderungskriterien für den Laderaumeinsatz am besten erfüllt. Für den weiteren Verlauf bildet das ToF-Verfahren daher den technologischen Kern für die sensorische Laderaumerfassung. Eine genauere Beschreibung des Kameraaufbaus sowie die detaillierte Erläuterung des ToF-Funktionsprinzips werden in Kapitel 4 schrittweise vertieft.

3.4 Spezifizierung der Arbeitsinhalte

Die detaillierte Aufarbeitung der Auslastungsthematik hat gezeigt, dass die volumenbezogene Laderaumerfassung von verschiedenen Bereichen und Faktoren abhängt. Dabei zeigt die bisherige Erfassung der Auslastungsdaten deutliche Diskrepanzen auf, sodass eine aussagekräftige Nutzung dieser Daten nur begrenzt möglich ist. Insbesondere da die Volumenbestimmung im Laderaum gar nicht oder nur sehr lückenhaft erfolgt und die Angaben größtenteils auf ungenauen Schätzungen basieren, ist die aktuelle Datenerfassung als äußerst ungenügend einzustufen – vor allen Dingen im Zeitalter der Digitalisierung. Die automatisierte sensorische Volumenerfassung im Laderaum sowie die damit verbundene Datenanalyse bieten daher ein großes Potenzial, um die vorhandenen Laderaumkapazitäten besser ausnutzen zu können. In der Fachliteratur und in der Praxis finden die zur Behebung der vorhandenen Erfassungsdefizite erforderlichen Maßnahmen jedoch nur geringe Beachtung.

Das Primärziel dieser Arbeit ist es daher, eine Methodik für die sensorische Volumenerfassung im Laderaum zu erarbeiten sowie eine entsprechende Datenaufbereitung für die Laderaumanalyse zu erproben, um zukünftig präzisere Laderaumanalysen hinsichtlich der Volumenauslastung zu ermöglichen. Mittels des auszulegenden Laderaumerfassungssystems sollen nicht nur hinreichend genaue Volumenangaben ermöglicht, sondern auch die bisherigen Datenlücken im Laderaum geschlossen werden. Für die Umsetzung ist eine Sensor-technologie erforderlich, die den Ansprüchen des Laderraums gerecht wird und gleichzeitig adäquate Messergebnisse liefert. In der Praxis haben sich hierfür insbesondere bildbasierte 3D-Mess- und Analysesysteme auf Basis des ToF-Prinzips als Erfolg versprechend erwiesen (s. Kapitel 3.3).

Im Rahmen der Systemauslegung ist es daher erforderlich, zunächst die grundlegende Funktionsweise der relevanten Systemkomponenten zu erläutern. Darauf aufbauend erfolgen die messtechnische Analyse der Tiefenbildkamera sowie die Identifikation der relevan-

ten Messlimitationen innerhalb des Laderaums. Hierfür wird die Tiefenbildkamera umfangreichen laderaumtypischen Laboranalysen unterzogen. Hierzu gehören u. a. Messuntersuchungen in Abhängigkeit von den zuvor ermittelten Beschaffenheits- und Belastungsprofilen (s. Ladeobjekt und Laderaum). Durch die systematische Auswertung der jeweiligen Laborversuche lassen sich letztlich die erforderlichen Rahmenbedingungen für den adäquaten Einsatz der Tiefenbildkamera im Laderaum bestimmen und die Messgenauigkeit der Tiefenbildkamera quantifizieren.

Für die Datenverarbeitung und die bildbasierte Laderaumanalyse wird eine entsprechende Auswertesystematik vorausgesetzt. Anhand einer miniaturisierten Laderaummodellumgebung soll geklärt werden, inwieweit sich verschiedene Verarbeitungsmethoden für die vorgesehene Laderaumanalyse eignen. Aufbauend auf diesem Grundszenario werden anschließend verschiedene Verarbeitungsschritte mit unterschiedlichen Parameterwerten angewendet, um letztlich eine geeignete Verarbeitungskette für die Laderaumanalyse bestimmen zu können. Abschließend erfolgen eine experimentelle Systemerprobung sowie eine entsprechende Ergebnisanalyse, um die erfassten Laderaumdaten zu validieren. Die hierfür erforderlichen Arbeitsinhalte und Maßnahmen werden im zweiten Teil dieser Arbeit (Kapitel 4 bis Kapitel 7) erläutert und bewertet.

4 Konzeptionelle Grundlagen zur Datengenerierung

Anhand der betrachteten Sensormessprinzipien wurde das ToF-Verfahren für die Erfassung des Laderaums ausgewählt. Im folgenden Kapitel wird das Messprinzip der eingesetzten Hardware näher beschrieben sowie die geometrische Modellierung des Abbildungsvorgangs vertieft. Diese themenspezifischen Inhalte sind zum einen für das grundlegende Verständnis bezüglich der anschließenden Datenakquisition, -verarbeitung und -analyse erforderlich und bilden zum anderen die Ausgangsbasis für Auswertung der einzelnen Laderaumszenarien. Ferner wird neben diesen theoretischen Grundlagen auch das Messverhalten der eingesetzten Tiefenbildkamera experimentell untersucht, um die beschriebenen Kameraparameter verifizieren sowie eventuell vorhandene messtechnische Defizite aufzeigen zu können.

4.1 Architektur und Funktionsweise der eingesetzten Hardware

Die voranschreitende Entwicklung leistungsfähiger Tiefenbildkameras wird insbesondere durch den kommerziellen Vertrieb serienreifer Kamerasysteme namhafter Hersteller (Infineon, Intel, Microsoft etc.) geprägt ([GVS18], S. 29). Hierzu gehören insbesondere indirekte ToF-Verfahren auf dem Prinzip der Phasenkorrelation²³ (Continuous-Wave-Prinzip) ([Lan00], S. 18). Der damit einhergehende millionenfache Verkauf dieser 3D-Kameratypen hat nicht nur die Anwendungsmöglichkeiten innerhalb der Konsumelektronik erweitert, sondern auch den Entwicklungsbedarf hinsichtlich neuer digitaler „Werkzeuge“ und „Hilfsmittel“ im industriellen Umfeld eröffnet. Durch die Fähigkeit, zeitgleich Bild- und Entfernungsdaten zu generieren, heben sich die ToF-Tiefenbildkameras nicht nur von herkömmlichen Digitalkameras ab, sondern ermöglichen es auch, bisher nicht realisierbare Bildanalysen durchzuführen (bspw. von Laderaumszenen). Welche Kamerakomponenten in diesem Zusammenhang von besonderer Bedeutung sind und wie die elektroni-

²³ Neben dem indirekten Verfahren existiert auch ein direktes ToF-Verfahren auf Basis der Pulsmodulation ([Lan00], S. 18). Diese Art von ToF-Kamera wird allerdings aufgrund der vergleichsweise deutlich geringeren Kameraverbreitung und des höheren Anschaffungspreises nicht für den Laderaumeinsatz in Erwägung gezogen (s. auch Kapitel 4.1.2 und Kapitel 8.2). Dabei ist anzumerken, dass sich die in dieser Arbeit entwickelte Auswertemethode auch durch andere ToF-Messprinzipien oder durch die Verwendung von ToF-Kameras anderer Hersteller realisieren lässt. Dabei wird davon ausgegangen, dass sich bei den einzelnen ToF-Varianten lediglich minimale Unterscheidungen bei den Messlimitationen nachweisen lassen (s. Kapitel 5). Die hier ausgewählte ToF-Kamera (Kinect™ V2 von Microsoft®) wird daher stellvertretend für die gesamte Bandbreite an existierenden ToF-Varianten eingesetzt und im weiteren Arbeitsverlauf ganz allgemein als Tiefen(bild)kamera bezeichnet.

schen Signale generiert sowie verarbeitet werden, wird in den nächsten Abschnitten schrittweise vertieft.

4.1.1 Technischer Aufbau der Tiefenbildkamera

Die im Rahmen dieser Arbeit eingesetzte Tiefenbildkamera besteht im Wesentlichen aus einer optischen Basiseinheit, welche sich aus einer (aktiven) Lichtquelle, einem optischen Detektor sowie einer darauf abgestimmten Kameraelektronik zusammensetzt. Die technischen Spezifikationen der Kamera werden im Folgenden anhand der Herstellerangaben erläutert ([BOE¹⁵]; [SO14]; [PDM¹⁴]).

Die erforderlichen Funktionseinheiten der ToF-Tiefenbildkamera (Linsen, Lichtquelle etc.) sind in einem Gehäuse fest angeordnet und untergebracht (s. Abbildung 4.1). Die quaderförmige Auslegung des Kameragehäuses weist eine Abmessung von 249 mm x 66 mm x 67 mm auf. Dadurch ergibt sich eine kompakte Grundform, die sich gut für den experimentellen Einsatz der Tiefenbildkamera im Laderaum eignet. Ferner weist die Tiefenbildkamera auf der Gehäuserückseite einen Lüfter auf, der zur Kühlung der Kameraelektronik eingesetzt wird (s. Abbildung 4.1, Rückansicht). Als zusätzliche Komponente ist auf der Unterseite der Kamerafront eine Mikrofonleiste angebracht, die im Rahmen dieser Arbeit jedoch unberücksichtigt bleibt. Die Spannungsversorgung der Kamera erfolgt über einen herstellerspezifischen Anschluss mit entsprechendem externem Netzteil sowie Adapterkabeln für den USB-Anschluss. Die Versorgungsspannung für die gesamte Kameraeinheit beträgt 12 V bei einer durchschnittlichen Leistung von ca. 15 W, d. h., es lässt sich auch ein akkubetriebener Einsatz der Tiefenbildkamera im Laderaum realisieren (s. Kapitel 7.1.1).

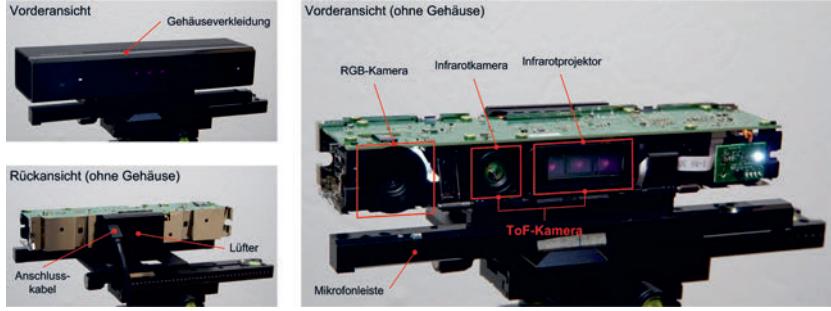


Abbildung 4.1: Grundaufbau der Tiefenbildkamera mit den jeweils relevanten Funktionseinheiten für die Datengenerierung

Anhand der aufgeführten Abbildung wird ersichtlich, dass die eingesetzte Tiefenbildkamera sowohl über eine hochauflösende Farbkamera (RGB) als auch eine Infrarotkamera verfügt. Da die RGB-Kamera im Dunkeln – bspw. innerhalb eines geschlossenen Lade-

raums – keine aussagekräftigen Bilddaten generieren kann, konzentriert sich der Schwerpunkt der Arbeit allein auf die Nutzung der integrierten ToF-Kameraeinheit (Infrarotkamera + -projektor) sowie auf die daraus generierten Tiefenbilder. Das Sichtfeld der Infrarotkamera weist einen Öffnungswinkel von 70° in horizontaler und 60° in vertikaler Richtung auf.²⁴

Wie bereits erwähnt, soll die Analyse des Laderaums anhand der simultan generierten Bilddaten erfolgen. Das Kernstück hierfür bildet der in die Kamera eingebaute CMOS-Sensor mit einer Größe von $14,2\text{ mm} \times 8,2\text{ mm}$. Dieser befindet sich hinter dem Objektiv der Infrarotkamera und ist in Abbildung 4.2 in einer stufenweisen Vergrößerung des Sensors zu sehen. Die Auflösung des ToF-Sensors liegt bei 512×424 Pixeln, wodurch 217 088 Tiefenwertmessungen pro Bild generiert werden können und zwar mit bis zu 30 Aufnahmen pro Sekunde. Die 2000-fache mikroskopische Vergrößerung des Bildsensors verdeutlicht den bereits beschriebenen matrixförmigen Sensoraufbau (s. Abbildung 4.2, unten). Darin wird nicht nur die Anordnung der einzelnen Pixel ersichtlich, sondern auch die jeweilige Kantenlänge eines Pixels von $10\text{ }\mu\text{m} \times 10\text{ }\mu\text{m}$.

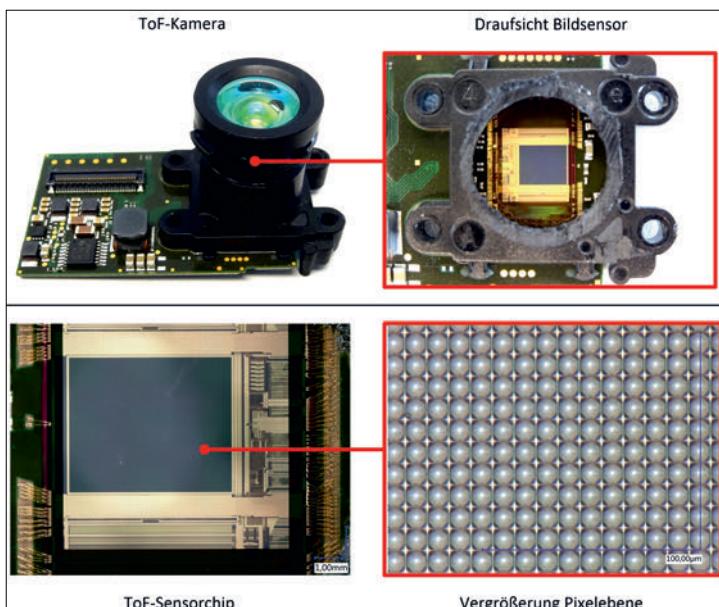


Abbildung 4.2: Detailaufnahmen vom verbauten Bildsensor (oben) sowie dessen Pixelanordnung (unten)

²⁴ Zum Zeitpunkt der Sensorsauswahl und Versuchsdurchführung weist die hier verwendete ToF-Tiefenbildkamera die beste Bildauflösung und das größte Sichtfeld in Abhängigkeit von der erforderlichen Messreichweite auf (vgl. [GVS18], S. 30).

Neben der Infrarotkamera ist für die Bildgenerierung auch eine zusätzlich installierte Beleuchtungseinheit erforderlich. Der in die ToF-Kamera eingebaute Infrarotprojektor enthält drei Emitter, die ein für das menschliche Auge nicht sichtbares Infrarotlicht (NIR) mit einer Wellenlänge von 860 nm und einer Strahlungsleistung von 0,6 W aussenden. Die emittierten Lichtwellen dienen dabei als Informationsträger und werden u. a. durch die Wellenlänge, Amplitude und Phase charakterisiert. Von diesen Parametern ist letztlich auch die maximal erreichbare Entfernung des Sensorsystems abhängig. Der Entfernungsbereich der eingesetzten Tiefenbildkamera wurde vom Hersteller auf 4,5 m begrenzt. Dadurch wird u. a. ein expliziter Arbeitsbereich vorgegeben, innerhalb dessen qualitativ verwertbare Tiefeergebnisse erzielt werden können (s. Kapitel 4.1.2). Die relevantesten technischen Herstellerangaben zur Tiefenbildkamera sind in Tabelle 4.1 zusammengefasst dargestellt. ([BOE⁺15], S. 303)

Tabelle 4.1: Zusammenfassung der technischen Kameraspezifikationen (Angaben nach ([BOE⁺15], S. 316; [PP15], S. 27574; [Mic19], S. 7))

Technische Spezifikationen der Tiefenbildkamera	
Sensorauflösung	512 x 424 Pixel
Chipgröße	14,2 mm x 8,2 mm
Pixelkantenlänge	10 µm
Sichtfeld	70 ° (h), 60 ° (v)
Belichtungswellenlänge	860 nm
Modulationsfrequenz	10 MHz – 130 MHz
Bildwiederholrate	30 fps
Tiefenmessbereich ²⁵	max. 4,5 m
Datenschnittstelle	USB 3.0
Spannungsversorgung	12 V
Gehäuseabmessung	249 mm x 66 mm x 67 mm
Gesamtgewicht	970 g

4.1.2 Messprinzip der Tiefenbildkamera

Das Kernelement zur Generierung der relevanten Tiefendaten im Laderaum bildet die bereits erwähnte ToF-Einheit der Kamera. Hierzu werden im Folgenden die wesentlichen Funktionsinhalte erläutert, die für die simultane Erfassung der Bild- und Tiefendaten erforderlich sind. Die darüber hinausgehende technische Erörterung hinsichtlich der Wellenmodulation, des Chipaufbaus, der Signaltaktung sowie der damit verbundenen Pixelauswertung kann in den einschlägigen Publikationen sowie den darin vorausgesetzten Grundlagenwerken vertieft werden ([JHG99]; [Lan00]; [BFI⁺14]; [SO14]; [BOE⁺15]; [LFO16]).

²⁵ In dem angegebenen Entfernungsbereich wird vom Hersteller die zuverlässige Erkennung von verschiedenen Körperteilen einer Person garantiert (ursprüngliche Auslegung der Kamera für interaktive Spieleanwendungen). Es lassen sich jedoch auch Tiefenwerte außerhalb des angegebenen Bereichs erfassen. Jedoch wird dabei die Körperteilerkennung durch das vorgegebene Software-Development-Kit (SDK) nicht mehr direkt unterstützt.

Wie bereits aus der englischen Bezeichnung des angewendeten Messprinzips hervorgeht (Time-of-Flight), basiert die Tiefenmessung der Kamera auf der Signallaufzeitmessung einer ausgesandten elektromagnetischen Lichtwelle. Beim ToF-Verfahren wird prinzipiell zwischen direkter und indirekter Laufzeitmessung unterschieden ([Bes88], S. 132). Bei der direkten Vermessung (Pulslaufzeitverfahren) wird die Entfernung z anhand der vorgegebenen Lichtgeschwindigkeit c (Naturkonstante) sowie der vom Detektor erfassten Zeitdifferenz zwischen dem ausgesendeten und empfangenen Signal bestimmt ($t_A - t_E$) ([Lan00], S. 18):

$$z = \frac{c \cdot (t_A - t_E)}{2} \quad (4.1)$$

Ein wesentlicher Nachteil bei der Anwendung der direkten Signallaufzeitmessung ergibt sich durch die sehr hohe Lichtgeschwindigkeit ($\approx 300\,000$ m/s) und die damit verbundenen Anforderungen an eine überaus präzise Zeitschaltungstechnik (in Pikosekunden), die sich wiederum auf den Herstellungsaufwand sowie die damit verbundenen Kosten für die erforderlichen Kamerakomponenten auswirken ([Her17], S. 23). Um die damit einhergehenden messtechnischen Schwierigkeiten zu umgehen, wird in der Praxis als Alternative häufig auf das Verfahren mit indirekter Signallaufzeitmessung (Phasenkorrelationsverfahren) zurückgegriffen, auf dem auch die in dieser Arbeit eingesetzte Hardware beruht. Bei dieser weiterentwickelten Art der Entfernungsmessung wird der Abstand zwischen Sensor und Objekt anhand der Phasenverschiebung $\Delta\phi$ zwischen der emittierten und detektierten elektromagnetischen Welle bestimmt. Die Formel hierfür lautet: ([BOE⁺15], S. 304)

$$z = \frac{\Delta\phi \cdot c}{2\omega} \quad (4.2)$$

Zur Tiefenwertbestimmung wird hierbei von einem sinusförmigen Idealzustand der elektromagnetischen Welle ausgegangen, die von der eingebauten Lichtquelle mit der Frequenz $\omega = 2\pi f$ moduliert und der Amplitude E emittiert wird (s. Abbildung 4.3, Markierung 1).

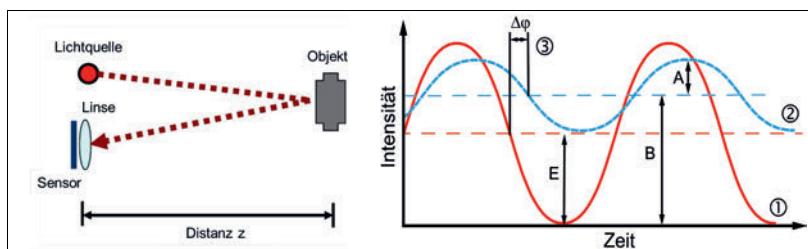


Abbildung 4.3: Funktionsprinzip der eingesetzten Kamera auf Basis der indirekten Lichtlaufzeitmessung ([BOE⁺15], S. 304; [CCP '09], S. 10082)

Beim Auftreffen des ausgesandten Lichtsignals auf eine entsprechende Objektoberfläche wird das Signal reflektiert und über die Empfangsoptik vom Bildsensor detektiert (s. Abbildung 4.3, links). Im Vergleich zum ursprünglichen Ausgangssignal weist das empfangene Signal zwar noch die gleiche Frequenz auf, jedoch trifft das Signal zeitlich verzögert und je nach Reflexion der Objektoberfläche mit einer abgeschwächten Amplitude A ein (s. Abbildung 4.3, Markierung 2). Durch die Überwindung der Wegstrecke z von der Lichtquelle zur Objektoberfläche und zurück zum Detektor erfährt das Laufzeitsignal zudem eine Phasenverschiebung relativ zum ursprünglichen Ausgangssignal (s. Abbildung 4.3, Markierung 3). Zur Bestimmung dieser Phasenverschiebung wird daher das reflektierte Signal mehrmals vom optischen Detektor der Tiefenbildkamera abgetastet.

Bei dem hier beschriebenen Funktionsschema wird das reflektierte Signal über vier Intervalle in einem Abstand von einer halben Periode integriert ($\tau_0 = 0^\circ$, $\tau_1 = 90^\circ$, $\tau_2 = 180^\circ$, $\tau_3 = 270^\circ$) und mit dem ausgesandten Referenzsignal verglichen. Die Phasenverschiebung $\Delta\varphi$ lässt sich somit durch folgende Arkustangensfunktion berechnen ([BOE⁺15], S. 305):

$$\Delta\varphi = \tan^{-1} \left(\frac{\tau_0 - \tau_2}{\tau_1 - \tau_3} \right) \quad (4.3)$$

Ausschlaggebend für die Messreichweite und -genauigkeit einer ToF-Tiefenkamera ist u. a. die Frequenz des modulierten Signals. Die Nutzung einer größeren Wellenlänge bewirkt in der Regel eine Steigerung der Messreichweite; allerdings verschlechtert sich dadurch auch die Messgenauigkeit. Durch den Einsatz einer kleineren Wellenlänge kann hingegen die Messgenauigkeit erhöht werden; jedoch führt die Periodizität der modulierten Welle zu einer Mehr- oder Doppeldeutigkeit bei der Tiefenwertbestimmung (s. Abbildung 4.4, Signalverlauf II).

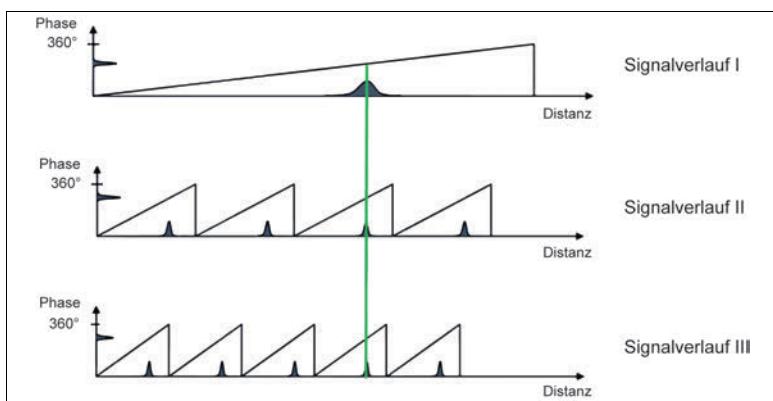


Abbildung 4.4: ToF-Prinzip auf Basis von mehreren Modulationsfrequenzen ([BOE⁺15], S. 304)

Um diese Problematik zu umgehen und gleichzeitig die Reichweite des Messbereichs mit nahezu gleichbleibender Entfernungsgenauigkeit auszubauen, greift die hier verwendete Tiefenkamera auf ein Modulationsprinzip mit multiplen Frequenzen zurück ([SO14], S. 50). Anhand der dargestellten Signalverläufe wird u. a. ersichtlich, dass der Einsatz einer niedrigen Modulationsfrequenz zwar einen eindeutigen Tiefenwert bei großer Reichweite ergibt, dieser jedoch ein starkes Messrauschen hervorruft (s. Abbildung 4.4, Signalverlauf I). Beim Einsatz einer höheren Modulationsfrequenz reduziert sich zwar das Rauschen aufgrund der kürzeren Signallänge, allerdings ergibt sich bei der Ermittlung der Tiefenwerte ein periodisch mehrdeutiges Ergebnis (s. Abbildung 4.4, Signalverlauf II). Um das Problem der Mehrdeutigkeit zu umgehen und die Einbußen bei der Messgenauigkeit zu kompensieren, verwendet die eingesetzte Tiefenbildkamera daher drei verschiedene Modulationsfrequenzen, aus deren Kombination sich die Genauigkeit und Eindeutigkeit der Messung deutlich verbessern lässt (s. Abbildung 4.4, vertikale Übereinstimmungslinie). Unter Berücksichtigung der Anzahl der einzelnen Phasenabtastungen (3-fach oder 4-fach) in Kombination mit den drei verschiedenen Modulationsfrequenzen ergeben sich insgesamt bis zu 12 durchgeführte Signalabtastungen, aus deren jeweiligem Messergebnis sich ein eindeutiger Tiefenwert bestimmen lässt. Mit diesem Funktionsprinzip gehen zwar im Vergleich zu anderen laufzeitbasierten Kameramodellen Einschränkungen bei den Einstellmöglichkeiten im Hinblick auf die Frequenzmodulation und die Integrationszeit einher [FPB⁺16], allerdings lassen sich dadurch auch durchweg stabilere Tiefenwertergebnisse innerhalb des agierenden Messbereichs der Tiefenbildkamera erzielen ([Her17], S. 20).

Ein weiterer wesentlicher Aspekt, den es bei der Generierung der Tiefendaten zu berücksichtigen gilt, ist die eigentliche Ausgabe der einzelnen Distanzwerte vom ToF-Sensor. Durch die leistungsfähige „onboard“-Signalverarbeitung (s. Kapitel 4.1.3) ist die Tiefenbildkamera in der Lage, die Tiefenwerte direkt zur Bezugsebene der Kamera zu ermitteln und auszugeben (s. Abbildung 4.5). Durch dieses Verarbeitungsprinzip kann der hinterlegte Tiefenwert direkt zur Abstandsermittlung eines Objektes oder einer Fläche herangezogen werden und muss nicht erst nachträglich – ausgehend vom Sensorzentrum – zusätzlich ermittelt und verarbeitet werden.²⁶ Diese Form der Tiefenwertausgabe ist als ein weiteres Unterscheidungskriterium zu den anderen Tiefenbildkameras anzusehen.

²⁶ Bei vergleichbaren Tiefenbildkameras wird „nur“ die Distanz zum Sensorzentrum ermittelt (s. Abbildung 4.5, Distanzlinie), d. h., der orthogonale Tiefenwert zur Bezugsebene muss in diesen Fällen erst noch nachträglich ermittelt werden (s. Abbildung 4.5, Tiefenwertlinie). Dieser Prozess erfordert zusätzliche Verarbeitungsschritte, die nicht auf der Kamera verrichtet werden können und wäre somit im direkten Kameravergleich als nachteilig anzusehen.

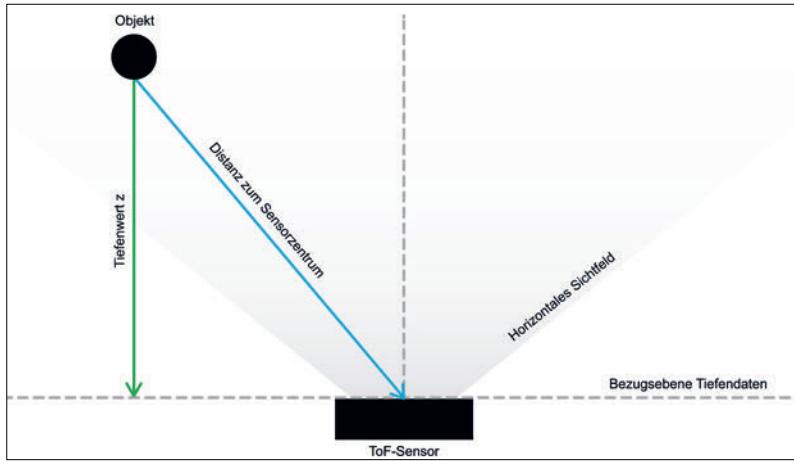


Abbildung 4.5: Funktionsschema für die Tiefenwertausgabe [Pte19]

4.1.3 Generierung der Bilddaten

Zur Generierung der einzelnen Bildarten (Tiefen- und Intensitätsbild) greift die Tiefenbildkamera auf ein Sensorsystem zurück, dessen Ein-Chip-Architektur (engl. „System-on-Chip“) einen CMOS-Bildsensor enthält. Durch den mikroelektronischen Aufbau der gesamten Kameraschaltung lassen sich diverse analoge und digitale Systemintegrationen realisieren, die die Basis für die Umsetzung eines intelligenten und leistungsfähigen Sensorsystems bilden. Der in die Tiefenbildkamera integrierte aktive Halbleiterdetektor ist u. a. dafür zuständig, dass die eintreffenden Photonen (Licht) in elektrische Spannungen konvertiert werden. Für die erforderliche Analog-Digital-Wandlung verfügt jedes Pixel über zwei Auslesekanäle (Kanal A und Kanal B). Das damit verbundene digitale Interface ermöglicht es wiederum, die Ausgangsdaten des jeweiligen Kanals direkt auszuwerten, um bspw. die Phasenverschiebung sowie den Intensitätswert zu ermitteln. Durch die auf dem Chip integrierte Auswertelogik wird somit eine pixelweise Bestimmung der erfassten Ladungen in den einzelnen Speicherzellen ermöglicht. Damit ist jedes der $10\text{ }\mu\text{m} \times 10\text{ }\mu\text{m}$ großen Pixel als eigenständiges multiples Messsystem anzusehen. ([BOE⁺15], S. 317) Durch diesen leistungsfähigen Sensoraufbau wird eine pixelspezifische Wellendemodulation und Signalaufbereitung durchgeführt. Die gemessenen und ausgewerteten Signale am jeweiligen Pixelausgang werden somit direkt auf der Hardware diskretisiert und quantisiert²⁷. Für die Generierung der entsprechenden Bilddaten sind also keine zusätzlichen externen Verarbeitungsschritte erforderlich.

²⁷ Unter Quantisierung wird die pixelweise Bewertung der Helligkeit oder der Entfernung verstanden, für die eine festgelegte Grauwertmenge herangezogen wird ([Pet13], S. 91). Bei der hier eingesetzten Tiefenbildkamera handelt es sich um eine 16-Bit-Auflösung.

Zur Bestimmung der relevanten Bildinformation wird auf die bereits erwähnte Signalabtastung sowie die dazugehörige Bestimmungsgleichung zurückgegriffen (s. Abbildung 4.3 und Gleichung (4.3)). Gemäß den darin aufgeführten Vorgaben lassen sich anhand der Signalabtastungen die Amplitude A sowie die mittlere Intensität B des reflektierten Signals wie folgt ableiten ([CCP⁺09], S. 10082):

$$A = \frac{\sqrt{(\tau_0 - \tau_2)^2 + (\tau_1 - \tau_3)^2}}{2} \quad (4.4)$$

$$B = \frac{\tau_0 + \tau_1 + \tau_2 + \tau_3}{4}$$

Durch diese Art der Signalverarbeitung können zunächst die Ladungen mehrerer Perioden in den einzelnen Speicherzellen gesammelt werden, um diese anschließend anhand der vorgegebenen Integrationszeit auszuwerten. Die Phasendifferenz $\Delta\phi$, die Amplitude A und das Offset B werden somit als Maß für die Bildberechnung genutzt. Zur Auswertung der empfangenen Signale lassen sich – ausgehend von Gleichung (4.4) – folgende Beziehungen für die jeweilige Bildgenerierung aufstellen ([SO14], S. 50):²⁸

$$\text{Intensitätsbild} = \sqrt{\sum (A - B)^2} \quad (4.5)$$

$$\text{Tiefenbild} = (A - B)$$

Der Intensitäts- und Tiefenwert eines einzelnen Pixels lässt sich somit anhand einer festgelegten Grauwertmenge bewerten ([Pet13], S. 91). Die ermittelten Daten werden anschließend genutzt, um diese innerhalb einer gitterförmigen Wertetabelle aufzustellen. Im vorliegenden Fall kann dies vereinfacht – gemäß dem beschriebenen Sensoraufbau – als eine Matrix mit 512 Spalten und 424 Zeilen veranschaulicht werden. Darin repräsentieren die aufgeführten Gitterzellen jeweils ein Pixel und der hinterlegte Wert wird letztlich dafür genutzt, um von der betrachteten Szene jeweils das erforderliche (graustufenbasierte) Intensitäts- oder Tiefenbild zu erzeugen (s. Abbildung 4.6). ([BK13], S. 19)

²⁸ Zur thematischen Vertiefung hinsichtlich der Signaldemodulation, Signalverarbeitung und Bildgenerierung wird auf [ZMD¹⁶], [BOE¹⁵] und [Cas12] verwiesen.

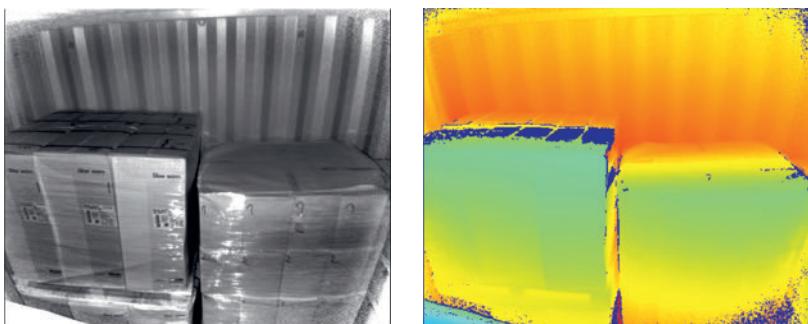


Abbildung 4.6: Aufnahme einer Laderaumszene (Rohdaten) mit entsprechendem Intensitätsbild (links) sowie dem simultan generierten Tiefenbild (rechts)

Die aus diesem automatischen Signalverarbeitungsprozess generierten Bilddaten bilden somit die Basis für die spätere Analyse des Kameraverhaltens im Laderaum (s. Kapitel 5).

4.2 Geometrische Modellierung der Tiefenbildkamera

In den vorherigen Abschnitten wurden das Funktionsprinzip der Tiefenmessung sowie dasjenige der Signalverarbeitung aufgezeigt. Zur Analyse des Laderaums anhand der erfassten Kameradaten ist es jedoch von besonderer Bedeutung, auch den eigentlichen Abbildungsvorgang der Tiefenbildkamera zu verstehen, d. h. die geometrische Überführung einer realen Szene in das entsprechend digitale Abbild der betrachteten Szene. Hierzu gehören sowohl die Berücksichtigung von verschiedenen Transformationsschritten bei der perspektivischen Projektion als auch der Einbezug von verschiedenen relevanten Modellparametern. Zur Beschreibung der Abbildungsvorgänge ist ferner die Verknüpfung verschiedener mathematischer und physikalischer Relationen erforderlich, die innerhalb des skizzierten Kameramodells zum Tragen kommen und zugleich verschiedene Bezugssysteme beinhalten. Anhand dieser systemtheoretischen Modellbeschreibung ist es letztendlich möglich, Rückschlüsse auf die von der Kamera betrachtete reale Szene zu ziehen sowie das entsprechende Abbildungsverhalten weiter zu analysieren ([Fie14], S. 15).

4.2.1 Relevante Bezugssysteme und Modellparameter für den Abbildungsvorgang

Die Transformation einer reellen Umgebung in ein digitales Abbild beinhaltet verschiedene Verarbeitungsvorgänge und erfordert unterschiedliche Bezugssysteme. Zur generellen Veranschaulichung und besseren Orientierung der darauf aufbauenden Systembetrachtung wird einleitend eine räumliche Aufteilung zwischen dem „realen“ und dem „digitalen“ Raum vorgenommen. Die hierfür erforderliche Systematisierung der zu betrachtenden

Räume erfolgt in Anlehnung an bestehende Vorgaben, die für den vorliegenden Betrachtungsrahmen wie folgt definiert werden ([DIN03], S. 4; [Luh10a], S. 30):

- **Objektraum:** Als Objektraum wird der gesamte physische Bereich vor dem betrachteten Linsen-/Kamerasytem aufgefasst. Im vorliegenden Fall wird der Laderaum als reeller dreidimensionaler Objektraum definiert, dessen Größe durch die jeweiligen Laderaumbegrenzungen vorgegeben wird (Seitenwände, Decke, Boden). Die darin befindlichen Ladeobjekte werden als reelle Messobjekte angesehen. Ferner befindet sich auch das Aufnahmesystem innerhalb des vorgegebenen Objektraums.
- **Bildraum:** Beim Bildraum wird zwischen dem optischen und dem digitalen Bildraum unterschieden. Der optische Bildraum wird durch den technischen Aufbau der Tiefenbildkamera vorgegeben. Dazu gehören im Wesentlichen das Linsensystem, der Bildsensor, die integrierte Elektronik sowie das damit behafte Sichtfeld der Kamera. Die von der Kamera erfassten Bilddaten werden hingegen innerhalb des vorgegebenen digitalen Bildraums festgehalten. Das darin gespeicherte Bild enthält die entsprechenden Informationen sowie die dazugehörigen Abbildungseigenschaften, die durch die elementaren Modellparameter der Kamera beschrieben werden. Den Kern des digitalen Raumes bilden sowohl die integrierte Schaltelektronik der Tiefenbildkamera als auch zusätzliche Peripheriegeräte.

Aufbauend auf der räumlichen Zuordnung der einzelnen Systemkomponenten (Objekt/Kamera) erfolgt in einem nächsten Schritt die geometrische Modellierung des Abbildungsvorgangs. Für die generelle Erläuterung des Abbildungsvorgangs wird beispielhaft ein vereinfachtes Systemmodell herangezogen, bei dem eine palettierte Ladeeinheit von der Tiefenbildkamera digital erfasst wird. Für die idealisierte Veranschaulichung dieses Abbildungsvorgangs wird auf das Grundprinzip der Lochkamera in Positivlage zurückgegriffen ([AGD07], S. 75).²⁹ Innerhalb dieser Modellbetrachtung befindet sich die relevante Projektionsfläche – im Folgenden Bildebene genannt – zwischen der Tiefenbildkamera und dem aufzunehmenden Objekt (s. Abbildung 4.7).

²⁹ Bei der klassischen Modellierung einer Lochkamera befindet sich die betrachtete Szene hinter dem Projektionszentrum der Kamera. Dabei steht die Abbildung auf dem Kopf und ist seitenverkehrt (Punktspiegelung). Im vorliegenden Betrachtungsfall wird die Projektionsfläche entlang der z-Achse verschoben und gespiegelt. Die optische Achse entspricht also der Aufnahmerichtung, wodurch die Bildebene in Positivlage gebracht wird. Dies vereinfacht insbesondere die Veranschaulichung des Kameramodells und wirkt sich zudem nicht auf die mathematischen Herleitungen aus.

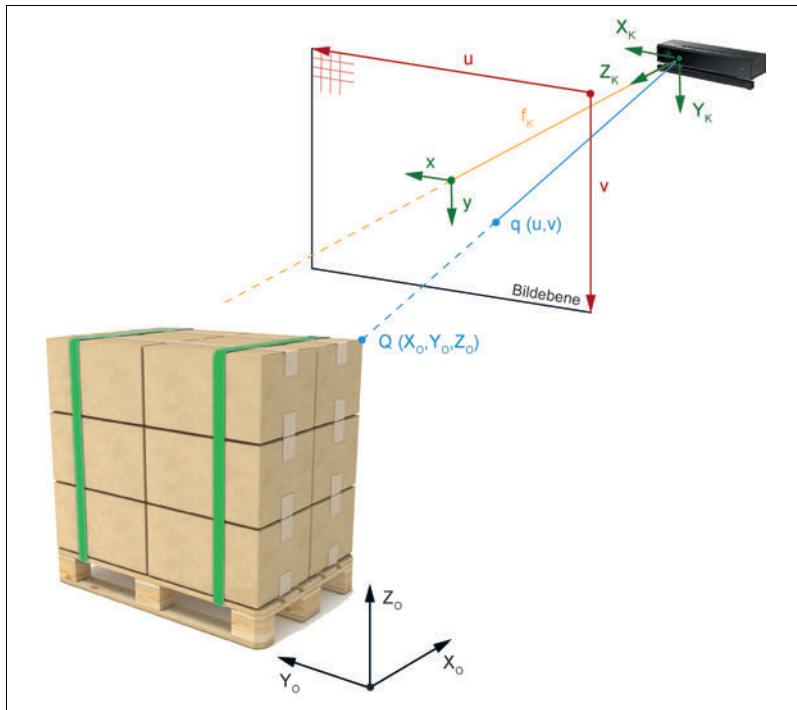


Abbildung 4.7: Schematische Darstellung des Abbildungsvorgangs am Beispiel einer Ladeeinheit bei vorgezogener Bildebene in Positivlage

Für die korrekte Projektion der betrachteten realen Szene (3D) in ein digitales Abbild (2D) sind entsprechende Bezugssysteme innerhalb des Bild- und Objektraums erforderlich. Durch die eindeutige Festlegung der relevanten Bezugssysteme lassen sich Relationen aufstellen, die es wiederum ermöglichen, die jeweils betrachteten Positions- und Orientierungspunkte in das entsprechend erforderliche Koordinatensystem zu überführen.

In Anlehnung an die in der Literatur vorgegebenen Konventionen werden die für den Abbildungsvorgang essenziellen Bezugssysteme (vgl. Abbildung 4.7) wie folgt definiert ([AGD07], S. 75; [Luh10a]; [Pet13], S. 58):³⁰

- **Objektkoordinatensystem (X_o, Y_o, Z_o):**

Das Objektkoordinatensystem ist als ein dreidimensionales metrisches Ausgangskoordinatensystem anzusehen, welches die Beziehungsgrundlage für sämtliche Objekte innerhalb einer betrachteten Laderaumszene bildet. Dazu ge-

³⁰ Je nach Detailierungsgrad kann die Anzahl der erforderlichen Bezugssysteme erweitert oder verringert werden. Im Rahmen dieser Arbeit erfolgt die Modellbeschreibung anhand von vier verschiedenen Koordinatensystemen.

hören u. a. das abzubildende Objekt (Ladegut) sowie das entsprechende Aufnahmesystem (Tiefenbildkameras). Innerhalb dieses Koordinatensystems lassen sich die Lage und die Orientierung der relevanten Objekte exakt beschreiben. Der Koordinatenursprung liegt beliebig im Objektraum³¹.

- **Kamerakoordinatensystem (X_K, Y_K, Z_K):**

Der Ursprung dieses rechtshändigen orthonormalen Koordinatensystems geht vom Projektionszentrum der Tiefenbildkamera aus (Linsenzentrum). Die Z_K -Achse entspricht dabei der optischen Achse der Kamera und zeigt nach vorn in Blickrichtung der abzubildenden Szene (positive Z_K -Koordinaten). Die X_K - und Y_K -Achse verlaufen parallel zu den Kanten des Bildsensors. Die Angaben im Kamerakoordinatensystem sind metrisch.

- **Bildkoordinatensystem (x, y):**

Innerhalb des Bildkoordinatensystems wird die betrachtete Szene auf die Bildebene der Tiefenbildkamera projiziert. Gemäß den Konventionen ist der Ursprung dieses Koordinatensystems um die Brennweite f_k von der Bildebene verschoben (s. Abschnitt 4.2.3). Die Bildebene wird ausgehend vom Schnittpunkt der optischen Achse mit der Bildebene durch die x - und y -Achse aufgespannt. Bei einer idealen Ausrichtung verlaufen diese Achsen parallel zu den Achsen des Kamerakoordinatensystems (X_K, Y_K). Die optische Achse steht rechtwinklig auf der Bildebene mit nach vorne gerichteter Blickrichtung der Kamera (s. übereinstimmende Ausrichtung zum Kamerakoordinatensystem).

- **Pixelkoordinatensystem (u, v):**

Im Pixelkoordinatensystem erfolgt die digitale Ausrichtung des Bildes (s. Kapitel 4.1.3, Diskretisierung und Quantisierung). Der Ursprung des zweidimensionalen Pixelkoordinatensystems liegt in der linken oberen Bildecke (ausgehend von der Aufnahmerichtung der Tiefenbildkamera). Dabei zeigt die u -Achse nach rechts und die v -Achse nach unten. Des Weiteren verlaufen die u - und die v -Achse kollinear zur x - und y -Achse der Bildebene. Die Angabe der Koordinaten erfolgt in Pixeln.

Anhand der getroffenen Konventionen wird es ermöglicht, die in Abbildung 4.7 dargestellte Ladeeinheit vom Objektraum in den Bildraum zu transformieren. Für diesen Abbildungsvorgang sind verschiedene Prozessschritte erforderlich, die in den folgenden Abschnitten – ausgehend vom Objektkoordinatensystem – sukzessive erläutert werden.

³¹ Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird der Laderaum als Objektraum aufgefasst. Dabei werden die X - und Y -Achse des Objektkoordinatensystems parallel zum Laderaumboden ausgerichtet und die Z -Achse steht senkrecht zu der aufgespannten Ebene (s. Kapitel 6.2.4).

4.2.2 Koordinatenüberführung in das Bezugssystem der Tiefenbildkamera

Zur digitalen Abbildung der betrachteten Ladeeinheit ist es in einem ersten Schritt erforderlich, die Ausgangskoordinaten vom Objektkoordinatensystem in das Kamerakoordinatensystem zu überführen (s. Abbildung 4.8). Die Basis hierfür bilden die jeweils vorgegebenen Koordinatenursprünge.

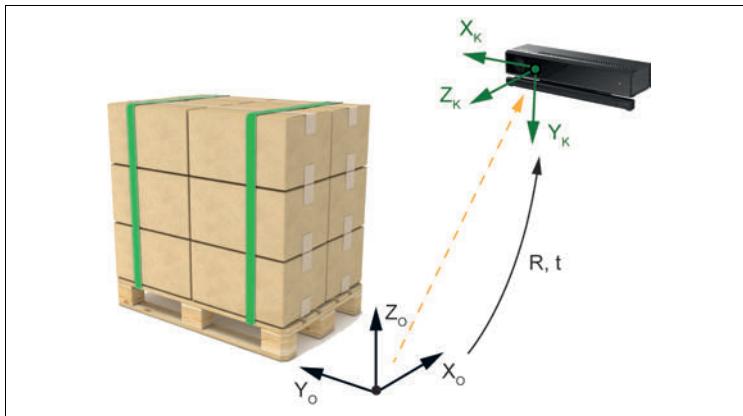


Abbildung 4.8: Überführung zwischen Objekt- und Kamerakoordinatensystem mittels entsprechender Rotations- (R) und Translationsvorgänge (t)

Ausgehend von den festgelegten Konventionen sowie den damit verbundenen geometrischen Berechnungsgrundlagen lassen sich die zwei vorhandenen kartesischen Koordinatensysteme mittels verschiedener Rotationen sowie anschließender Translation ineinander überführen ([KKS96], S. 49). Je nach Ausgangslage und Orientierung der positionierten Tiefenbildkamera innerhalb des Objektraums sind in einem ersten Schritt mehrere individuelle Grundrotationen um die einzelnen Koordinatenachsen (R_x , R_y , R_z) erforderlich ([Fol94], S. 209).

Rotation um die X-Achse mit dem Winkel α :

$$R_x(\alpha) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} \quad (4.6)$$

Rotation um die Y-Achse mit dem Winkel β :

$$R_y(\beta) = \begin{pmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{pmatrix} \quad (4.7)$$

Rotation um die Z-Achse mit dem Winkel γ :

$$R_z(\gamma) = \begin{pmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4.8)$$

Die aufgeführten Einzelrotationen lassen sich unter Einhaltung der richtigen Rotationsfolge zur Rotationsmatrix R zusammenfassen.

$$R = R_x \cdot R_y \cdot R_z = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix} \quad (4.9)$$

Im Anschluss an die Rotation erfolgt die Verschiebung des Koordinatenursprungs durch den Translationsvektor t . Dieser entspricht dem Abstand zwischen dem Ursprung des Objektkoordinatensystems und dem optischen Zentrum der Tiefenbildkamera ([KKS96], S. 49).

$$t = \begin{pmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{pmatrix} \quad (4.10)$$

Die Rotationen sowie die anschließende Addition der 3D-Translation lassen sich auch als eine gemeinsame Matrix-Vektor-Multiplikation darstellen ([Sch05], S. 33). Die hierfür erforderliche Transformationsmatrix M_{Ext} wird unter der Verwendung von homogenen Koordinaten³² wie folgt formuliert ([Bur16], S. 44):

$$M_{\text{Ext}} = \underbrace{\begin{pmatrix} r_{xx} & r_{xy} & r_{xz} & 0 \\ r_{yx} & r_{yy} & r_{yz} & 0 \\ r_{zx} & r_{zy} & r_{zz} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}}_{M_R} \cdot \underbrace{\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & t_x \\ 0 & 1 & 0 & t_y \\ 0 & 0 & 1 & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}}_{M_T} = \begin{pmatrix} R & t \\ 0^T & 1 \end{pmatrix} \quad (4.11)$$

Die Matrix M_{Ext} enthält alle relevanten externen Parameter, um die Position und die Orientierung der Tiefenbildkamera innerhalb des Objektraums beschreiben zu können. Bei fester Montage der Tiefenbildkamera – bspw. innerhalb des Laderaums – bleiben diese Angaben unverändert. Mittels der extrinsischen Parameter lässt sich die Überführung der dreidimensionalen Objektkoordinaten in das korrespondierende Koordinatensystem der Tiefenbildkamera wie folgt beschreiben:

³² Kartesische Koordinatensysteme können durch homogene Koordinaten erweitert werden ([HH03], S. 202). Durch die Verwendung homogener Koordinaten lassen sich alle erforderlichen räumlichen Transformationen u. a. durch einfache Multiplikation von 4x4-Transformationsmatrizen durchführen ([Hec95], S. 139). Auf die Einführung homogener Koordinaten wird im Rahmen dieser Arbeit verzichtet und daher auf die einschlägige Literatur verwiesen ([Fol94]; [DP11], S. 176; [BR04], S. 63).

$$\begin{pmatrix} X_K \\ Y_K \\ Z_K \\ 1 \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{pmatrix} r_{xx} & r_{xy} & r_{xz} & t_x \\ r_{yx} & r_{yy} & r_{yz} & t_y \\ r_{zx} & r_{zy} & r_{zz} & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}}_{M_{\text{Ext}}} \cdot \begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (4.12)$$

4.2.3 Kameramodell zur projektiven Transformation

Damit aus dem betrachteten 3D-Objekt ein entsprechendes 2D-Abbild generiert werden kann, wird in einem nächsten Schritt die zentralperspektivische Projektion vom Kamerakoordinatensystem in das Bildkoordinatensystem vorgenommen. Zur Erläuterung dieses Vorgangs wird auf das klassische Lochkameramodell zurückgegriffen, das primär dazu dient, die grundlegenden Eigenschaften einer realen Kamera zu erläutern und das erforderliche Modell sukzessive zu erweitern.

Innerhalb des Abbildungsprozesses stellt die Lochkamera eine idealisierte Modellbeschreibung für die Zentralprojektion dar. Das Funktionsprinzip dieses linsenlosen Modells beruht darauf, dass alle Punkte einer betrachteten Szene durch ein entsprechend kleines Loch auf die dazugehörige Bildebene projiziert werden ([MSK*04], S. 49). Aus mathematischer Sicht ist dieses Loch als ein einzelner Punkt anzusehen, der in der Fachliteratur auch Brennpunkt oder Projektionszentrum P genannt wird ([KKS96], S. 29). Ausgehend von diesem Zentrum verläuft in Blickrichtung der Kamera die optische Achse. Der Schnittpunkt der optischen Achse mit der Bildebene wird als Bildhauptpunkt c definiert ([Str02], S. 20). Der Abstand zwischen dem Bildhauptpunkt und dem Projektionszentrum wird als Brennweite aufgefasst; sie wird im Rahmen dieser Arbeit – in Anlehnung an die veröffentlichten Konventionen – mit f_K abgekürzt³³. Durch die Brennweite wird innerhalb der geometrischen Modellierung u. a. das Darstellungsverhältnis zwischen der realen Objektbe trachtung und dem projizierten Abbild festgelegt. Eine vereinfachte Darstellung des Lochkameramodells ist Abbildung 4.9 zu entnehmen. Darin befindet sich die Bildebene in der bereits beschriebenen Positivlage, d. h. vor dem Projektionszentrum, wodurch die Orientierung und die Lage des projizierten Abbildes an der betrachteten Szene ausgerichtet sind ([HZ04], S. 154).

³³ Der Begriff Kamerakonstante wird im Rahmen dieser Ausarbeitung synonym für Brennweite, Bildweite oder Bilddistanz verwendet. Hinsichtlich der generellen Diskussionen zur zeitgemäßen Begriffsverwendung wird auf die weiterführende Literatur verwiesen ([KKS96], S. 46; [Luh10a], S. 18).

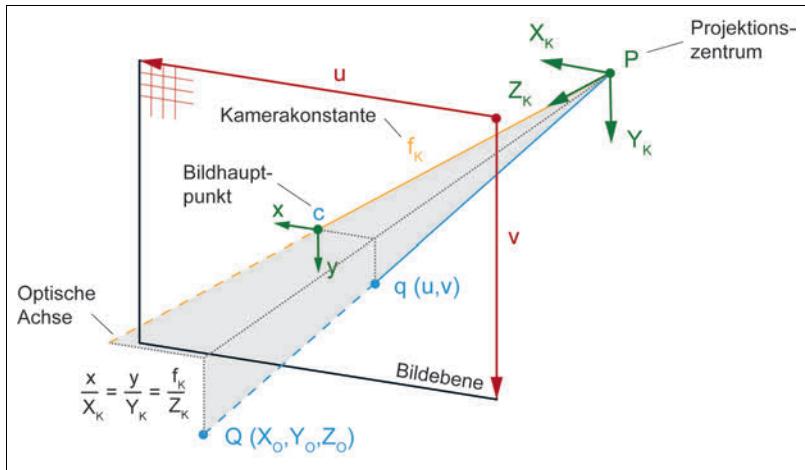


Abbildung 4.9: Projektionsschema zur Überführung der 3D-Kamerakoordinaten in die 2D-Bildecke

Anhand des aufgeführten Kameramodells lassen sich für die erforderliche Zentralprojektion folgende Verhältnisgleichungen aufstellen – gemäß den Vorgaben der Elementargeometrie ([KKS96], S. 42):

$$\frac{x}{X_K} = \frac{y}{Y_K} = \frac{f_K}{Z_K} \quad (4.13)$$

Zur Überführung des dreidimensionalen Objektpunktes vom Kamerakoordinatensystem in das zweidimensionale Bildkoordinatensystem (Bildecke) gilt somit:

$$x = f_K \cdot \frac{X_K}{Z_K} \text{ und } y = f_K \cdot \frac{Y_K}{Z_K} \quad (4.14)$$

Die aufgezeigten Beziehungen aus Gleichung (4.14) lassen sich unter Verwendung homogener Koordinaten auch in Matrixform ausformulieren ([MSK*04], S. 53; [Fie14], S. 17):

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_K & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f_K & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} X_K \\ Y_K \\ Z_K \\ 1 \end{pmatrix} \quad (4.15)$$

mit

$$M_P = \begin{pmatrix} f_K & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f_K & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{pmatrix} f_K & 0 & 0 \\ 0 & f_K & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}}_{M_F} \cdot \underbrace{\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}}_{M_K} \quad (4.16)$$

Die Projektionsmatrix M_P lässt sich wiederum in zwei einzelne Matrizen aufteilen (M_F und M_K). Darin charakterisiert M_K die kanonische und M_F die perspektivische Projektion ([MSK⁰⁴], S. 53). Mit $f_K = 1$ werden normierte Koordinaten auf die Bildebene transformiert, wodurch sich bspw. der Verlauf der radialen Verzeichnung vereinfacht darstellen lässt (s. Kapitel 4.3.1).

Anhand des beschriebenen Lochkameramodells und der dahinterstehenden Transformationsprozesse lässt sich die Abbildung einer 3D-Szene auf die ideelle Bildebene sehr vereinfacht darstellen. Für den Einsatz einer realen Tiefenbildkamera sind jedoch weitere Abbildungseigenschaften zu berücksichtigen, die im nächsten Abschnitt eingeführt und erläutert werden. ([Fie14], S. 20)

4.2.4 Berücksichtigung von Verzeichnungsfehlern

Der bisher vorgestellte Kameraaufbau stellt eine ideale mathematische Beschreibung der Lochkamera dar. In einer realen Kamera sind jedoch Linsensysteme verbaut, deren physikalische Eigenschaften zu Abbildungsfehlern führen. Zur Berücksichtigung dieser Restriktionen wird das bisherige ideale Kameramodell durch die physikalischen Eigenschaften eines realen Linsensystems erweitert, d. h. von der Lochkamera zur Linsenkamera überführt ([KKS96], S. 46). Durch die Einbindung eines realen Linsensystems bleiben zwar die geometrischen Eigenschaften des Lochkameramodells erhalten; allerdings führen die Krümmungseigenschaften einer Linse zu einem nichtlinearen Versatz der Bildpunkte von der eigentlichen Idealposition, wodurch bspw. gerade Linien durch Krümmungen dargestellt werden ([Pom16], S. 28). Bei diesen sogenannten Verzeichnungsfehlern wird zwischen radialer und tangentialer Verzerrung unterschieden ([Tsa87], S. 328).

Das Ausmaß des radialen Verzeichnungsfehlers ist u. a. abhängig von der Blendenlage und dem Abstand des Bildpunktes zum optischen Zentrum. Dabei nimmt die Verzeichnung von der Bildmitte zum Bildrand zu. Je nach Lage der Blende ergeben sich dabei zwei verschiedene Formen der radialen Verzerrung ([Luh10a], S. 40). Eine tonnenförmige Verzeichnung tritt auf, wenn sich ausgehend vom Bildraum die Blende hinter der Linse befindet. Dies spiegelt sich in einem negativen Verzerrungsparameter wider. Dementsprechend ruft die Verschiebung der Blende vor die Linse eine kissenförmige Verzerrung hervor (positiver Verzeichnungsparameter). In Abbildung 4.10 sind die beiden Verzeichnungsformen im Vergleich zu einem idealen Ausgangsbild zu sehen. Anhand der betrachteten Ladeeinheit und der damit verbundenen Konturverläufe ist deutlich zu erkennen, wie sich die eigentli-

che Grundform der Ladeeinheit kissen- oder tonnenförmig verzerrt (ausgehend von der Bildmitte). Durch die auftretende Verzeichnung wird nicht nur die Kontur der Ladeeinheit verzerrt, sondern damit geht auch eine Verfälschung der eigentlichen Kantenlänge einher, was wiederum zu einer inkorrekt Volumenbestimmung führen könnte und somit zwingend beim Abbildungsvorgang sowie der späteren Datenverarbeitung zu berücksichtigen ist.



Abbildung 4.10: Vergleich der radialen Verzeichnungsarten am Beispiel einer palettierten Ladeeinheit

Für die Modellierung der radiaen Verzerrung gibt es verschiedene Ansätze, bei denen eine unterschiedliche Anzahl von Verzerrungsparametern berücksichtigt wird ([Luh10a], S. 57). Einen in der Literatur und Praxis weitverbreiteten Ansatz bildet die Verwendung von Polynomfunktionen mit unterschiedlichen Graden ([HZ08], S. 190; [KKS96], S. 56; [Luh10a], S. 54). Im Rahmen der vorliegenden Modellbetrachtung lässt sich die radiale Verzeichnung der Linse durch folgende Terme berücksichtigen [Ope18]:

$$\begin{aligned}\Delta x_{\text{rad}} &= x (k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) \\ \Delta y_{\text{rad}} &= y (k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6)\end{aligned}\tag{4.17}$$

mit

$$r = \sqrt{x^2 + y^2}\tag{4.18}$$

Anhand der in Gleichung (4.17) genannten Verzerrungskoeffizienten lassen sich – je nach Dominanz der Parameter – unterschiedliche Verzeichnungsverläufe modellieren. Bei einer Dominanz von k_1 wird durch dessen Vorzeichen eine kissen- oder tonnenförmige Verzeichnung festgelegt ([Pet13], S. 107). Der Einfluss von k_2 und k_3 macht sich hingegen durch eine kubische Parabelform bemerkbar. Dadurch lassen sich nicht nur die typischen kissen- und tonnenförmigen Verzeichnungen modellieren, sondern auch wellenförmige Verzeichnungen mit unterschiedlichen Steigungsverläufen ([Luh10a], S. 57). Die Bestimmung und Berücksichtigung von drei Koeffizienten ist in dieser Arbeit dadurch begründet,

dass im Rahmen der nachfolgenden experimentellen Untersuchungen (s. Kapitel 4.3.1) ein Vergleich mit den hinterlegten Verzeichnungsparametern aus der Werkskalibrierung des Kameraherstellers vorgenommen wird und kameraintern die Parameter k_1 , k_2 sowie k_3 hinterlegt sind.

Neben der radialen Verzeichnung existiert auch eine tangentiale Verzeichnung. Diese tritt auf, wenn eine Linse äußerst schief oder nicht zentriert verbaut wurde ([HZ08], S. 189). Durch die inzwischen hohe Fertigungsgenauigkeit ist dieser Einflussfaktor zwar als vernachlässigbar klein einzustufen ([Luh10a], S. 58), der Vollständigkeit halber und aufgrund des besseren Verständnisses für die durchzuführenden Kamerakalibrierungen werden an dieser Stelle die damit verbundenen Parameter jedoch mit aufgeführt. Die relevanten Koeffizienten für die tangentiale Verzeichnung werden mit p_1 und p_2 abgekürzt. Die tangentialen Verzeichnungsanteile lassen sich unter Berücksichtigung der in Gleichung (4.18) vorgegebenen Konventionen durch folgende Funktion ermitteln [Ope18]:

$$\begin{aligned}\Delta x_{\tan} &= 2p_1xy + p_2(r^2 + 2x^2) \\ \Delta y_{\tan} &= p_1(r^2 + 2y^2) + 2p_2xy\end{aligned}\tag{4.19}$$

Zur Bestimmung der korrigierten Bildkoordinaten (x' , y') werden die aufgeführten Terme der radialen und der tangentialen Verzeichnung zu einer Gesamtfunktion zusammengefasst und auf die Initialkoordinaten der perspektivischen Transformation (x , y) angewendet (s. Kapitel 4.2.3).

$$\begin{aligned}x' &= x + \Delta x_{\text{rad}} + \Delta x_{\tan} \\ y' &= y + \Delta y_{\text{rad}} + \Delta y_{\tan}\end{aligned}\tag{4.20}$$

4.2.5 Bestimmung der Pixelkoordinaten

Bei der bisherigen Modellbeschreibung wurde u. a. davon ausgegangen, dass die Projektion auf eine ideale Bildebene erfolgt und darin der Ursprung des Bildkoordinatensystems deckungsgleich mit der Bildmitte ist ([Fie14], S. 20; [AGD07], S. 76). Bei der Betrachtung einer realen Kamera liegen hierbei jedoch einige systembedingte Unterscheidungen vor, die für die Überführung in das Pixelkoordinatensystem zusätzlich berücksichtigt werden müssen.

Im Gegensatz zum idealen Kameramodell hat das Pixelkoordinatensystem seinen Ursprung nicht mehr im Bildhauptpunkt, sondern notationsgemäß in der oberen Ecke des Bildes. Des Weiteren stimmt der Bildhauptpunkt nicht mehr zwingend mit dem Mittelpunkt des Bildes

überein, sondern kann je nach Kamerafertigung minimal davon abweichen. Für die weitere Modellbetrachtung werden daher die Bildhauptpunktkoordinaten nicht mehr durch c_x und c_y definiert, sondern zur besseren Modellunterscheidung in den Pixelkoordinaten u_0 und v_0 angegeben. ([Fie14], S. 20)

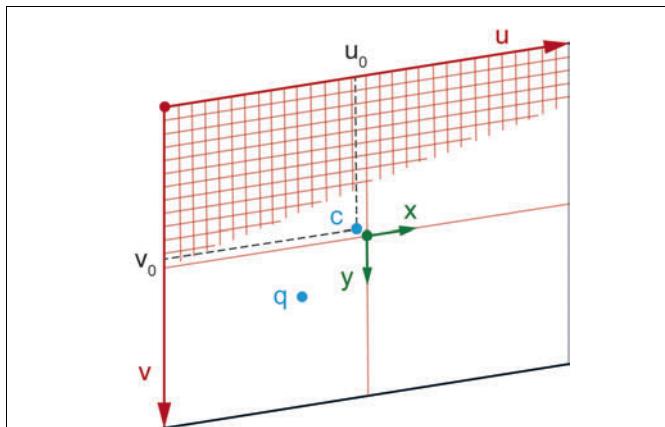


Abbildung 4.11: Überführung der Koordinaten in das Pixelkoordinatensystem mit Bildhauptpunktverschiebung (Darstellung in Aufnahmerichtung der Tiefenbildkamera, vgl. Abbildung 4.7)

Eine weitere Modellanpassung ergibt sich durch die Überführung der metrischen Koordinaten (Einheit: mm) in pixelbasierte Koordinaten (Einheit: Pixel). Hierfür ist ein Umrechnungsfaktor erforderlich, der die sensorspezifische Skalierung in Abhängigkeit von der Pixelgröße in u- und v-Richtung berücksichtigt. Dies erfolgt unter Einbeziehung der Herstellerangaben zum Sensoraufbau – horizontale und vertikale Pixeldimensionierung (m_x/m_y) – in Kombination mit der Kamerakonstanten f_K , wodurch sich letztendlich die Anzahl der Pixel pro metrischer Einheit bestimmen lässt. In Abhängigkeit von der Kamerakonstante f_K können die Teilkomponenten f_x und f_y ermittelt werden³⁴. ([Fie14], S. 20; [Gru12], S. 6)

$$f_x = \frac{f_K}{m_x} \quad \text{und} \quad f_y = \frac{f_K}{m_y} \quad (4.21)$$

Neben dem Umrechnungsfaktor muss für die Projektion in das Pixelkoordinatensystem auch die zuvor erwähnte Bildhauptpunktverschiebung berücksichtigt werden, wodurch sich für die Bestimmung der Pixelkoordinaten u und v folgende Abbildungsgleichung zusammenfassen lässt ([Gan02], S. 55):

³⁴ Weist der verbaute Sensor eine exakt quadratische Kantenlänge auf, dann entspricht $f_x = f_y = f$. Es muss also keine Unterscheidung zwischen den Parametern vorgenommen werden. Zur besseren Veranschaulichung sowie zum Vergleich der Kalibriergebnisse (s. Kapitel 4.3) werden bei der vorliegenden Modellbeschreibung beide Parameter getrennt betrachtet ($f_x \neq f_y$).

$$u = f_x x' + u_0 \quad \text{und} \quad v = f_y y' + v_0 \quad (4.22)$$

Des Weiteren wird in einigen Anwendungsfällen zusätzlich ein sogenannter Scherungsfaktor s aufgeführt ([Sch05], S. 45). Dieser kommt zum Tragen, wenn die optische Achse des Objektivs und der Bildsensor nicht senkrecht zueinander ausgerichtet sind ([Luh10a], S. 46). Durch eine automatisierte und äußerst präzise Herstellung der heutigen Bildsenso- ren ist dieser Faktor jedoch als vernachlässigbar klein anzusehen und bleibt in der finalen Modellbetrachtung unberücksichtigt ([BOE⁺15], S. 316; [Sch05], S. 45). Anhand der auf- geführten Beschreibung lässt sich die finale Überführung der verzerrungsfreien und nor- mierten Koordinaten in das erforderliche Pixelkoordinatensystem wie folgt formulieren ([Bur16], S. 5):

$$\begin{pmatrix} u \\ v \\ 1 \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{pmatrix} f_x & 0 & u_0 \\ 0 & f_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}}_{M_{\text{int}}} \cdot \begin{pmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{pmatrix} \quad (4.23)$$

mit

$$M_{\text{Int}} = \begin{pmatrix} m_x & 0 & u_0 \\ 0 & m_y & v_0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} f_K & 0 & 0 \\ 0 & f_K & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4.24)$$

Die Matrix M_{int} enthält die internen Abbildungsparameter der Kamera; durch diese wird der Abbildungsvorgang auf die Pixelebene beschrieben. Die Transformationsmatrix wird in der Literatur auch als Kameramatrix oder intrinsische Matrix aufgeführt ([HZ08], S. 163; [Luh18], S. 29). Die Bestimmung der intrinsischen Parameter erfolgt in Kapitel 4.3.

4.2.6 Zusammenfassung der Modellgleichungen

In den vorherigen Abschnitten wurde der Abbildungsprozess einer 3D-Szene auf die 2D- Bildebene iterativ beschrieben. Dabei wurde jede Erweiterung des betrachteten Kame- ramodells separat erläutert. Zur besseren Veranschaulichung werden an dieser Stelle die einzelnen Verarbeitungsstufen anhand einer betrachteten 3D-Objektkoordinate zusammen- gefasst (s. Punkt Q in Abbildung 4.7). Die vollständige projektive Überführung des be- trachteten Ladeeinheitenpunkts Q (X_0, Y_0, Z_0) vom metrischen Objektraum auf die 2D- Pixelebene mit den dazugehörigen Punktkoordinaten q (u, v) lässt sich mittels der Ge- samttransformationsmatrix M_T realisieren. Den Hauptbestandteil dieses Vorgangs bildet die zuvor eingeführte extrinsische und die intrinsische Matrix.

$$\begin{pmatrix} u \\ v \\ 1 \end{pmatrix} = M_T \cdot \begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (4.25)$$

mit

$$M_T = \underbrace{\begin{pmatrix} f_x & 0 & u_0 \\ 0 & f_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}}_{M_{\text{Int}}} \cdot \underbrace{\begin{pmatrix} r_{xx} & r_{xy} & r_{xz} & t_x \\ r_{yx} & r_{yy} & r_{yz} & t_y \\ r_{zx} & r_{zy} & r_{zz} & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}}_{M_{\text{Ext}}} \quad (4.26)$$

Die Transformationsmatrix M_T stellt dabei ein lineares Abbildungsmodell dar, in welchem die zuvor erwähnten Verzeichnungsfehler der Linse allerdings nicht berücksichtigt werden. Aus diesem Grund bietet es sich an, die Überführung anhand von vier verschiedenen Verarbeitungsstufen zu betrachten, die sich unter Berücksichtigung der zuvor getroffenen Konventionen und Erläuterungen wie folgt zusammenfassen lassen (in Anlehnung an ([Gan02], S. 58; [Mod08], S. 16; [Bur16], S. 7)):

Stufe 1: Externe Transformation

- o Die 3D-Ausgangskoordinaten werden vom Objektkoordinatensystem in das Bezugssystem der Tiefenbildkamera überführt.

$$\begin{pmatrix} X_K \\ Y_K \\ Z_K \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R & t \\ 0^T & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (4.27)$$

Stufe 2: Projektion auf die Bildebene

- o Von der betrachteten 3D-Szene wird ein 2D-Abbildung auf eine ideale Bildebene projiziert.

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} X_K \\ Y_K \\ Z_K \\ 1 \end{pmatrix} \quad (4.28)$$

Stufe 3: Bildentzerrung

- o Die Korrektur der projizierten Bildkoordinaten wird unter Berücksichtigung der relevanten Verzeichnungskoeffizienten durchgeführt.

$$\begin{aligned}x' &= x(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) + 2p_1 xy + p_2(r^2 + 2x^2) \\y' &= y(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) + p_1(r^2 + 2y^2) + 2p_2 xy\end{aligned}\quad (4.29)$$

Stufe 4: Interne Transformation

- Die verzerrungsfreien Bildkoordinaten werden durch die Einbeziehung der internen Abbildungsparameter in das Pixelkoordinatensystem überführt.

$$\begin{pmatrix} u \\ v \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_x & 0 & u_0 \\ 0 & f_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{pmatrix} \quad (4.30)$$

Im Rahmen der bisherigen Ausführungen wurde aufgezeigt, wie sich eine betrachtete Ladeeinheit aus dem Objektraum auf die Bildebene überführen lässt (Vorwärtstransformation). Für die spätere Verarbeitung der aufgenommenen Laderaumszenen und insbesondere für die experimentelle Untersuchung der Tiefendaten müssen jedoch auch Teil- und Rücktransformationen berücksichtigt werden – bspw. von der Bildebene in den Bildraum oder vom Bildraum in den Objektraum. Die entsprechende Rücktransformation von der normierten 2D-Ebene in das 3D-Kamerakoordinatensystem lässt sich durch eine Invertierung der Matrizen aus Gleichung (4.26) realisieren ([AGD07], S. 77). Des Weiteren ist für die vollständige Rückprojektion die Einbeziehung eines inversen Verzeichnungsmodells erforderlich ([DL16], S. 15). Unter der Einhaltung der damit verbundenen Vorgaben können für die spätere Verarbeitung der Daten alle relevanten Transformationsschritte realisiert werden.

Anhand der aufgeführten Modellerläuterungen lässt sich festhalten, dass für die Überführung einer betrachteten Szene auf die 2D-Bildebene verschiedene Kameraparameter erforderlich sind. Hierzu gehören insbesondere diejenigen Parameter, die die internen Abbildungseigenschaften sowie die Lage und Orientierung der Tiefenbildkamera beschreiben. Für die erfolgreiche Durchführung des Abbildungsprozesses sind diese Parameter als eine zwingende Voraussetzung anzusehen. Im Rahmen der bisherigen Ausführungen liegen diese Parameter allerdings noch nicht vor, d. h., sie müssen erst noch ermittelt werden. Die Bestimmung dieser Parameter erfolgt im Rahmen einer sogenannten Kamerakalibrierung, welche den Bestandteil der Messgenauigkeitsanalyse bildet und im nächsten Kapitel erläutert wird.

4.3 Messgenauigkeit der Tiefenbildkamera

Die detaillierte Beschreibung des Abbildungsvorgangs hat gezeigt, dass für die Bereitstellung von geeigneten Tiefenbilddaten verschiedene Parameter und Variablen notwendig sind. Damit sich anhand einer Tiefenbildaufnahme die Kantenlänge oder Fläche eines betrachtenden Objekts ermitteln lässt, werden u. a. die korrekte Überführung der betrachteten Szene in das Pixelkoordinatensystem sowie die adäquate Generierung der Tiefendaten vorausgesetzt. Im Kontext dieser Grundanforderungen ist die Tiefenbildkamera als ein elektrisches Messgerät anzusehen. Gemäß der Metrologie muss in diesem Zusammenhang für jedes Messgerät sichergestellt werden, dass die Messergebnisse eine nachweisbare Gültigkeit besitzen (Stichwort: Kalibrierung).³⁵ Je nach Messaufgabe werden die hierfür eingesetzten Messgeräte hinsichtlich ihrer Genauigkeit analysiert, um bspw. die Maßhaltigkeit innerhalb eines bestimmten Messbereichs vorgeben zu können. Durch eine solche Messanalyse kann sichergestellt werden, dass das eingesetzte Messgerät für das vorgesehene Anwendungsgebiet hinreichend genaue Daten liefert. ([Müh17a], S. 5)

Beim Einsatz digitaler Bildaufnahmesysteme sind ähnliche messtechnische Vorgehensweisen erforderlich. Damit die Tiefenbildkamera zu Messzwecken eingesetzt werden kann, muss deren Messverhalten auf etwaige Abweichungen hin überprüft werden. Bei der Beurteilung einer ToF-Kamera betrifft dies insbesondere die Analyse der intrinsischen Kameraparameter sowie der akquirierten Tiefenmesswerte. In der Literatur wird dabei zwischen der geometrischen Kamerakalibrierung sowie der Tiefenkalibrierung unterschieden ([ZMD⁺16], S. 117).

Für die Analyse der intrinsischen Kameraparameter gibt es verschiedene Kalibriermethoden [RF06]. Im folgenden Abschnitt wird zunächst die geometrische Kamerakalibrierung erläutert und die Parameterbestimmung anhand einer Open-Source-Kalibriersoftware beschrieben. Darauf aufbauend erfolgt ein Parametervergleich zwischen den ermittelten Werten aus der Eigenkalibrierung³⁶ sowie den hinterlegten Werksangaben. Des Weiteren soll anhand der durchgeföhrten Auswertung eine Genauigkeitsaussage getroffen werden können, ob die hinterlegten Werksparameter für den angestrebten Laderaumeinsatz ausreichen oder ob zur Erhöhung der Messgenauigkeit nachträgliche Parameteranpassungen erforderlich sind.

Ähnlich verhält es sich bei der Evaluierung der Tiefenmesswerte. Es müssen vorab die Zuverlässigkeit und die Genauigkeit der erfassten Distanzwerte geprüft werden, um die

³⁵ Die allgemeinen Grundlagen der Metrologie (Wissenschaft des Messens) sowie die damit in Verbindung stehenden Begrifflichkeiten, die nachfolgend zur Erläuterung verwendet werden, sind der weiterführenden Literatur zu entnehmen ([Müh17a]; [Kry15]; [Bri12]; [Hof12]).

³⁶ Als Eigenkalibrierung wird im Folgenden die Durchführung einer Kalibrierung aufgefasst, bei der die intrinsischen Kameraparameter vom Verfasser selbst – unter Zuhilfenahme einer Kalibriersoftware – ermittelt werden.

Aussagekraft der generierten Messwerte für den Einsatz im Laderraum einstufen zu können. Dieser Aspekt wird im Rahmen einer Tiefenkalibrierung analysiert. Für die damit verbundenen Messungen wurden ein für den Laderraumeinsatz abgestimmtes Messmodell konzipiert und erste Versuchsreihen bezüglich der Distanzwertmessungen durchgeführt. Anhand der sich daraus ergebenden Ergebnisse lassen sich erste Aussagen über das Distanzverhalten des ToF-Sensors sowie über den weiteren Untersuchungsbedarf bestimmen.

Zur adäquaten Auswertung der Vielzahl an erfassten Messwerten wird im Rahmen dieser Arbeit auf unterschiedliche statistische Tests und Verfahren zurückgegriffen. Durch diese Vorgehensweise wird es ermöglicht, die zu ermittelnden Kennwerte auf ihre Allgemeingültigkeit hin zu validieren. Ferner kann so garantiert werden, dass aus den erfassten Messwerten statistisch abgesicherte Schlussfolgerungen abgeleitet werden können. Da die Instrumente der Statistik als sehr umfangreich anzusehen sind, wird an dieser Stelle nicht weiter auf die Bestimmung der einzelnen Standardkennwerte eingegangen. Zur thematischen Vertiefung von Normalverteilungsprüfungen und Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen oder zur Berechnung von Mittelwerten, Standardabweichungen, Varianzen, Residuen etc. wird auf die einschlägige Literatur der Statistik und Messtechnik verwiesen (s. ([JL17]; [Müh17a]; [FHK⁺16]; [Kry15]; [Pue15]; [Hof12]; [Bri12])).

4.3.1 Genauigkeitsvergleich der intrinsischen Kameraparameter

Bei der mathematischen Modellierung der Tiefenbildkamera wurden für den Abbildungsprozess sowohl die Relevanz der extrinsischen als auch der intrinsischen Kameraparameter erläutert (s. Kapitel 4.2). Für die spätere Erprobung im Laderraum sind statische Aufnahmen vorgesehen. Hierzu werden die jeweiligen Tiefenbildkameras in einer vorab bestimmten Anordnung montiert. Dadurch werden Lage und Orientierung der jeweiligen Kamera fest vorgegeben sein. Die Tiefenbildkameras besitzen somit eine unveränderbare Aufnahmeposition mit festem Bezug zueinander sowie zum Laderraumkoordinatensystem. Aus diesem Grund wird in den folgenden Ausführungen nicht weiter auf die Bestimmung der extrinsischen Parameter eingegangen. Der Fokus des Abschnitts wird allein auf die Ermittlung und den Vergleich der intrinsischen Parameter gelegt.

Bei der Erläuterung des Kameramodells wurden in den einzelnen Transformationsschritten unterschiedliche Variablen und Parameter aufgeführt. Hierzu gehörten insbesondere die Kamerakonstante, der Bildhauptpunkt sowie die Verzeichnungskoeffizienten. Sie bildeten für die finale Beschreibung des Kameramodells die Grundlage, um eine möglichst exakte geometrische Überführung zwischen dem 3D-Kamerakoordinatensystem und dem 2D-Pixelkoordinatensystem realisieren zu können. Im Rahmen der aufgestellten Kalibriermatrix M_{Int} wurden sie als interne Orientierungsparameter zusammengefasst. Zur Bestimmung dieser Parameter ist die Durchführung einer geometrischen Kamerakalibrierung er-

forderlich. In der Literatur existieren hierzu verschiedene Kalibriermethoden, die sowohl für herkömmliche Digitalkameras als auch für ToF-Kameras genutzt werden können [RF06]. Ferner gibt es verschiedene Lösungsansätze zur Durchführung einer Kamerakalibrierung, wodurch sich die existierenden Kalibriermethoden wiederum unterschiedlich klassifizieren lassen ([Luh10b], S. 555; [Tsa87]; [Zha00], S. 1330). Als ein im Bereich des Maschinellen Sehens inzwischen sehr verbreiteter und etablierter Lösungsansatz ist das Grundprinzip nach Zhang anzusehen [Zha00]. Diese Kalibermethode basiert auf dem zuvor beschriebenen Kameramodell, wodurch sich die mathematischen Funktionen der Zentralprojektion anwenden lassen. Die Vorgehensweise zur Durchführung einer Kamerakalibrierung nach Zhang lässt sich verallgemeinert wie folgt zusammenfassen³⁷ ([Zha98], S. 8; [Bur16], S. 9):

- Zur Vorbereitung wird ein Kalibermuster (bspw. in Form eines Schachbrettfeldes) auf eine plane Oberfläche gedruckt. Ausgehend von dieser Kalibriertafel werden anschließend Einzelaufnahmen aus unterschiedlichen Perspektiven getätigt.
- Zur weiteren Verarbeitung werden in jeder Kaliberaufnahme die relevanten Merkmalspunkte detektiert, sodass sich die korrespondierenden Punktpaare eines jeden Schachbrettmusters beschreiben lassen (vgl. Abbildung 4.12).
- Durch die vorgegebene Struktur des Schachbrettmusters und die vorliegenden Punktrelationen lassen sich die detektierten Merkmalspunkte von der Kalibrierebene auf die Sensorebene abbilden (vgl. Kapitel 4.2). In der Literatur wird dieser Vorgang als eine sogenannte Homografie aufgefasst ([Zha00], S. 1331). Dabei wird die z-Ebene der in Gleichung (4.26) beschriebenen Transformationsmatrix gleich null gesetzt. Die Ausgangsmatrix wird dadurch normalisiert und auf eine 3×3 Homografimatrix H reduziert. Unter Berücksichtigung der erforderlichen Restriktionen lässt sich für die lineare Abbildung der detektierten Punktpaare eine Abbildungsmatrix in folgender Form aufstellen ([Sch05], S. 18):

$$\begin{pmatrix} u \\ v \\ 1 \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{pmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{pmatrix}}_{H \text{ oder } M_H} \cdot \begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (4.31)$$

mit den darin enthaltenen Kollinearitätsgleichungen:

³⁷ Die Ermittlung der intrinsischen Kameraparameter erfolgt mittels einer Software (s. Kapitel 4.3.2). Daher wird an dieser Stelle auf die umfangreiche Herleitung der einzelnen Rechenschritte verzichtet. Eine thematische Vertiefung ist in der entsprechenden Fachliteratur zu finden ([Bur16]; [Zha98]).

$$u = \frac{h_{11}X + h_{12}Y + h_{13}}{h_{31}X + h_{32}Y + h_{33}} \quad (4.32)$$

$$v = \frac{h_{21}X + h_{22}Y + h_{23}}{h_{31}X + h_{32}Y + h_{33}}$$

Anhand der Vielzahl an Kalibrieraufnahmen ist das aufgeführte Gleichungssystem überbestimmt, d. h., die Homografie wird in einer ersten Instanz geschätzt. Das Ergebnis wird anschließend genutzt, um die rauschbehafteten Werte mittels der Methode der kleinsten Fehlerquadrate zu optimieren.

- In einem nächsten Bearbeitungsschritt werden die Ergebnisse der linearen Lösung genutzt, um die noch fehlenden Verzeichnungskoeffizienten zu bestimmen. Für diesen iterativen Lösungsvorgang werden u. a. die in Gleichung (4.16) aufgestellten Verzeichnungsterme verwendet. Bei der finalen Bestimmung der Parameter gilt es generell zu berücksichtigen, dass rauschbehaftete Näherungswerte verwendet werden, die aufgrund der vorhandenen Überbestimmung eine Optimierung der Gesamtlösung erfordern – bspw. mittels der Levenberg-Marquardt-Methode (s. [Mor78]).

Anhand der beschriebenen Vorgehensweise lassen sich alle erforderlichen intrinsischen Parameter für die Tiefenbildkamera ermitteln. Die Beschreibung der Kalibermethode zeigt bereits auf, dass die iterative Bestimmung der Parameter mit einem erheblichen Rechenaufwand verbunden ist. Für die Durchführung einer Kamerakalibrierung haben sich daher über die letzten Jahre hinweg etliche kommerzielle sowie frei verfügbare Kalibriertools hervorgetan ([Bou15]; [Ope18], [Met16]; [Wie15]). Sie vereinfachen nicht nur den Zugang zur Durchführung einer Eigenkalibrierung, sondern der damit verbundene Arbeitsaufwand wird zudem deutlich reduziert.³⁸

Gemäß den bereits genannten Vorgaben ist für die Kalibermethode nach Zhang eine Kalibiertafel mit einem entsprechenden Muster erforderlich. Im vorliegenden Fall wurde ein Schachbrettmuster mit 7 x 4 Feldern auf eine stabile Hartschaumplatte gedruckt. Diese wurde vermessen, um die relevanten Ausgangsparameter (Feldanzahl, Feldgröße, Eckabstände etc.) für die spätere Auswertung im Programm hinterlegen zu können. Anhand dieser Voreinstellung wurden anschließend 60 Kalibrieraufnahmen aus verschiedenen Perspektiven und unterschiedlichen Abständen zur Kamera generiert. Ausschlaggebend für eine geeignete Aufnahme war die korrekte Detektion der Punktpaare³⁹. Im Rahmen der Bildakquisition wurde die vollständige Punktdetektion durch eine grüne Bildmarkierung

³⁸ Für die Bestimmung der intrinsischen Kameraparameter wurde im Rahmen dieser Arbeit auf den Programmcode der Open-Source-Software „MetriCam“ zurückgegriffen [Met16].

³⁹ Für die Detektion der relevanten Punktpaare/Kalibrierfelder existieren unterschiedliche Verfahren und Algorithmen. Details hierzu sind u. a. in [PFM¹⁴] und [FDP¹⁶] zu finden.

visuell unterstützt (s. Abbildung 4.12). Nach erfolgreicher Erfassung der erforderlichen Bilderanzahl wurde die Auswertung des Kalibrierprozesses im Programm gestartet, wodurch die intrinsischen Parameter ermittelt und die jeweiligen Ergebnisse für die weitere Analyse abgespeichert werden konnten.

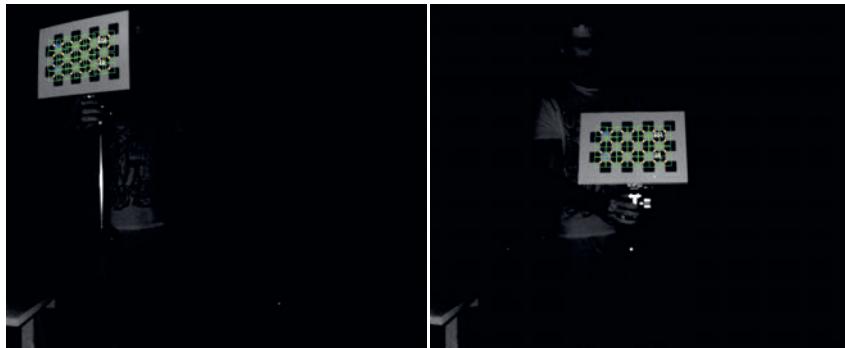


Abbildung 4.12: Auszug aus den getätigten Kalibrieraufnahmen aus verschiedenen Positionen und mit unterschiedlicher Tafelorientierung

Anhand der geschilderten Prozedur wurden alle in dieser Arbeit eingesetzten Tiefenbildkameras kalibriert. Zur statistischen Absicherung der Kalibrierergebnisse wurden pro Kamera 10 Kalibrierdurchgänge durchgeführt. Um die Genauigkeit der ermittelten Parameter besser bewerten zu können, wurden diese stufenweise nach verschiedenen Kriterien bewertet. Für die erste Bewertungsstufe wurden die ermittelten Standardabweichungen sowie die jeweiligen Reprojektionsfehler aus den einzelnen Kalibrierdurchgängen betrachtet. Die jeweilige Standardabweichung sollte dabei eine Größenordnung unter dem eigentlichen Kalibrierwert aufweisen und für den Reprojektionsfehler wurde ein Wert von unter 0,1 Pixel festgelegt (vgl. ([Luh10a], S. 114)). Die Evaluierung der ermittelten Parameter zeigte, dass die jeweils genannten Kriterien erfüllt wurden, sodass die Ergebnisse der durchgeführten Kalibrierung als stabil beurteilt werden konnten.

In einer zweiten Bewertungsstufe wurde ein direkter Vergleich zwischen den ermittelten Parametern und den hinterlegten Werksangaben vollzogen. Hierzu wurden die intrinsischen Parameter aus der jeweils verwendeten Kamera ausgelesen und mit den Ergebnissen aus der Eigenkalibrierung verglichen (s. Tabelle 4.2).

Tabelle 4.2: Direktvergleich der absoluten Parameterabweichungen

Kamera Nr.	f_x [px]	f_y [px]	u_0 [px]	v_0 [px]	k_1 [-]	k_2 [-]	k_3 [-]
Kamera 1	-2,53	-2,75	-1,98	-0,46	0,0020	0,0035	-0,0039
Kamera 2	-2,69	-3,09	-1,64	2,22	0,0065	-0,0111	0,0079
Kamera 3	-3,25	-3,35	-1,52	0,64	0,0058	-0,0055	0,0048
Kamera 4	-2,44	-2,40	-0,30	0,60	0,0015	-0,0025	0,0027
Kamera 5	-1,55	-1,56	-1,60	-1,24	0,0008	-0,0062	0,0091
Kamera 6	-2,46	-2,35	-0,80	-1,06	0,0020	-0,0034	0,0061
Kamera 7	-2,67	-2,83	-1,57	-0,60	-0,0006	-0,0013	0,0047
Kamera 8	-1,22	-1,26	-0,52	-0,06	0,0058	-0,0055	-0,0009
Kamera 9	-2,04	-2,49	-2,52	0,60	0,0037	-0,0019	-0,0017
Kamera 10	-1,10	-1,05	-1,09	0,36	0,0041	-0,0129	0,0111
Kamera 11	-1,60	-1,51	-1,53	-1,94	0,0011	-0,0033	0,0038
Min.	-3,25	-3,35	-2,52	-1,94	-0,0006	-0,0129	-0,0039
Max.	-1,10	-1,05	-0,30	2,22	0,0065	0,0035	0,0111

Neben den absoluten Werten wurden zusätzlich auch die relativen Parameterabweichungen ermittelt, die in Kombination mit den parameterbezogenen Korrelationsmatrizen und der ausgewerteten Bildhauptpunktverschiebung die Grundlage für die durchgeführte Parameteranalyse bildeten. Anhand dieser systematischen Auswertung konnten aus dem Vergleich der intrinsischen Parameter folgende Rückschlüsse gezogen werden:

Kamerakonstante:

Die angegebenen Werte für die Kamerakonstante waren bei den Werksdaten identisch, d. h., die Werte von f_x entsprachen den Angaben von f_y . Bei der durchgeföhrten Kalibrierung haben sich die ermittelten Werte für f_x und f_y minimal unterschieden. Jedoch ergab sich aus der berechneten Korrelationsmatrix ein Wert von 0,9952, wodurch die beiden Parameter als quasi identisch angesehen werden konnten und somit auch die Werksangaben bestätigt wurden (s. Hinweis quadratische Pixelgröße). Der Direktvergleich der angegebenen Kalibrierwerte zeigte eine absolute Abweichung von -1,05 bis -3,35 Pixeln auf; dies entsprach einer durchschnittlichen Relativabweichung von 0,6 %.

Bildhauptpunkt:

Der Vergleich der ermittelten Bildhauptpunktkoordinaten zeigte, dass diese durchweg versetzt zur Bildmitte lagen (vgl. Abbildung 4.13). In horizontaler Richtung (u_0) konnte zwischen den Werksangaben und den Eigenmessungen eine Abweichung von -0,3 bis -2,52 Pixeln festgestellt werden. Die Differenzen bei der vertikalen Ausrichtung des Hauptpunktes (v_0) variierten zwischen -1,94 und +2,2 Pixeln. Im Gesamtvergleich zu den hinterlegten Werksangaben lag die relative Gesamtabweichung für beide Parameter (u_0/v_0) bei durchschnittlich 0,48 %.

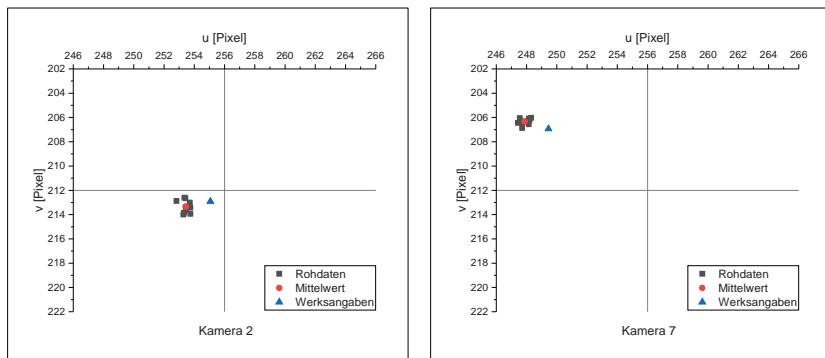


Abbildung 4.13: Vergleich der Bildhauptpunktkoordinaten (ermittelte und hinterlegte Werte)

Radiale Verzeichnung:

Die Analyse der ausgelesenen radialen Verzeichnungsparameter hat gezeigt, dass die jeweiligen Vorzeichen bei den einzelnen Parametern (k_1, k_2, k_3) mit den Angaben aus der Werkskalibrierung übereinstimmten. Durch eine genauere Einzelbetrachtung der Verzeichnungsparameter wurde zudem ersichtlich, dass der Wert von k_2 nahezu dem dreifachen Wert von k_1 und k_3 entsprach und k_2 mit k_3 korrelierte. Eine Korrelation der genannten Verzeichnungskoeffizienten sollte bei der Kalibrierung zwar prinzipiell vermieden werden; allerdings ist dies bei der beschriebenen Kalibriermethode – insbesondere zwischen den radialen Verzeichnungsparametern – als nicht untypisch anzusehen ([Luh10b], S. 563). Aufgrund der Dominanz von k_2 und der positiven Vorzeichen von k_1 lag bei allen untersuchten Tiefenbildkameras eine tonnenförmige Verzeichnung vor, die zum Bildrand hin zunahm (s. Abbildung 4.14).

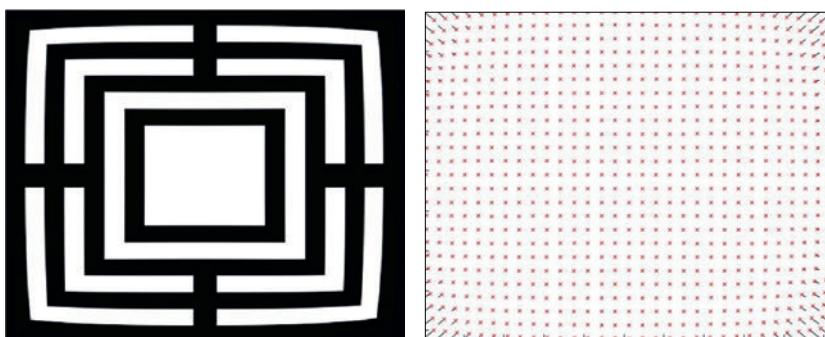


Abbildung 4.14: Verzerrungsbild mit tonnenförmiger Verzeichnung (links) sowie das zugehörige Vektorbild (rechts) am Beispiel der ermittelten Parameter von Kamera 2 (s. Verzeichnungen am Bildrand)

Für den Direktvergleich der relativen Abweichungen zwischen Werksangaben und Eigenmessungen wurden die jeweils relevanten Bezugswerte herangezogen (+1 und -1). Unter

diesem Aspekt ergab sich für den Vergleich von k_1 eine durchschnittliche Abweichung von 0,3 %, für k_2 ein Wert von 0,46 % und für k_3 wurde eine Parameterabweichung von 0,4 % ermittelt. Des Weiteren wurde anhand von normierten Koordinaten ein grafischer Vergleich der Verzeichnungskurven durchgeführt. Die Auswertung zeigte, dass bei einem Großteil der Kameraparameter nahezu identische Kurvenverläufe vorzufinden waren. Die größte Abweichung wurde bei der Gegenüberstellung der Parameter von Kamera 2 festgestellt. Beim Verzeichnungsverlauf wurde ein vergleichsweise deutlicher Versatz ersichtlich. Dieser ist jedoch u. a. auf die schlechte (manuelle) Detektion der Merkmalspunkte am äußersten Bildrand zurückzuführen (s. Abbildung 4.15).

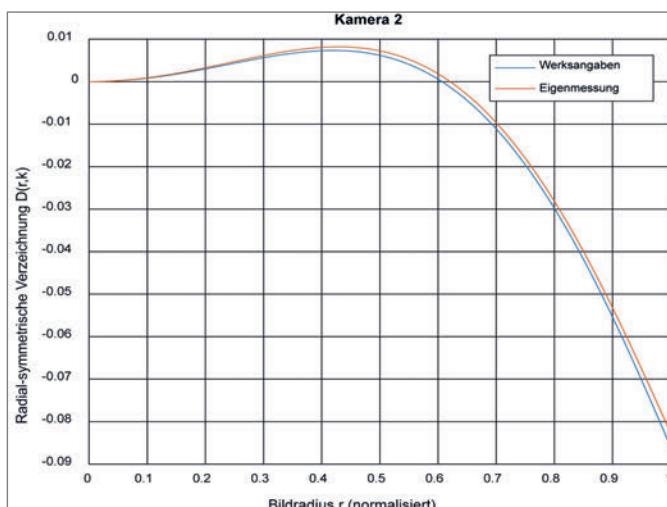


Abbildung 4.15: Vergleich des radialen Verzeichnungsverlaufs mit größter ermittelter Abweichung

Tangentielle Verzeichnung:

Bei der Analyse der tangentialen Verzeichnungskoeffizienten konnte kein Direktvergleich durchgeführt werden, da keine Werksparameter vorzufinden waren. Bei der Betrachtung der ermittelten Werte lagen die Angaben für p_1 bei -0,000057 und 0,00108 und bei p_2 variierten sie von 0,00009 bis 0,00046. In Anbetracht der niedrigen Werte sind die Auswirkungen der tangentialen Verzeichnungen als überaus gering einzustufen, sodass sie – entsprechend den Werksangaben – vernachlässigbar sind (s. Präzision bei der automatisierten Kamerafertigung).

Im Rahmen der durchgeföhrten Analyse wurden 11 Tiefenbildkameras anhand von insgesamt 120 Kalibrierdurchgängen und über 6000 Bildaufnahmen kalibriert. Mittels der Untersuchungsergebnisse konnte aufgezeigt werden, dass die intrinsischen Parameter kamera-individuell variieren. Darüber hinaus zeigte die Gegenüberstellung der Werte auf, dass bei

einzelnen Parametern zwar minimale Abweichungen vorlagen, diese allerdings keine signifikanten Auswirkungen auf den generellen Abbildungsprozess haben. Zudem gilt es zu berücksichtigen, dass für die Werksparameter keine Angaben hinsichtlich der Kalibriermethodik sowie zur Streuung der einzelnen Parameter vorlagen, wodurch kein direkter Rückschluss auf die Genauigkeit der jeweiligen Kalibriermethode getroffen werden konnte. Anhand der durchgeföhrten Eigenkalibrierung und des damit verbundenen Parametervergleichs lässt sich jedoch festhalten, dass die intrinsischen Parameter im Durchschnitt nur minimal voneinander abweichen (s. Tabelle 4.3) und somit die Werksangaben für die bisherige Beschreibung der kameraspezifischen Abbildungseigenschaften als hinreichend genau einzustufen sind.

Tabelle 4.3: Zusammenfassung des intrinsischen Parametervergleichs

Durchschnittliche Parameterabweichung	
Kamerakonstante	0,60 %
Bildhauptpunkt	0,48 %
Radiale Verzeichnung	0,37 %
Gesamtdurchschnitt	0,48 %

In diesem Zusammenhang gilt es zu berücksichtigen, dass die Laborversuche bei nahezu konstanten Umgebungsbedingungen durchgeführt wurden. Bei den ersten Vorversuchen wurde jedoch bereits ersichtlich, dass sich bei unterschiedlichen Ausgangssituationen minimale Parameterschwankungen bemerkbar gemacht haben. Dies lässt wiederum darauf rückschließen, dass Einflussfaktoren existieren, die sich auf die intrinsischen Kameraparameter auswirken ([ZMD¹⁶], S. 123). Welche dies konkret sind und inwieweit sich diese auf die Projektion einer Laderraumszene vom Kamera- in das Pixelkoordinatensystem auswirken, wird in Kapitel 5 vertiefend untersucht.

4.3.2 Genauigkeitsanalyse der Tiefenwerte

Neben der Bestimmung der internen Kameraparameter ist es beim Einsatz einer ToF-Kamera zusätzlich erforderlich, das Messverhalten bezüglich der akquirierten Tiefendaten zu analysieren, um möglichst verlässliche Distanzwerte für die spätere Rekonstruktion der betrachteten Laderraumszene zu erhalten. Im Bereich der Messtechnik wird hierzu auf ein distanzbezogenes Kalibriermodell zurückgegriffen, das es ermöglicht, die vorhandenen Distanzabweichungen einer Tiefenbildkamera zu identifizieren und zu quantifizieren. Ähnlich wie bei den intrinsischen Kalibriermethoden existieren auch bei der Tiefenkalibrierung verschiedene Modellierungsansätze und Vorgehensweisen ([VFA¹⁷], S. 9; [Fuc12], S. 50), die wiederum auf unterschiedlichen Typen von Referenzdatensätzen basieren ([KAB¹²], S. 345).

In der Literatur wird für die Generierung adäquater Referenzdaten in der Regel auf die zusätzliche Einbindung von äußerst präzisen Messeinrichtungen zurückgegriffen – bspw. auf einen terrestrischen Laserscanner, einen Tachymeter, einen Interferenzkomparator oder einen Roboterarm ([Fuc12], S. 37; [HKK⁺13]; [Kah08], S. 70; [LML⁺15], S. 13080). Durch die zusätzliche Einbindung solcher Hilfsmittel lassen sich exakte 3D-Referenzgeometrien einer betrachteten Szene erstellen. Diese werden anschließend genutzt, um die parallel von der ToF-Kamera generierten Tiefendaten mit den Referenzwerten vergleichen zu können. Für diesen diffizilen Ansatz sind nicht nur zusätzliche (kostspielige) Messsysteme erforderlich, sondern es werden zudem mehrere Verarbeitungsschritte für die korrekte Datenüberführung und den exakten Modellvergleich vorausgesetzt – bspw. ein identisches Ausgangskoordinatensystem. Je nach Anforderung an die gestellte Messgenauigkeit kann anstelle von einer ganzen 3D-Szene auch eine plane Fläche als Referenzbasis für die Tiefenkalibrierung genutzt werden – z. B. in Form einer Wand oder Tafel ([PCM⁺15]; [SLC⁺15]; [ZMM⁺15], S. 4). Bei dieser Art der Tiefenkalibrierung reicht es aus, ein herkömmliches Laserentfernungsmeßgerät für die Ermittlung der Referenzfernungen einzusetzen. Dadurch lassen sich die akquirierten Distanzwerte der Tiefenbildkamera mit den geometrischen Referenzwerten des Laserentfernungsmeßgeräts hinreichend genau vergleichen. In Anlehnung an diese Methode wurde im Rahmen dieser Arbeit ein Messaufbau für die Tiefenwertanalyse realisiert, bei dem die simultane Verschiebung von Tiefenbildkamera und Laserentfernungsmeßgerät zu einer Referenztafel ermöglicht wurde. Das vereinfachte Funktionsprinzip dieser Tiefenkalibrierung ist Abbildung 4.16 zu entnehmen.

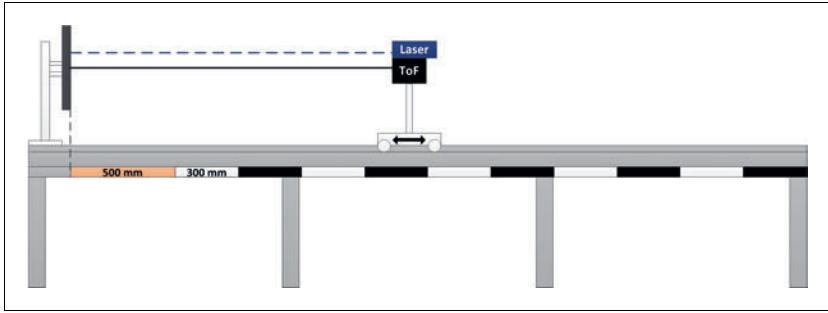


Abbildung 4.16: Schematischer Messaufbau zur Durchführung der Distanzmessungen

Für die Durchführung der einzelnen Tiefenwertmessungen wurde die Tiefenbildkamera vorab so ausgerichtet, dass sie parallel zur Referenztafel verschoben werden konnte. Der Abstand zwischen Tiefenbildkamera und Referenzobjekt wurde durch das in den Messaufbau eingebundene Laserentfernungsmeßgerät bestimmt, welches eine Messgenauigkeit von $\pm 1,5$ mm aufwies (Bosch GLM 100 C). Als Referenzobjekt wurde eine Graukarte verwendet, auf der zusätzliche Orientierungslinien zur Ausrichtung der Tiefenbildkamera

aufgedruckt waren. Die Feinjustierung der Tiefenbildkamera erfolgte durch eine zusätzliche Aufnahmeverrichtung, die in alle drei Achsrichtungen verschoben werden konnte. Darüber hinaus wurde die ganze Aufnahmeverrichtung auf einem Laborschienensystem mit verschiebbarem Schlitten angebracht, um die Tiefenbildkamera parallel zur Referenztafel in den erforderlichen Abständen positionieren zu können. Ferner wurde die Messumgebung mit nicht-reflektierendem Moltonstoff ausgekleidet, um den Einfluss äußerer Störfaktoren auf die Tiefenbildaufnahme minimieren zu können (s. Abbildung 4.17).

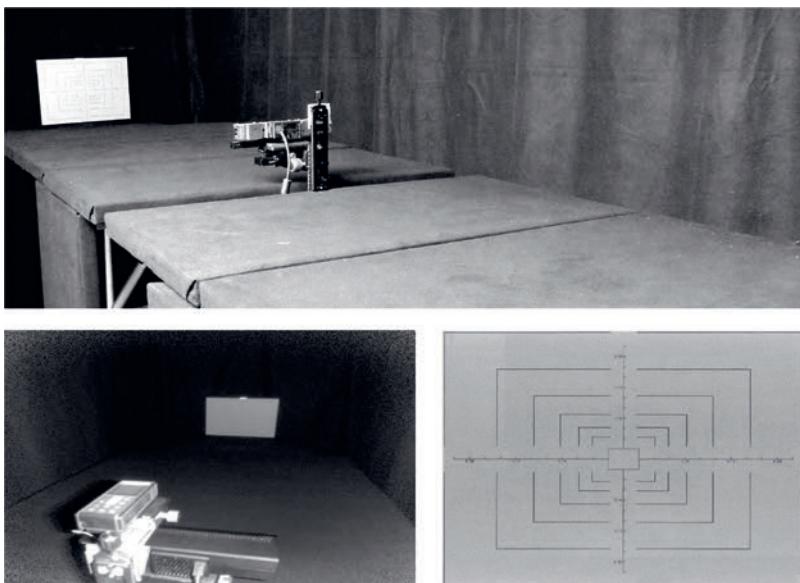


Abbildung 4.17: Versuchsaufbau zur Analyse der akquirierten Tiefenwerte bei verschiedenen Messabständen

Anhand des beschriebenen Versuchsaufbaus wurden anschließend Referenzmessungen bei unterschiedlichen Entfernungen durchgeführt und ausgewertet. Um eine generelle Aussage hinsichtlich des Tiefenwertverlaufs treffen zu können, wurde die Tiefenbildkamera schrittweise in Messabständen von 300 mm zur Referenztafel verschoben (beginnend bei 500 mm bis 3500 mm). Dadurch ergaben sich insgesamt elf verschiedene Messpositionen für die Datenakquisition. Die Bestimmung der Nominaldistanz (Messdistanz zwischen Kamera und Referenztafel) wurde mittels des Laserentfernungsmeßgeräts durchgeführt. Dieses wurde zusätzlich auf dem Messschlitten angebracht und bündig zur Frontscheibe der Kamera ausgerichtet (s. Abbildung 4.17, unten). Die Nominaldistanz wurde anhand von zehn Messdurchläufen ermittelt. An jedem Messpunkt wurden 200 Tiefenbilder erfasst. Zur Auswertung der Daten wurde ein flächenbasierter Datenvergleich herangezogen. Dafür wurde die Tiefenbildkamera so ausgerichtet, dass der Bildhauptpunkt der Tiefenbildkamera dem Mittelpunkt der Referenztafel entsprach. Ausgehend von dieser definier-

ten Mitte wurde ein Messbereich von 12×12 Pixeln ausgewählt und analysiert. Durch die parallele und rotationsfreie Verschiebung der Tiefenbildkamera konnte in Kombination mit dem Laserentfernungsmessgerät ein direkter Vergleich zwischen dem vorgegebenen Referenzwert (Nominaldistanz) und den erfassten Tiefenwerte vorgenommen werden.

In einem ersten Auswertungsschritt wurde überprüft, ob bei den akquirierten Daten eine Normalverteilung vorlag. Hierfür wurde jede erfasste Messreihe einer grafischen Analyse unterzogen. Zur Beurteilung der Messdaten wurden Histogramme, Quantil-Quantil-Diagramme und Box-Diagramme verwendet. Anhand dieser grafischen Auswertung konnten bspw. die Verteilung der Messwerte verglichen (s. Q-Q-Diagramm), einzelne Messwertausreißer identifiziert sowie die Verteilungsdichtefunktion bestimmt werden (s. Histogramm) ([JL17], S. 248). Zusätzlich wurden die Messreihen einem Kolmogorov-Smirnov-Test mit Lilliefors-Korrektur unterzogen und analytisch ausgewertet ([JL17], S. 648). Hierdurch konnte verifiziert werden, dass für die Grundgesamtheit der erfassten Messreihen eine Normalverteilung vorlag, sodass für die weitere Evaluierung der Messreihen grundsätzlich die arithmetischen Mittelwerte sowie die entsprechenden Standardabweichungen herangezogen werden konnten. Ein beispielhafter Auszug der grafischen Normalverteilungsprüfung ist in Abbildung 4.18 dargestellt.

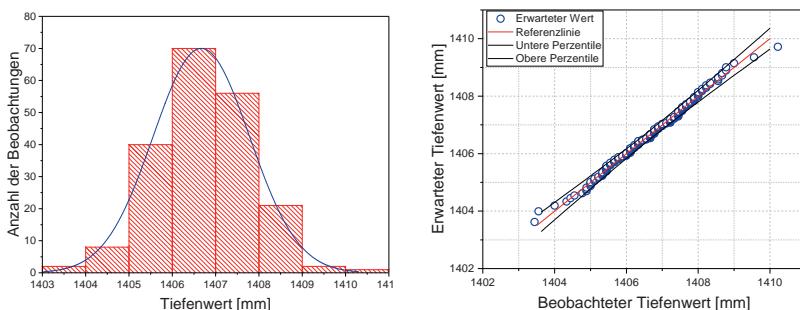


Abbildung 4.18: Grafische Überprüfung der Normalverteilung einer Messreihe anhand eines Histogramms (links) und Q-Q-Diagramms (rechts).

Anhand dieser Ausgangsbasis wurden für jede Messreihe die relevanten Auswerteparameter bestimmt (Mittelwert, Standardabweichung, Varianz etc.). Die sich daraus ergebenden Gesamtdaten wurden anschließend verwendet, um eine Korrelationsanalyse bezüglich der ermittelten Messwerte und der vorgegebenen Nominaldistanzen durchführen zu können. Anhand der berechneten Mittelwerte aus den Rohdaten wurde zudem eine lineare Anpassung vorgenommen. Die aufgetragenen Werte sowie die dazugehörige Anpassungsgerade sind in Abbildung 4.19 zu sehen.

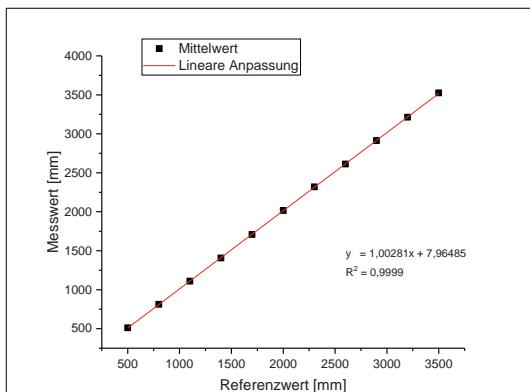


Abbildung 4.19: Verlauf der ermittelten Tiefendaten in Abhängigkeit vom Referenzwert

Der abgebildete Datenverlauf zeigt einen funktionalen Zusammenhang zwischen Mess- und Referenzwert auf. Ausgehend vom idealen Messwertverlauf müsste der Korrelationswert bei einem Wert von 1 liegen. Der aus den Versuchsdaten rechnerisch ermittelte Wert lag bei 0,9999, wodurch eine Korrelation zwischen Mess- und Referenzwert bestätigt werden konnte. Bei der näheren Betrachtung der aufgestellten Geradengleichung wurde jedoch eine nicht unerhebliche Merkmalsabweichung erkennbar. Der theoretische Idealverlauf der Geradengleichung müsste eine Steigung von 1 und einen Schnittpunkt im Koordinatenursprung (0/0) aufweisen. Bei der vorliegenden Geradengleichung wird zwar die theoretisch vorgegebene Steigung nahezu eingehalten (errechneter Wert: 1,00281); allerdings weist der Schnittpunkt mit der y-Achse einen deutlichen Versatz zum Nullpunkt auf (errechneter Wert: 7,96485 mm). Dieser systematische Versatz hängt mit der Lage des optischen Zentrums der Tiefenbildkamera und der Position des Laserentfernungsmessgeräts zusammen. Bei der Datenerfassung wurde das Lasermessgerät auf die Frontscheibe des Kameragehäuses ausgerichtet. Anhand der Datenauswertung wurde jedoch deutlich, dass sich das optische Zentrum der Tiefenbildkamera weitaus tiefer innerhalb des Gehäuses befindet. Hierdurch kam es zu einem generellen Messwertversatz. Da für die spätere Erprobung und Montage der Tiefenbildkameras die Frontscheibe zur Ausrichtung der einzelnen Tiefenbildkameras genutzt wird und diese Vorgehensweise für den weiteren Arbeitsverlauf beibehalten werden soll, wurden die Bezugsdaten angepasst.

Um die ausgewerteten Messdaten vergleichbar darstellen zu können, wurden für die nachfolgenden Analysen nicht mehr die absoluten Tiefenwerte mit Bezug zur Referenztafel betrachtet, sondern als neue Ausgangsbasis wurden die generierten Datensätze bei der ersten Messposition festgelegt (500 mm). Hierfür wurden die generierten Tiefenwerte von den anderen Messpositionen subtrahiert, wodurch sich ein Messergebnis relativ zur ursprünglichen Ausgangsposition ergab. Anhand dieser Anpassung wurde eine erneute Analyse der

erfassten Tiefenwerte durchgeführt, wodurch der Verlauf der Messabweichungen und der Standardabweichung relativ zur theoretischen Nullposition ermittelt und dargestellt werden konnte (s. Abbildung 4.20).

Anhand des aufgetragenen Werteverlaufs werden z. T. deutliche Tiefenwertschwankungen bei den einzelnen Messpositionen ersichtlich. Ausgehend vom theoretischen Idealverlauf der Messwerte müsste im Diagramm die Messabweichung nahezu exakt entlang der Nulllinie verlaufen (s. gestrichelte Linie). Die tatsächlichen Tiefenmesswerte zeigen jedoch deutliche Messschwankungen entlang dieser Ideallinie auf. Wie aus Abbildung 4.20 ersichtlich wird, weisen die Messdaten einen periodischen bzw. wellenförmigen Werteverlauf auf, mit zum Teil deutlichen Messwertabweichungen. Da für jede Messposition jeweils 200 Datensätze generiert wurden, konnten hierfür auch die jeweiligen Messwertstreuungen bestimmt werden. Die grafische Auswertung zeigt, dass das Streuverhalten der Tiefenwerte exponentiell zur Messdistanz zunahm (s. Abbildung 4.20).

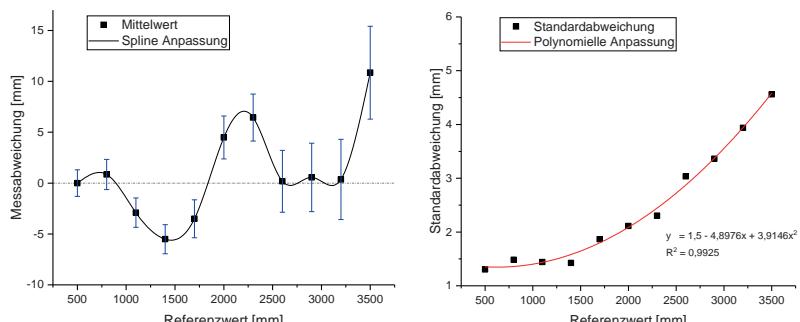


Abbildung 4.20: Verlauf der Messabweichung (links) und der Standardabweichung (rechts) bezogen auf den jeweiligen Referenzwert

Anhand der durchgeführten Auswertungen konnte festgestellt werden, dass der Tiefenwertverlauf der Kamera stellenweise deutlichen Schwankungen unterliegt. In einem Messbereich von bis zu 3200 mm kann eine Genauigkeit von -5,11 mm bis +6,44 mm erzielt werden. Erst darüber hinaus steigen die Messabweichungen deutlich an, sodass die Genauigkeit der erfassten Tiefendaten bei über 10 mm liegt, mit einer Streuung von bis zu ± 4,56 mm. Für eine hinreichend genaue Erfassung der Tiefendaten im Laderaum bedeutet dies, dass die Tiefenbildkameras im Laderaum u. a. so angeordnet werden sollten, dass der Messbereich von 3200 mm nicht überschritten wird (s. Kapitel 5.4). Ferner gilt es, die Hauptursachen für die auftretenden Messwertschwankungen zu identifizieren, um entsprechende Kompensationsmaßnahmen einleiten zu können. Die in Abbildung 4.20 aufgezeigte Messwertschwankung wird in der Literatur als „Wiggling Error“ bezeichnet ([FAT11], S. 1919). Dieser für ToF-Kameras typische Messfehler stellt bei der Tiefenwertgenerierung einen systematischen Einflussfaktor dar, der durch die Signaldemodulation hervorgerufen

wird und eine sogenannte Tiefeninhomogenität auslöst ([LSK⁺10], S. 1319). Zur Kompen-sation dieses Fehlers wird u. a. ein Fehlermodell anhand einer Spline-Kurve herangezogen, wodurch sich der aufgetragene Werteverlauf abbilden und korrigieren lässt.

Die durchgeführten Untersuchungen haben gezeigt, dass das Tiefenverhalten der Kamera zwar Schwankungen aufweist, die sich allerdings grundsätzlich kompensieren lassen. Eine Grundvoraussetzung hierfür bildet jedoch die Identifikation und Analyse der damit ver-bundenen Fehlerursachen. Ferner gilt es in diesem Zusammenhang zu berücksichtigen, dass die durchgeführten Tiefenwertversuche – analog zur intrinsischen Kamerakalibrie- rung – unter idealen Laborbedingungen durchgeführt wurden, d. h., die jeweiligen Aus-gangsszenarien waren nahezu unverändert (konstant) und konnten somit nicht von weiteren Störfaktoren beeinflusst werden. Diese optimalen Versuchsvoraussetzungen lassen sich allerdings nicht auf den späteren Einsatz im Laderaum übertragen. In der Praxis ist viel-mehr von einer sich ändernden Laderaumumgebung auszugehen, in der weitere Einfluss-faktoren zum Tragen kommen, die in der bisherigen Tiefenwertanalyse unberücksichtigt geblieben sind – bspw. hinsichtlich des Temperaturverlaufs oder der vielfältigen Reflexi-onseinflüsse von Laderaum- und Ladeeinheitenmaterialien. Für eine adäquate Datenaus-wertung ist es daher von grundlegender Bedeutung, die vom Laderaum ausgehenden Ein-flussfaktoren vorab zu identifizieren und deren Auswirkungen auf den Tiefenwertverlauf zu analysieren. Erst durch die Identifikation der potenziellen Fehlerquellen und der damit einhergehenden Folgewirkungen lassen sich konkrete Aussagen über die tatsächliche Da-tengüte und die Messgenauigkeit der Tiefenbildkamera im Laderaum treffen. Zur weiteren Erörterung dieses Themenkomplexes sind daher erweiterte Messwertanalysen und vertie-fende Kalibrierversuche erforderlich (s. Kapitel 5).

5 Experimentelle Untersuchungen zum Messverhalten

Die Anzahl von Tiefenbildkameras sowie deren Anwendungsgebiete haben sich über die letzten Jahre hinweg stets erweitert. Dabei weist jedes Einsatzfeld abweichende Rahmenbedingungen auf, die wiederum unterschiedliche Anforderungen und Auswirkungen auf eine Tiefenbildkamera besitzen. Ein tiefenmessender Systemaufbau im klinischen Bereich weist bspw. ganz andere Anforderungen an die optische Hardware auf als der Einsatz einer Tiefenbildkamera im rauen Braunkohletagebau oder im Logistikumfeld ([MF18]; [PSB⁺15]; [San17a]; [Sch11]; [SO10]). Es ist daher unumgänglich – wie bei jedem anderen Messsystem auch –, das Messverhalten der eingesetzten Tiefenbildkamera in Bezug auf das angestrebte Einsatzgebiet (Laderaum) vertiefend zu untersuchen.

Im Rahmen dieser Arbeit werden hierfür zunächst die kamerabezogenen Einflussfaktoren kategorisiert und spezifiziert. Anhand der daraus resultierenden Fehlereingrenzungen werden anschließend experimentelle Untersuchungen durchgeführt, die eine technisch-wissenschaftliche Evaluierung der identifizierten Limitationen ermöglichen. Den Schwerpunkt der Untersuchungen bilden die bisher weitgehend unberücksichtigten Einflussparameter hinsichtlich des erarbeiteten Laderaumprofils (Transportbelastungen, Laderaumtemperaturen, Oberflächenmaterialien etc.). Abschließend werden die Versuchsergebnisse diskutiert, um eventuelle Maßnahmen zur Fehlerkompensation bei der Datenakquisition berücksichtigen zu können.

5.1 Messabweichungen bei der Datengenerierung

Die sensorische Erfassung von Messwerten ist grundsätzlich mit Einschränkungen behaftet, die sich in unterschiedlicher Art und Weise auf die Güte der akquirierten Messdaten auswirken. Zur generellen Eingrenzung und Einordnung der Fehlerquellen werden sie zunächst beschrieben und in verschiedene Fehlerklassen sowie Ursachengruppen eingeteilt. Durch diese systematische Klassifizierung wird eine Bestandsaufnahme hinsichtlich der bisher identifizierten Einflussgrößen erzielt. Anhand dieser Erkenntnisse lassen sich wiederum relevante Untersuchungsdefizite hinsichtlich des Laderaumeinsatzes ableiten, die anschließend durch eigene Untersuchungen ergänzt werden können.

5.1.1 Allgemeine Einschränkungen einer ToF-Tiefenbildkamera

Einen wesentlichen Einfluss auf die Qualität der erfassten Distanzwerte hat das Rauschverhalten einer Tiefenbildkamera. Dabei wird prinzipiell unterschieden, ob das Rauschen

vom verbauten Bildsensor oder von der Kameraelektronik ausgeht. Zu den dominierenden Rauschquellen eines Bildsensors gehört u. a. das kameratypische Ortsrauschen (Fixed Pattern Noise) ([Lan00], S. 68). Ferner kommt bei einer Tiefenbildkamera das sensorbasierte Quantisierungrauschen zum Tragen, welches aus der Signalumwandlung von einer analogen Eingangsspannung in einen digitalen Datenstrom resultiert ([Hus00], S. 10). Ein Maß zur qualitativen Bewertung des Sensorrauschens stellt das Signal-Rausch-Verhältnis dar, das sich anhand der vorhandenen Elektronenanzahl ermitteln lässt ([Lin10], S. 12). Im Zusammenhang mit der Kameraelektronik ist an dieser Stelle noch der Einfluss des thermischen Rauschens zu erwähnen, das in Verbindung mit dem vorhandenen Dunkelstrom auftritt ([Alb07], S. 14). Dabei ist zu berücksichtigen, dass elektronische Bauteile bei der Inbetriebnahme generell unterschiedliche Temperaturbereiche durchlaufen, wodurch die Systemstabilität im Allgemeinen beeinflusst wird. Im Fall einer ToF-Tiefenbildkamera wärmen sich u. a. der verbaute Bildsensor sowie die integrierte NIR-Lichtquelle auf ([Kah08], S. 78). Bedingt durch den daraus resultierenden Temperaturverlauf im Inneren der Kamera kommt es zu einer thermischen Phasendrift, die sich auf die einzelnen Distanzwerte auswirkt ([FBR¹⁵], S. 389; [FPB¹⁶], S. 29; [LMM¹⁵], S. 96; [SLK15], S. 12).⁴⁰ Die aufgeführten Rauschquellen sind weitgehend unvermeidbar und treten zufällig auf, sodass die vom Sensor erfassten Tiefenbilder – im Vergleich zum ursprünglich betrachteten Ausgangszenario – störende sowie verfälschte Tiefenbilddaten enthalten. Die rauschbedingten Einflüsse lassen sich zwar nicht verhindern, sollten allerdings bei der Erfassung und Weiterverarbeitung der Tiefenmessdaten mit beachtet werden.

Eine weitere sensortypische und zum Teil unkontrollierbare Ursache für verfälschte Tiefenmessdaten resultiert aus der Entstehung von vermischten Phasenverschiebungen (s. mixed pixel problem) ([BFI¹⁴], S. 614). Sie treten u. a. in Form von Artefakten bei statischen Objektaufnahmen auf. Diese sogenannten „Fliegenden Pixel“ (engl. flying pixels) oder „Sprungkanten“ (engl. jump edges) entstehen anhand von Tiefendiskontinuitäten. Das emittierte Messsignal wird also z. B. von einem im Vordergrund stehenden Objekt an der entsprechenden Objektkante nicht richtig reflektiert, sondern vermischt sich mit der dahinter liegenden Objekt- oder Hintergrundfläche ([AAB¹⁷], S. 68). Daraus resultiert eine verfälschte Phasenverschiebung, woraus ein Tiefenwert ermittelt wird, der zwischen den eigentlich betrachteten Objekten liegt. Die Entstehung dieses Effekts lässt sich anhand einer Kameraaufnahme mit zwei zueinander räumlich versetzten Ladeeinheiten veranschaulichen (s. Abbildung 5.1 a). Dabei stellt die Objektkante der vorderen Ladeeinheit einen Problembereich für die eindeutige Ermittlung der Phasenverschiebung dar. Die betrachteten Ladeeinheiten lassen sich in diesem Szenario nicht eindeutig voneinander abgrenzen, obwohl zwischen der vorderen und hinteren ein eindeutiger Abstand zu verzeichnen ist (s. Abbildung 5.1 b). Die Darstellung der erfassten Tiefenbilddaten führt somit zu einer Arte-

⁴⁰ Bei der Datenakquisition sollte neben dem Einfluss der genannten Kamerainnentemperatur daher auch stets die Entwicklung der Umgebungstemperatur mit berücksichtigt werden ([KI08], S. 6).

faktbildung an der hinteren Oberkante der Ladeeinheit, wodurch in der entsprechenden Aufnahme der betrachteten Szene ein fließender Übergang von der vorderen zur hinteren Ladeeinheit entsteht. Dadurch werden nicht nur die eigentlichen Tiefendaten verfälscht, sondern es wird auch die Gesamtoberfläche der vorderen Ladeeinheit vergrößert dargestellt. Dies erschwert sowohl die Weiterverarbeitung der generierten Rohdaten als auch die korrekte Zuordnung der jeweiligen Objektabmessungen – bspw. einer Ladeeinheit im Laderaum.



a.) Kameraperspektive b.) Seitenbetrachtung c.) Aquisitionsergebnis

Abbildung 5.1: Entstehung von Tiefendiskontinuitäten zwischen zwei hintereinander angeordneten Ladeobjekten

Eine weitere Form der Phasenvermischung entsteht bei der Mehrwegreflexion der emittierten Signale (engl. multipath-effect) ([Fuc12], S. 4). Das für die Messdatengenerierung notwendige Infrarotlicht wird hierbei von den in der Messumgebung befindlichen Objekt-oberflächen mehrfach reflektiert, sodass das emittierte Lichtsignal nicht direkt, sondern über Umwege vom ToF-Sensor erfasst wird (s. Abbildung 5.2, links). Aufgrund des hierdurch länger zurückgelegten Weges weist das reflektierte Signal (gestrichelte Linie) im Vergleich zum eigentlichen Signalverlauf (durchgezogene Linie) eine deutlich höhere Messdistanz auf. ([KBR14], S. 13) Die bisher beschriebenen Fehlerursachen für die Ver-mischung der Phasenverschiebungen treten in Abhängigkeit von der jeweils betrachteten Messumgebung auf. Eine weitere in diesem Zusammenhang zu erwähnende Ursache für eine vermischte Phasenverschiebung tritt bei Streulicht innerhalb der Kamera auf. In diesem Fall wird das Licht von einem stark reflektierenden Objekt nicht außerhalb, sondern innerhalb des Linsensystems der Kamera gestreut (s. Abbildung 5.2, rechts). Die überaus starken Objektreflexionen gelangen hierbei auf mehrere Pixel des Sensors (s. Linienverlauf Objekt 1). Innerhalb dieser Pixel vermischen sich wiederum die gestreuten Lichtsignale mit den von der Linse ursprünglich abgebildeten Signalen (s. Objekt 2 und Objekt 3), wodurch es zu den entsprechenden Messdatenverfälschungen kommt. ([KI08], S. 8)

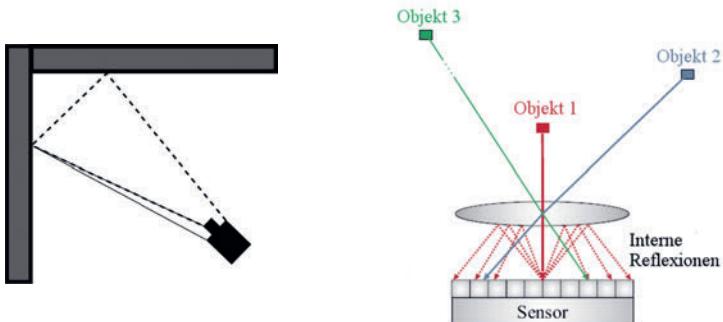


Abbildung 5.2: Darstellung der Einflussfaktoren hinsichtlich Mehrwegreflexion (links) ([FAT11], S. 1922) und Streulicht innerhalb des Linsensystems (rechts) ([KGP12], S. 156)

Neben den bereits erwähnten Fehlerursachen kommen beim Einsatz einer ToF-Tiefenbildkamera insbesondere auch Störgroßen zum Tragen, die in einem unmittelbaren Zusammenhang mit der Signaldemodulation oder der Phasenbestimmung stehen.⁴¹ Ein wesentlicher Einflussfaktor, der sich dabei direkt auf den entsprechenden Datenwert eines Pixels auswirkt, ist das distanzabhängige Messverhalten der Tiefenbildkamera zum tatsächlichen Aufnahmeobjekt. Bei diesem Fehlereinfluss wird insbesondere deutlich, dass der gemessene Ist-Wert im Vergleich zum eigentlichen Soll-Wert schwankt ([FAT11], S. 1919). Eine Ursache für diese oszillierende Messabweichung – auch „Wiggling-Error“ genannt (s. Kapitel 4.3.2) – liegt u. a. darin, dass in der Theorie von einer (harmonischen) sinusförmigen Signalmodulation ausgegangen wird ([BOE⁺15], S. 304), obwohl in der Realität eine idealtypische Abweichung bei der Signalmodulation zu verzeichnen ist (Rechtecksignale) ([PDM⁺14], S. 135; [SO14], S. 49). Dadurch kommt es mitunter zu Signaltüberlagerungen, die sich auf die Phasenverschiebung auswirken und somit wiederum Abweichungen bei den ermittelten Distanzwerten hervorrufen ([Lan00], S. 36).

Als weitere umfassende Fehlerquelle sind die intensitätsabhängigen Messabweichungen durch das von der Objektoberfläche reflektierte Signal anzusehen ([FAT11], S. 1920). Dieser spezifische Fehlereinfluss wird insbesondere anhand von Aufnahmen deutlich, bei denen ein planes Aufnahmeobjekt aus einer konstanten Entfernung zur Tiefenbildkamera erfasst wird und die betrachtete Objektoberfläche zugleich unterschiedliche Reflexionseigenschaften aufweist. Je nach Oberflächenbeschaffenheit kommt es in diesem Fall bei der Signalaufbereitung zu einer Unter- oder Überbelichtung der Pixel, wodurch sich die Güte der akquirierten Daten verschlechtert ([FBR⁺15], S. 390). Besonders gut veranschaulichen lässt sich dieser Effekt anhand der Aufnahme eines Schachbrettmusters mit seinen unter-

⁴¹ Bei der hier eingesetzten ToF-Tiefenbildkamera lassen sich die Integrationszeit und die Modulationsfrequenz nicht manuell verändern ([FPB⁺16], S. 29). Die damit direkt in Verbindung stehenden Fehlerquellen werden daher im Rahmen dieser Analyse nicht weiter betrachtet.

schiedlichen schwarzen und weißen Feldern. Anhand von Abbildung 5.3 wird in diesem Zusammenhang deutlich, dass das aufgenommene Kamerabild keine idealtypische plane Ebene repräsentiert, sondern deutliche Vertiefungen auf dem erfassten Feldmuster zu erkennen sind. Im vorliegenden Fall wurden die reflektierten Signale der dunklen Schachbrettflächen stärker absorbiert als die der weißen Flächen. Bei der Demodulation des empfangenen Signals hat dies u. a. zu einer abgeschwächten Signalamplitude geführt, die – wie bereits in Kapitel 4.2 erläutert – im Zusammenhang mit der Tiefenwertermittlung steht, woraus die unterschiedlichen Distanzabweichungen bei den jeweiligen Farbfeldern resultierten. ([Lin10], S. 44; [LNL⁺13], S. 8). Hieran wird bereits ersichtlich, dass die Oberflächen der betrachteten Aufnahmeobjekte – je nach Beschaffenheit und Material – unterschiedliche radiometrische Eigenschaften hervorrufen und einen deutlichen Einfluss auf die erfassten Tiefenwerte nehmen können. Ein zusätzlicher Aspekt, den es in diesem Zusammenhang zu berücksichtigen gilt, ist die Ausrichtung der Objektoberfläche zur Kamera und den daraus resultierenden Einfalls- und Ausfallswinkeln der NIR-Strahlen. In Kombination mit den zuvor erwähnten Mehrwegreflexionen ergeben sich daraus überaus komplexe Konstellationen hinsichtlich der eigentlichen Ursachen- und Wirkzusammenhänge des ToF-Prinzips.



Abbildung 5.3: Auswirkungen des unterschiedlichen Reflexionsverhaltens einer gemusterten Objektoberfläche auf die erfassten Mess-/Bilddaten

Des Weiteren treten beim gleichzeitigen Einsatz mehrerer ToF-Tiefenbildkameras Störeinflüsse durch Interferenzen auf, die es bei der Datenakquisition ebenfalls zu berücksichtigen gilt ([SLK15], S. 4). Einen Hauptgrund für den Einsatz mehrerer Kameras bildet die Erweiterung des Erfassungsbereichs der jeweils betrachteten Aufnahmeszene. Je nach Anzahl und Anordnung der einzelnen ToF-Kameras (Position, Neigungswinkel etc.) können die emittierten Signale der jeweiligen Kamera miteinander interferieren und somit die erfassten Messdaten verfälschen ([KBA16], S. 345). Neben den Fehlerursachen durch die verbaute Lichtquelle einer anderen Kamera muss in diesem Zusammenhang auch die Einflussnahme von Fremdlicht innerhalb der vorzufindenden Messumgebung berücksichtigt werden (z. B. Sonnenstrahlung). Da die Tiefenbildkamera für die Signalmodulation nahes

Infrarotlicht (NIR) verwendet, besteht hierbei die Möglichkeit, dass es durch das eindringende Fremdlicht zu einer Signalüberlagerung bei den ausgesandten Lichtstrahlen kommt (s. bspw. Infrarotstrahlung der Sonne), wodurch die erfassten Messdaten verfälscht werden. ([But14], S. 4; [LMM⁺15], S. 96)

5.1.2 Einordnung der Einflussfaktoren

Die zuvor aufgeführten Erläuterungen zu den verschiedenen Einflussfaktoren einer ToF-Tiefenbildkamera haben bereits aufgezeigt, dass die Identifikation der eigentlichen Fehlerquelle aufgrund der vielzähligen Einflussmöglichkeiten als äußerst vielschichtig einzustufen ist. Daher ist es in der Praxis und der Literatur üblich, die einzelnen Ursachen hinsichtlich des eigentlichen Anwendungsbereiches zu betrachten und zu analysieren, was in den folgenden Abschnitten in Bezug auf den anvisierten Laderaumeinsatz schrittweise vorgenommen wird.

Bei der Erfassung von Tiefenmessdaten muss grundsätzlich berücksichtigt werden, dass in der Regel die jeweils einwirkenden Einflussfaktoren zeitgleich und vermischt auftreten. Eine systemübergreifende und synchrone Charakterisierung aller Einflussfaktoren ist in solchen Fällen als sehr unübersichtlich und wenig Erfolg versprechend einzustufen. Damit die auftretenden Messfehler⁴² zielgerichtet minimiert werden können, müssen die jeweiligen Ursachen isoliert betrachtet und analysiert werden. Hierfür wird in der Literatur eine grundsätzliche Charakterisierung der auftretenden Messfehler vorgenommen. Bei aktiven optischen Messsystemen wird generell zwischen zwei verschiedenen Fehlertypen unterschieden ([Kah08], S. 49; [FBR⁺15], S. 389), die sich für die Verwendung in dieser Arbeit wie folgt charakterisieren lassen ([PK11], S. 16; [SK14], S. 23; [Müh17b], S. 21):

- **Systematische Messfehler** weisen ein wiederkehrendes und unverändertes Auftreten des Fehlers bei gleichbleibenden Bedingungen sowie bekannten Fehlerursachen auf. Das Messergebnis weist somit bei einer systematischen Abweichung immer gleiche und konstante Differenzen zum eigentlich wahren Tiefenwert auf – z. B. bei den distanzbezogenen (periodischen) Tiefenwertschwankungen.
- **Stochastische Messfehler** treten zufällig auf und sind nicht kontrollierbar. Bei sich wiederholenden Tiefenwertmessungen unter gleichen Rahmenbedingungen führen sie zu einer statistischen Verteilung der Messwerte. Das Messergebnis weist somit eine sich ändernde Streuung zum wahren Messwert auf – bspw. beim pixelspezifischen Sensorrauschen.

⁴² In der englischsprachigen Literatur wird für den deutschen Begriff „Abweichung“ vorwiegend das Wort „Error“ verwendet. Daher wird im Folgenden der Fachbegriff Messabweichung auch mit Messfehler gleichgesetzt. Zur thematischen Vertiefung siehe hierzu ([Fuc12], S. 22).

Neben der Unterscheidung zwischen systematischen und stochastischen Messfehlern wird in der Literatur zudem zwischen der eigentlichen Verursachungsquelle unterschieden – bspw. in Form von hardware-, objekt-, daten- oder umweltbezogenen Einflüssen ([CR13], S. 141; [FAT11], S. 1919; [LK11], S. 1015; [LMM⁺15], S. 95). Dies stellt insbesondere beim Einsatz komplexer Messsysteme eine geeignete Ausgangsbasis dar, um eine detaillierte Strukturierung und Beschreibung der jeweiligen Ursachen vorzunehmen. Ein wesentlicher Nachteil, der sich aus solch einer Feingliederung ergibt, ist die richtige Zuordnung der jeweiligen Störgröße zur entsprechenden Verursacherquelle, da ein Großteil dieser Fehlerquellen von gegenseitiger Abhängigkeit geprägt ist und das zeitgleiche Auftreten sich nicht vermeiden lässt. Zur Vereinfachung der Fehlerzuordnung wird im Rahmen dieser Ausarbeitung auf eine vereinfachte Gruppierung der Fehlerquellen zurückgegriffen ([Fuc12], S. 22):

- **Interne Fehlerquellen:** Hierzu gehören alle Störgrößen, die sich aus dem internen Aufbau der systembezogenen Hardwarekomponenten ergeben und weitgehend unabhängig von der jeweiligen Einsatzumgebung (bspw. Laderaum) betrachtet werden können. Hierunter werden insbesondere Einflussfaktoren eingeordnet, die z. B. im Zusammenhang mit dem kameraspezifischen Chipaufbau, der Lichtwellengenerierung oder der Signalauswertung stehen.
- **Externe Fehlerquellen:** Hierunter werden alle Störgrößen subsumiert, deren Einflussfaktoren sich durch die Umgebung, in der die Kamera eingesetzt wird, ergeben und die somit von außen auf die Kamera einwirken. Im vorliegenden Fall ergeben sich hieraus primär Einflüsse durch die sich ändernden Umgebungsbedingungen innerhalb des Laderaums. Hierzu gehören insbesondere die schwankenden Laderaumtemperaturen oder die sich beim Be- und Entladen ändernde Zusammensetzung der einzelnen Ladeeinheiten (Form, Material, Struktur etc.).

Anhand der aufgeführten Erläuterungen wird es ermöglicht, eine auftretende Störquelle bzw. einen Messfehler eindeutig einer entsprechenden Gruppe (intern/extern) und dem entsprechenden Typ (systematisch/stochastisch) zuzuordnen.⁴³ Anhand dieser getroffenen Konventionen lassen sich in einem nächsten Schritt die in Bezug zur eingesetzten ToF-Tiefenbildkamera stehenden Fehlerquellen identifizieren und gemäß den getroffenen Vorgaben einordnen (s. Tabelle 5.1).

⁴³ Die Klassifizierung eines Messfehlers hängt u. a. vom Kenntnisstand der eigentlichen Messaufgabe ab. Im Rahmen der durchgeführten Recherchen wurde festgestellt, dass identifizierte Fehlerquellen je nach Literaturquelle mal als stochastisch oder mal als systematisch klassifiziert wurden. Hierbei muss berücksichtigt werden, dass es in der Messtechnik durchaus üblich ist, einen ursprünglich als stochastisch definierten Fehler aufgrund eines verbesserten Systemverständnisses (deterministische Fehlerquellen) fortan als systematischen Fehler zu betrachten ([PK11], S. 17). Im Rahmen dieser Arbeit wird daher die Klassifizierung der jeweils identifizierten Fehlerquelle insbesondere im Hinblick auf den relevanten Kameratyp sowie den anvisierten Laderaumeinsatz vorgenommen.

Tabelle 5.1: Auflistung der identifizierten Einflussfaktoren gemäß erarbeitetem Einordnungsschema

	Intern (Kamera)	Extern (Umgebung)
Systematisch	<ul style="list-style-type: none"> Amplitudenbezogene Tiefenwertschwankungen ([SLK15], S. 4) Distanzbezogene (oszillierende) Tiefenwertschwankungen („Wiggleing“) ([LMM⁺15], S. 98) Temperaturabhängige Systemstabilität der Tiefenwerte (Einlaufverhalten) ([CGM⁺16], S. 585) Linsenbasiertes Streulicht (Linsenreflexion) ([FPB⁺16], S. 28) 	<ul style="list-style-type: none"> Reflexionseigenschaften der Materialoberflächen (Aufnahmeobjekte) [SLC¹⁵], S. 8 Temperaturverlauf innerhalb der Messumgebung ([Kah08], S. 77) Interferenzen beim simultanen Einsatz von mehreren Kameras (Kameraanordnung) [KBA16] Mehrachtreflexionen im Objektraum ([WS17], S. 42)
Stochastisch	<ul style="list-style-type: none"> Sensorspezifisches Rauschverhalten ([FBR¹⁵], S. 390; [SLC¹⁵]; [WS17]): <ul style="list-style-type: none"> Axiales Sensorrauschen Laterales Sensorrauschen Schrotrauschen etc. 	<ul style="list-style-type: none"> Fremd-/Hintergrundlicht (Einsatz im Außenbereich) ([FBR¹⁵], S. 392 oder [But14], S. 4) Tiefendiskontinuitäten (Sprungkanten, Fliegende Pixel, vermischt Pixel) ([WS17], S. 41) Bewegungsartefakte (dynamische Szenenaufnahme) ([SLK15], S. 16)

Als Ausgangsbasis für die oben aufgeführte Auflistung der zu berücksichtigenden Fehlerquellen diente eine detaillierte Literaturrecherche. Der Fokus der Recherche lag auf Publikationen, die sich zum einen generell mit den typischen Fehlerursachen einer ToF-Tiefenbildkamera befassten und zum anderen Veröffentlichungen, die insbesondere die Fehlerquellen im Zusammenhang mit der in dieser Arbeit verwendeten Tiefenbildkamera untersuchten. Auf die jeweils relevanten Fehlerquellen wird im nächsten Kapitel nochmals vereinzelt eingegangen, um insbesondere den Bezug der jeweiligen Fehlerursachen und -auswirkungen zum Laderaumeinsatz vertiefend darstellen zu können.

5.1.3 Eingrenzung der identifizierten und relevanten Einflussfaktoren

Im vorherigen Abschnitt wurden die Fehlerquellen gemäß den getroffenen Konventionen klassifiziert. Darauf aufbauend erfolgt in einem nächsten Schritt die Eingrenzung der Einflussgrößen hinsichtlich der Relevanz für den angestrebten Einsatz der Tiefenbildkamera im Laderaum. Den Kernbestandteil hierfür bildet die inhaltliche Aufbereitung der identifizierten und gruppierten Einflussfaktoren. Anhand von publizierten Untersuchungsergebnissen wurden hierfür die bisher betrachteten und identifizierten Einflussfaktoren hinsichtlich ihres Erkenntnisstandes und der Relevanz für den Einsatz im Laderaum beurteilt. Das Ziel dieses Abschnittes ist es, vorhandene Untersuchungsdefizite bei den bisher identifizierten Fehlerquellen bezüglich des angestrebten Laderaumeinsatzes aufzuzeigen, um die damit in Verbindung stehenden Auswirkungen anschließend auf Basis eigener Untersuchungsmaßnahmen evaluieren zu können. Als Ausgangsbasis für die Aufbereitung des

aktuellen Untersuchungsstandes dient die im vorherigen Kapitel erarbeitete Klassifizierung der identifizierten Fehlerquellen (s. Tabelle 5.1).

Interne und externe stochastische Einflussfaktoren:

Wie bereits zuvor erwähnt, können die Auswirkungen der verschiedenen stochastischen Fehlerquellen nicht ohne Weiteres kontrolliert werden. Durch die in die Kameraelektronik integrierten Kompensationsmechanismen lassen sich vereinzelte Messfehler bereits während des Datenerfassungsprozesses filtern oder können im Rahmen der nachgelagerten Datenweiterverarbeitung korrigiert werden ([KBR14], S. 7). Dies trifft auch auf die beschriebenen und auftretenden Tiefendiskontinuitäten zu. Einzelne Tiefendiskontinuitäten können bspw. durch die Anwendung bilateraler Filter [WBS15] oder des 3D-Superresolutionsverfahrens ([CST⁺13]; [VMC⁺14]) beheben werden. Darüber hinaus lassen sich in diesem Zusammenhang auch klassische Verfahren wie z. B. der k-Nearest-Neighbor-Algorithmus (KNN) zur Fehlerkompensation anwenden [Alt92]. Die oben genannten Fehlerquellen werden daher nicht weiter vertieft.

Ein weiterer relevanter Aspekt, den es beim Betrieb der Tiefenbildkamera im Laderaum mit zu berücksichtigen gilt, ist der Einfluss von Fremdlicht – bspw. in Form von eindringenden Sonnenstrahlen. In diversen Veröffentlichungen wurde der mobile Einsatz der Tiefenbildkamera in der Außenumgebung untersucht ([But14], S. 4; [FBR⁺15], S. 392; [LML⁺15], S. 13078). Dabei wurde festgestellt, dass die Tiefenbildkamera bei direkter Sonneneinstrahlung im Messbereich von bis zu 2 m äußerst robuste Tiefenwerte liefert, die sich ab einem Entfernungsbereich von 3 m deutlich verschlechtern und ab 4 m zum Teil überhaupt keine verwertbaren Tiefendaten mehr liefern ([But14], S. 4; [FBR⁺15], S. 392). Unter der Berücksichtigung, dass die Datenerfassung im Laderaum erst erfolgt, wenn dieser vollständig geschlossen ist, ist die Störeinwirkung von Fremdlicht als äußerst gering einzustufen. Darüber hinaus sollten die Kamerapositionen – ausgehend von einem Kofferaufbau – so festgelegt sein, dass selbst bei offenen Laderaumtüren nur von einer geringen Sonneneinstrahlung auszugehen ist. Aufgrund dieser Gegebenheiten wird der Aspekt des Fremdlichts in dieser Form nicht weiter verfolgt. Da die Datenerfassung zudem nur während des Stillstandes der Transporteinheit erfolgen soll und somit von einer rein statischen Laderaumszene ausgegangen wird, werden auch die erwähnten Einflüsse durch Bewegungssartefakte von vornherein ausgeschlossen.

Untersuchungen hinsichtlich des Sensorrauschverhaltens haben aufgezeigt, dass das axiale Rauschen quadratisch zur Messdistanz ansteigt (Abweichungen von bis zu 4 mm), wohingegen bei der lateralen Betrachtung äußerst unterschiedliche Werte auftreten. Diese Schwankungen fallen je nach betrachteter Seite (linke oder rechte Kamerahälfte) unterschiedlich aus und stehen u. a. in Verbindung mit der Positionierung und Anordnung der IR-Lichtquelle. ([FBR⁺15], S. 391) Im Bildzentrum treten annähernd konstante Tiefenwer-

te auf, die eine Abweichung von ± 1 mm bis ± 3 mm aufweisen. Zum Bildrand hingegen steigen die erfassten Messabweichungen deutlich an, sodass Streumaße von bis zu 30 mm möglich sind ([FBR¹⁵], S. 389). Je nach betrachteter Szene können zudem am äußersten Bildrand vereinzelte Pixel gar nicht umgewandelt werden ([CGM¹⁶], S. 587). Daraus lässt sich ableiten, dass für den späteren Betrieb der Tiefenbildkamera im Laderaum eine ausreichende Überschneidung des jeweiligen Kamerasichtfeldes angestrebt werden sollte, damit der relevante Erfassungsbereich weitgehend im Kamerazentrum liegt. Da die betrachteten Messdistanzen in den meisten Publikationen auch den anvisierten Messbereich innerhalb des Laderaums abdecken, werden in Bezug auf das dazugehörige Rauschverhalten keine Messanalysen vorgenommen.

Interne systematische Einflussfaktoren:

Bei den distanzbezogenen Tiefenwertschwankungen konnte aufgrund der bereits durchgeführten Voruntersuchungen eine Messabweichung von -5 mm bis +10 mm festgestellt werden – je nach Pixelposition und Messabstand (s. Kapitel 4.3.2). Anhand dieser Versuchsergebnisse konnte zudem gezeigt werden, dass die Tiefenbildkamera bis zu einem Entfernungsbereich von 4 m eine verlässliche Datenakquisition ermöglicht. Diese Erkenntnisse decken sich auch mit den Untersuchungsergebnissen anderer Autoren ([CGM¹⁶], S. 588; [FBR¹⁵], S. 389; [SLK15], S. 13). Für die anstehende experimentelle Erprobung des Erfassungssystems weist der verwendete Laderaum eine Breite und Höhe von 2,48 m x 2,39 m auf. Daraus ergibt sich eine Laderaumdiagonale von maximal 3,44 m, die innerhalb des zuvor angegebenen und untersuchten Erfassungsbereiches liegt und somit nicht weiter vertieft wird (s. Kapitel 3.2.2, Normvorgaben bei den Laderaumabmessungen).

Bei den Veröffentlichungen hinsichtlich der amplitudenbezogenen Tiefenwertschwankungen sind u. a. aufgrund der in der Kameraelektronik integrierten Filter (Onboard) nur geringe Messabweichungen zu verzeichnen ([FPB¹⁶], S. 38). Im Vergleich zu konkurrierenden Kamerasystemen erreicht die ToF-Kamera ein überaus stabiles und gutes Messverhalten ([SLK15], S. 14; [FPB¹⁶], S. 39), sodass auch zu diesem Untersuchungskontext keine zusätzlichen Versuche unternommen werden. Die amplitudenbezogenen Tiefenwertschwankungen werden auch oft mit dem kamerainternen Streulicht in Verbindung gebracht. Dabei wird davon ausgegangen, dass diese im Vergleich zu den amplitudenbezogenen Einflüssen dominieren ([FPB¹⁶], S. 38). Genauere Aussagen zu den Auswirkungen dieses Einflussfaktors existieren derzeit jedoch nicht und werden im Rahmen dieser Arbeit aufgrund der atypischen Bedeutung für den Laderaum nicht weiter verfolgt.

Größere Abweichungen, die durchaus von Relevanz für diese Arbeit sind, wurden bei der Systemstabilität der Kamera hinsichtlich des temperaturabhängigen Einlaufverhaltens festgestellt. Die Angaben bezüglich der angesetzten Einlaufzeiten, um von der Kamera weitgehend stabile Tiefenwerte zu erhalten, variieren in den Veröffentlichungen von 20 min bis

120 min (s. [FBR⁺15], S. 389; [FPB⁺16], S. 29; [LMM⁺15], S. 96; [SLK15], S. 12; [JYT⁺17], S. 7). Vereinzelt wurde auch auf die Einflussnahme des installierten Ventilators auf die Tiefenwerte hingewiesen ([LMM⁺15], S. 96; [CGM⁺16], S. 586). Im Hinblick auf die Erfassung der relevanten Daten im Laderaum wird eine Datenerfassung in nur wenigen Sekunden angestrebt. Im Vergleich zu den bisherigen Veröffentlichungen ist es daher erforderlich, das Einlaufverhalten der Kamera unter der Berücksichtigung von verschiedenen möglichen Betriebsmodi separat zu analysieren. Anhand der bisherigen Untersuchungen und Veröffentlichungen lassen sich für den angestrebten Anwendungsfall keine direkten Rückschlüsse ziehen, sodass hierzu weiterer Untersuchungsbedarf besteht.

Externe systematische Einflussfaktoren:

Als ein typischer externer Störfaktor ist das Reflexionsverhalten der jeweiligen Oberflächenmaterialien innerhalb der betrachteten Kameraszene anzusehen. Im Rahmen der bisher veröffentlichten Untersuchungen wurden verschiedene herkömmliche Materialien (Holz, Papier etc.) mit zum Teil unterschiedlichen Farbtönen analysiert ([CGM⁺16], S. 589; [LMM⁺15], S. 96; [SLC⁺15], S. 8; [WS17], S. 41). Dabei wurde festgestellt, dass die betrachteten Materialien individuellen Einfluss auf den Amplitudenverlauf und somit auch auf die Tiefenwertgenauigkeit nehmen. Dabei kommt es – je nach betrachtetem Material und Einfallswinkel – zum Teil zu sehr großen Tiefenwertabweichungen. Eine detaillierte Untersuchung der logistikspezifischen Materialien – abgestimmt für den Einsatz der Tiefenbildkamera im Laderaum – hat in diesem Kontext noch nicht stattgefunden und wird daher im Rahmen dieser Arbeit vertieft (s. Kapitel 5.3). Zusammen mit den bereits genannten Reflexionsverhalten der Oberflächenmaterialien kommen beim Einsatz der Tiefenbildkamera innerhalb des Objektraumes auch entsprechende Mehrfachreflexionen oder vermischt Pixel zum Tragen. Analysen haben aufgezeigt, dass durch diesen Effekt Messabweichungen von bis zu 19 mm entstehen können, woraus gewölbte Konturen innerhalb der Tiefenbildaufnahme resultieren ([WS17], S. 42). Ansätze zur Kompensation dieses Effektes sind den entsprechenden Veröffentlichungen zu entnehmen ([BFI⁺14]; [FSK⁺14]).

Eine weitere potenzielle Störgröße stellt der gegenseitige Einfluss von mehreren gleichzeitig betriebenen Tiefenbildkameras desselben Typs dar. Durch die daraus resultierenden Interferenzen kann es unter anderem nicht nur zu einer Erhöhung der auftretenden Messabweichungen, sondern auch zu einem deutlichen Anstieg von ungültigen Pixeln innerhalb des jeweils betrachteten Interessenbereichs kommen ([KBA16]; [SLK15], S. 11). Bei einer redundanten Kameraausrichtung wurde stellenweise eine maximale Messabweichung von 19 mm festgestellt ([SLK15], S. 11). Eine weitere Untersuchung, in der die zweite Kamera innerhalb eines festgelegten Umkreises um die fest positionierte erste Kamera bewegt wurde, hat aufgezeigt, dass eine durchschnittliche Messabweichung von 8 mm auftritt ([KBA16], S. 346). Im Rahmen der angestrebten Laderaumanordnung kommen die Tiefenbildkameras auf beiden Laderaumseiten zum Einsatz. Somit wird es sowohl eine seit-

lich nebeneinander als auch versetzt gegenüberliegende Kamerapositionierung geben. Des Weiteren wurde zuvor erwähnt, dass zur Erweiterung des Erfassungsbereichs eine Überschneidung der einzelnen Kamerablickfelder anzustreben ist. Der Einfluss einer solchen Konstellationsform wurde jedoch noch nicht analysiert. Aus diesem Grund wird im Rahmen dieser Arbeit der Einfluss von simultan betriebenen Kameras mit einem sich überschneidenden Sichtfeld untersucht (s. Kapitel 5.4).

Wie bereits bei den internen Einflussfaktoren erwähnt, wirkt sich bei der Inbetriebnahme der Kamera der Temperaturverlauf auf das Messverhalten aus. In entsprechenden Veröffentlichungen wurde stets von gleichbleibenden und vergleichbaren Außen-/Umgebungstemperaturen ausgegangen. Im Laderaum können diese konstanten Umgebungsbedingungen jedoch nicht gewährleistet werden; es ist vielmehr von sich deutlich ändernden Temperaturverläufen auszugehen [JV12]. Die Auswirkungen der Umgebungstemperatur auf die Tiefenwerte wurden bisher lediglich mit anderen Kameratypen thematisiert ([FM13]; [KI08], S. 6). Eine kameraspezifische Untersuchung, bei der explizit die hier eingesetzte Tiefenbildkamera zum Einsatz gekommen ist, wurde bisher nicht durchgeführt. Daher ist es erforderlich, die Systemstabilität der Tiefenbildkamera auch unter der Einflussnahme der Temperaturentwicklung im Laderaum zu analysieren, was ein weiterer Schwerpunkt der experimentellen Untersuchungen darstellt.

Einen weiteren Einflussfaktor, den es im Kontext der potenziell anzutreffenden Umgebungsbedingungen zu nennen gilt, stellen die bereits genannten mechanischen Belastungen im Laderaum während des Transportvorgangs dar (s. Kapitel 3.2.3). Zwar ist die Datenakquisition während des Stillstands des Transportfahrzeugs/-mittels vorgesehen, allerdings lassen sich durch eine feste Montage der Kameras im Laderaum die mechanischen Einwirkungen auf die Kamera während der Fahrt in Form von Schwingungen und Stößen grundsätzlich nicht vermeiden. Aus diesem Grund muss überprüft werden, inwieweit sich die mechanischen Transportbelastungen auf den Aufbau oder die intrinsischen Parameter der Kamera auswirken (s. Kapitel 5.5).

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass es aufgrund des weitverbreiteten Einsatzes der betrachteten Tiefenbildkamera eine Vielzahl aufschlussreicher Veröffentlichungen gibt, in denen verschiedene Einflussfaktoren bei unterschiedlichen Einsatzbedingungen untersucht wurden. Für den fachgerechten Einsatz der Kamera im Laderaum lassen sich die gesammelten Erkenntnisse jedoch nicht immer ohne Weiteres übertragen. Dies erfordert vertiefende Untersuchungen, um die jeweils anwendungsbezogenen Lücken zu schließen. Um weitere potenzielle Ursachen- und Wirkzusammenhänge für den Einsatz im Laderaum berücksichtigen oder evtl. ausschließen zu können, sind daher ergänzende Untersuchungen erforderlich, die sich im Rahmen des weiteren Arbeitsverlaufs auf folgende Bereiche konzentrieren werden:

- Analyse der Kamerasystemstabilität in Abhängigkeit von der internen und externen Temperaturentwicklung
- Analyse der Tiefenwertschwankungen in Abhängigkeit vom Reflexionsverhalten der Materialien/Objekte im Laderaum
- Analyse der Interferenzen in Abhängigkeit von der Kameraanordnung im Laderaum
- Analyse der Kameraparameter in Abhängigkeit von den auftretenden mechanischen Belastungen während des Transports

5.2 Einfluss der Temperatur

Das thermische Systemverhalten der eingesetzten Tiefenbildkamera wurde in den bisherigen Untersuchungen nur in Bezug auf den Messwertverlauf während der Inbetriebnahme der Tiefenbildkamera analysiert. Dabei wurde stets von einer konstanten Umgebungstemperatur ausgegangen. Die zusätzliche Einbindung der kamerainternen sowie der umgebungsbedingten Temperaturveränderungen fand somit bisher keine explizite Berücksichtigung. Es existieren zwar Veröffentlichungen, in denen der Einfluss des externen Temperaturverlaufs aufgegriffen wurde; allerdings wurden dabei andere Kameratypen mit z. T. grundsätzlich verschiedenen Funktionsprinzipien analysiert (s. ([Fie14]; [KI08])).

Um die thermischen Auswirkungen innerhalb des Laderaums auf die Tiefenwerte spezifizieren zu können, wird daher im folgenden Abschnitt der Tiefenwertverlauf in Abhängigkeit von internen und externen Temperaturveränderungen analysiert. Im Vorfeld werden hierzu die relevanten Betriebszeiten für die Datenakquisition sowie die Temperaturbereiche für einen adäquaten Einsatz im Laderaum eingegrenzt, um darauf aufbauend das thermische Systemverhalten der Tiefenbildkamera experimentell untersuchen zu können.

5.2.1 Bestimmung der einwirkenden Temperaturbereiche

Die Temperaturentwicklung im Inneren des Kameragehäuses geht primär von den verbauten elektronischen Komponenten aus. Diese geben durch die physikalisch bedingte Verlustleistung Wärmeenergie frei, die wiederum einen internen Temperaturanstieg herbeiführt. Je nach Betriebsdauer steigt die Temperatur im Kameragehäuse unterschiedlich an. Zur Akquisition der erforderlichen Laderaumdaten reichen bereits wenige Sekunden für die Aufnahme einer Szene aus. Zu diesem Zweck ist es nicht zwingend erforderlich, dass sich die Tiefenbildkamera in dem sonst üblichen Dauerbetrieb befindet. Insbesondere hinsichtlich der begrenzten Energiekapazitäten bei den mobilen Transporteinheiten könnte hierdurch die Nutzungszeit deutlich erweitert werden – bspw. für den zwischenzeitlichen Akkubetrieb der Tiefenbildkamera. Anhand dieser Gegebenheiten wurde in einem ersten

Untersuchungsschritt der Temperaturanstieg innerhalb des Kameragehäuses exemplarisch analysiert. Hierfür wurde über die seitlichen Lüftungsschlitzte ein Temperatursensor in das Kameragehäuse geführt. Dieser wurde zur Datenerfassung mittig hinter der ToF-Einheit positioniert. Zusätzlich wurde die Temperaturverteilung im Gehäuse mittels einer Wärmebildkamera festgehalten (s. Abbildung 5.4).

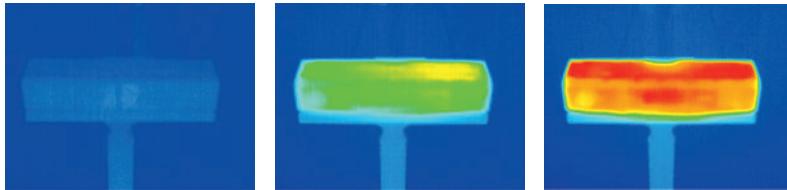


Abbildung 5.4: Erfassung der Temperaturentwicklung im Gehäuse mittels Wärmebildaufnahmen – Kaltbetrieb (links), Stand-by-Betrieb (mittig), Warmbetrieb (rechts).

Anhand der erfassten und anschließend ausgewerteten Temperaturdaten konnten drei verschiedene Betriebsmodi mit jeweils unterschiedlichen Ausgangstemperaturen bestimmt werden (T_I = Gehäuseinnentemperatur; T_U = Umgebungstemperatur):

- I. **Kaltbetrieb ($T_I \approx T_U$):** In diesem Betriebsmodus verfügt die Tiefenbildkamera über keine Betriebsspannung (komplett inaktiv). Die Innentemperatur der Tiefenbildkamera entspricht dadurch annähernd der jeweils vorzufindenden Umgebungstemperatur.
- II. **Stand-by-Betrieb ($T_I \approx 36^\circ\text{C}$):** Die Tiefenbildkamera ist an das Stromnetz angeschlossen; es findet jedoch noch keine aktive Datenerfassung statt. Durch diese Grundversorgung wird der Innenbereich der Kamera vorgewärmt. Die Gehäuseinnentemperatur liegt dann bei ca. 36°C .
- III. **Warmbetrieb ($T_I \approx 54^\circ\text{C}$):** Die Tiefenbildkamera befindet sich hierbei im eingeschalteten Datenerfassungsmodus. Alle Komponenten sind permanent aktiv, wodurch sich der Innenraum des Kameragehäuses auf eine Temperatur von etwa 54°C erwärmt.

Zur Bestimmung der externen Temperaturbereiche wurde als Nächstes die Temperaturentwicklung innerhalb des Laderraums näher betrachtet. Dabei ist zu berücksichtigen, dass der Temperaturverlauf im Laderraum nicht nur vom Außenklima beeinflusst wird, sondern zusätzlich auch vom jeweils verwendeten Aufbautyp sowie von den im Laderraum befindlichen Ladegütern abhängt ([GK07], S. 41). Anhand des verwendeten Aufbautyps kommt insbesondere der Wärmeaustausch zwischen der vorherrschenden Außentemperatur, den Laderraumwänden (Fläche) und der generellen Laderraumgröße (Volumen) zum Tragen. Bei einem isolierten Kühllaufbau lassen sich bspw. geringere Wärmedurchgangswerte ermitteln als bei einem einfachen Kofferaufbau. Hingegen weist ein Planenaufbau,

bei dem die angebrachten Planen die Laderaumbegrenzungen umhüllen, nochmals eine deutlich geringere Isolationsschicht und somit eine völlig andere Temperaturentwicklung als der Kofferaufbau auf. Zusätzlich beeinflussen der Transportverlauf (Weg), die geografische Lage (Klimazone) sowie die Jahres- und Tageszeit die Temperaturentwicklung im Laderaum. ([GDV18]; [GK07])

Anhand der obigen Ausführungen wird bereits deutlich, dass die Temperaturverläufe sehr variieren und eine generelle Aussage zur jeweils vorherrschenden Laderaumtemperatur nicht getroffen werden kann. Zur weiteren Eingrenzung der thermischen Untersuchungsbeziehen wurden daher zusätzlich die Vorgaben aus verschiedenen nationalen Richtlinien und internationalen Normen berücksichtigt. Von besonderer Relevanz sind hierfür die Angaben aus der DIN EN ISO 2233 und der ASTM D4332. ([DIN01]; [AST14])

Zur weiteren Spezifizierung der Temperaturverläufe wurden zudem Temperaturaufzeichnungen im Laderaum vorgenommen, um die auftretenden Schwankungen näher betrachten zu können. Anhand der daraus resultierenden Erkenntnisse sollte eine Einschätzung ermöglicht werden, welchen Temperaturschwankungen die Tiefenbildkamera bspw. innerhalb eines Tages ausgesetzt werden kann. Die Ausgangsbasis hierfür bildeten eigene Temperaturaufzeichnungen im Laderaum über einen Zeitraum von 12 Monaten.⁴⁴ Anhand der erfassten und ausgewerteten Daten konnte u. a. festgestellt werden, dass innerhalb von 16 bis 24 Stunden natürliche Temperaturveränderungen von 20 °C bis 29 °C auftraten. Je nach Jahreszeit sowie Be- und Entladebereich (innen/außen) können diese Temperaturschwankungen zudem deutlich höher ausfallen. Die aufgezeichneten Daten verdeutlichen nochmals die Notwendigkeit, die Auswirkungen der Laderaumtemperatur auf das Messverhalten der Tiefenbildkamera explizit zu untersuchen. Anhand der durchgeföhrten Temperaturanalysen sowie der Vorgaben aus den Richtlinien und Normen konnten sieben verschiedene Ausgangstemperaturen bestimmt werden, die jeweils die Grundlage zur Durchführung der thermischen Versuchsreihen bilden (s. Abbildung 5.6).⁴⁵

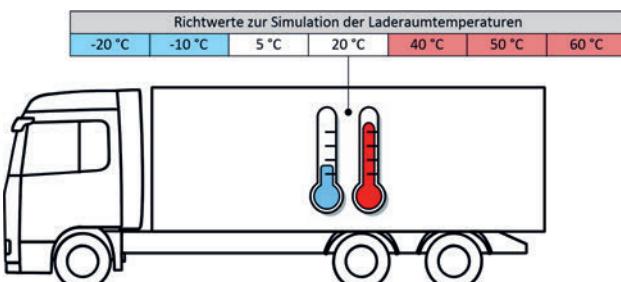


Abbildung 5.5: Festgelegte Temperaturen für die Versuchsdurchführung

⁴⁴ Hierbei bleiben temperaturgeführte Transporte unberücksichtigt.

⁴⁵ Für die Versuchsdurchführung wurde eine maximal zulässige Temperaturabweichung von ± 2 °C festgelegt (in Anlehnung an die Normvorgaben).

5.2.2 Untersuchung des temperaturbezogenen Einlaufverhaltens

Die zuvor ermittelten Temperaturverläufe im Kameragehäuse haben gezeigt, dass innerhalb der verschiedenen Betriebsmodi eindeutige Temperaturunterschiede auftreten. Anhand der getätigten Messungen und Wärmebildaufnahmen können jedoch keine direkten Rückschlüsse auf den Tiefenwertverlauf der Kamera gezogen werden. Aus diesem Grund wurden in einem weiteren Untersuchungsschritt der Tiefenwert- und Temperaturverlauf synchron erfasst und analysiert.

Im Vorfeld wurden hierzu die Aufwärmzeiten für die jeweiligen Betriebsmodi erfasst (s. Abbildung 5.6). Die Aufzeichnung der Daten erfolgte über einen längeren Zeitraum (+10 Stunden) mit unterschiedlicher Verweildauer, um die einzelnen Übergänge zu den jeweiligen Temperaturphasen (Aufwärm-/Abkühlphase) hervorheben sowie die Zeiten zur Erreichung der einzelnen Betriebsmodi spezifizieren zu können.

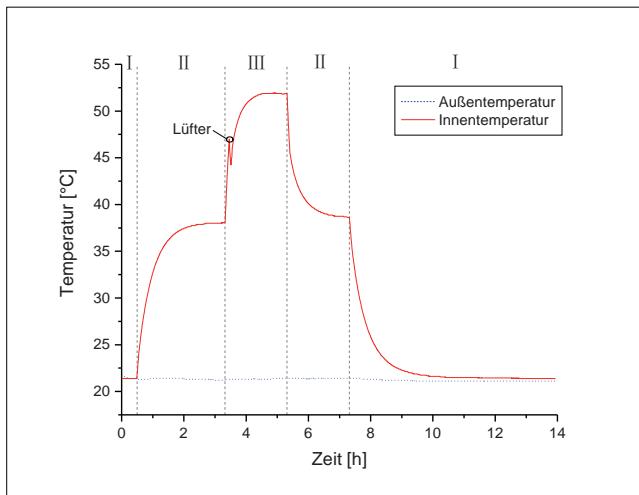


Abbildung 5.6: Verlauf der Gehäuseinnentemperatur in den jeweiligen Betriebsmodi (Stufe I – III) der Tiefenbildkamera

Anhand der ermittelten Temperaturen und Zeiten konnte aufgezeigt werden, dass die Abkühlphase um das 1,5-Fache länger dauert als die eigentliche Aufwärmphase der Tiefenbildkamera. Ferner hängt die Abkühlungszeit für die Akklimatisierung im Kaltbetrieb sehr stark von der jeweils anzutreffenden Umgebungstemperatur ab. Neben dieser behutsamen Ansteuerung der jeweiligen Betriebsmodi besteht ferner die Möglichkeit, die Kamera direkt aus dem Kaltbetrieb in den aktiven Akquisitionsbetrieb zu nehmen. Dadurch wird nicht nur der Stand-by-Betrieb übergangen, sondern auch die Zeit zur Erreichung des Warmbetriebs nahezu halbiert. Des Weiteren konnte anhand der ausgewerteten Daten fest-

gestellt werden, dass sich der integrierte Lüfter bei ca. 54 °C einschaltet und zu einer kurzzeitigen Abkühlung der Gehäuseinnentemperatur führt.

Um den Einfluss der kamerainternen Temperatur besser analysieren zu können, wurden in einem nächsten Schritt die Tiefendaten in Abhängigkeit vom Temperaturverlauf aufgezeichnet und ausgewertet. Die durchgeführten Messungen bestätigten nicht nur einen Zusammenhang zwischen dem Temperatur- und Tiefenwertverlauf, sondern verdeutlichten auch die Einflussnahme des Lüfters. Es konnte aufgezeigt werden, dass sich dessen Luftzirkulation beim Ein- und Ausschalten direkt auf die erfassten Tiefenwerte auswirkt (s. Abbildung 5.7). Innerhalb der betrachteten Akquisitionsphase wies der maximale und minimale gemessene Tiefenwert eine Spannweite von 12 mm auf. Eine nahezu konstante Betriebstemperatur wurde nach etwa 70 min. erreicht, was sich zugleich auch auf den Verlauf der Tiefenwerte auswirkte (Warmbetrieb).

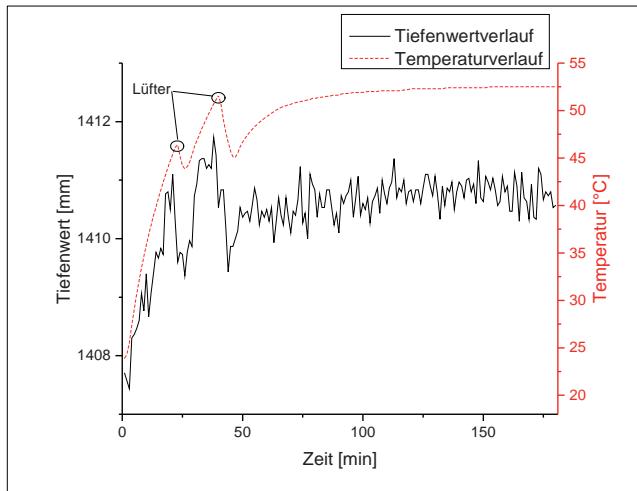


Abbildung 5.7: Verlauf der Tiefenwerte in Abhängigkeit von der Temperaturentwicklung im Kameragehäuse

Um den Tiefenwertverlauf in Abhängigkeit vom jeweiligen Betriebsmodus weiter spezifizieren zu können, wurden als Nächstes Tiefenwertmessungen bei unterschiedlichen Entfernungsmessungen durchgeführt. Hierfür wurde der Versuchsaufbau aus Kapitel 4.3.2 verwendet. Die Distanzmessungen erfolgten an sechs verschiedenen Messpunkten in einem Entfernungsbereich von 500 mm bis 3000 mm. Am jeweiligen Messpunkt wurden jeweils 200 Aufnahmen im Kalt-, Stand-by- und Warmbetrieb erfasst. Zur Auswertung der Tiefen-

wertverläufe im jeweiligen Betriebsmodus wurde ein punkt- und ein flächenbasierter Pixelvergleich vorgenommen.⁴⁶

Die Auswertung der erfassten Messdaten zeigte bei den jeweiligen Betriebsmodi einen nahezu identischen Verlauf auf (s. Abbildung 5.8). Wie zu erwarten war, stiegen die ermittelten Standardabweichungen mit zunehmender Entfernung an. Der Vergleich der ermittelten Messabweichungen – im jeweiligen Betriebsmodus – verdeutlichte insbesondere nochmals die Tiefenwertschwankungen bei den einzelnen Messdistanzen (Stichwort: wiggling error).

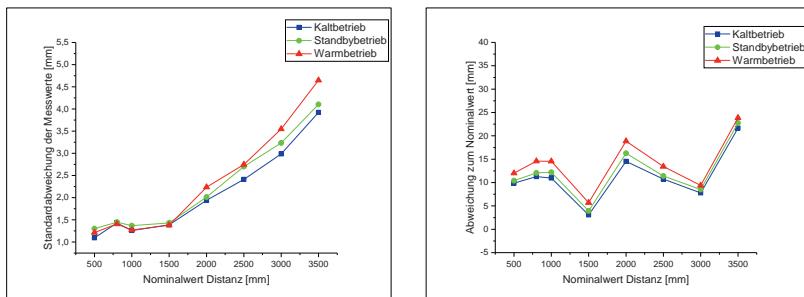


Abbildung 5.8: Darstellung der Standardabweichung der erfassten Messwerte (links) und Vergleich der Messabweichung zum Nominalwert der betrachteten Distanz (rechts)

Damit der Einfluss dieses Effekts weitgehend außer Acht gelassen werden konnte, wurde für den weiteren Datenvergleich der Warmbetrieb bei konstanter Innentemperatur als Ausgangsbasis festgelegt. Anhand dieser Vorgabe wurden die ermittelten Daten aus dem Kalt- und dem Warmbetrieb erneut verglichen. Hierdurch konnte insbesondere der Temperatureinfluss auf die Tiefenwerte im jeweiligen Betriebsmodus hervorgehoben werden (s. Abbildung 5.9). Anhand der aufgetragenen Messdaten wird deutlich, dass die Linienverläufe nicht konstant sind, sondern minimale Abweichungen aufweisen. Zurückzuführen ist dies u. a. auf die Temperatur erfassung in einem nicht klimatisierten Raum. Die Auswirkungen dieser minimalen Temperaturschwankungen waren auch in den einzelnen Tiefenwertverläufen erkennbar und verdeutlichten nochmals den direkten Zusammenhang dieser beiden Messgrößen. Für die weitere Auswertung der erfassten Messdaten wurde anschließend die Methode der kleinsten Fehlerquadrate angewandt. Dadurch konnten die vorhandenen Messwerte mittels einer Ausgleichsgeraden angepasst werden. In Kombination mit der anschließenden Korrelations- und Regressionsanalyse konnte somit ein eindeutiger Zusammenhang zwischen Tiefenwert- und Temperaturabweichung bestimmt werden. Im vorliegenden Fall besitzt die Tiefenbildkamera für den Stand-by-Betrieb – ausgehend vom

⁴⁶ Für die Datenauswertung wurden während der gesamten Versuchsdurchführung das gleiche Pixel sowie die gleiche Fläche (3 x 3 Pixel) herangezogen.

Warmbetrieb – eine mittlere Messabweichung von -1,93 mm, die im Vergleich zum Kaltbetrieb auf -2,87 mm ansteigt.

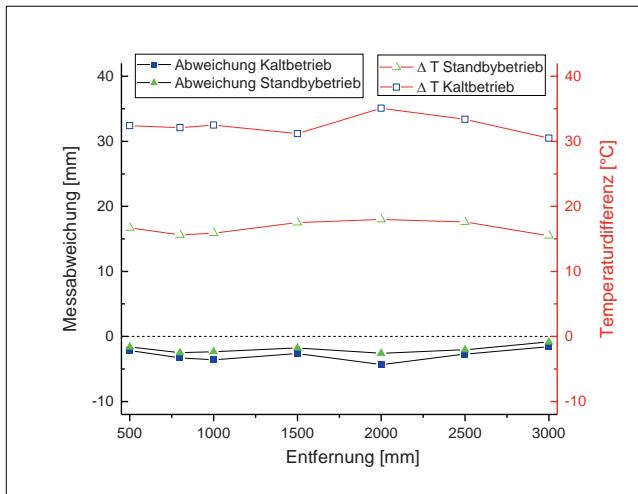


Abbildung 5.9: Vergleich der Tiefenwertabweichungen und Temperaturdifferenzen anhand der erfassten Rohdaten (Warmbetrieb als Ausgangsbasis, s. Nulllinie)

Ein weiterer Aspekt, den es im Rahmen des temperaturbezogenen Einlaufverhaltens zu untersuchen galt, waren evtl. auftretende Veränderungen am optischen Linsensystem aufgrund der jeweils auftretenden Temperaturunterschiede. Wie in Kapitel 4.2 bereits beschrieben wurde, lässt sich solch eine Veränderung durch den Vergleich der intrinsischen Kameraparameter feststellen. Zu deren Bestimmung wurde eine Kalibrierung nach dem in Kapitel 4.3.1 vorgegebenen Prozedere durchgeführt. Hierfür wurde die Tiefenbildkamera jeweils aus dem Kalt-, Stand-by- und Warmmodus in Betrieb genommen. Für jeden Betriebsmodus wurden 10 Kalibrierdurchgänge mit jeweils 60 Aufnahmen durchgeführt. Um eine solide und vergleichbare Datenbasis zu generieren, wurde darauf geachtet, dass zum Start der Tiefenbildkamera die jeweils gleiche Ausgangstemperatur vorlag. Die jeweils ermittelten Kalibrierparameter wurden anschließend dem entsprechenden Betriebsmodus zugeordnet und in Tabelle 5.2 aufgelistet. Die annähernd konstanten und geringen Standardabweichungen verdeutlichen nochmals die Stabilität der ermittelten Kalibrierparameter. Im vorliegenden Fall war festzustellen, dass die Verzerrungsparameter und die Koordinaten des Bildhauptpunktes nahezu konstant geblieben sind. Lediglich die Brennweite der IR-Kamera hat sich im Vergleich vom Kalt- zum Warmbetrieb um 1,92 Pixel in x-Richtung und um 1,86 Pixel in y-Richtung vergrößert, wodurch sich wiederum das Sichtfeld der Kamera verkleinert. Die entsprechende Auswirkung dieser Parameterveränderung wird im nächsten Kapitel vertieft.

Tabelle 5.2: Vergleich der intrinsischen Kameraparameter im jeweiligen Betriebsmodus der Kamera

Betriebsmodus IR-Kamera	Intrinsische Kameraparameter								
	f_x [px]	f_y [px]	u_0 [px]	v_0 [px]	k_1 [-]	k_2 [-]	k_3 [-]	p_1 [-]	p_2 [-]
Kaltbetrieb	358,49	358,48	252,41	206,97	0,1120	-0,3080	0,1210	0,00265	-0,00328
Stand-by-Betr.	360,41	360,35	252,55	206,95	0,1118	-0,3060	0,1186	0,00125	-0,00236
Warmbetrieb	360,26	360,12	252,63	207,15	0,1119	-0,3040	0,1176	0,00490	-0,00191
Max. Differenz	1,92	1,86	0,22	0,20	0,0002	0,0040	0,0034	0,00365	0,00137

5.2.3 Untersuchung des Kameraverhaltens durch externen Temperatureinfluss

Im vorherigen Abschnitt wurde bereits der Zusammenhang zwischen der Temperaturrentwicklung im Kameragehäuse und dem Tiefenwertverlauf festgestellt. Um das Kameraverhalten unter Temperatureinfluss genauer bestimmen zu können, wird im Folgenden das Distanz- und das Rauschverhalten der Tiefenbildkamera in Abhängigkeit von einer sich ändernden Umgebungstemperatur analysiert.

In Anlehnung an die Versuche aus dem vorherigen Abschnitt wurde ein Versuchsaufbau in einer klimatisierten Kammer realisiert, der es ermöglichte, die Tiefenbildkamera in einem Temperaturbereich von -20 °C bis +60 °C zu betreiben, um so die entsprechenden Daten bei unterschiedlichen Temperaturen akquirieren zu können. Die Datenerfassung erfolgte statisch, d. h., die Ausrichtung und die Distanz der Tiefenbildkamera zum Referenzobjekt wurden während der gesamten Versuchsdurchführung nicht verändert, sondern nur die jeweils einwirkende Umgebungstemperatur. Anhand der eingestellten Umgebungstemperatur wurden die Tiefendaten im Kalt-, Stand-by- und Warmbetrieb erfasst – jeweils unter Einhaltung der erforderlichen Temperaturvorgaben für die verschiedenen Betriebsmodi. Für die Akklimatisierung im Kameragehäuse wurde auf die Daten des im Kameragehäuse angebrachten Temperatursensors zurückgegriffen. Bei jeder Temperaturstufe wurden im jeweiligen Betriebsmodus 200 Aufnahmen akquiriert, wodurch für die anschließende Auswertung über 3600 verschiedene Datensätze zur Verfügung standen.

Zur ersten Einordnung der erfassten Messdaten wurden die Verläufe von Innen- und Außentemperatur im jeweiligen Betriebsmodus miteinander verglichen. Anhand der einzelnen Linienverläufe wurde bereits deutlich, dass bis zu einer Umgebungstemperatur von 10 °C die jeweiligen Ausgangssituationen für die Datenakquisition nahezu konstant gehalten werden konnten. Erst bei einem Anstieg der Umgebungstemperatur auf über 20 °C wurden Veränderungen bei den Temperaturdifferenzen zwischen den einzelnen Betriebsmodi festgestellt. Anhand der Versuche konnte zudem das Verhalten des im Kameragehäuse integrierten Lüfters konkretisiert werden. Wie bereits erwähnt, aktiviert sich der Lüfter im Warmbetrieb automatisch, wodurch der Temperaturverlauf beeinträchtigt wird. Dies wird insbesondere im Vergleich zum Kalt- und Stand-by-Betrieb deutlich (s. Abbildung 5.10).

Im Stand-by- und Kaltbetrieb ist der Lüfter ständig inaktiv, was u. a. mit der kurzen Betriebszeit bei der Akquisition der Tiefendaten zusammenhängt. Hierdurch bleibt der Verlauf von Kamerainnen- und Umgebungstemperatur nahezu linear. Durch den Vergleich dieser Temperaturverläufe konnte somit festgestellt werden, dass sich im Stand-by-Betrieb der stabilste Temperaturverlauf erzielen lässt. Aus diesem Grund wurde – im Gegensatz zu den Versuchen beim Einlaufverhalten – der Stand-by-Betrieb als Referenzbasis für die Datenauswertung festgelegt.

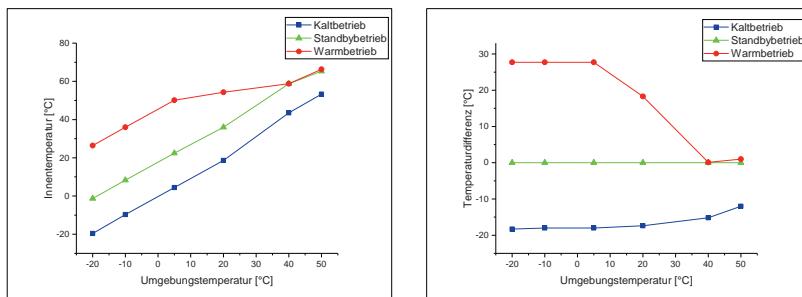


Abbildung 5.10: Verlauf der Kamerainnentemperatur (links) und Darstellung der Temperaturdifferenz ausgehend vom Stand-by-Betrieb (rechts)

Ein weiterer Aspekt, der durch die Temperatureinwirkungen zum Tragen kam, war die integrierte Abschaltautomatik der Tiefenbildkamera. Anhand der Versuche konnte festgestellt werden, dass sich die Tiefenbildkamera ab einer Temperatur von 66 °C automatisch abschaltet. Die Folge dieser Begrenzung ist, dass ein Dauerbetrieb der Tiefenbildkamera in diesem Temperaturbereich im Warmbetrieb nur begrenzt möglich ist. Durch diese Limitation konnte daher bei einer Umgebungstemperatur von 60 °C keine Datenakquisition im Stand-by- und Warmbetrieb durchgeführt werden. Somit wurde der ursprünglich festgelegte Temperaturbereich für die weitere Versuchsdurchführung auf maximal 50 °C verschoben. Durch diese Maßnahme wurde bereits im Stand-by-Betrieb die innere Grenztemperatur erreicht. Im Warmbetrieb beschränkte sich hingegen die Betriebszeit der Tiefenbildkamera auf wenige Minuten. Des Weiteren erschwerten sich aufgrund der hohen Umgebungstemperatur die Akklimatisierungsvorgänge im Kaltbetrieb, da keine adäquate Abkühlung innerhalb des Kameragehäuses erfolgen konnte und somit nur eine sehr langsame Anpassung von Innen- und Außentemperatur möglich war. Dies hatte zur Folge, dass bei einer Umgebungstemperatur von 40 °C und 50 °C das ursprüngliche Ausgangsniveau für den Kaltbetrieb nicht mehr vollständig erreicht werden konnte.

Anhand des Temperaturvergleichs konnte bereits aufgezeigt werden, dass sich die Außen-temperatur zusätzlich auf die Temperaturentwicklung im Kameragehäuse auswirkt, wodurch die Gehäuseinnentemperatur nochmals deutlicher ansteigen und absinken kann – insbesondere im Vergleich zu den Erkenntnissen bezüglich des Einlaufverhaltens der Tie-

fenbildkamera. Um den Tiefenwertverlauf in Abhängigkeit von diesen extremen Temperaturveränderungen analysieren zu können, wurden die erfassten Datensätze innerhalb eines Streudiagramms aufgetragen und entsprechend analysiert (s. Abbildung 5.11).

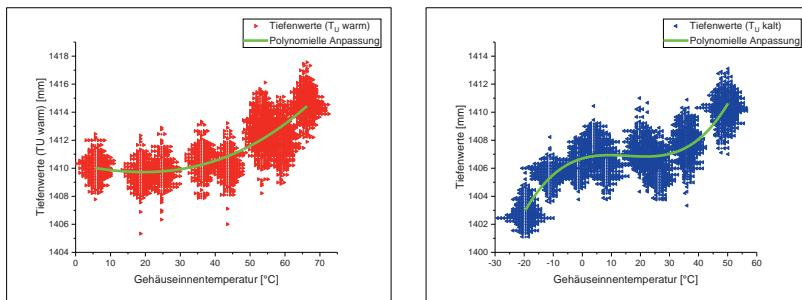


Abbildung 5.11: Verlauf der erfassten Tiefenwerte in Abhängigkeit von der Gehäuseinnentemperatur sowie von der Messdatenerfassung bei warmer (links) und kalter (rechts) Umgebungstemperatur

Im Rahmen dieser ersten Auswertungsstufe wurden die Messdaten bei kalter Außentemperatur (-20 °C bis +20 °C) und bei warmer Außentemperatur (-20 °C bis +50 °C) getrennt betrachtet. Die Auswertung dieser umfangreichen Datensätze zeigte bereits auf, dass der Verlauf der Tiefenwerte in Abhängigkeit von der Innentemperaturrentwicklung eine polynomische Basisfunktion besitzt. Bestätigt wurde dieser Tiefenwertverlauf durch die Gesamtbetrachtung der erfassten Messdaten bei einer Innentemperatur von -20 °C bis +50 °C. Anhand der ausgewerteten Daten konnte der Rückschluss gezogen werden, dass sich bei einer Innentemperatur von +5 °C bis +25 °C ein nahezu konstanter Tiefenwertverlauf erzielen lässt. Erst bei Temperaturen, die deutlich außerhalb dieses Bereichs lagen, konnte eine deutliche Steigung des Kurvenverlaufs und somit auch eine Messabweichung vom ursprünglichen Referenzwert verzeichnet werden.

Zur weiteren Quantifizierung der Messabweichungen wurden in einer nächsten Auswertungsstufe die Tiefenwerte in Abhängigkeit von der Außentemperatur betrachtet – insbesondere, um einen Bezug zum jeweiligen Betriebsmodus generieren zu können. Für die Auswertung wurde die mittlere Messabweichung der erfassten Datensätze verwendet. Als Referenzwert wurden die im jeweiligen Betriebsmodus erfassten Tiefenwerte bei einer Umgebungstemperatur von +20 °C festgelegt (s. Abbildung 5.12). Die ausgewerteten Standardabweichungen sind vergleichsweise gering ausgefallen und zeigten einen nahezu konstanten Verlauf auf, wodurch von einem geringen Messrauschen über den gesamten Temperaturbereich ausgegangen werden konnte.

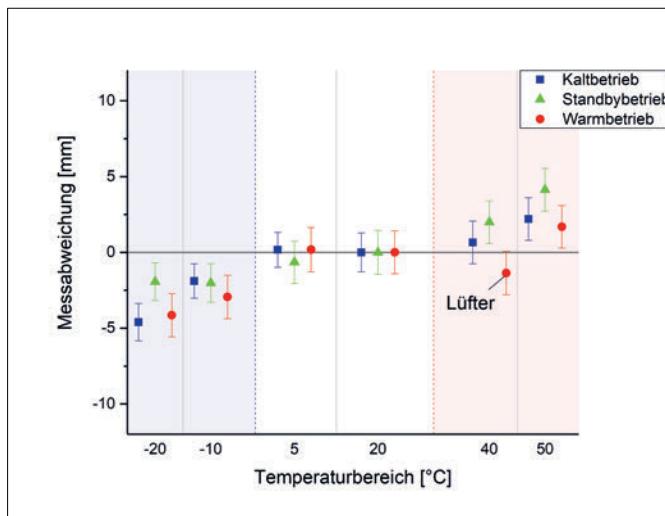


Abbildung 5.12: Darstellung der ermittelten Messabweichungen im jeweiligen Betriebsmodus (Ausgangsbasis: Messwert bei $T_U = 20^\circ\text{C}$)

Die Auswertungen der einzelnen Datensätze zeigen für den jeweiligen Betriebsmodus einen Messdatenversatz bei sinkender oder steigender Außentemperatur auf. Des Weiteren konnten für den Warmbetrieb bei einer Umgebungstemperatur von über 20°C nochmals die Messausreißer hervorgehoben werden, die durch den Lüfter verursacht worden sind. Da sich der Lüfter direkt auf die Innentemperatur und somit auch auf den eigentlichen Tiefenwert auswirkt, wird die Regressionsanalyse im Warmbetrieb zusätzlich erschwert. Aufgrund der daraus resultierenden Nebeneffekte sowie der damit verbundenen Limitationen (Stichwort: Abschaltautomatik) lässt sich der Warmbetrieb der Tiefenbildkamera für den Laderaumeinsatz grundsätzlich ausschließen. Insbesondere durch den direkten Vergleich von Kalt- und Stand-by-Betrieb hat sich gezeigt, dass sich im Stand-by-Betrieb der stabilste Temperaturverlauf erzielen lässt, wodurch die Ermittlung des Tiefenwertverlaufs begünstigt wird. Die wesentlichen Kennwerte aus den einzelnen Analysen wurden abschließend nochmals zusammengefasst und in Tabelle 5.3 aufgelistet.

Tabelle 5.3: Zusammenfassung der wesentlichen Kennwerte aus der Versuchsdurchführung

Kennwerte	Betriebsmodus der Tiefenbildkamera		
	Kaltbetrieb	Stand-by-Betrieb	Warmbetrieb
Spannweite Innentemperatur	$72,9^\circ\text{C}$	$66,6^\circ\text{C}$	$39,9^\circ\text{C}$
Korrelationskoeffizient T_f/T_U	0,99	0,99	0,93
Spannweite Tiefenwerte	6,8 mm	6,1 mm	5,84 mm
Standardabweichung Tiefenwerte	1,28 mm	1,35 mm	1,43 mm
Bestimmtheitsmaß Tiefenwerte	0,99	0,99	0,86

Analog zum temperaturbezogenen Einlaufverhalten der Tiefenbildkamera wurde als Nächstes die Stabilität der intrinsischen Kameraparameter in Abhängigkeit von der externen Temperaturentwicklung untersucht. Wie bereits aufgeführt wurde, sind für die Ermittlung der kamera spezifischen Parameter mehrere Bildfolgen des betrachteten Kalibriermusters erforderlich. Bei der Untersuchung des Einlaufverhaltens wurden hierfür die einzelnen Betriebsmodi separat betrachtet. Die damit verbundene Durchführung der Versuchsreihen hat verdeutlicht, mit welch erheblichem Aufwand solch eine separate Zustandsbetrachtung verbunden ist. Und dies insbesondere unter dem Aspekt, dass die erforderliche Datenerfassung manuell erfolgen musste und zur statistischen Absicherung der Werte für jede betrachtete Temperatureinstellung zehn Kalibrierdurchgänge erforderlich waren. Zur Eingrenzung des Arbeitsaufwands und des Untersuchungsumfangs wurden daher für die folgenden Versuche die Kameraparameter nur im Warmbetrieb erfasst und ausgewertet. Diese exemplarische Parameterermittlung sollte für eine erste Einschätzung der aufgezeichneten Daten ausreichen – insbesondere unter dem Aspekt, dass für den späteren Praxiseinsatz ohnehin für jede Kamera die intrinsischen Parameter individuell ermittelt werden müssten und somit generell ein vertiefender Untersuchungsbedarf bestehen würde.

Die Auswertung der Kalibrierparameter zeigte auf, dass die Koordinaten des Bildhauptpunkts über den ganzen Temperaturbereich nahezu konstant geblieben sind (s. Tabelle 5.4). Die größten prozentualen Abweichungen wurden bei den radialen Verzeichnungskoeffizienten festgestellt. Da diese jedoch im Tausendstel-Bereich variieren, sind die Auswirkungen nur sehr gering. Des Weiteren konnte festgestellt werden, dass die Brennweite mit steigender Temperatur minimal zugenommen hat. Aufgrund der Temperatureinwirkung hat sich eine maximale Differenz von 2,12 Pixeln in x-Richtung und 2,47 Pixeln in y-Richtung ergeben. Im Vergleich zum Kaltstart aus den Versuchen zum Einlaufverhalten hat sich die Differenz sogar auf 3,89 Pixel (f_x) und 4,10 Pixel (f_y) erhöht (vgl. Tabelle 5.2). Diese minimale Verschiebung der Brennweite hat Auswirkungen auf den Abbildungsfaktor der Tiefenbildkamera und somit auch auf das Sichtfeld einer betrachteten Laderraumszene, auf die im Folgenden beispielhaft eingegangen wird.

Bei der idealisierten Betrachtung einer Laderraumszene mit einer palettierten Ladeeinheit (Höhe 1500 mm, Länge 1200 mm) und einem Kameraabstand von 1300 mm ergibt sich durch die oben genannte Verschiebung der Brennweite eine Veränderung des Abbildungsfaktors, d. h., die Ladeeinheit wird im Kamerabild minimal größer dargestellt. Unter der konstanten Beibehaltung aller ursprünglichen Parameter ergibt sich aus den Vorgaben der Linsengleichung (s. ([Luh10a], S. 37)) ein Abbildungsfaktor von 1,006. Im Vergleich zur ursprünglichen Brennweite würde dies theoretisch eine minimale Veränderung der Kanten von 9 mm in der Höhe und 7,2 mm in der Länge mit sich führen. Diese exemplarische Darstellung belegt nochmals die Auswirkungen der thermischen Veränderungen auf die

intrinsischen Kameraparameter, die je nach erforderlicher Messpräzision mit berücksichtigt werden sollten.

Tabelle 5.4: Vergleich der intrinsischen Kameraparameter unter externem Temperatureinfluss

Temperatur	Intrinsische Kameraparameter									
	T _U [°C]	T _I [°C]	f _x [Pixel]	f _y [Pixel]	u ₀ [Pixel]	v ₀ [Pixel]	k ₁ [-]	k ₂ [-]	k ₃ [-]	p ₁ [-]
-20	26	360,50	360,30	252,26	207,60	0,1174	-0,3192	0,1279	0,00049	-0,00063
-10	36	361,19	360,79	252,40	207,93	0,1202	-0,3286	0,1380	0,00046	-0,00044
5	50	361,05	360,78	252,22	207,30	0,1091	-0,3270	0,1371	0,00006	-0,00054
20	53	360,26	360,12	252,63	207,15	0,1119	-0,3040	0,1176	0,00005	-0,00019
40	58	361,80	361,75	252,46	207,56	0,1000	-0,2951	0,1101	0,00042	-0,00050
50	66	362,38	362,59	252,62	207,39	0,0997	-0,2946	0,1095	0,00036	-0,00026
Max. Differenz		2,12	2,47	0,41	0,78	0,0205	0,0340	0,0285	0,00044	0,00044

5.3 Einfluss der Materialien

Eine weitere Störquelle, die sich auf die Messwerte einer Tiefenbildkamera auswirkt, stellen die Reflexionseigenschaften der im Laderraum befindlichen Objekte dar, die unterschiedliche Oberflächenmaterialien aufweisen. Wie bereits in Kapitel 4.1.2 beschrieben wurde, nutzt die Tiefenbildkamera für die Messwertermittlung die vom Objekt reflektierten Lichtsignale. Je nach Materialeigenschaft und Oberflächenbeschaffenheit (bspw. Struktur, Farbe) werden die Strahlen unterschiedlich reflektiert, absorbiert oder transmittiert.⁴⁷ In Abhängigkeit von den objektspezifischen Reflexionseigenschaften kann daher der von der Sensorik ermittelte Tiefenmesswert vom tatsächlichen Entfernungswert deutlich abweichen.

Aus diesem Grund wird in den folgenden Abschnitten die Einflussnahme der im Laderraum befindlichen Materialien näher untersucht. Für die Durchführung der erforderlichen Versuche wird die in Kapitel 3.2 getroffene Vorauswahl an Grundmaterialien herangezogen, um diese zu spezifizieren und darauf aufbauend die Messanalyse durchzuführen.

5.3.1 Eingrenzung der relevanten Oberflächenmaterialien

Wie bereits festgestellt werden konnte, ist unter Einbeziehung der Ladungsvielfalt eine erhebliche Anzahl an Materialien mit unterschiedlichen Oberflächenbeschaffenheiten im Laderraum vorzufinden. Um die Vielzahl der zu berücksichtigenden Materialien in einem

⁴⁷ Relevant für die vorliegende Strahlenbetrachtung der lichttechnischen Materialeigenschaften sind die Reflexion und die Absorption [Koc98].

angemessenen Detaillierungsgrad zusammenfassen zu können, ist eine systematische Materialbetrachtung beim Laderaumaufbau und bei den Ladeobjekten erforderlich.

Der Laderaum lässt sich unabhängig vom Aufbautyp durch seine jeweiligen Begrenzungen nach vorne, hinten sowie zur Seite definieren. Bedingt durch die Forderung nach gesteigerten Nutzlastverhältnissen und wirtschaftlicheren Produktionsabläufen hat sich bei der Ausgestaltung des Laderaums zwar die Vielfalt der Ausgangsmaterialien erweitert, allerdings halten sich diese bei den Materialien für die Innenverkleidung noch in einem überschaubaren Rahmen. Für die Ausgestaltung der Stirn-, Seiten-, Rück- oder Trennwand sowie der Boden- und Deckenflächen eines Kofferaufbaus kommen neben den klassischen Metallwerkstoffen (Stahl) vermehrt Aluminiumwerkstoffe sowie technische Sperrhölzer (Plywood) zum Einsatz, die durch glasfaserverstärkte Kunststoffe sowie vereinzelte Schaumstoffe in Verbundbauform ergänzt werden. Die in die Seitenwände sowie in den Boden integrierten Schienensysteme bestehen dabei vorwiegend aus metallischen Stoffen (Aluminium oder Stahl). ([App13], S. 303)

Der Materialeinsatz beim typischen Planenaufbau unterscheidet sich nur unwesentlich von demjenigen anderer Aufbautypen. Hinsichtlich des Rahmengestells (Stahl) sowie der Spiegel (Aluminium/Holz) sind auch hier überwiegend die bereits erwähnten laderaumtypischen Materialien vorzufinden. Als explizite Ergänzung gilt es an dieser Stelle lediglich die klassische LKW-Plane zu erwähnen, die vorwiegend aus thermoplastischem Kunststoff (Polyvinylchlorid – PVC) besteht und in verschiedenen Materialdicken sowie Farbvariationen vorzufinden ist.

Zur Erstellung des Materialprofils auf der Ladeobjektebene wird auf die in Kapitel 3.2.1 getroffene Vorauswahl zurückgegriffen ([BP97], [Kaß11], [DIN14]). Gemäß den getroffenen Deklarationen wurde unter Berücksichtigung des Materialprofils vom Laderaum eine entsprechend praxisnahe Materialauswahl getroffen, sodass für die anstehende Versuchsdurchführung 12 verschiedene Materialproben herangezogen werden. In Tabelle 5.5 sind die ausgewählten Materialien aufgelistet. Neben der jeweiligen Materialbezeichnung werden zusätzlich noch Informationen zum praktischen Einsatzgebiet sowie hinsichtlich der Oberflächenbeschaffenheit und der Farbgebung aufgeführt.

Tabelle 5.5: Materialauswahl für die Versuchsdurchführung

Materialbezeichnung	Beispielhafte Einsatzfunktion	Oberflächenbeschaffenheit	Materialfarbe
Aluminium (Alu)	Spiegel, Sicherungsschienen, Riffelbleche	Glatt, glänzend,	Silbergrau (hell)
Glasfaserverstärkter Kunststoff (GFK)	Innenverkleidung Laderaum	Glatt, glänzend	Weiß (milchig)
Vollholz (Holz)	Ladungsträger (Paletten, Gestelle etc.)	Gehobelt, unbehandelt	Gelb-braun
Pappe (Karton)	Transportverpackungen, (Kartonagen)	Glatt, mattiert	Hellbraun
Polyethylen (PE)	Verpackungs-, Stretchfolie	Glatt, glänzend	Farblos/transparent
Polypropylen (PP)	Ladungsträger, Transportbehälter	Glatt, mattiert	Grau
Polystyrol expandiert (EPS)	Polstermaterial, Transportbehälter	Glatt (perlenförmig)	Weiß
Polystyrol extrudiert (XPS)	Formteile Verpackung, Transportbehälter	Rau, Schaumstruktur (wabenförmig)	Gelblich
Polyvinylchlorid (PVC)	LKW-Plane	Glatt, mattiert	Grün
Plywood Rückseite (R)	Verkleidung Laderaum (Seitenwände)	Glatt, glänzend	Dunkelbraun
Plywood Vorderseite (V)	Verkleidung Laderaum (Boden)	Rau, wabenförmige Struktur	Dunkelbraun
Stahl (Stahlblech)	Laderaumstirn-der -rückwand, Ladungsträger	Glatt, glänzend	Grau

5.3.2 Untersuchung des materialbedingten Reflexionsverhaltens

Zur Untersuchung der materialabhängigen Reflexionseinwirkungen auf den Tiefenmesswert wurde der in Kapitel 4.3.2 beschriebene Versuchsaufbau modifiziert, damit die jeweiligen Materialien in einem konstanten Abstand zur Tiefenbildkamera vermessen werden konnten (s. Abbildung 5.13). Als Messabstand wurde eine Entfernung von 1,40 m festgelegt, was in etwa der halben Landeraumbreite entspricht. Für die Anbringung der Versuchsmaterialien wurde eine Vorrichtung realisiert, die eine einfache Ausrichtung und Fixierung der auszutauschenden Materialien ermöglichte, ohne nachträgliche Korrekturen am Aufbau vornehmen zu müssen. Durch diese Vorgehensweise konnte für jede Messung und jedes betrachtete Material die jeweils gleiche Ausgangsbasis gewährleistet werden. Ferner wurde die Tiefenbildkamera zur Datenakquisition so ausgerichtet, dass der Bildhauptpunkt dem Messmittelpunkt entspricht.

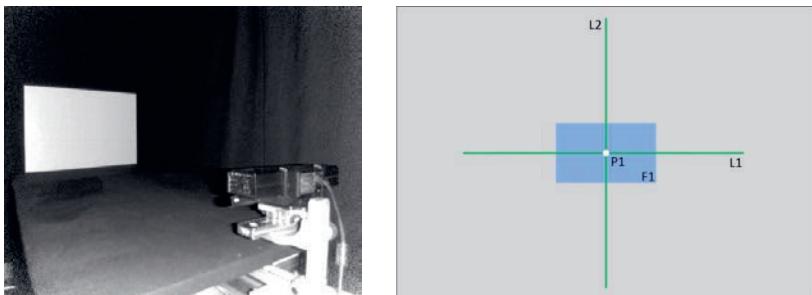


Abbildung 5.13: Aufbau für die Versuchsdurchführung (links) und schematische Festlegung der Interessenbereiche für die Datenauswertung (rechts)

Während der Versuchsdurchführung wurden pro Materialprobe jeweils 200 Bildaufnahmen akquiriert. Zur Auswertung der erfassten Messwertdaten wurden drei verschiedene Interessenbereiche definiert. Für die punktbasierte Auswertung (P1) wurde der Bildmittelpunkt herangezogen. Die linienbasierten Auswertungen (L1, L2) erfolgten entlang der horizontalen und vertikalen Bildachse (ausgehend vom Mittelpunkt). Ferner wurde eine flächenbasierte Auswertung (F1) über eine Pixelfläche von 104 x 62 Pixel vorgenommen. Im Rahmen der Datenauswertung wurden die Messabweichung, die Streuung der Messwerte sowie die Anzahl der Pixelfehler ermittelt.

Die Datenauswertung zeigte eine materialspezifische Messwertabhängigkeit auf. Die ermittelten Messwertschwankungen sowie die dazugehörigen Standardabweichungen wurden anhand der Ergebnisse aus der flächenbasierten Auswertung in Abbildung 5.14 zusammengefasst. Im ersten Diagramm ist die vergleichsweise große Streuung von Aluminium vollständig zu erkennen. Das zweite Diagramm stellt eine vergrößerte Detailansicht der übrigen Ergebnisse dar, um die einzelnen Wertebereiche besser erkennen und einordnen zu können.

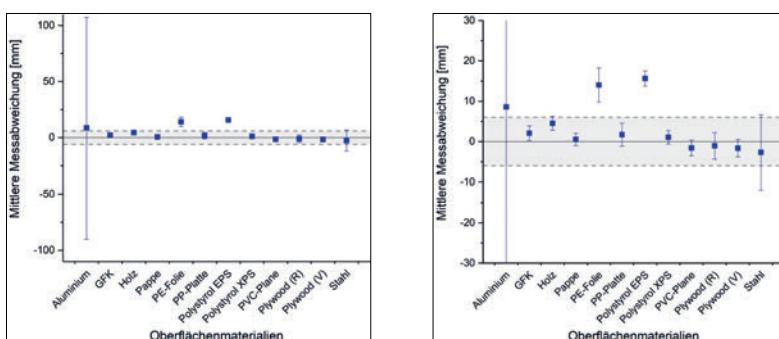


Abbildung 5.14: Materialabhängige Betrachtung der Tiefenwertabweichungen (links vollständige Darstellung der flächenbasierte Versuchsauswertung, rechts vergrößerte Ergebnisdarstellung)

Anhand der ermittelten Werte ist zu erkennen, dass die betrachteten Materialien vorwiegend innerhalb eines Toleranzmessbereichs von ± 6 mm liegen und die Messwerte größtenteils nur eine minimale Abweichung voneinander aufzeigen. Allerdings sind auch Materialien dabei, die deutlich größere Messwertschwankungen aufweisen. Die ermittelte mittlere Messabweichung beim Stahl liegt bspw. noch innerhalb des genannten Toleranzbereichs – allerdings ragt die Streuung der Messwerte deutlich heraus.

Noch extremere Schwankungen sind beim Aluminium festzustellen. Hier liegt nicht nur die Messabweichung außerhalb des Toleranzbereichs, sondern auch die Standardabweichung liegt im Vergleich zu den anderen Materialien um ein Vielfaches darüber.

Ein völlig anderes Messverhalten zeigen die PE-Folie und das EPS auf. Beide Materialien weisen zwar die größte Abweichung zum Referenzwert (Nulllinie) auf, im Vergleich zu den beiden metallischen Werkstoffen besitzen sie jedoch eine durchaus stabilere Messstreuung. Zur Analyse der Hauptursachen für dieses unterschiedliche Messverhalten wurden in einem weiteren Auswertungsschritt die akquirierten Tiefenbildausschnitte der jeweiligen Materialien näher betrachtet (s. Abbildung 5.15).

Wie bereits zu Beginn des Kapitels aufgeführt wurde, beeinflussen das Material, die Struktur und die Farbe eines Objekts den Reflexionszustand. In der Literatur wird hierbei in erster Linie zwischen gerichteter und diffuser Reflexion unterschieden ([Güh02], S. 80; [Kri92]). Ein Hauptunterscheidungsmerkmal zwischen diesen beiden idealen Reflexionszuständen stellen die jeweiligen Oberflächennormalen der betrachteten Objekte dar. Bei der infinitesimalen Oberflächenbetrachtung einer gerichteten (spiegelnden/glänzenden) Reflexion zeigen alle Oberflächennormalen in exakt dieselbe Richtung. Sind diese hingegen gleichmäßig verteilt, dann wird von einer idealen diffusen Reflexion gesprochen. Diese beschriebenen Idealzustände treten in der Praxis allerdings selten auf. Bei den hier verwendeten technischen Oberflächen ist daher primär von einer Mischform dieser beiden Reflexionszustände auszugehen. ([Str08], S. 77; [Hol15], S. 43)

Die Auswirkungen dieser Reflexionszustände auf den Messwert lassen sich am besten anhand der ausgewerteten materialspezifischen Tiefenbilder veranschaulichen (s. Abbildung 5.15). Der messtechnische – jedoch per Definition in der Praxis nicht erreichbare – Idealzustand für die durchgeführten Versuche wäre ein gleichmäßig eingefärbter Tiefenbildbereich. Die ausgewerteten Tiefenbilder zeigen jedoch alle ein rauschförmiges und ein größtenteils unterschiedliches Punktmuster auf. Neben den Tiefenbildern, bei denen nur ein minimales Rauschverhalten zu sehen ist (vgl. Karton), gibt es ferner auch Bildausschnitte, die deutlich extremere Farbschwankungen enthalten. Darin sind vereinzelt zusätzliche deutlich dunklere Stellen innerhalb des Bildes zu erkennen, die als Pixelfehler anzusehen sind (vgl. Aluminium).

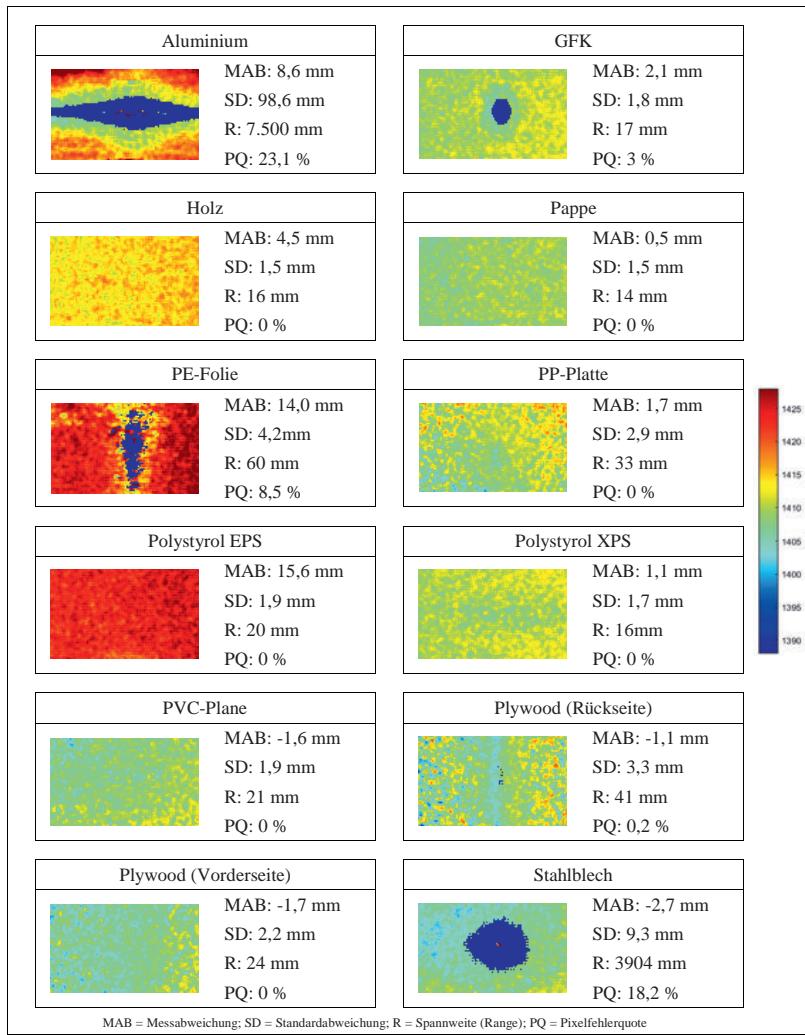


Abbildung 5.15: Analyse des materialbedingten Tiefenwertverhaltens bei pixelgetreuer Darstellung der untersuchten Interessenbereiche

Anhand der dargestellten Bildausschnitte wird nicht nur das übliche Signal-Rausch-Verhalten der Tiefenbildkamera erkennbar, sondern es werden zudem auch die deutlichen Auswirkungen der Reflexionszustände von den einzelnen Materialien aufgezeigt. Insbesondere bei den ausgewerteten Aufnahmen vom Holz und von dem expandierten Polystyrol (EPS) ist ein deutlicher Farbversatz von einem gelben (Holz) bis zu einem roten (EPS) Farbbereich zu erkennen. Eine Begründung hierfür liegt u. a. darin, dass das Holz und das EPS einen vergleichsweise kleinen Reflexionsgrad aufweisen, wodurch die emittierten

NIR-Strahlen der Tiefenbildkamera auf diesen Oberflächen stärker absorbiert werden. Dadurch wird wiederum die Strahlungsintensität des reflektierten Lichts reduziert, was wiederum bei der Auswertung der demodulierten Signale – da die Intensitätswerte bei der Phasenkorrelation miteinbezogen werden (vgl. Kapitel 4.1.2) – den jeweils aufgezeigten Messdatenversatz zur Folge hat.

Deutlich extremere Farbunterschiede und somit auch größere Messwertschwankungen zeigen die Tiefenbilddaten von Aluminium, PE-Folie, GKF und Stahl auf. Bei den ausgewerteten Tiefenbildern sind insbesondere die Pixelfehler – ausgehend vom Bildzentrum – ersichtlich. Sie stellen im Rahmen der Versuchsdatenauswertung keine Tiefenbildwerte dar, sondern sind vielmehr als nichtauswertbare Pixel anzusehen. Das bedeutet: In diesem Bereich konnten von der Tiefenbildkamera keine aussagefähigen Daten demoduliert werden. Dieser Umstand ist u. a. auf die glänzende/spiegelnde Objektoberfläche der betrachteten Materialien zurückzuführen. Aufgrund dieser materialspezifischen Glanzstellen steigt der Anteil der spiegelnden Reflexion an, wodurch die einzelnen Pixel der Tiefenbildkamera überbelichtet werden. Anhand der eingestellten Kameraposition und des Aufnahmewinkels können innerhalb dieses Bereichs somit keine aussagekräftigen Signalauswertungen vorgenommen werden. Die Auswertungen beim Aluminium haben sich zudem als äußerst schwierig erwiesen, da es im Bildzentrum zusätzlich zu Fehlmessungen gekommen ist (s. Mehrfachreflexionen), die über den eigentlichen Mess- bzw. Eindeutigkeitsbereich der Tiefenbildkamera hinausgegangen sind und somit zu einer Spannweite der Tiefendaten von bis zu 7500 mm geführt haben. Ein ähnliches Verhalten konnte bei der PE-Folie festgestellt werden, wobei hier der Übersättigungsbereich vertikal ausgerichtet war. Da die PE-Folie nicht nur eine glatte und reflektierende Oberfläche besitzt, sondern zusätzlich auch noch über eine transparente Materialoberfläche verfügt, die sich durch die transmittierende Reflexionseigenschaft nachteilig auf die Tiefendatenermittlung auswirkt, war bei der PE-Folie zudem ein größerer Messdatenversatz zu verzeichnen. Das GFK und das Stahlblech wiesen in diesem Zusammenhang – abgesehen von den typischen Glanzstellen – ein nahezu stabiles Messverhalten auf. Als weiteres reflektierendes, aber dennoch gut auswertbares Material mit einer minimalen Pixelfehlerquote von 0,2 % konnte die Rückseite des verwendeten Plywoods identifiziert werden.

5.3.3 Untersuchung des Tiefenwertes in Abhängigkeit vom Einfallswinkel

Im vorherigen Abschnitt wurde der grundlegende Zusammenhang zwischen den verschiedenen Laderaummaterien und dem Tiefenwertverlauf aufgezeigt. Die Ausgangsbasis für die Datenauswertung stellte hierfür eine unveränderte Kameraposition mit fixem Aufnahmewinkel und paralleler Kameraausrichtung zu den Testmaterialien dar. Für die Anwendung in der Praxis ist diese idealtypische Betrachtung jedoch ungeeignet, da durch die

Kameraanordnung und die Positionierung der Ladegüter im Laderaum jeweils unterschiedliche Betrachtungswinkel und somit auch verschiedene Einfallswinkel zur Materialoberfläche zustande kommen. Zur Vervollständigung der Reflexionsanalyse wird daher im Folgenden das Messverhalten der ausgewählten Laderaummaterien in Abhängigkeit von unterschiedlichen Einfallswinkeln betrachtet.

Für die Versuchsdurchführung wurde der bereits verwendete Versuchsaufbau (s. Kapitel 5.3.2) durch eine entsprechende drehbare Vorrichtung erweitert. Durch diese Maßnahme wird es ermöglicht, die jeweils in der Vorrichtung eingespannten Probematerialien in präzisen gerasterten Winkelschritten zu drehen (Auflösung 2 °). Hierfür wurde die Tiefenbildkamera so ausgerichtet, dass die optische Achse der Kamera mit der Rotationsachse des zu untersuchenden Probematerials übereinstimmte. Zur Beibehaltung dieser Ausrichtung blieb die Position der Tiefenbildkamera für die gesamte Versuchsdurchführung unverändert, d. h., es wurden lediglich die vertikal ausgerichteten Probematerialien mittels der konzentrierten Aufnahmeverrichtung gedreht (s. Abbildung 5.16). Durch diesen Aufbau konnte für die Datenakquisition eines jeden Testmaterials die gleiche Ausgangslage gewährleistet werden. Die Materialien wurden in einem Winkelbereich von 0 ° bis 80 ° untersucht. Die Datenakquisition erfolgte hierfür in Winkelschritten von 10 °. Für jede eingestellte Winkelposition wurden pro Materialprobe 200 aufeinanderfolgende Tiefenbildaufnahmen erfasst. Zur Datenauswertung wurde vorab ein Interessenbereich entlang der Rotationsachse festgelegt. Entlang dieser Achse wurde der Datenvergleich über eine Fläche von 3 x 60 Pixeln durchgeführt. Als Referenzmaterial wurde erneut die Graukarte eingesetzt.

Damit der winkelabhängige Einfluss der Oberflächenmaterialien quantifiziert werden konnte, wurden die materialspezifischen Streumaße sowie die Messabweichungen der jeweiligen Materialien bei unterschiedlichem Einfallswinkel ermittelt und dann verglichen. Anhand der Untersuchungen aus Kapitel 5.3.1 war bereits bekannt, dass das Aluminium eine hochreflektierende Oberfläche besitzt, die zu einer signifikanten Streuung bei den Messwerten führt. Bei der winkelabhängigen Betrachtung wurde ersichtlich, dass die Streuung der Messwerte durch die Veränderung des Einfallswinkels – im Vergleich zur Ausgangsposition bei 0 ° – geringer wird. Dies hängt u. a. mit dem materialspezifischen Reflexionskegel zusammen (vgl. Abbildung 5.15). Bei der Ausgangsposition befand sich dieser direkt auf der Rotationsachse (= innerhalb des Interessenbereichs). Durch die zunehmende Probendrehung wurde dieser weiter nach außen verschoben, wodurch sich die Anzahl der Pixelfehler und somit auch die Streuung der Messwerte beim Aluminium verringerten (vgl. Reflexionskegel in Abbildung 5.16 bei 0 ° und 10 °).

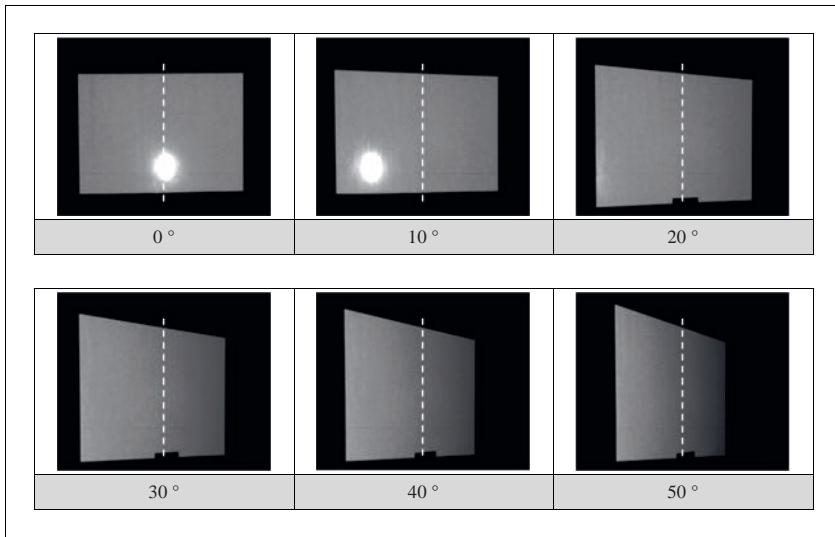


Abbildung 5.16: Drehung der Materialprobe um die Rotationsachse (gestrichelte Linie) zur winkelabhängigen Erfassung der Tiefenwerte am Beispiel der GFK-Platte

Bei den anderen untersuchten Materialien, die im Vergleich zum Aluminium einen deutlich kleineren oder gar keinen Reflexionskegel aufweisen, hat die Streuung der Messwerte – bei größer werdendem Einfallswinkel – hingegen zugenommen (vgl. Abbildung 5.17). Zu dieser Kategorie gehören insbesondere Oberflächen mit starken Reflexionseigenschaften, also Versuchsmaterialien, die vorwiegend eine glatte und glänzende Oberfläche besitzen.

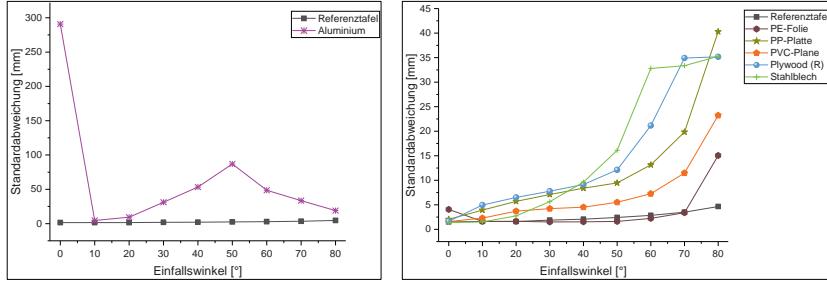


Abbildung 5.17: Standardabweichungsverlauf in Abhängigkeit vom Einfallswinkel I (Materialien mit einer maximalen Standardabweichung > 10 mm)

Neben den Oberflächenmaterialien mit großer Messstreuung konnten bei den Untersuchungen auch Oberflächenmaterialien identifiziert werden, die im Vergleich zu den bisher betrachteten Materialien bei zunehmendem Einfallswinkel eine geringere Standardabweichung (< 10 mm) aufgezeigt haben. Darunter fielen insbesondere Materialien mit einer

matten Oberfläche, die bei der zuvor durchgeföhrten flächenbasierten Auswertung keinen Reflexionskegel aufgezeigt haben. Ausnahmen stellten dabei das GFK und die Rückseite des Plywoods dar. Beide besitzen eine glatte reflektierende Oberfläche, wodurch eine generell größere Streuung zu erkennen war, die jedoch im Vergleich zu den anderen reflektierenden Materialien deutlich geringer ausgefallen ist.⁴⁸

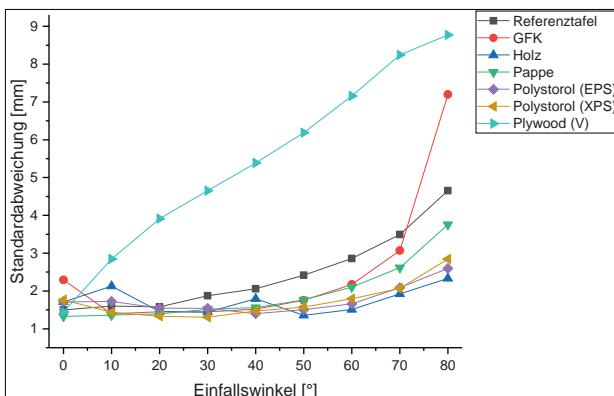


Abbildung 5.18: Standardabweichungsverlauf in Abhängigkeit vom Einfallswinkel II (Materialien mit einer maximalen Standardabweichung < 10 mm)

Damit die materialspezifische Messabweichung in Abhängigkeit von der Winkelposition quantifiziert werden konnte, wurde als weiterer Analyseschritt die mittlere Messabweichung in Bezug zur verwendeten Referenztafel ermittelt. Dabei wurde ersichtlich, dass die reflektierenden Materialien – abgesehen von den metallischen Werkstoffen – bis zu einem Einfallswinkel von 50° einen nahezu konstanten Messwertverlauf aufzeigten. Erst ab einem Einfallswinkel von 60° stiegen bei diesen Materialien die Messabweichungen erheblich an. Durchaus bessere Ergebnisse ließen sich bei Materialien mit schwachen Reflexionseigenschaften erzielen, die einen nahezu konstanten Messwertverlauf aufgezeigt haben (vgl. Abbildung 5.19).

Die dazugehörigen Messwertauswertungen zeigen, dass mit zunehmendem Einfallswinkel die Datenerfassung erschwert wird und die Genauigkeit der ermittelten Tiefenwerte abnimmt. Insbesondere bei den glatten und stark reflektierenden Materialien werden bei größer werdendem Einfallswinkel nicht genügend Lichtimpulse reflektiert, wodurch die demodulierte Signalamplitude abgeschwächt wird und die Messabweichung steigt. Bei den mattierten und rauen Materialoberflächen fallen die Auswirkungen der Reflexionseigenschaften weniger ins Gewicht. Im Vergleich zu den reflektierenden Materialien können

⁴⁸ Bei den hierbei ermittelten Ergebnissen ist auch die jeweilige Größe und Lage des ausgewerteten Interessensbereichs zu berücksichtigen.

hierbei in einem Bereich von 0° bis 70° nahezu gleichbleibende Ergebnisse ermittelt werden.

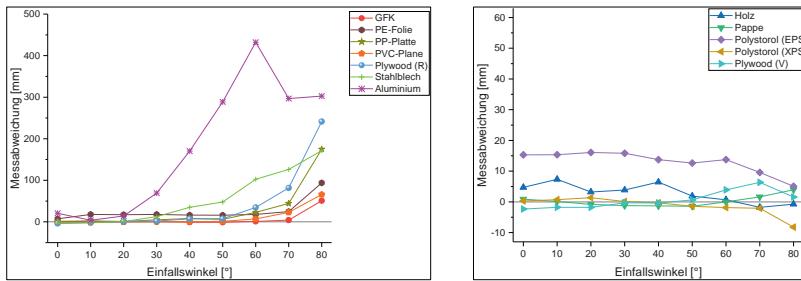


Abbildung 5.19: Verlauf der winkelabhängigen Messabweichungen bei glatten/reflektierenden (links) und matten nicht reflektierenden Oberflächenmaterialien (rechts)

Es lässt sich somit festhalten, dass die Reflexionseigenschaften von reflektierenden Oberflächenmaterialien einen deutlichen Einfluss auf die Messgenauigkeit nehmen. Dabei lassen sich die getesteten Materialien in drei verschiedene Reflexionsstufen einteilen. Während bei den Materialien mit schwachen Reflexionseigenschaften nahezu konstante Messwerte ermittelt werden konnten, wurden bei den Materialien mit starken und mittleren Reflexionseigenschaften zum Teil deutliche Messabweichungen festgestellt. Zur Erhöhung der Datengüte sind in diesem Zusammenhang zusätzliche Kompensationsmechanismen erforderlich, auf die in Kapitel 5.6 eingegangen wird.

5.4 Einfluss der Kameraanordnung

Im bisherigen Arbeitsverlauf wurde jeweils nur der Einsatz einer einzelnen Tiefenbildkamera betrachtet. Für die vollständige Erfassung des Laderaums ist jedoch der Einsatz mehrerer Kameras entscheidend – insbesondere die damit verbundene Anordnung innerhalb des Laderaums sowie deren Interaktion. Je nach Ausrichtung und Sichtfeldüberschneidung kann es bei der Datenerfassung zu einer Überlagerung der jeweils ausgesandten Signale kommen. Wie sich diese auf die Datenakquisition auswirken, wird in den folgenden Abschnitten erörtert.

Zu Beginn werden hierzu verschiedene Anordnungsmöglichkeiten der Kameras im Laderaum vorgestellt. Anschließend erfolgt die Untersuchung verschiedener horizontal und vertikal verschobener Kameraanordnungen, anhand derer sich die Einflussnahme auf die Tiefenwerterfassung durch den simultanen Dualbetrieb der Tiefenbildkameras aufzeigen lässt.

5.4.1 Kameraanordnung zur sensorischen Erfassung des Laderraums

Ausschlaggebend für die spätere Anordnung der Tiefenbildkameras im Laderraum sind das Sichtfeld der einzelnen Kameras sowie der daraus resultierende Gesamterfassungsbereich. Wie in Kapitel 4.1 bereits erwähnt wurde, besitzt die eingesetzte Tiefenbildkamera ein Sichtfeld von 60° in vertikaler und 70° in horizontaler Richtung. Für den erfolgreichen experimentellen Einsatz der Hardware im Laderraum bedeutet dies, dass für die vollständige Raumabdeckung stellenweise eine Erweiterung des Sichtfeldes in vertikaler Richtung (90° -Erfassung) erforderlich ist, d. h. die Tiefenbildkamera muss zusätzlich um 30° geneigt werden.⁴⁹ Ausgehend von dieser Prämisse wurden verschiedene Szenarien in Abhängigkeit von ihrem potenziellen Erfassungsbereich verglichen. Als Ausgangsbasis für die jeweiligen Anordnungsmöglichkeiten wurde ein Standardszenario definiert, dessen Laderraum die Innenmaße $6,05 \text{ m} \times 2,49 \text{ m} \times 2,38 \text{ m}$ ($L \times B \times H$) aufweist. Für die ideale Positionierung der Tiefenbildkameras im Laderraum wurden verschiedene Grundaordnungen betrachtet, die sich wie folgt beschreiben lassen (vgl. Abbildung 5.20):

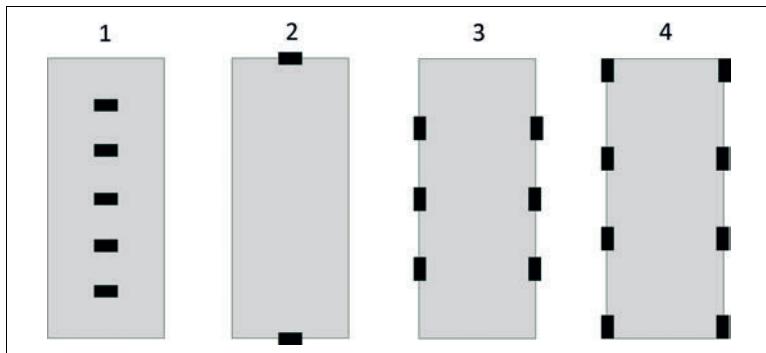


Abbildung 5.20: Grundschemata zur Anordnung der Tiefenbildkameras (schwarz) im Laderraum (grau)

Grundaordnung 1: An der Laderraumdecke werden die Tiefenbildkameras mittig und in gleichmäßigen Abständen zueinander positioniert, sodass diese frontal nach unten auf den Laderraumboden ausgerichtet sind. Je nach ausgewähltem Abstand zwischen den Kameras lassen sich 5 bis 9 Tiefenbildkameras im Laderraum positionieren, die insgesamt nur 55 % bis 88 % des Laderraums erfassen.

Grundaordnung 2: An der Stirn und Rückwand wird jeweils eine Kamera angebracht. Durch diese Anordnung überschneiden sich zwar die jeweiligen Erfassungsbereiche in der Laderraummitte; allerdings lassen sich die jeweiligen Laderaumecken an der Stirn- und

⁴⁹ Die aktuellen Entwicklungsschritte zeigen auf, dass gleichwertige oder bessere Tiefenbildkameras zukünftig ein größeres Sichtfeld aufweisen werden. Ein zusätzlicher Neigungsvorgang wäre in diesem Fall nicht mehr notwendig (s. Kapitel 8.2).

Rückwand nicht vollständig abdecken. Mit dieser Anordnung wird eine Laderaumabdeckung von bis zu 88 % erreicht.

Grundanordnung 3: Die Kameras werden im Rahmengestell des Aufbaus entlang der beiden Seitenwände angebracht und schräg nach unten ausgerichtet. Dabei werden die Tiefenbildkameras direkt gegenüberliegend angeordnet. Durch diese Anordnung lassen sich mit insgesamt 6 Kameras (2 x 3) ca. 95 % des Laderaums erfassen.

Grundanordnung 4: Eine Erweiterung von Grundanordnung 3 stellt die versetzte Erstausrichtung der Tiefenbildkameras dar. Durch das Vorziehen des ersten Kamerapaars lässt sich im Gegensatz zur Grundanordnung 3 eine vollständige Raumabdeckung erzielen. Dabei werden das erste und das letzte Kamerapaar jeweils auf der Höhe der Stirn- und Rückwand positioniert, sodass nur etwa das halbe Sichtfeld der beiden Kameras zum Tragen kommt. Die restlichen 2 Kamerapare werden so an den Seitenwänden versetzt und zueinander ausgerichtet. Dabei überschneiden sich die jeweiligen Sichtfelder auch in den Laderaumecken. Durch diese Grundanordnung wird eine vollständige Abdeckung des vorhandenen Laderaums erreicht.

Anhand der Grundanordnung 4 lässt sich nicht nur die bestmögliche Erfassung des Laderaums realisieren, sondern durch die Entfernung oder Hinzunahme weiterer Tiefenbildkamerapare ist eine Skalierbarkeit des Systems auf die jeweils erforderliche Laderaumlänge möglich. Des Weiteren lässt sich bei dieser Anordnung der Inhalt des Laderaums – bspw. bei Ladeeinheiten mit unterschiedlichen Höhen – besser und vor allen Dingen eindeutiger erfassen (Stichwort: Abschattungen). Das Anordnungsszenario 4 stellt somit die Ausgangsbasis für die nachfolgenden Untersuchungen dar.

5.4.2 Untersuchung der horizontalen Kameraneigung

Durch die gewählte Grundanordnung wird vorgegeben, dass sich die einzelnen Erfassungsbereiche überschneiden. Damit könnten auch die jeweils ausgesandten Signale einer Tiefenbildkamera interferieren ([Cas12], S. 11; [KBA16]). Damit die Auswirkungen dieser potenziellen Störquelle präzisiert werden können, wurde ein entsprechender Versuchsaufbau realisiert. Der Grundaufbau für die anstehenden Laborprüfungen bestand aus zwei Tiefenbildkameras, die in einem Abstand von 2490 mm zueinander ausgerichtet wurden (dies entspricht der durchschnittlichen Laderaumbreite). Im gleichen Abstand zur jeweiligen Tiefenbildkamera wurde mittig eine Graukarte (GK 1) positioniert (s. Referenztafel aus den vorherigen Versuchen). Diese wurde als exemplarisches Testobjekt für die Datenakquisition verwendet. Eine zweite identische Graukarte (GK 2) wurde direkt unterhalb von Tiefenbildkamera 2 (K 2) positioniert, um den Einfluss der Datenakquisition in der unmittelbaren Umgebung der Sensoreinheit erfassen zu können. Zur jeweiligen Positionierung wurden die Kameras mittels eines Neigekopfs und einer Schnellwechselplatte auf dem

umgebauten Führungsschienensystem befestigt und mittels des Laser-Entfernungsmessgerätes horizontal zueinander ausgerichtet. Durch diesen realisierten Versuchsaufbau war es somit möglich, die jeweilige Tiefenbildkamera schrittweise zu neigen und die entsprechenden Messdaten aufzuzeichnen. Anhand dieses Gesamtaufbaus und der damit verbundenen Datenanalyse soll letztendlich beurteilt werden, inwieweit der gleichzeitige Betrieb von zwei aktiven Tiefenbildkameras die Datengüte beeinflusst (s. Abbildung 5.21).

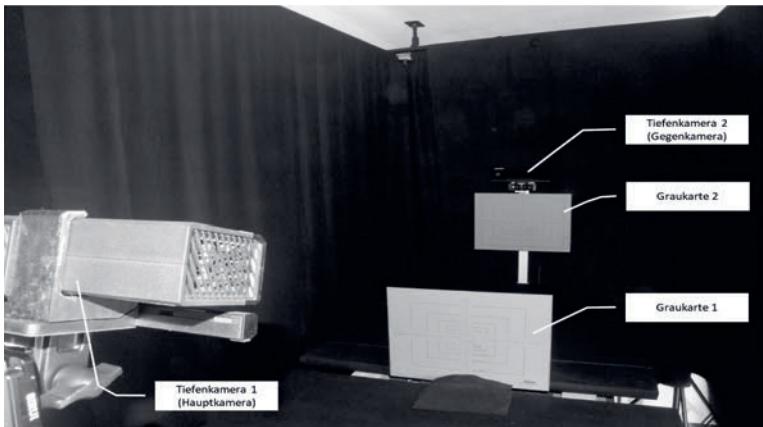


Abbildung 5.21: Anordnung der Tiefenbildkameras und der Graukarten für die Versuchsdurchführung

Für die Datenaufnahme wurden die Tiefenbildkameras in einem Bereich von 0° bis 45° um jeweils 15° geneigt. Die Anzahl der erfassten Datensätze wurde im Gegensatz zu den vorherigen Versuchen auf 1000 Bilder pro betrachteten Neigungswinkel erhöht, um insbesondere für die anschließende Auswertung eine größere Zeitspanne der akquirierten Daten zur Verfügung zu haben. Zur Bildung einer Referenzmessung wurde die Datenaufnahme der Hauptkamera (K 1) bei ausgeschalteter Gegenkamera (K 2) herangezogen. Die Infrarotsensoren von K 2 waren zu diesem Zeitpunkt also inaktiv. Für die Durchführung der einzelnen Interferenzversuche wurden beide Tiefenbildkameras simultan betrieben und entsprechend den festgelegten Winkeln geneigt, um die Tiefendaten für die jeweilige Lage akquirieren zu können. Für die Erfassung einer Messreihe wurde die Hauptkamera nicht bewegt, sondern es wurde nur die Gegenkamera stufenweise im Bereich von 0° bis 45° geneigt. Erst nach erfolgreicher Durchführung einer Messreihe wurde die Hauptkamera um eine Stufe weitergeneigt (15°), um nach erneuter Ausrichtung der beiden Tiefenbildkameras eine weitere Messreihe erfassen zu können. So konnten sukzessive die Daten aller erforderlichen Messstufen erfasst werden.

Für die anschließende Auswertung wurde sowohl ein flächenbasierter als auch ein linienbasierter Pixelvergleich von den beiden Graukarten herangezogen. Beim Flächenvergleich

wurde die mengenmäßige Veränderung der auftretenden Pixelfehler untersucht. Der Linienvergleich wurde herangezogen, um die jeweiligen Messabweichungen in den verschiedenen Bereichen der Graukarte zu ermitteln, die sich jeweils in der Mitte sowie an den oberen und unteren Randgrenzen der Graukarte befanden. Die Ergebnisse des flächenbasierten Vergleichs der ersten Graukarte (GK 1) haben gezeigt, dass keine Veränderung bei der Anzahl der fehlerhaften Pixel zu verzeichnen war. Hinsichtlich der mittleren Messabweichung – ausgehend von den verschiedenen Neigungspositionen von Haupt- und Geigenkamera – waren die Ergebnisse bezüglich der Graukarte 1 als nahezu konstant einzustufen. Lediglich bei der Ausgangsaufnahme (0°) war ein leichter Anstieg der Messabweichungen zu verzeichnen. Dies hängt damit zusammen, dass sich bei der Aufnahme dieser Ausgangsposition die Graukarte am Rand des Tiefenbildes befand, wodurch das Messrauschen stärker ausfällt. Besonders deutlich wird dies anhand der gruppierten Messwertdarstellung (s. Abbildung 5.22). Darin ist zu erkennen, dass durch die Neigung der Kamera die Datengüte besser wurde, da sich der festgelegte Interessenbereich auf der Graukarte zunehmend in die Bildmitte verlagerte. Die aufgezeigten Messdaten sind als äußerst stabil einzustufen. Die maximale Messabweichung lag bei 2,1 mm mit einer Streuung von 1,6 mm.

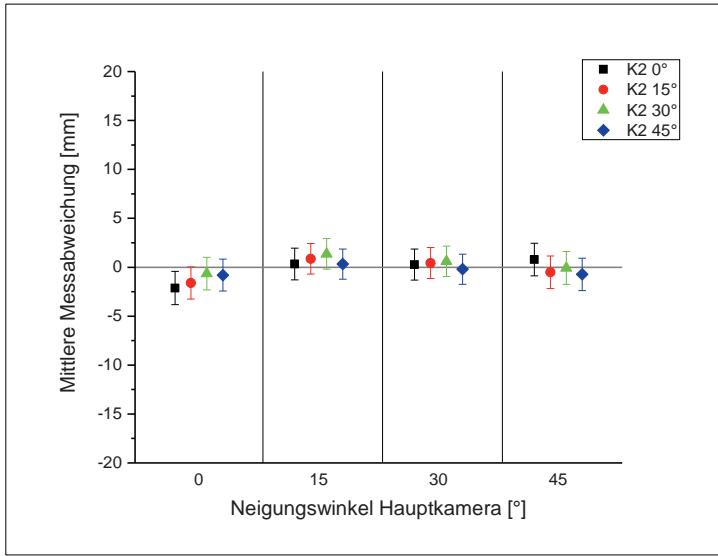


Abbildung 5.22: Verlauf der Messabweichungen in Abhängigkeit von der Kameraneigung (Graukarte: 1, Messbereich: Mitte)

Bei der Auswertung von Graukarte 2 wurde nach selbigem Analyseprinzip verfahren. Dabei galt es zu berücksichtigen, dass sich bei einer Neigung von 45° die zweite Graukarte (GK 2) nicht mehr im Blickfeld der Hauptkamera (K 1) befand und somit für diese Positi-

on generell keine Daten erfasst werden konnten. Im weiteren Verlauf der Analyse konnten bei den Auswertungen von GK 2 deutlich erkennbare Messunterschiede verzeichnet werden (s. Abbildung 5.23). Die Ergebnisse aus dem unteren Bereich von GK 2 waren weitgehend mit den Ergebnissen von GK 1 vergleichbar; lediglich die Standardabweichung der einzelnen Messungen hat sich auf 2,8 mm erhöht, was u. a. auf die doppelte Entfernung der Graukarte zur Tiefenbildkamera zurückzuführen ist (s. Kapitel 5.1.3, Wiggling Error). Im mittleren und oberen Bereich von GK 2 wurde hingegen eine Zunahme bei den Messfehlern sowie bei der Messwertstreuung festgestellt. Im Bereich der Kartenmitte (GK 2) hat sich insbesondere bei einer Neigung der Hauptkamera (K 1) von 30° die Streuung der Messergebnisse z. T. verdoppelt. Im oberen Bereich der Graukarte war sogar ein exponentieller Anstieg der Streuung zu verzeichnen. Während bei einer Neigung der Hauptkamera von 0° eine max. Standardabweichung von 34,63 mm zu verzeichnen war, stieg diese bei weiterer Neigung auf bis zu 381,52 mm an.

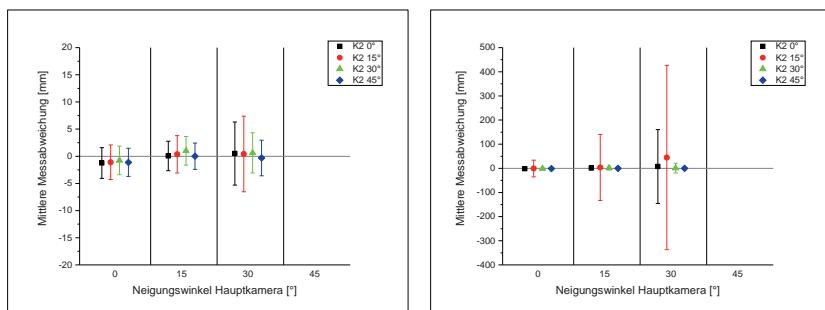


Abbildung 5.23: Darstellung der Analyseergebnisse von Graukarte 2 im mittleren (links) und oberen Interessengebiet (rechts).

Anhand der ausgewerteten und dargestellten Messabweichungen und Streumaße wurde insbesondere deutlich, dass die Gegenkamera bei einer Neigung von 15° (s. rote Messreihe, K2 15°) einen deutlichen Einfluss auf die Datenakquisition im Untersuchungsbereich nimmt. Die Messabweichungen haben bei einer Neigungsposition von 30° sogar weiter zugenommen (s. Abbildung 5.23). Eine Hauptursache hierfür basiert auf dem Modulationsprinzip der verwendeten Tiefenbildkameras.

Anhand der durchgeföhrten Untersuchungen wurde erkennbar, dass der gleichzeitige Betrieb von zwei parallel zueinander ausgerichteten Tiefenbildkameras einen Einfluss auf die Güte der akquirierten Daten nehmen kann. Besonders auffallend während der Versuchsdurchführung war, dass nach einer bestimmten Kamerabetriebszeit ein pulsierender Lichtring um den Emitter der Kamera erschien (s. Abbildung 5.24). Dieser Lichtring war nicht ständig präsent, sondern trat erst nach einer Betriebszeit von ca. 20 min schleichend auf. Zu Beginn dieser Phase war im Bereich des NIR-Emitters ein vereinzeltes Flackern wahr-

zunehmen, welches sukzessive zu einem pulsierenden Lichttringring anwuchs. Nach wenigen Minuten klang dieser Lichtring wieder ab, bis er nicht mehr in den Aufnahmen zu erkennen war (vgl. Abbildung 5.24).

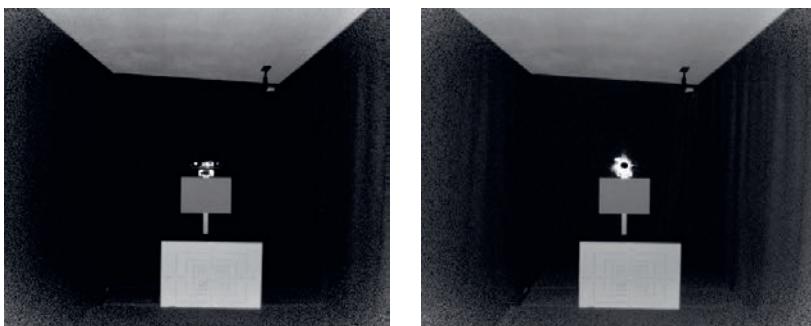


Abbildung 5.24: Vergleich des Kamerabereichs mit pulsierendem Lichtring (rechts) und ohne auftretende Interferenzen (links).

Der beschriebene Lichtring führte stellenweise zu Pixelfehlern im Tiefenbild. Diese wirkten sich zwar nicht auf die gesamte Aufnahme aus; allerdings entstanden hierdurch starke Messwertstreuungen im direkten Umgebungsbereich der Gegenkamera, die sich je nach Neigung der Hauptkamera mit nach unten oder oben verlagerten.

5.4.3 Untersuchung der vertikalen Kameraverschiebung

In Ergänzung zu den unterschiedlichen Neigungspositionen wurden abschließend die Auswirkungen der Gegenkamera aus unterschiedlichen vertikal verschobenen Positionen innerhalb des Haupterfassungsbereichs von K 1 untersucht. Zur Durchführung dieser Versuche wurde der Versuchsaufbau aus den vorherigen Untersuchungen weitgehend beibehalten. Eine wesentliche Ergänzung des Aufbaus bildete die Einbindung einer horizontal zum Boden ausgerichteten Führungsschiene, die es exemplarisch ermöglichte, die Position der Gegenkamera vertikal zu verschieben (entlang der Laderaumseitenwand), um so u. a. den bestmöglichen Versatz bzw. die ideale Position der Gegenkamera bestimmen zu können (s. Abbildung 5.25). Für die Datenaufzeichnung an den einzelnen Kamerapositionen wurde – in Anlehnung an die vorherigen Versuchsdurchläufe – die Gegenkamera erneut um jeweils 15° geneigt. Die Ausrichtung der Hauptkamera blieb bei dieser Versuchsanordnung unverändert.

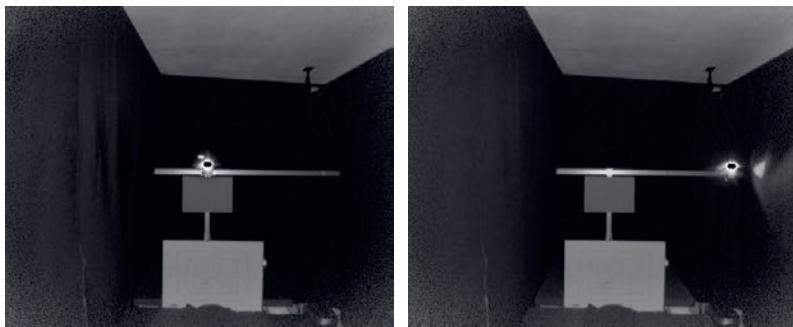


Abbildung 5.25: Versuchsaufbau zur vertikalen Verschiebung der Tiefenbildkamera mit sichtbarem Lichtimpulsring

Als Ausgangsbasis für die Versuchsauswertung wurde derselbe linienbasierte Datenvergleich wie bei der horizontalen Neigung der Tiefenbildkamera herangezogen. Bei der Auswertung der vorderen Graukarte (GK 1) wurden sowohl im oberen, mittleren als auch unteren Kartenbereich keine wesentlichen Messwertveränderungen wahrgenommen, so dass hier keine Einflussnahme der Gegenkamera zu verzeichnen war (s. Abbildung 5.26).

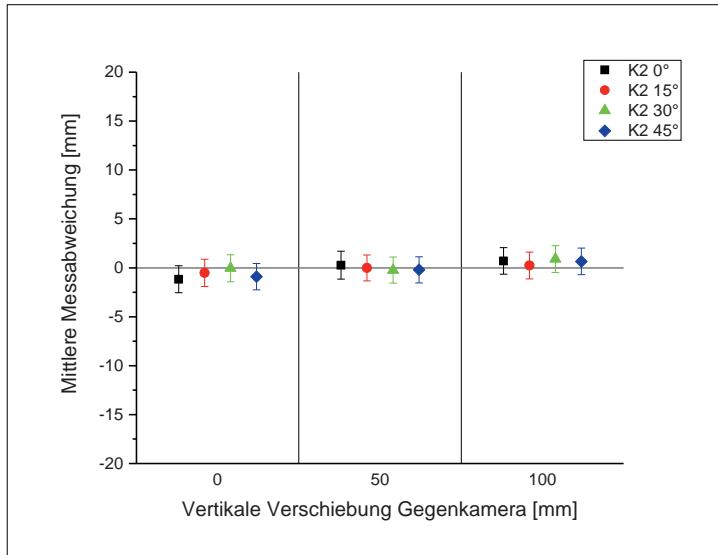


Abbildung 5.26: Messabweichungen im oberen Bereich von Graukarte 1 bei vertikaler Verschiebung der Gegenkamera

Wie anhand der Erkenntnisse aus dem vorherigen Kapitel bereits zu erwarten war, ergaben sich auch im Rahmen der Auswertung von GK 2 deutlich größere Messabweichungen als

im Vergleich zu GK 1. Diese konzentrieren sich allerdings nur auf die Positionen, bei denen sich die Gegenkamera genau gegenüber von der Hauptkamera befand (Erfassungszentrum). Durch die vertikale Verschiebung der Gegenkamera (GK 2) aus dem Zentrum hinaus nahmen die jeweiligen Messstreuungen ab, wodurch sich die Messabweichungen wiederum stabilisierten (s. Abbildung 5.27).

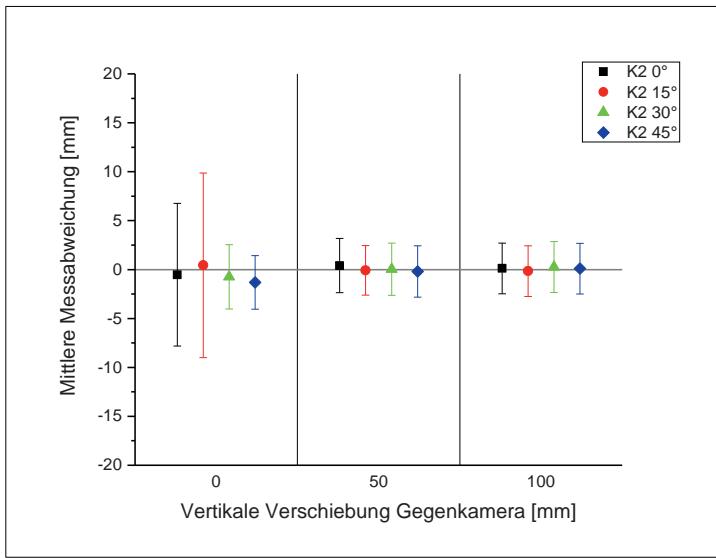


Abbildung 5.27: Messabweichung im Bereich von Graukarte 2 (oben) bei vertikaler Verschiebung der Gegenkamera

In Bezug zu den Auswertungen bei den vertikalen Verschiebungen gilt es zu berücksichtigen, dass die Analysen immer nur von einem festen Erfassungsbereich innerhalb von K 1 ausgehen. Bei der Betrachtung der dazugehörigen Intensitäts-/Infrarotbilder zeigt sich jedoch, dass auch hier der bereits zuvor beschriebene Lichtimpulsring auftritt und sich durch die vertikale Verschiebung verlagert. Die Pixelfehler waren somit auch hier vorhanden; allerdings befanden sie sich an anderen, nicht ausgewerteten Stellen (vgl. Abbildung 5.25).

In Anlehnung an die durchzuführenden Messungen im Laderraum bedeutet dies, dass der simultane Einsatz mehrerer Tiefenbildkameras eine adäquate Datenerfassung erschweren kann, falls sich die Modulationsfrequenzen überlagern sollten. Um diesen Aspekt im Rahmen der anstehenden Modell- und Praxiserprobungen ausschließen zu können, wird auf einen Simultansbetrieb der Tiefenbildkameras vorerst verzichtet (weitere Details s. Kapitel 5.6).

5.5 Einfluss der mechanischen Transportbelastungen

Ein weiterer Punkt, den es im Rahmen der Voruntersuchungen zu analysieren gilt, sind die in Kapitel 3.2.3 bereits genannten mechanischen Einwirkungen auf die Tiefenbildkamera, die unweigerlich mit dem eigentlichen Transportprozess einhergehen (Stöße/Schwingungen). Zwar ist während der Fahrt keine Datenakquisition vorgesehen; durch die dauerhafte Anbringung der Tiefenbildkamera im Laderraum wirken die transportbegleitenden mechanischen Belastungen allerdings unweigerlich auf die optische Einheit ein.

Um die möglichen Auswirkungen dieser Belastungen auf die Tiefenbildkamera beurteilen zu können, werden im Folgenden die einwirkenden Schwingungen und Stöße konkretisiert und hinsichtlich ihrer Relevanz eingegrenzt. Darauf aufbauend werden die durchgeföhrten Transportsimulationen beschrieben sowie die relevanten Kameraparameter ausgewertet.

5.5.1 Charakterisierung der einwirkenden mechanischen Transportbelastungen

Zur aktiven Ermittlung der Laderraumdaten während der einzelnen Transport- und Verlastestationen ist es erforderlich, die Tiefenbildkameras in den Laderraum zu integrieren. Durch den damit verbundenen Montageprozess werden Laderraum und Tiefenbildkamera fest gekoppelt, wodurch die Kamera weiteren Belastungen ausgesetzt wird. Während des Transportprozesses entstehen aufgrund des Fahrbetriebs sowie der jeweiligen Streckenbeschaffenheit unvermeidbare dynamisch-mechanische Belastungen⁵⁰, die sich auch auf die montierten Tiefenbildkameras übertragen. Die damit einhergehenden Kräfte und Momente treten zeitgleich und in unterschiedlichen Intensitäten auf. Zur Beurteilung dieser Auswirkungen auf die Tiefenbildkamera müssen daher die einzelnen Belastungen separat betrachtet werden, die im Vorfeld der Versuchsdurchführung kurz charakterisiert und bezüglich der relevanten Richtwerte eingegrenzt werden.

Aufgrund ihres Wirkungsverlaufs lassen sich die während eines Transports auftretenden dynamisch-mechanischen Einflussgrößen prinzipiell in Stoß- und Schwingungsbelastungen unterteilen, die wiederum jeweils in horizontaler und vertikaler Richtung einwirken ([Sch89], S. 30). Die entsprechenden Belastungsgrundlagen sowie die damit in Verbindung stehenden Belastungsgrößen und Belastungsprofile werden u. a. in der DIN 30786 Teil 1 und Teil 2 ausführlich erläutert [DIN15].

⁵⁰ Da die vorhandenen statisch-mechanischen Belastungen durch die dynamisch-mechanischen Belastungen überlagert werden, wurde der Fokus ausschließlich auf dynamische Belastungen gelegt, also auf vertikale Schwingungen sowie horizontale und vertikale Stöße. Weitere existierende mechanische Belastungsfälle wurden aufgrund ihrer Irrelevanz für den angestrebten Anwendungsbereich nicht betrachtet. Hierzu wird auf die im Text aufgeführten Normen und Richtlinien verwiesen.

In Bezug auf die Kameraanbringung sind u. a. die vertikalen Schwingungen von Bedeutung. Sie sind als eine unvermeidbare dynamisch-mechanische Belastung während des Transportprozesses anzusehen und entstehen entweder durch die reine Fahrzeuggbewegung entlang der Fahrtstrecke oder werden durch resonanzfähige Baugruppen des Transportmittels (z. B. Fahrwerk oder Antriebsstrang) übertragen. Das für den Straßentransport übliche Frequenzspektrum variiert in einem Bereich von 3 bis 350 Hz, wobei die Amplitude der Beschleunigung bis zu 10 m/s^2 erreichen kann ([GK07], S. 39). Des Weiteren treten sie in allen drei Achsrichtungen auf und weisen je nach Transportmittel und Fahrbahnbeschaffenheit einen annähernd gleichbleibenden oder stochastischen Frequenzverlauf auf. Anhand der aufgezeigten Frequenzbreite und der unterschiedlichen Krafteinwirkungen wird bereits deutlich, dass die vertikalen Schwingungen im Laderaum stark variieren können. Als Maß für die jeweiligen Schwingungsverläufe wird die spektrale Beschleunigungsdichte verwendet, die sich in einem sogenannten PSD-Diagramm (Power Spectral Density) darstellen lässt (vgl. Abbildung 5.28). Neben den fahrzeug- und streckenspezifischen Einflüssen werden die Schwingungen zudem auch vom bereits thematisierten Beladungsgrad des Laderraums beeinflusst (prozentual zur maximalen Volllast). Dies bedeutet, dass bspw. das Trägheitsmoment des Gesamtsystems mit zunehmender Last steigt, wodurch wiederum die Schwingungsbelastung im Laderaum sinkt (vgl. Leer- vs. Vollfahrten). ([Sch89], S. 38, [GK07], S. 39)

Neben den erläuterten Schwingungen treten beim Transportprozess auch Stoßbelastungen auf. In Bezug auf die Montage der Tiefenbildkamera sind hierbei sowohl die vertikalen als auch die horizontalen Stoßbelastungen von Bedeutung. Die Stöße werden ebenfalls von der Fahrtstrecke (gute oder schlechte Straßenverhältnisse) und vom Transportmittel beeinflusst. Im Vergleich zu den Schwingungen weisen sie jedoch deutlich höhere Beschleunigungsspitzen auf. Die horizontalen Stoßbelastungen entstehen bspw. durch extreme Kurvenfahrten oder bei Anfahr- und Bremsvorgängen und können dabei Beschleunigungen von bis zu 10 m/s^2 erreichen. Beim Rangier- oder Kopplungsprozess sind kurzzeitig sogar Belastungsspitzen von 40 m/s^2 und mehr möglich. Die vertikalen Stöße werden hingegen primär durch die Streckenbeschaffenheit aufgrund von Bodenwellen, Schlaglöchern oder Straßenübergängen hervorgerufen. Je nach Intensität unterscheiden sich die Stöße in ihrer Amplitude und der jeweils damit einhergehenden Einwirkdauer; dabei sind kurzzeitige Beschleunigungen von bis zu 100 m/s^2 möglich, die im Praxisdurchschnitt jedoch deutlich darunter liegen.

Die beschriebenen mechanischen Einflussgrößen zeigen bereits auf, dass äußerst vielfältige Belastungsverläufe während des Transports auftreten. Um eine erste Einschätzung bezüglich dieser Einflüsse auf das Kameraverhalten zu erhalten, wurden für die Durchführung der mechanischen Belastungsversuche folgende Testbedingungen und Richtwerte festgelegt:

- vertikale Schwingprüfungen, stufenweise von 0,37 bis 1,15 g_{rms}
- vertikale Stoßprüfungen bei max. 2 g
- horizontale Stoßprüfungen bei max. 4 g

5.5.2 Auswirkungen der mechanischen Belastungen auf die Kameraparameter

Die erforderlichen Versuchsreihen wurden anhand der beim Transport auftretenden Belastungen unter Laborbedingungen simuliert. Hierzu wurden nationale und internationale Prüfverfahren berücksichtigt, in denen die Vorgehensweise sowie die Prüfparameter beschrieben sind. Für die anstehenden Versuche wurden u. a. auf die Angaben aus der DIN 30786, den ISTA-Testprozeduren der Serie 2 sowie dem ASTM Standard D4169 zurückgegriffen ([AST16]; [DIN15]; [IST06]).

Für die Durchführung der vertikalen Schwingprüfungen wurden vier Prüfspektren nach den ASTM- und ISTA-Vorgaben festgelegt. Als Kenngröße des jeweiligen Prüfspektrums wurde der effektive Beschleunigungswert g_{rms} angegeben. Für den Programmablauf der Schwingungssimulationen wurde die spektrale Leistungsdichte in Abhängigkeit von der Frequenz aufgetragen (s. Verlauf PSD-Diagramm in Abbildung 5.28).

Neben der effektiven Beschleunigung stellte die Prüfdauer einen weiteren wichtigen Parameter für die Versuchsdurchführung dar. In Bezug auf die Prüfdauer galt es zu berücksichtigen, dass die Schwingprüfungen zur Simulation der Transporte generell zeitgerafft erfolgen, d. h., die einzelnen Prüfungen werden im Vergleich zur tatsächlichen Fahrzeit schneller durchgeführt. Mittels der Zeitraffung können somit innerhalb kürzerer Zeit längere Transportstrecken mit höherer Belastungsintensität durchgeführt werden. Die zeitgerafften Laborversuche sind daher – im Vergleich zu den tatsächlichen Transportfahrten – als intensiver anzusehen, da die Belastungen in konzentrierter Form aufgeführt werden. Im Rahmen der Versuche wurde für jede Schwingungsprüfung eine Dauer von 1,5 Stunden festgelegt, wodurch für jeden Schärfegrad eine Fahrtstrecke von mehreren Hundert Kilometern nachgebildet werden konnte.

Die Simulation der Prüfspektren erfolgte mittels eines elektromagnetischen Schwingtisches (s. Abbildung 5.29). Durch die Auswahl des Prüfspektrums und der Prüfdauer an der Bedieneinheit wurden über das installierte Schwingregelsystem die Steuersignale für den Schwingtisch eingeleitet und das Prüfspektrum abgefahren. Für jedes Prüfspektrum wurde die Tiefenbildkamera fest auf dem Schwingtisch montiert. Nach Beendigung einer jeweiligen Schwingungsprüfung wurden die intrinsischen Parameter der Tiefenbildkamera nach vorgegebenem Prinzip ermittelt (s. Kapitel 4.3.1). Durch diese Vorgehensweise konnte die Tiefenbildkamera stufenweise höheren Belastungen ausgesetzt werden. Im Rahmen der

mechanischen Belastungsversuche wurde eine Transportstrecke von über 2500 km simuliert.

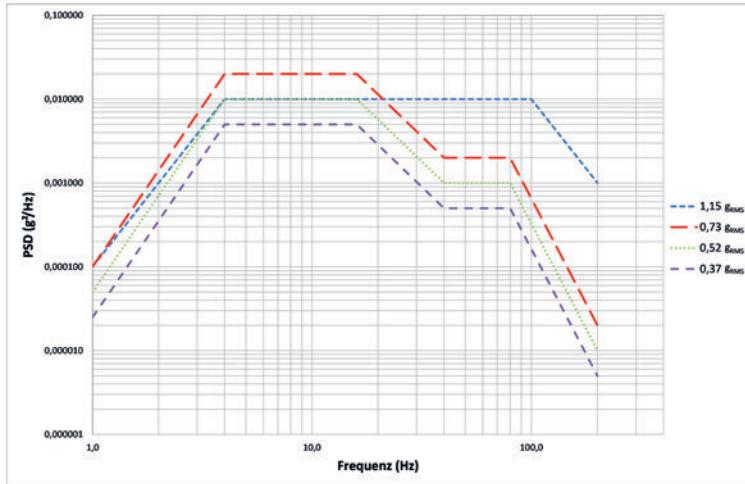


Abbildung 5.28: Darstellung der verschiedenen Prüfspektren zur Durchführung der vertikalen Schwingprüfungen mit der Tiefenbildkamera [AST16]

Der Versuchsaufbau für die Schwingungsprüfungen wurde analog für die Stoßprüfung verwendet. Als Belastungsprofil wurde eine Stoßamplitude von 2 g mit einer Einwirkzeit von 11 ms determiniert. Im Gegensatz zur Schwingungsprüfung wurde keine Prüfdauer festgelegt, sondern die Anzahl der Stöße. Im vorliegenden Fall wurde die Gesamtanzahl der einwirkenden Stöße auf 50 begrenzt, wobei pro Minute 4 Stöße auf die Tiefenbildkamera eingeleitet wurden. Im Anschluss an die Stoßprüfung wurden erneut die intrinsischen Parameter vermessen und dokumentiert.



Abbildung 5.29: Durchführung der Transportsimulationen auf dem Schwingtisch (links) sowie auf der Ablaufbahn (rechts)

Die Durchführung der horizontalen Stoßprüfungen erfolgte auf der Ablaufbahn (s. Abbildung 5.29, rechts). Hierfür wurde die Tiefenbildkamera auf einem Prüfschlitten montiert und mittels einer Seilwinde auf eine für den Versuch festgelegte Ablaufhöhe gezogen. Durch das anschließende Abrollen des Prüfschlittens wurde die jeweils für die Versuchsdurchführung erforderliche Aufprallgeschwindigkeit an der Prallwand erreicht. Durch die Abstimmung von Ablauflänge, Ablaufwinkel sowie Gesamtmasse konnten die jeweiligen Beschleunigungen für die simulierten Anfahrt- und Bremsvorgänge erzielt werden. Im vorliegenden Fall wurde die Tiefenbildkamera in zehn Durchgängen einer Beschleunigung von 4 g und einer Stoßdauer von 120 ms ausgesetzt. Anschließend wurden die intrinsischen Kameraparameter erneut bestimmt und die ermittelten Ergebnisse einem abschließenden Parametervergleich unterzogen (s. Tabelle 5.6). Daraus wurde ersichtlich, dass die dynamisch-mechanischen Belastungen – gemäß den durchgeföhrten Simulationsbedingungen – keine Auswirkungen auf die intrinsischen Kameraparameter haben. Zwar sind kleinere Abweichungen zu erkennen; allerdings nehmen diese unter der Berücksichtigung der jeweiligen Streumaße keinen signifikanten Einfluss auf die damit verbundenen Messdaten (s. Kapitel 4.3.1).

Tabelle 5.6: Vergleich der ermittelten Kameraparameter anhand der jeweiligen Belastungsform (vertikale Schwingungen sowie horizontale und vertikale Stöße)

Mechanische Belastung	Intrinsische Kameraparameter								
	f_x [px]	f_y [px]	u_0 [px]	v_0 [px]	k_1 [-]	k_2 [-]	k_3 [-]	p_1 [-]	p_2 [-]
Ausgangsbasis	362,97	362,52	252,47	205,84	0,0940	-0,2725	0,0951	-0,00013	0,00009
0,52g; v. Schw.	362,17	361,93	252,63	205,71	0,0897	-0,2686	0,0955	-0,00030	-0,00011
0,73g; v. Schw.	362,46	362,13	252,72	205,80	0,0935	-0,2711	0,0951	-0,00016	0,00012
1,15g; v. Schw.	362,85	362,38	252,54	205,56	0,0938	-0,2729	0,0962	-0,00017	0,00005
2,00g; v. Stoß	362,27	361,73	252,33	205,92	0,0931	-0,2661	0,0882	-0,00037	0,00014
4,00g; h. Stoß	362,01	361,65	252,53	205,97	0,0925	-0,2704	0,0956	-0,00010	-0,00009
Max. Differenz	0,96	0,87	0,39	0,41	0,0043	0,0068	0,0080	0,00027	0,00025

5.6 Gesamtbewertung der Versuchsergebnisse

Im Rahmen der experimentellen Untersuchungen wurden die Einflussfaktoren der Tiefenbildkamera für den laderaumtypischen Anwendungsfall betrachtet. Als potenzielle Störquellen wurden dabei insbesondere thermische sowie material- und anordnungsbedingte Ursachen identifiziert.

Anhand der thermischen Untersuchungen konnte aufgezeigt werden, dass sich die unterschiedlichen Betriebszustände der Tiefenbildkamera (Betriebsmodus, Betrieb Lüfter, interne und externe Temperaturveränderung etc.) direkt auf das Messverhalten der Tiefenbildkamera auswirken. In Abhängigkeit von der eingesetzten Betriebsstufe (Kalt-, Stand-by,

Warmbetrieb) wurden bspw. Temperaturdifferenzen von bis zu 36 °C ermittelt, die eine Messabweichung von bis zu 2,87 mm hervorgerufen haben. Verstärkt wurde dieser Effekt durch die Einflussnahme von externen Temperaturveränderungen. Der zusätzliche Einfluss der Umgebungstemperatur hat im Rahmen der Versuche zu einer internen Temperaturdifferenz von über 70 °C geführt, woraus eine Messabweichung von bis zu 11,7 mm hervorging. Mittels der durchgeführten Untersuchungen konnte somit eine direkte Korrelation zwischen Temperatur- und Tiefenwertverlauf aufgezeigt werden. Zudem konnten auch minimale Schwankungen bei der Analyse der intrinsischen Kameraparameter festgestellt werden. Diese Erkenntnisse ermöglichen es, durch die richtige Auswahl des Betriebsmodus und der Berücksichtigung der Laderaumtemperatur die thermischen Fehleinwirkungen bei der Datengenerierung deutlich zu kompensieren.

Für den Einsatz der Tiefenbildkamera im Laderaum bedeutet dies, dass bei der Datenakquisition insbesondere die tatsächliche Betriebstemperatur berücksichtigt werden sollte. Ein erster Ansatz zur Verbesserung der Datengüte bildet die anforderungsgerechte Anpassung des derzeitigen Kameragehäuses, um die Temperaturschwankungen im Gehäuse besser eingrenzen zu können. Hierzu gehören in erster Linie ein Gehäusematerial mit verbesserten Isolations- und Kühlwirkung und ein industrieller Gehäuseaufbau, der den Arbeitsbereich der Tiefenbildkamera gezielt erweitert – bspw. ein abgestimmtes Aluminiumgehäuse mit optionaler Passivkühlung. Erste Ansätze zur Klimatisierung von Kameragehäusen existieren zwar bereits (vgl. [Aut19]), allerdings erweisen sich diese Modifikationen im aktuellen Zustand noch als ungeeignet für den Einsatz im Laderaum (s. Aufwand für die Aktivkühlung).

Einen durchaus vielversprechenden Ansatz bietet die Umsetzung einer temperaturabhängigen Tiefenkalibrierung. Das Grundprinzip hierfür wurde bereits in Kapitel 5.2.3 aufgezeigt. Anhand der sich daraus ergebenden Kennlinie lässt sich für die Datenakquisition im Laderaum eine temperaturbezogene Korrekturfunktion erarbeiten. Diese Vorgehensweise stellt für den vorliegenden Fall eine vielversprechende Lösungsmöglichkeit dar, zu der bereits erste Kalibrieransätze erarbeitet worden sind [Met19a]. In Verbindung mit einer entsprechenden Gehäuseanpassung lassen sich somit dauerhaft die Messstabilität verbessern und das Einsatzgebiet von ToF-Tiefenbildkameras gezielt erweitern.

Bei den materialabhängigen Tiefenwertuntersuchungen wurde deutlich, dass das reflektierte Intensitätssignal vom Reflexionszustand der betrachtenden Laderaumobjekte beeinflusst wird. Da das Intensitätssignal wiederum zur Tiefenwertbestimmung herangezogen wird, kommt es durch die Materialien im Laderaum zu Fehlmessungen. Bei den durchgeführten Versuchen wurden Messabweichungen von bis zu 15,6 mm festgestellt; allerdings lagen 9 der 12 getesteten Materialien in einem Toleranzbereich von unter 6 mm, wodurch der Tiefenbildkamera eine durchaus stabile Messwerterfassung hinsichtlich der Materialien im Laderaum bescheinigt werden kann.

Die aufgetretenen Messabweichungen lassen sich im Wesentlichen auf die Oberflächenbeschaffenheit der erprobten Materialien zurückführen (bspw. Struktur, Farbe). Dabei kann zwischen stark und schwach reflektierenden Oberflächen unterschieden werden, die durch Materialien mit weitgehend normaler Reflexionseigenschaft ergänzt werden. Als ein typisch normales Laderraumobjekt kann die Außenhülle einer Versandkartonage (Pappe) angesehen werden. Bei diesem Material sind nahezu keine Messabweichung festzustellen (0,5 mm). Bei den Materialien mit schwacher Reflexionseigenschaft weisen die demodulierten Intensitätssignale hingegen eine meist geringe ausgeprägte Amplitude auf. Dies resultiert in einer steigenden Messabweichung – im Vergleich zu einem normalen Material, wodurch zugleich auch eine größere Standardabweichung zu verzeichnen ist – bspw. bei einer Holzpalette (Abweichung: 4,5 mm; Streuung: $\pm 1,5$ mm). Einen deutlich ausgeprägten Einfluss auf die Datenqualität nehmen stark reflektierende Laderraumobjekte ein. Hierzu gehören insbesondere Objekte aus Aluminium, welche – je nach Einfallsinkel der Kamera – eine Messwertstreuung von bis zu $\pm 98,6$ mm aufweisen können. Eine Hauptursache für diese große Streuung liegt bei den auftretenden Pixelfehlern. Dabei wird das Intensitätssignal durch die starke Materialreflexion überbelichtet und/oder fehlgeleitet, wodurch wiederum die Tiefenwertbestimmung fehlschlägt oder ein gänzlicher anderer Distanzwert demoduliert wird. Da sich diese Pixelfehler vorwiegend auf den Bereich des Reflexionskegels beziehen und somit im Vergleich zur restlichen Fläche gering ausfallen, halten sich die Messabweichungen in einem vertretbaren Rahmen (s. vorgegebene 2 cm Messabweichung), wodurch sich für den anvisierten Laderraumeinsatz ein hinreichend genaues Datenergebnis erzielen lässt.

Die aufgezeigten Pixelfehler lassen sich zwar mittels eines nachträglichen Amplituden- oder Medianfilters kompensieren; allerdings erschwert sich dieser Prozess bei einer Szenenbetrachtung mit unterschiedlichen Materialien. Durchaus angebrachter erscheint die Umsetzung eines intensitätsbezogenen Kalibriermodells für das reflektierte Kamerasignal. Die damit verbundenen Kalibrier- und Korrekturansätze sind allerdings Bestandteil verschiedener Forschungsarbeiten, deren Erkenntnisse erst noch implementiert werden müssen ([Fuc12]; [JYT⁺17]; [LK07]; [ZHZ19]).

In Bezug auf die anordnungsbedingte Wechselwirkung von mehreren Tiefenbildkameras im Laderraum hat sich gezeigt, dass sich je nach Ausrichtung des Sichtfeldes sehr stabile Messergebnisse erzielen lassen, die eine max. Messabweichung von nur 2,1 mm aufweisen. Zu einer deutlichen Beeinträchtigung dieser Ergebnisse kommt es allerdings beim Simultanbetrieb von mehreren Kameras und gleichzeitiger Sichtfeldüberschneidung. Je nach Winkellage und betrachtetem Interessenbereich steigt dabei die Messwertstreuung auf bis zu 381,52 mm an, wodurch die vernünftige Weiterverarbeitung der erfassten Tiefendaten deutlich erschwert wird. Eine wesentliche Ursache für diese schlechten Messergebnisse bilden die betriebsbedingten Signalüberlagerungen.

Eine technische Erklärung für diese ausgeprägten Störeinwirkungen lässt sich durch die nähere Betrachtung der auftretenden Interferenzen beschreiben. Wie in Kapitel 4.1.2 erläutert, basiert das Modulationsprinzip der Tiefenbildkamera auf drei verschiedenen Frequenzen. Hierbei haben die experimentellen Untersuchungen gezeigt, dass es ab einer bestimmten Zeitspanne zu einer Synchronisation der Modulationsfrequenzen bei den eingesetzten Kameras kommt. Das bedeutet: Die ausgesandten Lichtimpulse der beiden Kameras weisen die gleiche Frequenz auf. Dadurch ist die Auswertelektronik der Kamera u. a. nicht mehr in der Lage, die frequenzgleichen Empfangssignale der zweiten Kamera eindeutig zuzuordnen, wodurch es bei der Demodulation zu Fehlinterpretationen kommt.

Für die Akquisition der Laderaumdaten ist zwar nur eine kurze Erfassungszeit vorgesehen, wodurch das Auftreten der beschriebenen Interferenzen als gering einzustufen ist. Allerdings wird zur zusätzlichen Absicherung der anstehenden Systemerprobung im Laderaum eine sequenzielle Datenerfassung eingeplant. Diese systembedingte Einschränkung gilt es für zukünftige Einsatzszenarien jedoch zu beheben, wodurch ein Parallelbetrieb aller Kameras realisierbar wäre. Dadurch wird nicht nur Zeit für die Datenakquisition eingespart, sondern es würde sich auch eine direkte Darstellung aller Kameradaten umsetzen lassen. Ansätze hierfür bieten z. B. die Einbindung einer Kontrollfunktion bei der Generierung der Modulationsfrequenz oder die Umsetzung einer vorgelagerten Selektionsschaltung im Sinne eines klassischen Multiplexers – bspw. bei der gleichzeitigen Einbindung von mehr als fünf Kameraparen.

Der Hauptzweck der experimentellen Untersuchungen war es, die laderaumrelevanten Fehlerquellen systematisch zu erfassen, um darauf aufbauend deren Auswirkungen für den Praxiseinsatz quantifizieren zu können. Anhand der identifizierten Fehlerquellen konnte insbesondere festgestellt werden, dass bei großer Veränderung der Laderaumtemperatur sowie beim Einsatz von stark reflektierenden Laderaumobjekten ein signifikanter Einfluss auf die generierten Tiefeninformationen genommen wird. Die ermittelten Abweichungen liegen zwar im unteren Zentimeterbereich, wodurch noch eine hinreichend genaue Messgenauigkeit für den Laderaumeinsatz gewährleistet werden kann. Allerdings sind zur dauerhaften Kompensation dieser Störquellen weitere Maßnahmen erforderlich. Hierzu existieren bereits vereinzelte Lösungsansätze; allerdings werden diese in den aktuellen Kameragenerationen noch nicht berücksichtigt, sodass in Bezug auf die erfolgreiche Implementierung dieser Systeme sowie die damit verbundene Erweiterung des Einsatzfeldes zusätzlicher Handlungs- und Untersuchungsbedarf besteht (s. Kapitel 8.2).

6 Methodik zur Verarbeitung der Laderaumdaten

Damit aus den Daten der verschiedenen Laderaumszenen später die volumenbezogene Auslastung abgeleitet werden kann, sind einige grundlegende grafische Verarbeitungsschritte notwendig, die in diesem Kapitel erarbeitet und beschrieben werden.

Als wesentliche Schritte sind die generelle Verarbeitung und Analyse der erfassten Rohdaten anzusehen. Das Hauptziel ist es daher, die erfassten Einzelaufnahmen in ein Gesamt-szenario der Laderaumumgebung zu überführen, um anschließend ein Bildanalysesystem zur Auswertung der erforderlichen Laderaumdaten anwenden zu können. Die damit verbundene Verarbeitungskette enthält verschiedene Arbeitsphasen, die erprobte Auswertetechniken und Verarbeitungsmethoden verwenden, um eine funktionale Interpretation der zu betrachtenden Laderaumszenen zu ermöglichen. Dabei wird der Fokus insbesondere auf die Funktionsweise der einzelnen Operatoren und Methoden gelegt. Die sonst übliche Berücksichtigung der Verarbeitungseffektivität, des Laufzeitverhaltens und der Programmatomatisierung bleibt im Rahmen dieser Arbeit – aufgrund des zusätzlichen Umfangs – unberücksichtigt.⁵¹

6.1 Aufnahme und Vorverarbeitung der akquirierten Rohdaten

Für die Erarbeitung der Verarbeitungskette wird zunächst ein miniaturisiertes Laderaummodell herangezogen. Die Erprobung der erforderlichen Verarbeitungsmethoden erfolgt dabei anhand unterschiedlicher beispielhafter Modellszenarien mit verschiedenen Testobjekten. Aufbauend auf diesen Ausgangssituationen werden verschiedene Verarbeitungsschritte mit unterschiedlichen Parameterwerten angewendet, um das bestmögliche Ergebnis für die finale Analyse des Testszenarios heranziehen zu können. Neben der eigentlichen Datenakquisition und -repräsentation bildet die Datenvorverarbeitung einen wesentlichen Schritt dieser Arbeitsphase. Dabei steht die gezielte Optimierung und Reduzierung der erfassten Ausgangsdaten im Fokus.

⁵¹ Die Literatur zum Thema der Bildanalyse ist sehr umfangreich. Die folgenden Abschnitte erheben daher nicht den Anspruch der Vollständigkeit, sondern fokussieren sich auszugsweise auf die wesentlichen Operatoren sowie einzelne Verarbeitungsmethoden. Zur thematischen Vertiefung wird an gegebener Stelle auf die weiterführende Literatur verwiesen.

6.1.1 Aufbau der Modellumgebung

Zur Erprobung der einzelnen Verarbeitungsschritte wurde eine miniaturisierte Modellumgebung eines Laderaums realisiert. Dieses Laderaummodell bildet die Ausgangsbasis zur Ausgestaltung von modellbehafteten Laderaumszenarien, um auszugsweise praxisnahe Laderaumszenen (bezüglich der relevanten Materialien, Formen, Anordnungen etc.) nachbilden zu können. Aufbauend auf diesen Testszenarien sowie den daraus generierten Datensätzen soll anschließend eine adäquate Verarbeitungskette für die grafische Laderaumanalyse bestimmt werden. Gemäß den Erkenntnissen aus den Laborversuchen wurde für die Datengenerierung jeweils eine Tiefenbildkamera auf jeder Modellseite montiert, sodass diese zueinander versetzt ausgerichtet werden konnten (vgl. Abbildung 6.1). Die Position der Tiefenbildkameras konnte zudem auf den verwendeten Profilschienen in der Höhe verschoben werden, um unterschiedliche Messabstände berücksichtigen zu können. Des Weiteren wurden die Kameras auf einer Neigungsvorrichtung angebracht, sodass der Blickwinkel der Tiefenbildkamera variiert werden konnte, um Aufnahmen aus unterschiedlichen Perspektiven zu erfassen, die zugleich eine hinreichende Überlappung der jeweiligen Modellszenen enthielten.

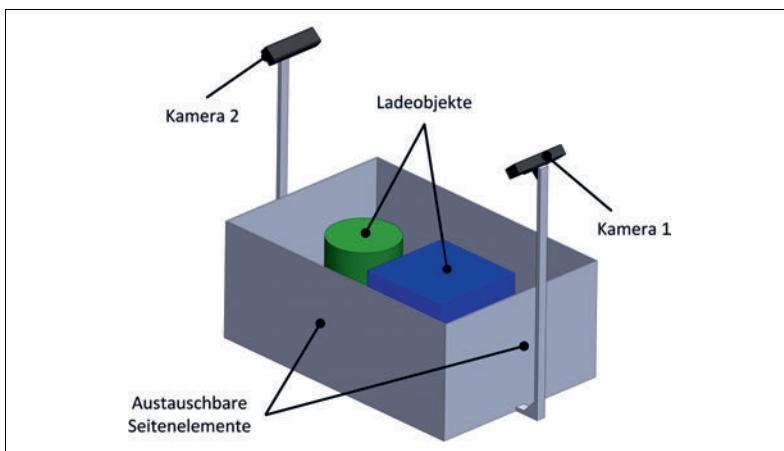


Abbildung 6.1: Aufbauschema des Laderaummodells für die Versuchsphase

Ferner wurden für den Grundaufbau des miniaturisierten Laderaummodells unterschiedliche Materialien verwendet. Für die praxisnahe Laderaumsimulation wurden primär die Referenzmaterialien aus den Laborversuchen eingesetzt, die als austauschbare Seitenelemente in den Modellaufbau integriert wurden. Dadurch konnten simultan verschiedene Materialkombinationen erprobt und berücksichtigt werden. Wie bereits in Kapitel 3.2.1 aufgezeigt wurde, lassen sich die Grundformen der hier betrachteten Ladeeinheiten entweder quaderförmig oder zylindrisch repräsentieren. Zur charakteristischen Beschreibung des

Ladeguts innerhalb des Modellaufbaus wurden daher sowohl verschiedene Volumenkörper (Quader, Zylinder) als auch palettierte Mini-Ladeeinheiten als Erprobungsobjekte verwendet.

Anhand dieser Ausgangsbasis wurden für die Erprobung der Datenverarbeitungsschritte verschiedene Modellszenen mit unterschiedlich zusammengestellten Ladeobjekten generiert (s. Abbildung 6.2). Das Kernziel bestand im Wesentlichen darin, die relevanten Algorithmen für die Datenverarbeitung sowie die darauf abzustimmenden Parameter für die jeweilige Kameraaufnahme analysieren zu können. Die erarbeiteten Erkenntnisse sollten anschließend genutzt werden können, um eine allgemeine Datenverarbeitungskette zu bestimmen, die zukünftig zur Approximation des belegten Laderaumvolumens herangezogen werden kann. Die Beschreibung der einzelnen Verarbeitungsschritte erfolgt im Folgenden primär am Beispiel der im Laderaummodell positionierten Mini-Ladeeinheiten.

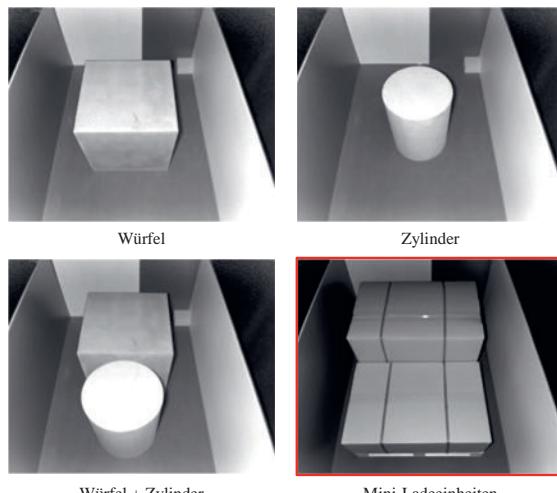


Abbildung 6.2: Einzelaufnahmen der verschiedenen Ausgangsszenarien für die Erprobung der erforderlichen Verarbeitungsschritte

6.1.2 Struktur der Rohdaten

Für die von der Tiefenbildkamera erfassten Daten gibt es in der Literatur unterschiedliche Bezeichnungsformen sowie verwendbare Ausgabeformate ([Bes88], S. 128). Im bisherigen Verlauf dieser Arbeit wurden für die Versuchsdurchführung und die Erprobung des Tiefensensors klassische Tiefenbilder in Matrixform genutzt (vgl. Kapitel 5). Dabei enthielt jede Pixelkoordinate im Tiefenbild einen vom Sensor ermittelten Entfernungswert, der für die bildliche Darstellung nochmals in Graustufen codiert wurde. Darüber hinaus wird von der Infraroteinheit der Kamera simultan ein Intensitätsbild der betrachteten Szene ausgege-

ben, sodass von der jeweils betrachteten Versuchsszene stets zwei unterschiedliche Bildformen vorliegen (s. Abbildung 6.3, Tiefen- und Intensitätsbild). Aufgrund der begrenzten metrischen Repräsentation der darin enthaltenen Bildinformationen erweist sich diese Form der Datenstruktur (2,5D-Pixelstruktur) als ungeeignet für die Bestimmung der Laderaumauslastung. Eine alternative Darstellungsform stellt daher die Punktwolke dar, in der die aufgenommenen Bilddaten als eine Menge von Punkten innerhalb eines dreidimensionalen Raums aufgefasst werden ([Fie14], S. 2).⁵² Hierfür wird die betrachtete Szene innerhalb des Kamerakoordinatensystems (X_K , Y_K , Z_K) dargestellt. Die Bilddaten (u , v , z) werden von der Kamera automatisch in die Punktwolke (X , Y , Z) über den entsprechenden Ausgabekanal überführt. ([Rus09], S. 17)

Anhand dieser Datenstruktur wird es fortan ermöglicht, metrische Informationen aus der Punktwolke abzuleiten, um diese anschließend grafisch bezüglich des relevanten Laderaums auszuwerten. Neben den räumlichen Koordinaten lassen sich zudem auch zusätzliche Detailinformationen auf den jeweiligen Punkten hinterlegen – bspw. Farb- und Texturangaben ([ABF⁺14], S. 36). Durch diese zusätzlichen Eigenschaften lässt sich – in Kombination mit den Grauwerten des Intensitätsbildes – eine detailgetreue dreidimensionale Struktur der erfassten Modelloberfläche darstellen (s. Abbildung 6.3).

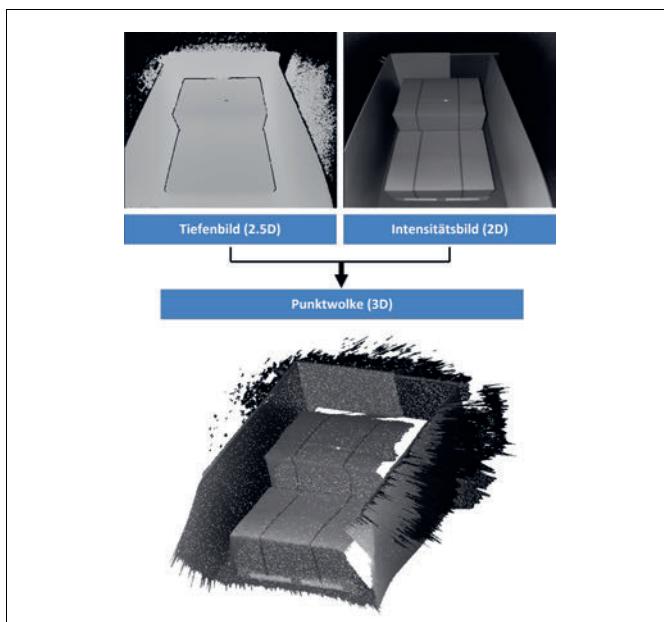


Abbildung 6.3: Schema zur Generierung einer dreidimensionalen Punktwolke (texturierte Rohdaten)

⁵² Im Umkehrschluss lässt sich ein Tiefenbild als eine geordnete Punktwolke auffassen, in der die einzelnen Punkte innerhalb einer festen Pixelstruktur angeordnet sind ([Arb14], S. 5).

Einen weiteren Aspekt, den es bei der Punktwolkengenerierung zu berücksichtigen gilt, ist die Gesamtanzahl der angeordneten Punkte. Die in Abbildung 6.4 dargestellten Punktwolken zeigen eine Laderaummodellaufnahme mit ansteigender Punktwolkendichte (ausgehend von 100 000 Punkten bis über eine Million Punkte). Darin wird bereits deutlich, dass sich die betrachtete Szene mit zunehmender Punktanzahl und gleichzeitig geringerem Punktabstand besser wahrnehmen lässt. Für das menschliche Auge ist es insbesondere einfacher, abgebildete Objekte in einer möglichst detailreichen Aufnahme wiederzuerkennen. Dieser hohe Detailgrad ist für die (maschinelle) Bestimmung der Laderaumauslastung jedoch unerheblich. Für die Weiterverarbeitung der Punktwolke lassen sich daher Szenen mit einer deutlich niedrigeren Punktwolkendichte verwenden, ohne dass dabei die relevanten Informationen verloren gehen ([ABF⁺14], S. 38; [Rus09], S. 23). Der weitere Verarbeitungsprozess der generierten Daten lässt sich daher mit einer deutlich geringeren Punktwolkendichte erproben und realisieren.⁵³



Abbildung 6.4: Rohdaten einer Punktwolkenaufnahme mit unterschiedlichem Detailgrad

6.1.3 Vorverarbeitung der Ausgangsdaten

Das Kernziel der Datenvorverarbeitung liegt darin, die Qualität der von der Tiefenbildkamera akquirierten Rohdaten für die weitere Verarbeitung der einzelnen Punktwolken zu verbessern ([Arb14], S. 28). Bedingt durch das bereits beschriebene Messverfahren (vgl. Kapitel 4.1) und die damit in Verbindung stehenden Störfaktoren (vgl. Kapitel 5.1) entstehen bei der Datenakquisition unterschiedlich grobe Messfehler, die sich in der Datenrepräsentation bemerkbar machen. Um diesen Einflussfaktoren entgegenzuwirken, existieren verschiedene Filter und Operatoren [HJW⁺17]. Für die erforderliche dreidimensionale Rekonstruktion des Laderaummodells konzentriert sich die entsprechende Vorverarbeitung auf eine Auswahl klassischer Aufbereitungsmethoden. Durch diese weitgehend standardisierte Vorgehensweise werden die einzelnen Aufbereitungsschritte im folgenden Abschnitt nur komprimiert beschrieben und das erzielte Ergebnis der Vorverarbeitung wird anhand

⁵³ Zur besseren Ergebnisdarstellung und zur einfacheren Wahrnehmung werden die Punktwolkendaten in den nachfolgenden Abbildungen mit einer stets höheren (erkennbaren) Punktwolkendichte aufgeführt, als dies für die tatsächliche Verarbeitung erforderlich wäre.

eines aufgenommenen Ausgangsszenarios analysiert. Als grundlegender Bestandteil der Vorverarbeitung sind insbesondere die Nachbarschaftssuche und die Normalenbestimmung innerhalb der Punktwolke anzusehen ([Rus09], S. 23). Diese Nachbarschaftsbeziehungen werden im Rahmen der Vorverarbeitung einmalig ermittelt und entsprechend abgespeichert, damit die nachfolgenden Verarbeitungsmethoden und -algorithmen stets auf diese Basisinformationen zurückgreifen können.

Anhand der in Kapitel 5 durchgeführten Voruntersuchungen konnte bereits das Rauschverhalten der Tiefenbildkamera aufgezeigt werden. Da die damit verbundenen Verzerrungen die anstehende Punktwolkenverarbeitung sowie die erforderliche Datenextraktion deutlich erschweren, ist es in einer ersten Instanz notwendig, die vom Sensor generierte Punktwolke zu bereinigen. Ein Hauptaspekt dieses ersten Arbeitsschritts bildet die Messrauschreduzierung mittels eines herkömmlichen Medianfilters, der den Mittelwert aus einer Punktmenge berechnet und beibehält ([PLB12], S. 325; [Tya81]). Ähnlich verhält es sich bei der Entfernung von einzelnen Ausreißern innerhalb der Punktwolkenaufnahme. Zum Auffinden und Entfernen der irrelevanten Punkte wird in Abhängigkeit von einem vorzugebenden Radius der statistische Ausreißerfilter angewendet ([Rus09], S. 42). Dabei wird zunächst für jeden Punkt der mittlere Abstand zu seinen k nächsten Nachbarn ermittelt. Durch die Festlegung der Punktzahl für die Nachbarschaftssuche sowie die Angabe eines Schwellwertes für die Standardabweichung des maximalen Punktabstandes können die relevanten Punkte ermittelt werden. Anhand dieser Ausgangsmenge werden anschließend alle Punkte, die diesen Kriterien nicht entsprechen, aus der Punktwolke entfernt. Dadurch lassen sich die identifizierten Ausreißer herausfiltern und eine erste Verbesserung der erfassten Rohdaten erzielen. Zur zusätzlichen Entfernung von weiteren irrelevanten Datenbereichen wird ferner der RANdom-SAmple-Consensus-Algorithm (RANSAC) angewendet [FB81], dessen Funktion in Kapitel 6.2.2 näher beschrieben wird.

Eine weitere Punktwolkenoptimierung lässt sich durch die parameterbasierte Datenglättung erzielen. Basierend auf der Approximation der kleinsten Fehlerquadrate lässt sich anhand eines lokalen Projektionsparameters das Moving-Least-Squares-Verfahren (MLS) anwenden [MRB09]. Durch diesen Algorithmus wird nicht nur das Rauschen innerhalb der Punktwolke unterdrückt, sondern es lassen sich insbesondere auch kleinere Lücken innerhalb der erfassten Objektoberflächen schließen, wodurch generell die Datenkonsistenz erhöht wird. Bei der Punktwolkenglättung gilt es vor allen Dingen zu berücksichtigen, dass der Glättungsgrad so zu wählen ist, dass nicht allzu viele Detailinformationen verloren gehen oder Kantenübergänge zu sehr verwischen werden. Dies würde insbesondere die anschließende Extraktion der relevanten Daten beeinträchtigen. ([Arb14], S. 29; [Sch09])

Als abschließender Schritt wird die zuvor erwähnte Punktwolkenreduzierung angewendet. Mittels der bisher erwähnten Algorithmen lässt sich zwar bereits eine sukzessive Verringerung der Punktwolkendichte erreichen, jedoch lässt sich dabei der Informationsgehalt der

restlichen Daten nur bedingt steuern. Aus diesem Grund wird bei der finalen Punktwolkenreduzierung das Ziel verfolgt, eine hinreichend genaue Punktwolkendichte zu bestimmen, die zudem eine möglichst effiziente Speicherung der Daten ermöglicht. Durch das gezielte Entfernen von nicht zwingend erforderlichen Punkten lässt sich das Volumen der einzelnen Punktwolke reduzieren und zugleich wird der erforderliche Informationsgrad für die weitere Punktwolkenverarbeitung beibehalten. Dies ist insbesondere für die spätere Zusammenführung und Analyse des Gesamtszenarios von Bedeutung, da dadurch auch eine verbesserte und vereinfachte Verarbeitung des Gesamtszenarios erzielt wird. Das Ergebnis der vorverarbeiteten Rohdaten ist in Abbildung 6.5 anhand der betrachteten Modellszene dargestellt.

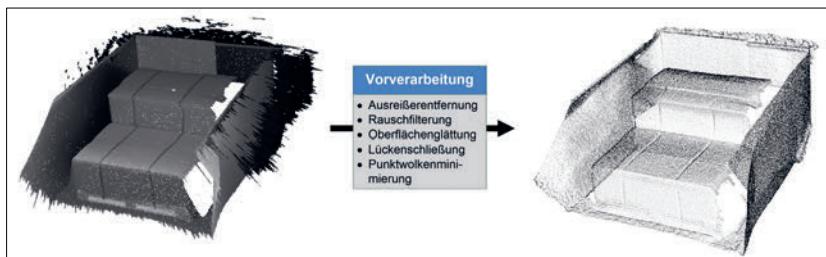


Abbildung 6.5: Arbeitsschritte zur Vorverarbeitung der erfassten Rohdaten

6.2 Ablaufschema zur Verarbeitung der Laderaumdaten

Anhand der vorverarbeiteten Laderaummodellszenarien konnten die generierten Punktwolken optimiert werden, um sie im Folgenden gezielt weiterverarbeiten zu können. Den Schwerpunkt der folgenden Abschnitte bilden somit die Fusion und die Segmentierung der Modelldaten sowie die entsprechende Bestimmung des Modellvolumens. Hierzu werden die erforderlichen Hauptschritte einzeln erläutert. Dabei liegt das Hauptaugenmerk nicht auf der mathematischen Beschreibung der erforderlichen Parameter, sondern es soll primär eine Übersicht gegeben werden, welche Kernfunktion der jeweils angewandte Verarbeitungsoperator besitzt und wie sich dieser auf die auszuwertenden Modelldaten auswirkt.

6.2.1 Fusion der Einzelszenarien

Bei der Datenakquisition wurden vom Laderaummodell einzelne Aufnahmen aus verschiedenen Ansichten generiert. Durch diese Einzelaufnahmen ist es bereits grundsätzlich möglich, erste Objektausschnitte innerhalb des Laderaummodells zu erkennen. Allerdings reichen diese Teilaufnahmen nicht aus, um eine detaillierte Darstellung und Auswertung des gesamten Laderaums vorzunehmen. Für eine aussagekräftige Interpretation der Laderaumdaten ist eine zusammenhängende Gesamtdarstellung vom Laderaum erforderlich.

Für die Umsetzung einer solchen Datenfusion gibt es verschiedene Möglichkeiten und Ansätze. Durch die fixe Anordnung der Kameras und die statische Datenaufnahme würde sich insbesondere die direkte Überführung der Koordinatenursprünge mittels der intrinsischen und extrinsischen Parameter anbieten [TH17]. Dieser Ansatz würde eine eigenständige und zusätzliche Programmimplementierung erfordern, die sich für die experimentelle Erprobung jedoch zu umfangreich gestaltet. Eine praktikable Alternative bietet daher die Datenfusion mittels einer zweistufigen Registrierung. Hierfür existieren verschiedene Registrierungsansätze ([Hol17]; [RL01]). Eine sehr verbreitete Variante für die Datenfusion stellt in diesem Zusammenhang das Iterative-Closest-Point-Verfahren (ICP) dar [BM92]. Dabei werden die Punktwolken aus den Einzelaufnahmen so zueinander ausgerichtet und ineinander überführt, dass das Abstandsmaß der vorab bestimmten Punktkorrespondenzen iterativ minimiert wird. Ein Punkt wird dabei als korrespondierend aufgefasst, wenn er jeweils in beiden betrachteten Einzelaufnahmen vorkommt. Dies setzt die bereits erwähnte Überlappung der jeweiligen Laderaummodellaufnahmen voraus, wodurch der betrachtete Punkt zum jeweiligen Koordinatenursprung (s. Ausrichtung der gegenüberliegenden Kameras) unterschiedliche Koordinaten aufweist (s. Abbildung 6.6).

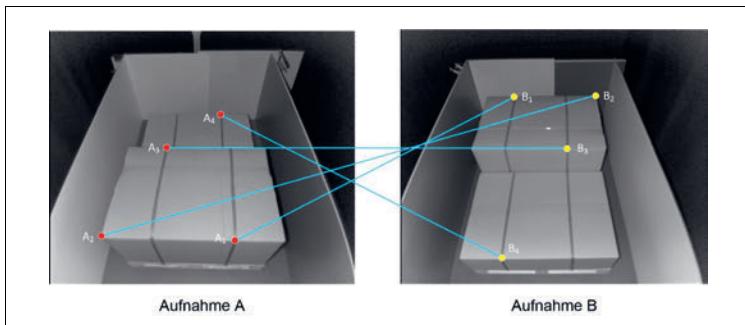


Abbildung 6.6: Aufnahme einer gemeinsamen Szene aus verschiedenen Aufnahmepositionen mit beispielhaften Punktkorrespondenzen innerhalb des betrachteten Laderaummodells

Damit die in den Einzelaufnahmen markierten Punkte mittels des ICP-Algorithmus ineinander überführt werden können, ist es erforderlich, dass die einzelnen Aufnahmen möglichst nah zueinander ausgerichtet sind. In einer ersten Registrierungsstufe wird daher der Koordinatenursprung von Einzelaufnahme B näherungsweise zum Ursprung von Einzelaufnahme A ausgerichtet. Da die Aufnahmepositionen (Abstand und Neigungswinkel) der Tiefenbildkameras fix sind, lassen sich die beiden Einzelaufnahmen durch eine entsprechende Rotation (Spiegelung um die z-Achse) und Translation (Verschiebung um den Kameraabstand) näherungsweise zueinander ausrichten. Anhand dieser relativen Ausrichtung lassen sich in einer zweiten Registrierungsstufe die Einzelaufnahmen zu einem Gesamt-szenario mit einheitlichen Koordinaten zusammenführen. Hierfür sucht der ICP-Algorithmus nach der optimalen Transformationsmatrix, um den Abstand zwischen der

korrespondierenden Punktmenge zu minimieren und eine optimierte Gesamtszene des Laderaummodells zu generieren. Die Überführung der einzelnen Laderaumszenen wird iterativ wiederholt, bis die auf die korrespondierenden Punktpaare zugewiesene Fehlerfunktion einen vorgegebenen Schwellenwert unterschreitet und sich der Abstand zwischen der korrespondierenden Punktmenge nicht weiter verringern lässt. [BM92]

Das Ergebnis der zusammengeführten Einzelaufnahmen zu einem Gesamtszenario wird aus Abbildung 6.7 ersichtlich. Durch die fusionierte Punktwolke werden sukzessive die Zusammenführung des gesamten Laderaummodells sowie die Schließung weiterer Datenlücken ermöglicht, wodurch wiederum eine verbesserte Datengrundlage für die Weiterverarbeitung der Punktwolke erzielt wird.

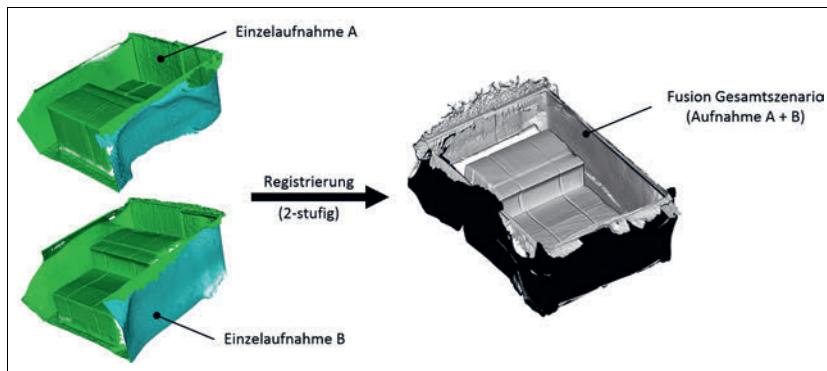


Abbildung 6.7: Überführung der einzelnen Laderaummodellszenarien zu einem Gesamtszenario

6.2.2 Grobsegmentierung des Gesamtszenarios

Anhand der akquirierten und fusionierten Einzelaufnahmen weist das zusammengeführte Gesamtmodell sowohl den Laderauminhalt als auch die entsprechenden Seitenwände auf. Für die weitere Auswertung sind die enthaltenen Seitenflächen nicht nur irrelevant, sondern sogar hinderlich bei der Auswertung. Damit die Seitenbegrenzungen gezielt entfernt werden können, muss die vorhandene Punktwolke in logische Bereiche mit identischen Geometrieeigenschaften aufgeteilt werden. In der Literatur wird dieser Vorgang als Segmentierung aufgefasst ([Wil00], S. 94). Ähnlich wie bei den bisher eingeführten Verfahren zur Punktwolkenverarbeitung existieren auch bei der Segmentierung verschiedene Algorithmen und Lösungsansätze ([Hol17], S. 13). Beim betrachteten Laderaum sind zur Extraktion der Seitenwände insbesondere flächenbasierte Segmentierungsverfahren von Interesse. Einen sehr verbreiteten und hierfür oft angewendeten Ansatz liefert der RANdom-SAmple-Consensus-Algorithm (RANSAC) [FB81].

Demnach wird das erfasste Gesamtmodell des Laderaums vorab in relevante Teilmengen zerlegt (Grobsegmentierung), um anschließend die jeweiligen Laderaumbegrenzungsfächen aus dem Modell zu extrahieren. Dabei wird davon ausgegangen, dass sich die erfassten Seitenwände als einfache Flächen repräsentieren lassen, die jeweils durch eine minimale Punktmenge zu einer robusten Modellebene aufgespannt werden. Ausgehend von der parametrisierten Modellebene (Ebenengleichung) wird anschließend anhand der gesamten Punktwolkenanzahl geprüft, von wie vielen Punkten die ermittelte Modellebene beschrieben wird. Liegt die Anzahl der ermittelten Punkte über dem vorgegebenen Schwellenwert, dann gilt die aufgestellte Modellhypothese des RANSAC-Verfahrens als bestätigt und die identifizierten Flächen können entfernt werden. Wird jedoch im ersten Durchgang keine Modellverifizierung erzielt, dann muss eine neue Stichprobe (Punktmenge) ausgewählt und der Vorgang so lange wiederholt werden, bis die Anzahl der maximal vorgegebenen Iterationen erreicht ist. ([HIT⁺15]; [KSB15])

Für die Identifizierung der Laderaumseitenwände in den vorliegenden Modelldaten müssen die zuvor genannten Schwellenwerte vorgegeben werden. Da für die praxisnahe Nachbildung des Laderaummodells unterschiedliche Materialien für die Seitenwände verwendet wurden, variiert auch das Rauschverhalten an den jeweiligen Flächen, was sich wiederum auf die Qualität der Ebenenbeschreibung auswirkt. Um eine ausgewogene Modellebene und eine hinreichend genaue Punktentfernung zu erhalten, wurde ausgehend von der jeweils ermittelten Ebene ein Interessenbereich definiert, innerhalb dessen sich alle gefundenen Punkte entfernen lassen. Durch diese Festlegung wird gewährleistet, dass insbesondere die zugehörigen Punkte vor und hinter der jeweils farblich markierten Modellebene mit extrahiert werden (s. Abbildung 6.8).

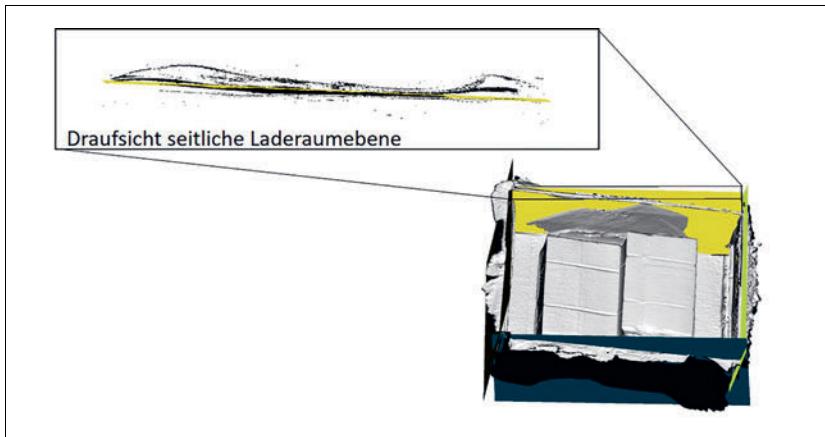


Abbildung 6.8: Bestimmung der einzelnen Modellebenen für die anschließende Entfernung der irrelevanten Punkte innerhalb des vorgegebenen Interessenbereichs (Ebenenzugehörigkeit)

Durch die beschriebene Prozedur lassen sich iterativ alle relevanten Seitenwände identifizieren und entfernen. Mittels der beschriebenen Grobsegmentierung ist es somit möglich, die Seitenwände gezielt aus dem erfassten Gesamtszenario zu entfernen, sodass für die weitere Datenverarbeitung nur noch die interessierenden Bereiche hinsichtlich des Laderaumbodens sowie der vorhandenen Laderaumobjekte zur Verfügung stehen (s. Abbildung 6.9, rechts).

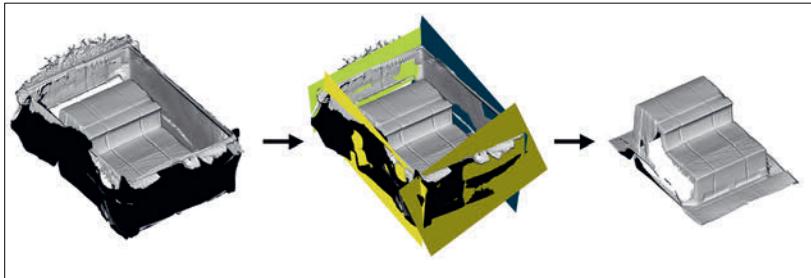


Abbildung 6.9: Vorsegmentierung des Laderaummodells zur Extraktion der Seitenbegrenzungsfächen

6.2.3 Feinsegmentierung der Laderaumdaten

Bei der durchgeföhrten Grobsegmentierung lag der Fokus auf einer rein flächenbasierten Segmentierung anhand einzelner Modellebenen. Für die weitere Aufteilung der restlichen Laderaumdaten reicht dieser Ansatz nicht aus. Unter Berücksichtigung des beschriebenen Beschaffenheitsprofils eines Laderaums (s. Kapitel 3.2.2) kommen insbesondere bei den erfassten Ladeobjekten weitere geometrische Flächenprofile zum Tragen, die es bei der anstehenden Segmentierung mit zu berücksichtigen gilt. Für die weitere Identifikation der Interessenbereiche innerhalb der vorhandenen Laderaumaufnahme ist daher ein deutlich präziserer Ansatz erforderlich (Feinsegmentierung), der neben typischen Flächen auch die Segmentierung weiterer geometrischer Grundformen ermöglicht – bspw. rechteckige, kreisförmige oder elliptische Elemente sowie Flächen mit einem gekrümmten Oberflächenverlauf ([JB97], S. 129). Anhand des ausgewählten Ansatzes bei der Grobsegmentierung wird für die bevorstehende Feinsegmentierung des Laderaums eine erweiterte Form des RANSAC-Verfahrens angewendet, welches insbesondere auch die zuvor erwähnten Profilformen berücksichtigt [SWK07].

Im Vergleich zum klassischen RANSAC-Verfahren bezieht diese Segmentierungsform auch die maximale Abweichung der idealen Flächennormalen zur betrachteten Punktnormalen mit ein. Dadurch kann für die anstehende Segmentierung die Normalenorientierung der betrachteten Oberflächen als zusätzlicher Entscheidungsparameter herangezogen werden. Ferner ist für die stichprobenbezogene Analyse eine hierarchische Datenstruktur erforderlich (Stichwort: Octree), um die Analyse der zufällig ausgewählten Datensätze in

einem vorab festgelegten Radius zu ermöglichen ([Hof17], S. 41). Anhand dieser Rahmenbedingungen lassen sich die erforderlichen Modellparameter wiederum in einer ersten Instanz schätzen, um diese anschließend dahingehend zu überprüfen, inwieweit sie mit den restlichen Daten kongruieren. Dieser Prozess wird so oft wiederholt, bis eine möglichst große übereinstimmende Punktmenge ermittelt werden konnte. ([Heb12], S. 52)

Damit der RANSAC-Algorithmus besser an die vorgegebene Punktwolkenbetrachtung angepasst werden kann, lässt sich eine Vorauswahl bezüglich der zu betrachtenden geometrischen Grundformen treffen (Flächen, Zylinder etc.). Zur besseren Identifizierung werden zudem die Mindestpunktzahl für die zu betrachtenden Grundformen sowie der maximale Punktabstand vorgegeben. Des Weiteren werden noch die Auflösung der Stichprobe, die maximale Abweichung der Normalenvektororientierung sowie die Wahrscheinlichkeit von besser geeigneten Punkten einbezogen. ([Lau16], S. 78) Dabei gilt es zu berücksichtigen, dass eine zu hohe oder zu niedrige Schwellenwertbestimmung unweigerlich zu Segmentierungsfehlern führt, wodurch einzelne Geometrieformen fälschlicherweise miteinander verbunden oder getrennt werden.

Das Ergebnis der vorgestellten Segmentierung sowie der Vergleich mit dem Algorithmus aus der Grobsegmentierung werden anhand von Abbildung 6.10 veranschaulicht. Bei der rein flächenbasierten Erkennung gemäß den Vorgaben aus der Grobsegmentierung würde die betrachtete Beispielszene in insgesamt 41 Teilflächen aufgeteilt werden. Dadurch erschwert sich nicht nur die Zuordnung oder Entfernung der relevanten Segmente, sondern auch die generelle Weiterverarbeitung der Punktwolke. Bei der Anwendung der Feinsegmentierung wird hingegen eine deutlich präzisere Identifikation der relevanten Objektoberflächen erzielt (9 Segmente), wodurch die Ausgangsbasis für die Extraktion der Laderraumdaten deutlich verbessert und die zwingend erforderliche Unterscheidung zwischen Grob- und Feinsegmentierung nochmals verdeutlicht wird (s. Beispiel Zylinder).

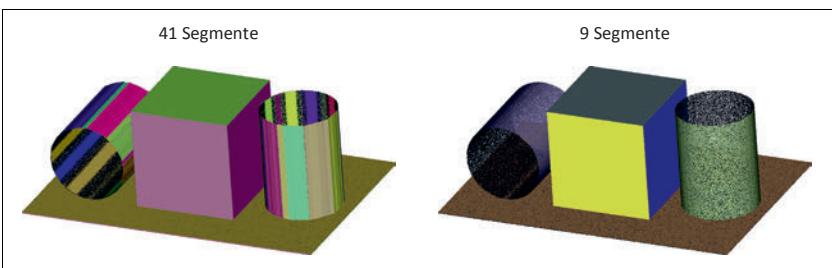


Abbildung 6.10: Vergleich der beiden Segmentierungsergebnisse anhand eines formtypischen Beispielszenarios

Anhand der gesammelten Erkenntnisse aus der Modelleprobung wurde anschließend am vorliegenden Modelldatensatz die Feinsegmentierung durchgeführt. Da für die spätere Re-

konstruktion des Laderaumvolumenmodells nur die parallel zum Laderaumboden verlaufenden Oberflächen für die finale Verarbeitung von Relevanz sind, wurden alle Segmentflächen mit einer Orientierung der Normalenvektoren in X- und Y-Richtung aus der Modellszene herausgefiltert. Das Ergebnis der schrittweisen Feinsegmentierung ist in Abbildung 6.11 dargestellt.

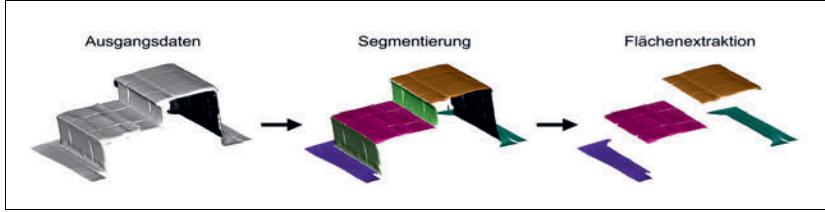


Abbildung 6.11: Extraktion der relevanten Objektoberflächen durch das Feinsegmentierungsverfahren

6.2.4 Approximation des Ladegutvolumens

Anhand der extrahierten Interessenbereiche erfolgt in einem abschließenden Verarbeitungsschritt die dreidimensionale Rekonstruktion des Ladegutvolumenmodells. Hierfür werden zunächst die vorhandenen Laderaumdaten, die die extrahierten Messpunkte des Ladeguts repräsentieren, in ein einheitliches Laderaumkoordinatensystem überführt (Laderaumregistrierung). Der Laderaum wird durch die Begrenzungsflächen der Stirn- und Rückwand sowie durch die Seitenwände definiert. Für den weiteren Verlauf dieser Arbeit wird daher der Ursprung des Laderaumkoordinatensystems in die vordere linke Ecke der Ladefläche in Angrenzung zur Stirnwand gelegt. Die X- und die Y-Achse verlaufen dabei parallel zur Ladefläche und die Z-Achse steht senkrecht darauf und repräsentiert somit auch die Ladehöhe. Die Durchführung dieser finalen Transformation erfolgt analog zu der zuvor beschriebenen Feinregistrierung. Dabei gilt es zu berücksichtigen, dass der leere Laderaum als fester Bestandteil der Systeminitialisierung anzusehen ist und die Kamera – sowohl in diesem Modellaufbau als auch später im realen Laderaum – ausgehend von diesem vordefinierten Koordinatenursprung montiert wird.⁵⁴ Dadurch wird gewährleistet, dass sich später durch die Einbeziehung der (vorhandenen) extrinsischen Parameter eine automatisierte Koordinatentransformation realisieren lässt. Die relevanten Messdaten werden im vorliegenden Fall in das Laderaumkoordinatensystem mittels einer zusätzlichen Bezugsebene überführt, die den Ausgangszustand des leeren Laderaums repräsentiert (s. Abbildung 6.12).

⁵⁴ Die geometrischen Angaben des leeren Laderaums sowie die einzelnen Positionen der montierten Kameras sind als eine Grundvoraussetzung für das System anzusehen. Diese Bezugsdaten werden später bei der Implementierung der Anwendung a priori bereitgestellt (s. Referenzhöhe, -fläche, -volumen).

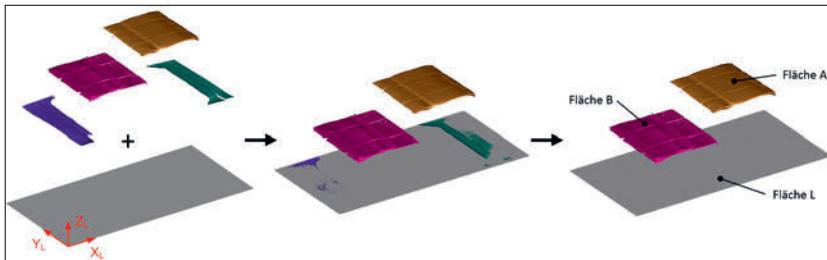


Abbildung 6.12: Überführung der Messdaten in das Laderraumkoordinatensystem

Durch die Überführung der Daten in das Laderraumkoordinatensystem erhalten die erfassten Objektpunkte nicht nur einen ortsfesten Bezug, sondern es wird zudem ermöglicht, daraus den Abstand zwischen den jeweiligen Objektflächen und der Ladefläche zu bestimmen. Dabei repräsentiert die Ladefläche L eine Projektionsebene, mittels derer an jeder Stelle im Laderraum der lotrechte Vektor zwischen Bezugsebene und Objektoberfläche ermittelt werden kann. Der Betrag des Vektors an der Stelle X, Y innerhalb des vorgegebenen Laderraumkoordinatensystems ergibt somit die Ladehöhe H_{XY} (s. Abbildung 6.13).

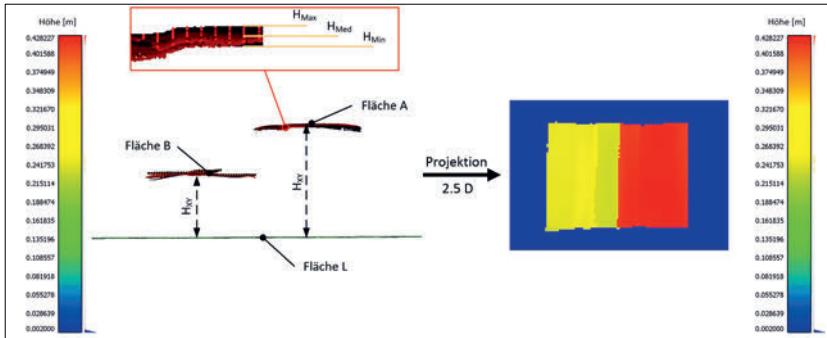


Abbildung 6.13: Bestimmung der objektabhängigen Ladehöhe (links) zur projektiven Ableitung des Laderraumhöhenprofils (rechts)

Wie aus der abgebildeten Oberflächenvergrößerung ersichtlich wird, überlagern sich die Messwerte aus den Tiefenbilddaten, sodass je nach betrachteter Laderraumstelle mehrere Höhenwerte zur Verfügung stehen – u. a. aufgrund des Messrauschens des Tiefensensors. Durch die alleinige Betrachtung von H_{Max} oder H_{Min} würde es bei der Datenauswertung zu einer grundsätzlichen Fehlinterpretation der tatsächlichen Laderraumsituation kommen – insbesondere bei einem sehr starken Rauschverhalten. Für die adäquate Auswertung stellt daher der Medianwert (H_{Med}) einen durchaus geeigneten Höhenbezugswert dar, sodass dieser fortan für die Rekonstruktion des Ladegutvolumens herangezogen wird. Anhand der sich daraus ergebenden Höhenwerte lassen sich anschließend die Daten auf die Ladefläche

projizieren (2,5D), wodurch das Höhenprofil über die gesamte XY-Ebene des Laderaumkoordinatensystems ersichtlich wird (s. Abbildung 6.13, rechts).

Die projektive Modellierung des Laderauminhalts basiert auf einer rasterförmigen Repräsentation des Laderaumumfelds (s. Abbildung 6.14). Das Raster erstreckt sich über die vollständige Ladefläche, wobei in jeder Rasterzelle R_i ein Ladehöhenwert H_i gemäß der zuvor beschriebenen Konvention gespeichert wird. Je nach Auflösung des Rasters lassen sich der Detaillierungsgrad und somit auch die Genauigkeit der Messwertzuordnung verändern (zwischen fein und grob). Mittels der gespeicherten Werte in jeder Rasterzelle ist es in einem nächsten Verarbeitungsschritt möglich, aus dem vorhandenen 2,5D-Raster eine vernetzte und geschlossene 3D-Volumendarstellung vorzunehmen. Hierfür wird eine sogenannte Triangulation vorgenommen, d. h., aus den vorhandenen Ladehöhenwerten wird ein aus kleinen Dreiecken verdichtetes Netz erzeugt. Für die erforderliche Vermaschung wird im vorliegenden Fall die Delaunay-Triangulation angewendet [LS80]. Dieses Grundprinzip wurde über die letzten Jahrzehnte kontinuierlich ausgeweitet und zur praxisbezogenen Einbindung modifiziert [KH13]. Im vorliegenden Fall werden die einzelnen Punkte zu einem Tetraeder zusammengefasst. Die generierten Einzelflächen eines Tetraeders werden wiederum zu einer Menge von Tetraedern zusammengefasst, wodurch eine konvexe Hülle entsteht ([Wil00], S. 39). Die daraus entstehende, vernetzte und geschlossene Oberflächenhülle repräsentiert letztlich eine 3D-Rekonstruktion des vom Tiefensor erfassten Laderauminhalts (s. Abbildung 6.14).

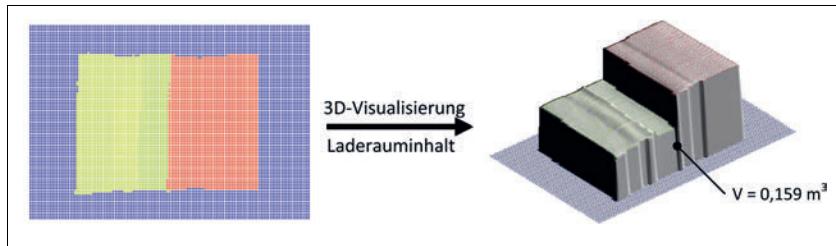


Abbildung 6.14: Überführung der ermittelten 2,5D-Daten in ein dreidimensionales Volumenmodell des Laderaums

Anhand dieses finalen grafischen Verarbeitungsschritts entsteht ein geschlossenes Volumenmodell mit einer festen Rasterauflösung. Anhand des rekonstruierten Modells lässt sich letztlich das Volumen der erfassten Ladeeinheiten berechnen. Hierzu wird auf die Rasterauflösung der Ladefläche zurückgegriffen, in der pro hinterlegtem Wert der Grundriss der Ladefläche abgebildet wird. Ausgehend von diesem Grundriss wird jede Grundfläche der Rasterzelle mit dem entsprechenden Ladehöhenwert multipliziert. Durch die inkrementelle Addition der sich daraus ergebenden finiten (endlich kleinen) Höhensäulen wird das Volumen der erfassten Ladegüter ermittelt. Für das aufgebaute Laderaummodell

mit den darin befindlichen Ladegütern ergibt sich anhand der akquirierten Messdaten somit ein Volumen von $0,159 \text{ m}^3$.

Zur Validierung des Modellergebnisses wurden ein Wertevergleich mit den Idealmaßen aus den Herstellerangaben sowie die Produktabmessungen aus der Eigenvermessung (Lasermessgerät) verwendet. Gemäß diesen Angaben wurde ein theoretisches Idealvolumen von insgesamt $0,153 \text{ m}^3$ ermittelt. Im Vergleich zum sensorbasierten Ergebnis liegt hierbei eine Differenz von $0,006 \text{ m}^3$ vor. Dies entspricht einer Abweichung von 3,9 %. Ferner konnte im Rahmen der Validierung festgestellt werden, dass die vom ToF-Sensor erfasste Ladeeinheitenoberfläche um 6,8 % größer ist als die aufsummierte Idealfäche der einzelnen Ladeeinheiten. Bei der Vermessung der Testobjekte konnten bereits erste Abweichungen zum Idealmaß festgestellt werden. Insbesondere in der Höhe und in der Breite wurden Maßabweichungen deutlich. Anhand der Angaben aus der Referenzmessung ergab sich für die betrachteten Mini-Ladeeinheiten ein Volumen von $0,158 \text{ m}^3$, das nahezu dem aus den Tiefenbildern generierten Volumen ($0,159 \text{ m}^3$) entspricht. Die aus dem Laderaummodell abgeleiteten Volumendaten zeigen auf, dass die vom Tiefensensor akquirierten und anschließend verarbeiteten Daten in einer ersten Instanz als hinreichend genau einzustufen sind. Zur finalen Verifikation ist jedoch auch eine praxisbezogene Systemerprobung erforderlich, die Bestandteil von Kapitel 7 ist.

6.3 Zusammenfassung der grafischen Verarbeitungskette

In den vorherigen Abschnitten wurden die erforderlichen Verarbeitungsschritte anhand eines Laderaummodells aufgezeigt und erprobt. Anhand dieser Erkenntnisse lassen sich im Folgenden die einzelnen Verarbeitungsschritte zu einem exemplarischen Ablaufschema zusammenfassen, anhand dessen sich eine grafische Laderaumanalyse – unabhängig vom ausgewählten Tiefenbildsensor und Laderaumtyp – durchführen lässt (s. Abbildung 6.15).

Als initialer Arbeitsschritt der Verarbeitungskette ist die Datengenerierung anzusehen. Anhand mehrerer Tiefenbildkameras, die fest im Laderaum montiert und zueinander ausgerichtet sind, wird die Digitalisierung des Laderaums eingeleitet. Dabei wird von jeder Tiefenbildkamera aus einem bestimmten Blickwinkel eine Teilansicht des Laderaums erfasst. Dadurch lässt sich die von der Kamera abgetastete Oberfläche der jeweils betrachteten Laderaumszene in digitaler Form darstellen. In jeder erfassten Einzelaufnahme des Laderaums werden die Daten als eine Folge von Punkten innerhalb eines orthogonalen Koordinatensystems dargestellt. Dieses Rohdatenformat repräsentiert eine Punktwolke, die im Anschluss vor- und weiterverarbeitet wird.

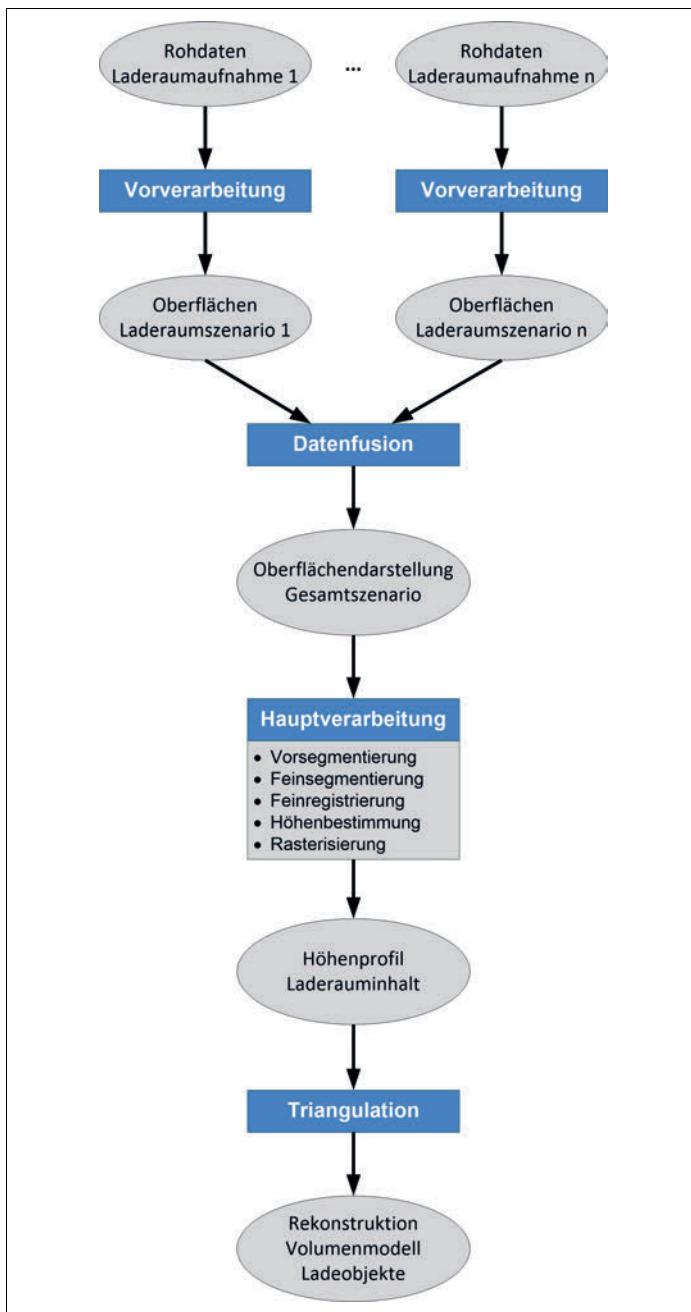


Abbildung 6.15: Ablaufschema zur Verarbeitung der generierten Laderaumdaten

Die Vorverarbeitung einer einzelnen Laderaumaufnahme enthält im Wesentlichen fünf Arbeitsschritte, die mittels klassischer Operatoren durchgeführt werden. Zur Verbesserung der Datenqualität werden die Rohdaten zu Beginn gefiltert und geglättet. Des Weiteren werden auftretende Ausreißer entfernt, um eine bereinigte Darstellung der Laderaumaufnahme zu erhalten. Eine weitere Maßnahme stellt die Schließung einzelner Lücken innerhalb der abgetasteten Oberflächen dar. Hierfür werden bereits grundlegende Nachbarschaftsbeziehungen innerhalb der Punktwolke bestimmt (bspw. Normalenvektor und Krümmung der Oberflächenpunkte), um diese anschließend für die Fusion und Weiterverarbeitung der generierten Einzelszenarien nutzen zu können. Da für die generelle Weiterverarbeitung der Rohdaten auch eine deutlich geringere Anzahl an Punkten ausreicht, wird ferner noch die Punktmenge reduziert, ohne dass dabei die relevanten Informationen (bspw. Kantenübergänge) verloren gehen.

Die zweite Verarbeitungsphase wird durch die Fusion der einzelnen Laderaumaufnahmen zu einem Gesamtszenario des Laderaums eingeleitet. Die Hauptherausforderung der Punktwolkenzusammenführung liegt darin, aus den aufbereiteten Einzelansichten eine adäquate Gesamtdarstellung des Laderaums zu erhalten. Damit eine redundanzfreie Speicherung der Punktwolke mit hoher Datenkonsistenz erzielt werden kann, sind entsprechende Einzelaufnahmen erforderlich, in denen sich die betrachteten Szenen überlappen. Durch diese vorgegebene Aufnahmeanordnung lassen sich wiederum Punktkorrespondenzen erzielen, anhand derer die Zusammenführung der jeweiligen Einzelaufnahmen zu einem Gesamtszenario durchgeführt wird.

Die Datenfusion basiert im Wesentlichen auf Rotationen und Translationen der einzelnen Punktwolken, welche im vorliegenden Fall zweistufig erfolgen (s. Grob- und Feinregistrierung). Anhand des erarbeiteten Gesamtszenarios wird anschließend eine Grobsegmentierung am Laderaum durchgeführt, um die Stirn- und die Rückwand sowie die Seitenwände aus dem Gesamtszenario zu extrahieren. Die sich daraus ergebende Restpunktfolke beinhaltet danach nur noch die von den Tiefenbildkameras erfassten äußeren Teilloberflächen von den im Laderaum platzierten Ladeobjekten. Damit die relevanten Objektoberflächen weiter eingegrenzt werden können, wird anschließend feinsegmentiert. Hierdurch werden alle weiteren irrelevanten Flächen extrahiert, sodass nur noch die Oberflächenpunkte zurückbleiben, die für die Bestimmung des Höhenprofils relevant sind. Für die anschließende Höhenberechnung wird die hinterlegte Modellebene der Ladefläche mit den Restdaten der Punktwolke registriert. Anhand dieser Datenbasis erfolgen die vektorielle Höhenberechnung der einzelnen Oberflächenpunkte sowie die Projektion der Oberflächendarstellung auf ein festes Ladeflächenraster. Durch die finale Vernetzung der einzelnen Punkte lässt sich eine geschlossene Fläche der erfassten Daten realisieren, wodurch sich wiederum eine dreidimensionale modellbasierte Volumendarstellung des Laderauminhalts ergibt, die letztendlich zur Approximation des Ladegutvolumens herangezogen wird.

7 Experimentelle Systemerprobung

Das zur Verarbeitung der Laderraumdaten beschriebene Funktionsschema wird in den folgenden Abschnitten herangezogen, um mittels eines Referenzszenarios eine Evaluierung der erarbeiteten Erfassungsmethodik durchzuführen. Für die experimentelle Erprobung wird ein Testaufbau mit verschiedenen Verladeszenarien und Ladeobjekthöhen verwendet. Innerhalb der festgelegten Laderraumumgebung werden die Tiefenbilddaten der Einzelszenarien erfasst und zusammengeführt. Anhand des Referenzmodells wird anschließend ein Datenvergleich durchgeführt. Ferner wird eine Auswertesystematik für die neu generierten Laderraumdaten aufgezeigt, um zukünftig die Effizienz des eingesetzten Transportmittels präziser bewerten zu können.

7.1 Evaluierung der Laderraumanalyse

Mit der Systemevaluierung soll die Genauigkeit der Laderaumerfassung anhand eines Praxiszenarios ermittelt werden. Im Fokus des folgenden Abschnitts stehen dabei die Bestimmung der relevanten Objektsegmente sowie die darauf aufbauende Approximation des Ladegutvolumenmodells. Damit ein quantitativer Rückschluss auf die Genauigkeit der Laderraumdaten gezogen werden kann, werden abschließend, im Rahmen einer Ergebnisanalyse, die erfassten Grundflächen sowie die ermittelten Höhenebenen und das generierte Volumenmodell miteinander verglichen und bewertet.

7.1.1 Ausgangsszenario zur Datengenerierung

Für die Systemerprobung wurde ein Fahrzeug der Kategorie N2 (leichte Lkw) mit einem zulässigen Gesamtgewicht von 7,49 t verwendet (s. Abbildung 7.1, links). Dieser Fahrzeugtyp repräsentiert den typischen Verkehrsbetrieb im Nahverkehr und deckt mit seinen Laderraumgrundmaßen (Breite und Höhe) den Großteil des relevanten Fahrzeugbestandes ab. Der Laderraum weist die für den Kofferaufbau typische Plywood-Bauweise auf. Der Ladeboden besteht aus einer mehrfach verleimten Siebdruckplatte mit rauer Oberfläche. Die Seitenwände bestehen größtenteils aus glasfaserverstärktem Kunststoff (beschichtet). Zusätzlich sind auf jeder Seitenfläche zwei Aluminium-Zurrschienen mit Kombi-Anker angebracht. Die Schienen sind jeweils auf einer Höhe von 600 mm und 1200 mm montiert. An der Stirnfläche ist zusätzlich eine beschichtete Plywoodplatte bis zu einer Höhe von 1250 mm angebracht (glatte Oberfläche). Die Laderraumdecke besteht aus einem abgerundeten Dachrahmenprofil mit transluzentem GFK (Details s. Abbildung 7.1, rechts).



Abbildung 7.1: LKW mit Kofferaufbau zur Praxiserprobung des Laderaumanalysesystems (Außen- und Innenansicht)

Darüber hinaus verfügt das Heck des Kofferaufbaus über einen Stahlrahmen mit bedienbarer Bordwand und integrierter Ausstellklappe. Die vorhandene Hebeplattform hat eine Fläche von 2520 mm x 1800 mm und weist eine Oberfläche aus geriffeltem Aluminium auf. Die für die Systemerprobung relevanten Laderaumangaben sind in Tabelle 7.1 zusammengefasst.

Tabelle 7.1: Technische Daten zum Laderaum/LKW

Iveco Eurocargo 7,49 t (Kofferaufbau mit Hebebühne)	
Ladefläche (Länge x Breite)	6,05 m x 2,48 m
Laderaumhöhe	2,38 m
Ladevolumen (leer)	35,70 m ³
Material Ladebodenoberfläche	Siebdruckplatte (rau)
Material Seitenwandoberfläche	GfK + Alu-Anker-Zurrschiene
Material Stirnwandoberfläche	Siebdruckplatte (glatt) + GfK
Material Rückwand (Hebebühne)	Alu-Plattform + GfK-Abdeckung

Im Rahmen der durchgeföhrten Voruntersuchungen (s. Kapitel 5.4.1) wurde bereits ersichtlich, dass für die vollständige Erfassung des Laderauminhalts eine einzige Aufnahme pro Laderaumseite nicht ausreicht. Für den Erprobungsaufbau wurden daher insgesamt acht Tiefenbildkameras – gemäß dem erarbeiteten Anordnungsschema – im Laderaum angebracht. Sie wurden so ausgerichtet und positioniert, dass aus unterschiedlichen Blickrichtungen eine vollständige Erfassung des Laderaums gewährleistet werden konnte. Ähnlich wie bei der Vorerprobung am Laderaummodell (s. Kapitel 6) wurde zur vollständigen Abdeckung einer Laderaumszene ein Aufnahmewinkel von 30° und/oder 60° gewählt. Die Positionierung der Tiefenbildkameras erfolgte ausgehend vom vordefinierten Laderaumkoordinatenursprung. Das erste Kamerapaar wurde entlang der Laderaum-X-Achse in einem Abstand von 700 mm montiert, d. h., die verwendeten Tiefenbildkameras wurden parallel zur Stirnwand ausgerichtet. Für die darauffolgenden Kamerapositionen wurde jeweils ein Abstand von 2100 mm gewählt. Somit konnten sowohl eine ausreichende Sichtfeldüberlappung (Kameraanordnung auf der gegenüberliegenden Laderaumseite) sowie

eine vernünftige Sichtfeldüberschneidung (Kameraanordnung auf der gleichen Laderaumseite) gewährleistet werden. Zur Anbringung der Tiefenbildkameras wurde eine eigenkonstruierte Halterung mit integrierter Neigungsvorrichtung verwendet. Dadurch konnten die Tiefenbildkameras bestmöglich zur Oberkante der Laderaumdecke montiert werden. Ferner konnte dadurch der vorhandene Freiraum im Aufbaurahmen (zwischen Decke und Seitenwand) als Kabelkanal genutzt werden, um die Kameras anschließen und in Betrieb nehmen zu können (s. Abbildung 7.2, links).

Für die Datenakquisition wurde ein repräsentatives Ladeschema mit unterschiedlichen Ladehöhen erarbeitet. Als Ladeobjekte wurden Faltkartonagen mit einer Abmessung von 1200 mm x 600 mm x 600 mm verwendet. Aus diesen Kartonagen wurden anschließend verschiedene quaderförmige Ladeeinheiten mit unterschiedlichen Höhen gebildet. Das stufenförmige Ladeschema wurde bewusst so gewählt, damit für die Datenauswertung vier verschiedene Höhenebenen sowie entsprechende Freiflächen auf dem Laderaumboden berücksichtigt werden konnten (s. Abbildung 7.2, rechts).

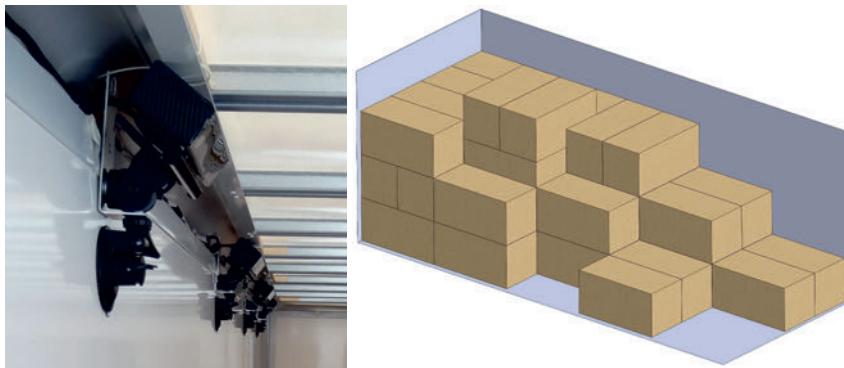


Abbildung 7.2: Anordnung der Tiefenbildkameras auf der linken Laderaumseite sowie die entsprechende 3D-Modelldarstellung des erarbeiteten Stauschemas mit den verwendeten Ladeobjekten

Der Laderaum wurde für die Datenakquisition vollständig geschlossen. Die Erfassung der Messwerte erfolgte sequenziell, um potenzielle Interferenzen mit den anderen Kameras ausschließen zu können. Die Messwerterfassung erfolgte zudem rein statisch, d. h., das Fahrzeug wurde nicht bewegt.⁵⁵ Die Durchführung der Datenaufnahme erfolgte bei einer durchschnittlichen Umgebungstemperatur von 9 °C (± 2 °C). Das beschriebene Ausgangsszenario für die Datenerfassung im Laderaum ist nochmals in Abbildung 7.3 dargestellt.

⁵⁵ Zur generellen Reduzierung der Einflussfaktoren bei der Datenakquisition und zur Vereinfachung des Testaufbaus im Laderaum wurde für die Ersterprobung des Systems grundsätzlich auf entsprechende Maßnahmen bezüglich der Ladeeinheiten- und Ladungssicherung verzichtet.



Abbildung 7.3: Ausgangsszenario für die Akquisition der Daten im Laderaum

7.1.2 Verarbeitung der erfassten Laderaumdaten

Anhand der gewählten Kameraanordnung wurden die jeweiligen Laderaumaufnahmen generiert, um entsprechende Teilansichten des Laderraums zu erhalten (s. Abbildung 7.4). Dabei wurden von jeder Laderraumszene 200 Tiefenbilder akquiriert. Ausgehend von diesen Ausgangsdaten wurde anschließend eine entsprechende Punktwolke generiert, sodass die Punkte im jeweiligen Kamerakoordinatensystem vorlagen.

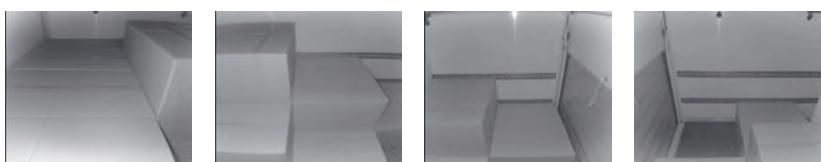


Abbildung 7.4: Auszug einzelner Sensoraufnahmen (IR-Bilder) von der betrachteten Laderraumszene

Gemäß dem erarbeiteten Ablaufschema für die Punktwolkenverarbeitung (s. Kapitel 6.3) wurde jede einzelne Laderaumaufnahme separat vorverarbeitet. Als Ergebnis lagen somit einzelne Laderaumaufnahmen von unterschiedlichen Blickrichtungen und von beiden Laderraumseiten im lokalen Kamerakoordinatensystem vor. Zur weiteren Verarbeitung wurden als Nächstes die Daten fusioniert. Anhand der vorab festgelegten Kameraanordnung lagen sowohl die Messabstände zum jeweiligen Standort der Kamera als auch der Aufnahmewinkel fest. Das bedeutet: Innerhalb der fest definierten Laderaumumgebung konnten die jeweiligen Einzelaufnahmen möglichst nah zueinander ausgerichtet werden. Dabei wurden die einzelnen Punktwolken zunächst paarweise verarbeitet, d. h. mit der jeweils

gegenüberliegenden Kameraaufnahme. Durch diese erste Ausrichtung erfolgte anschließend die Fusion der Daten mittels des aufgeführten ICP-Algorithmus. Als Zwischenergebnis lagen somit jeweils die fusionierten Daten eines einzelnen Kamerapaars vor. Durch diese iterative Vorgehensweise konnten sukzessive die jeweiligen Punktfolgenpaare zu einer Gesamtpunktfolge zusammengeführt werden. Das Ergebnis stellt eine Gesamtaufnahme des abgetasteten Laderraums dar (s. Abbildung 7.5).

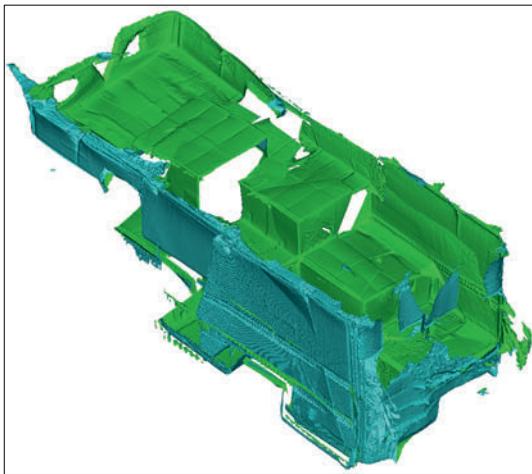


Abbildung 7.5: Fusion der einzelnen Punktfolgenaufnahmen zu einem Laderraumgesamtszenario (erfasste Objektoberflächen)

Innerhalb des zusammengestellten Gesamtszenarios sind zwar das vorgegebene Landeschema sowie die verschiedenen Laderraumkonturen vereinzelt zu erkennen, allerdings wirkt die gesamte Aufnahme noch sehr unübersichtlich. Für die weitere Datenaufbereitung wird daher in einem nächsten Schritt die Segmentierung der Gesamtpunktfolge vorgenommen. Wie aus Abbildung 7.5 ersichtlich wird, nehmen die Seitenbegrenzungsf lächen des Laderraums einen nicht unerheblichen Anteil in der Punktfolgenaufnahme ein. Damit diese aus der Aufnahme entfernt werden können, wird mittels des RANSAC-Algorithmus eine Extraktion der Seitenebenen durchgeführt. Für die gezielte Extraktion der Seitenflächen werden innerhalb des Modells nur Ebenen berücksichtigt, die nahezu senkrecht verlaufen und eine entsprechende Punktzahl enthalten. Anhand dieser Grobsegmentierung lassen sich alle irrelevanten Punkte der Seitenflächen entfernen, sodass nur noch der erfasste Laderrauminhalt übrig bleibt. Ausgehend von diesen Restdaten werden im Anschluss die Oberflächen der relevanten Ladeobjekte segmentiert. Ausschlaggebend für ein adäquates Ergebnis ist dabei die Auswahl des Radius für die Nachbarschaftssuche – insbesondere unter dem Aspekt, dass beim miniaturisierten Laderraummodell aus Kapitel 6 von deutlich kleineren Dimensionen auszugehen war. Da jedoch die Abmessungen der verwendeten

Kartonagen vorlagen bzw. die Grundmaße einer palettierten Ladeeinheit standardisiert sind, konnte eine gute Ausgangsbasis für die erforderliche Feinsegmentierung vordefiniert werden. Das Segmentierungsergebnis mit den extrahierten Ladeobjektoberflächen ist in Abbildung 7.6 zu sehen. Neben der Segmentierung des Laderauminhalts ist auch eine Registrierung der Daten innerhalb des Laderaumkoordinatensystems erforderlich. Hierfür wird der Ursprung der Punktwolke in das Koordinatensystem des Laderaums überführt (s. graue Bezugsfläche), sodass fortan jeder Punkt in Bezug zur vorderen linken Laderaumecke steht.

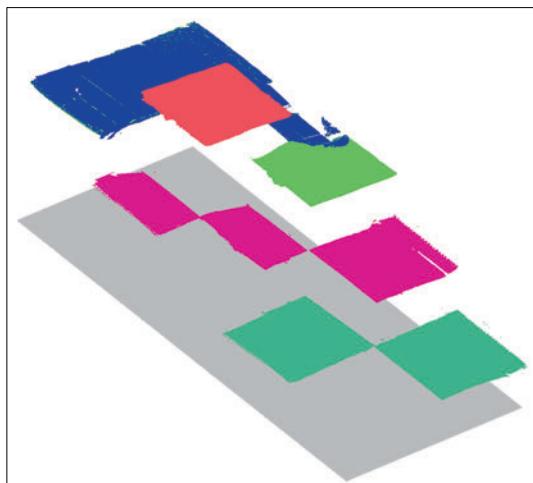


Abbildung 7.6: Segmentierung der Laderaumdaten und Extraktion der irrelevanten Datenbereiche

Anhand dieser Ausgangsbasis lässt sich in einem letzten Schritt der Punktwolkenverarbeitung das Volumen des Laderauminhalts berechnen. Im Vergleich zur Erprobung am Modellszenario ist auch hier eine Anpassung der Grunddimensionen erforderlich. Für die Auswertung und Zuordnung der einzelnen Laderaumdaten wurde der Detailgrad des Grindrasters auf 10 mm x 10 mm festgelegt. Die Berechnung der Höhenwerte nach dem Medianprinzip hat sich an dieser Stelle insbesondere dadurch bewährt, da sich aufgrund der zahlreichen vorhandenen Überlappungen – in Kombination mit der paarweisen Punktwolkenfusion – stellenweise eine deutlich ausgeprägte Datenüberlagerung bei den einzelnen Punkten ergeben hat (vgl. Abbildung 6.14). Durch diese indirekte Datenbereinigung konnten die Punkte anschließend vernetzt werden, sodass sich eine geschlossene Objekt-oberfläche ergibt, anhand derer sich das Volumen des erfassten Modells ermitteln lässt (s. Abbildung 7.7).

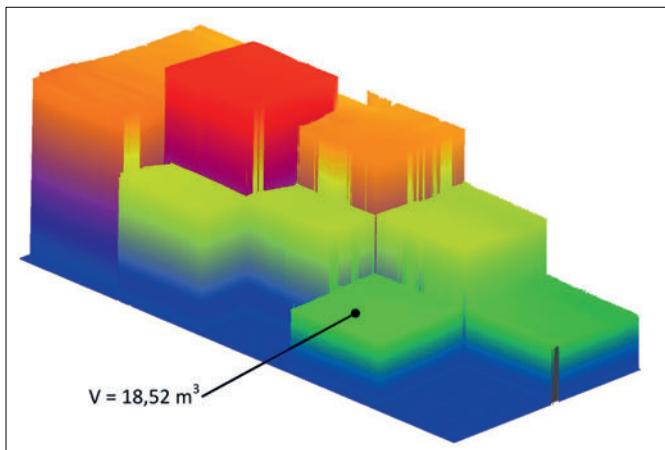


Abbildung 7.7: Volumenmodell von den im Laderaum erfassten Ladeobjekten

Innerhalb des rekonstruierten Volumenmodells wird nicht nur das ursprüngliche Ladeschema ersichtlich (vgl. Abbildung 7.2), sondern es werden auch die einzelnen Höhenebenen deutlich erkennbar. Zwar sind in dem vorliegenden Modell noch einzelne Farbstreifen zu erkennen, die auf einen verrauschten Kantenübergang zurückzuführen sind; allerdings lassen sich diese minimalen Abweichungen durch einen zusätzlichen Bereinigungsschritt einfach entfernen. Inwieweit sich das approximierte Ladeobjektvolumen von $18,52 \text{ m}^3$ mit dem tatsächlichen Volumen vergleichen lässt, wird im Rahmen einer separaten Ergebnisanalyse beantwortet.

7.1.3 Ergebnisanalyse

Damit die Genauigkeit der erarbeiteten Laderaumerfassungsmethodik ermittelt werden kann, ist eine detaillierte Analyse der erfassten 3D-Daten erforderlich. Im folgenden Abschnitt wird daher das generierte Laderaumvolumenmodell systematisch zerlegt. Wie bereits eingangs erwähnt wurde, ergibt sich das zu ermittelnde Volumen unmittelbar aus der beanspruchten Ladeobjektfläche ($L \times B$) und den jeweiligen Ladeobjekthöhen (H). Für die nachfolgende Ergebnisanalyse werden daher die erfassten Grundflächen sowie die ermittelten Höhenprofile einzeln betrachtet, um eventuelle Parameterabweichungen näher erörtern zu können.

Für eine erste Flächeneinordnung werden die Idealmaße gemäß den Herstellerangaben herangezogen. Hierfür wurde das Volumenmodell so zerlegt, dass die einzelnen Grundflächen der jeweiligen Ladeeinheitenhöhenebenen betrachtet werden können. Das vorgegebene Ladeschema enthält vier verschiedene Höhenprofilebenen mit jeweils unterschiedlichen Flächengrößen. Die Höhenprofilebene der Ladeeinheit 4 besitzt die kleinste und die Hö-

henprofilebene 3 die größte Grundfläche. Die Grundflächen von LE-Ebene 1 und 2 besitzen zwar eine identische Flächengröße, weisen jedoch eine unterschiedliche Anordnung der einzelnen Kartonagen auf (s. Abbildung 7.8).

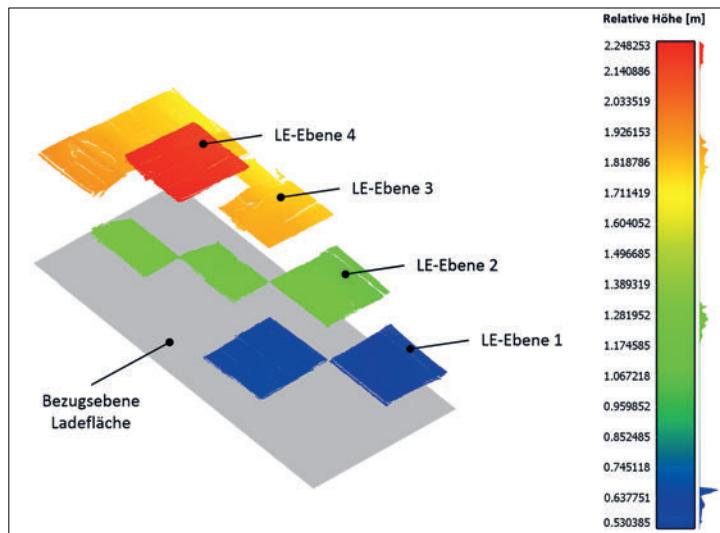


Abbildung 7.8: Betrachtung der einzelnen Höhenebenen der angeordneten Ladeobjekte

In einem ersten Schritt wurde die Erfassung der Gesamtfläche bewertet. Es wurde also geprüft, ob einzelne Flächenbereiche grundsätzlich nicht erfasst wurden – bspw. aufgrund von Abschattungen. Die Auswertung der Gesamtfläche zeigte, dass eine Erfassungsquote von 98,7 % vorlag. Mittels der gewählten Kameraanordnung konnten also nahezu vollständig alle relevanten Ladeobjektflächen erfasst werden. Auf Basis dieses Ansatzes wurden im Anschluss die Einzelflächen der jeweiligen Höhenebenen separat betrachtet und ausgewertet (s. Tabelle 7.2). Dabei wurde eine durchschnittliche Messabweichung von 3,75 % ermittelt. Die von den Sensoren erfassten Objektoberflächen wurden somit generell größer erfasst als die angegebenen Idealmaße. Dies deckt sich wiederum mit den beim Laderaummodell erfassten Messwerten (s. Kapitel 6) sowie den Erkenntnissen aus den Laborversuchen (s. Kapitel 5).

Tabelle 7.2: Flächenvergleich der einzelnen Höhenprofilebenen anhand des idealen Ladeschemas

Objektebene	Fläche Idealdaten [m ²]	Fläche Sens- ordaten [m ²]	Fläche Ab- schattung [m ²]	Flächenab- weichung [%]
LE-Ebene 1	2,88	2,96	0,000	2,64
LE-Ebene 2	2,88	2,89	0,042	1,91
LE-Ebene 3	5,04	5,07	0,182	4,02
LE-Ebene 4	1,44	1,54	0,000	6,43

Zur weiteren Bewertung der erfassten Ebenen wurde in einem nächsten Schritt die Anordnung der verwendeten Ladeobjekte im Laderraum näher betrachtet. Wie bereits eingangs erläutert, werden die Ladeschemaangaben oftmals 1:1 aus den verwendeten Stau- oder Dispositionsprogrammen übernommen. Dabei wird stets von einer lückenlosen und optimalen Anordnung der quader- oder zylinderförmigen Ladeobjekte ausgegangen. Die Betrachtung des realen Verladezustands im Laderraum zeigt jedoch auf, dass die vorzufindende Ladeeinheitenanordnung deutlich vom idealisierten Ladeschema abweicht. Im vorliegenden Fall sind dabei insbesondere Abweichungen bei der eigentlichen Ladeeinheitengrundkontur festzustellen. Im Gegensatz zu den Idealmaßen ergeben sich daraus einzelne Zwischenräume, die sich durch die Anordnung und Positionierung mehrerer Ladeobjekte vervielfachen. Besonders deutlich wird dieser Effekt durch die Stapelung der Ladeobjekte in X-, Y-, Z-Richtung und die daraus resultierenden und zugleich unvermeidbaren Spaltmaße zwischen den einzelnen Kartonagen (s. Abbildung 7.9). Dadurch ergibt sich bereits eine Differenz bei den Grundmaßen, die sich bei der Erfassung der betrachteten Teilszenen nochmals verstärkt (s. Staulücken zwischen den Seitenwänden und den Ladeobjekten).



Abbildung 7.9: Spaltmaße und Staulücken zwischen den angeordneten Ladeobjekten

Wie aus der aufgeführten Abbildung ersichtlich wird, ergeben sich die genannten Differenzen primär durch das Falten und Verschließen der einzelnen Kartonagen. An den Boden- und Deckelverschlussklappen ergeben sich zudem Überlappungen am Stoß, wodurch die Gesamthöhe ansteigt. Des Weiteren kommt es beim Verkleben der einzelnen Faltkartonagen zu minimalen Verformungen, die sich auf die Idealkontur der einzelnen Ladeobjekte auswirken und somit folglich auch die Länge, Breite und Höhe der gesamten Ladegutanz-

ordnung beeinflussen. Unter Berücksichtigung der aufgeführten Einflussfaktoren konnte bei den betrachteten Ladeeinheitenebenen eine durchschnittliche Maßabweichung von 17,3 mm festgestellt werden (Längen-/Breitenverhältnis). Dabei gilt es wiederum zu berücksichtigen, dass zwischen den Ladeobjekten und den beiden Seitenwänden noch eine zusätzliche Staulücke von bis zu 25 mm besteht, die bei der Datenerfassung vereinzelt mit erfasst wurde (je nach Kameraaufnahme und -position). Im Rahmen des Segmentierungsprozesses lässt sich dieses Übermaß jedoch nicht mehr gezielt entfernen, sodass dies zu einer zusätzlichen Datenabweichung führt. Der Gesamtvergleich der erfassten Flächendaten ergibt somit eine Abweichung von 2,1 % (s. Tabelle 7.3).

Tabelle 7.3: Vergleich der Flächendaten (gesamte Ladeobjektflächen)

Flächenbereich	Fläche (L x B)
Fläche (Ist-Vermessung)	12,45 m ²
Fläche (ToF-Sensor)	12,68 m ²
%-Abweichung	2,1%

Da die Volumenbestimmung in direktem Zusammenhang mit der jeweiligen Höhe steht, wurde als Nächstes der Höhenverlauf der erfassten Ladeobjekte näher analysiert. Die Be- trachtung der aufgenommenen und aufbereiteten Daten zeigte auch hier Messabweichungen auf. Entlang der Laderaumlängsseite (X-Achse) ist nur ein geringer Abfall des Höhenverlaufs zu verzeichnen. Dagegen zeigt der Höhenverlauf entlang der Laderaumbreite (Y-Achse) einen stärkeren Abfall auf, der deutlich nach rechts neigt (s. Abbildung 7.10). Dies hängt u. a. mit der Kameraanordnung, der Datenüberführung sowie der Fusion der einzelnen Aufnahmen zusammen. Durch die Auswahl und Überführung der Punktcorrespondenzen bei der Datenfusion ergibt sich bereits zu Beginn der Datenerfassung zwar ein Annäherungsfehler, dessen Ungenauigkeit jedoch durch jede weitere Datenfusionsstufe ansteigt. Dieser Fehler ist zwar nur minimal; jedoch ruft er aufgrund der stufenweisen Zusammenführung der jeweiligen Ausgangsdaten erkennbare Abweichungen hervor. Ähnlich verhält es sich bei der Registrierung der Aufnahmen mit dem Laderaumkoordinatensystem. Hier wirken sich die Approximationsfehler der Punktcorrespondenzen in einer zusätzlichen Verdrehung der Gesamtszene aus.⁵⁶

⁵⁶ Die Ergebnisanalyse zeigt, dass sich beim Einsatz mehrerer Kameras die Folgefehler stärker auswirken und der bereits erwähnte Ansatz der Direkttransformation ein zwingender Bestandteil der Systemimplementierung sein sollte (s. Kapitel 6.2.1 und Kapitel 8.2).

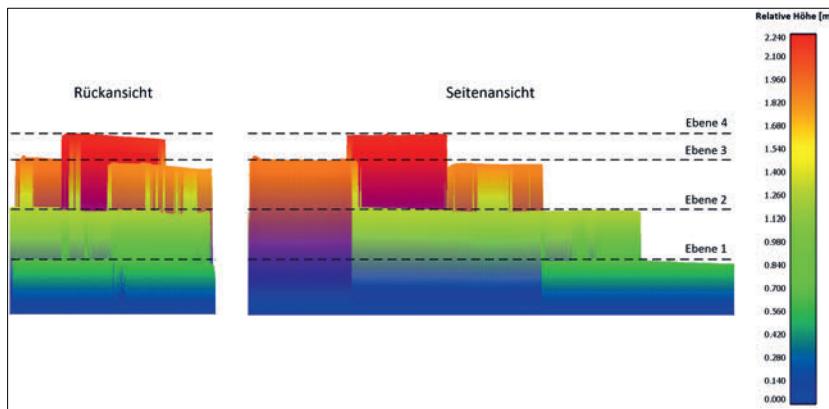


Abbildung 7.10: Höhenverlauf vom erfassten Ladeeinheitenmodell im Laderaum

Die Auswertung des Höhenverlaufs von den einzelnen Betrachtungsebenen zeigt, dass sowohl eine positive als auch eine negative Abweichung bei den einzelnen Höhenebenen vorliegt. Wie aus Abbildung 7.10 ersichtlich wird, weist die Höhenebene 3 die stärkste Neigung auf. Da die betroffene Ebene zudem auch die größte Fläche innerhalb der Szene einnimmt, wirkt sich die auftretende Ebenenneigung unweigerlich auch auf die Durchschnittshöhe aus, sodass bei Ebene 2 die ermittelte Objekthöhe unterhalb von der eigentlichen Ist-Höhe liegt (s. Tabelle 7.4).

Tabelle 7.4: Vergleich der einzelnen Höhenangaben

Höhenebene	Referenzhöhe	Modellhöhe	Abweichung
Ebene 1	2,17 m	2,20 m	1,85 %
Ebene 2	1,82 m	1,81 m	-0,65 %
Ebene 3	1,21 m	1,27 m	4,96 %
Ebene 4	0,61 m	0,63 m	3,27 %

Da sich die einzelnen Höhenangaben unweigerlich auf das Volumen auswirken, wurde in einem letzten Schritt das Gesamtvolumen für den Datenvergleich herangezogen. In Anbe tracht der verschiedenen Flächen- und Höhenabweichungen ergibt sich anhand der zusammengefassten Sensordaten eine Volumenabweichung von insgesamt 3,86 %.

Tabelle 7.5: Vergleich der Volumendaten (Ladeobjekte gesamt)

Volumenbereich	Gesamtvolumen ($L \times B \times H$)
Volumen (Ist-Vermessung)	17,83 m ³
Volumen (ToF-Sensor)	18,52 m ³
%-Abweichung	3,86 %

Die durchgeführte Ergebnisanalyse zeigt zwar Messabweichungen von nur 1 bis 5 cm auf, die sich in Bezug auf das Gesamtvolumen jedoch in einer Abweichung von 0,69 m³ bemerkbar machen. Die wesentlichen Faktoren, die zu den potenziellen Messgenauigkeiten in der Ergebnisanalyse führen, werden daher abschließend aufgeführt und eingeordnet.

Für Generierung und Verarbeitung der Tiefenbilddaten wurden die intrinsischen Parameter aus der Werkskalibrierung verwendet. Wie in Kapitel 4.3.1 aufgezeigt, weichen diese nur um wenige Pixel voneinander ab, was im Allgemeinen nur zu geringen Messabweichungen führt. In Bezug auf die Laderaumkonstellation und die Gesamtanordnung der Tiefenbildkameras kann es in Kombination mit einzelnen Ladeobjektkanten im Bildrandbereich – aufgrund des bereits genannten Abbildungsverhältnisses – jedoch zu größeren Projektionsabweichungen und somit auch zu fehlerhaften Kantenlängen bei den betrachteten Ladeobjekten kommen. Eine weitere Fehlerquelle ergibt sich durch die gewählte Anbringung der Tiefenbildkameras im Laderaum. Die Ausrichtung der Kameras erfolgte auf Basis der Oberkante des Laderaumrahmens. Dabei blieb die Fertigungsgenauigkeit des Rahmenaufbaus unberücksichtigt. Es kann daher nicht ausgeschlossen werden, dass der Laderaumboden, die Laderaumdecke und die Seitenwände nicht exakt parallel/orthogonal zueinander verlaufen. Durch diese Abweichung vom eigentlich angenommenen Idealzustand ergeben sich unweigerlich Folgefehler bei der Bestimmung der Ausgangsposition der jeweiligen Kamera. In Kombination mit der gewählten Grob- und Feinregistrierung führt dies in Summe zu größeren Abbildungsfehlern beim generierten Laderaummodell, sodass die anfänglichen kleinen Messabweichungen (Millimeterbereich) letztendlich in einem Bereich von wenigen Zentimetern schwanken können.

Die aufgeführten Unsicherheitsfaktoren zeigen erste Verbesserungspotenziale auf, die bei zukünftiger Bewertung der Bilddaten und des generierten Laderaummodells mit berücksichtigt werden sollten. Die Ungenauigkeiten beim gewählten Referenzszenario gilt es bspw. durch die Durchführung einer intrinsischen und extrinsischen Eigenkalibrierung zu kompensieren. Im Rahmen der weiteren Systemauslegung und -erprobung sollte zudem der Direktvergleich von Referenz- und Modelldaten mittels eines hochgenauen Laserscans erfolgen. Dadurch könnte nochmals ein präziserer Ergebnisvergleich durchgeführt werden (s. auch Hinweis zu neuen Kameragenerationen in Kapitel 8.2). Trotz der aufgeführten und eingeordneten Unsicherheitsfaktoren lässt sich an dieser Stelle jedoch festhalten, dass die vorgestellte Erfassungsmethodik in einer ersten Erprobungsinstanz ausreicht, um die Volumenauslastung des Laderaums zuverlässig und hinreichend genau bestimmen zu können – insbesondere in Anbetracht der bisher fehlenden Volumenangaben und der damit verbundenen Dateninkonsistenz (s. Kapitel 1, Zielstellung der Arbeit).

7.2 Bestimmung einer Auswertesystematik

In den vorherigen Abschnitten wurden die Grundlagen geschaffen, um den Laderaum volumenbezogen zu bewerten. Das Ziel des nächsten Arbeitsschrittes ist, die generierte Datenbasis so zu verknüpfen, dass das erfasste Volumen in ein quantitativ messbares Bewertungsinstrument integriert werden kann. Den Kern hierfür bildet die systematische Aufbereitung der ermittelten Daten zu einem Kennzahlensystem, um anschließend eine ganzheitliche Transportbewertung zu ermöglichen.

7.2.1 Aufbereitung der Laderaumdaten

Damit die vom Erfassungssystem generierten Laderaumdaten in messbaren und vergleichbaren Werten wiedergegeben werden können, werden in einem ersten Schritt die Absolutzahlen aufbereitet. Gemäß den in Kapitel 3.1.2 festgelegten Zielgrößen gehören hierzu der Flächen- und der Volumenauslastungsgrad. Zur Bestimmung der jeweiligen Auslastungsdaten werden die ermittelten und vorhandenen Laderaumdaten genutzt und in Beziehung zueinander gesetzt.

$$\text{Flächenauslastungsgrad} = \frac{\text{Belegte Ladeobjektfäche}}{\text{Laderaumreferenzfläche}} \quad (7.1)$$

$$\text{Volumenauslastungsgrad} = \frac{\text{Belegtes Ladeobjektvolumen}}{\text{Laderaumreferenzvolumen}} \quad (7.2)$$

Um zusätzlich den erwähnten Höhennutzungsgrad im Laderaum betrachten und bewerten zu können, besteht die Möglichkeit, diesen für jedes Ladeobjekt separat oder in Summe aufzuführen.⁵⁷ Hierzu werden die jeweiligen Höhenebenen in Relation zur Laderaumhöhe gesetzt (s. Gleichung (7.3)).

$$\text{Höhennutzungsgrad}_i = \frac{\text{Ladeobjekthöhe}_i}{\text{Laderaumreferenzhöhe}} \quad (7.3)$$

i = Einzelbetrachtung der segmentierten Ladeobjekte und Höhenebenen

Auf der Basis dieser Beziehungszahlen lässt sich eine Laderaumbewertungsskala umsetzen. Durch die schematische Aufteilung des Laderaums bzw. der Ladefläche in einzelne Sektoren (Säulen) wird es ermöglicht, darin den jeweiligen Auslastungsgrad zu visualisieren (Füllstand der Säulen). Durch die Kombination des reinen Zahlenwertes (Auslastungsgrad) mit den grafischen Darstellungen lässt sich eine transparentere und sektorenbezogene

⁵⁷ Eine weitere Vertiefung der Höhen- und Volumenangaben wird nicht vorgenommen, da diese beiden Werte miteinander korrelieren.

Repräsentation des tatsächlichen Laderaumzustandes erzielen. Die Bewertungsskala für das erprobte Laderaummodell wird in Abbildung 7.11 schematisch dargestellt.

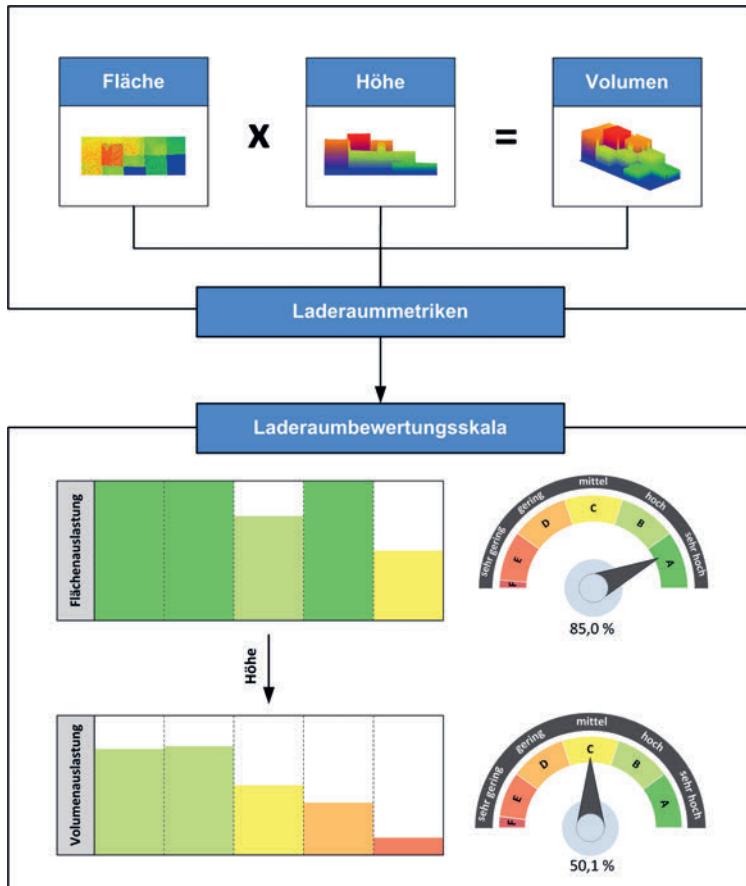


Abbildung 7.11: Darstellungsform für die Laderaumauslastungsbewertung

Die Aufteilung des Laderaums in verschiedene Sektoren zeigt auf einfache Weise, in welchen Bereichen eine hohe oder niedrige Auslastung vorliegt und wie sich diese auf die Gesamtauslastung auswirkt. Im vorliegenden Fallbeispiel (Referenzszenario) ist zu sehen, dass drei der fünf aufgeführten Sektoren eine sehr hohe Flächenauslastung aufweisen, wodurch die Flächenauslastung insgesamt bei 85,0 % liegt. Im Gegensatz hierzu zeigt die Auswertung der Volumendaten auf, dass in keinem Sektor eine volle Auslastung erreicht wird. Es wird vielmehr ersichtlich, dass nur eine mittelmäßige Volumenauslastung vorliegt (50,1 %), wodurch noch ein deutliches Optimierungspotenzial bei der Verladung besteht.

Anhand der gewählten Analyse- und Darstellungsform lässt sich eine situationsgerechte Bewertung des Auslastungsgrades vornehmen und auf einfache Weise visualisieren, welche Auslastungsform als restriktive Größe (Fläche oder Volumen) auf die jeweilige Transportsituation einwirkt. Die hier gezeigte Auswertereform berücksichtigt allerdings nur die Flächen- und Volumenangaben. Für die anforderungsgerechte Betrachtung des gesamten Transportgeschehens ist es daher in einem nächsten Auswerteschritt erforderlich, die vorhandenen Daten mit weiteren Transportvariablen zu verknüpfen.

7.2.2 Auswertesystematik für den Parametervergleich

Die bisherige Datenauswertung bezieht sich auf die volumenbezogenen Angaben. Wie bereits eingangs erwähnt wurde, reicht diese isolierte Betrachtung jedoch nicht aus, um eine aussagekräftige Bewertung hinsichtlich der tatsächlichen Laderaumauslastung und Transporteffizienz vornehmen zu können. Als nächster Auswerteschritt wird daher der Vergleich von mehreren in Wechselwirkung zueinander stehenden Transportvariablen in Kombination mit den neu generierten Laderaumdaten angestrebt.

Als Auswertebasis dienen hierzu die in der Literatur häufig erwähnten und verwendeten Variablen bezüglich der Transportdistanz, der Ladefläche, des Ladungsgewichts, des Ladevolumens, des Kraftstoffverbrauchs und der Transportzeit ([CS94]; [LB04]; [McK09]; [TS97]). Um einen Direktvergleich zwischen den aufgeführten Größen zu ermöglichen, werden die ausgewählten Variablen in einem entsprechenden Auswertediagramm gegenübergestellt. Das hierfür verwendete Diagramm verfügt über sechs Achsen, welche dem Zentrum entspringen und jeweils nach außen verlaufen. Jede einzelne Achse repräsentiert somit eine der genannten Transportvariablen. Ausgehend vom Zentrum des Diagramms ist ein vorgegebener Idealbereich aufgetragen (graue Fläche), der das Optimum eines Transports darstellt. Für die Auswertung werden jeweils die Abweichungen zum vorgegebenen Idealwert aufgetragen. Das heißt: Je mehr eine Transportvariable vom vorgegebenen Referenzwert abweicht, umso deutlicher wird dieser Ausschlag im Diagramm ersichtlich. Anhand dieser Vorgehensweise lässt sich für jede Achse ein entsprechender Punkt eintragen. Durch das anschließende Verbinden dieser Punkte entsteht eine geschlossene Linie, die im Idealfall innerhalb der vorgegebenen Zentrumsfläche verläuft. Zur Veranschaulichung dieser Auswertereform wurden exemplarisch die Ergebnisse von vier verschiedenen Transportszenarien mit unterschiedlicher Variablenabweichung in ein Diagramm eingezeichnet (Abbildung 7.12).

Durch das Auftragen und Verbinden der Auswertegrößen zu einer gemeinsamen Linie wird es ermöglicht, den jeweiligen Transportzustand grafisch zu modellieren. Der anschließende Gesamteintrag von allen vier Transportszenarien ermöglicht einen ersten Transportvergleich. Durch die eingetragenen Punkte sowie die verbundenen Linienzüge

lassen sich zwar erste Abweichungen erkennen; allerdings besitzt diese Darstellungsform nur eine bedingte Aussagekraft. Zur besseren Veranschaulichung werden daher in einem nächsten Schritt die Flächen der einzelnen Linienzüge ausgefüllt (s. Abbildung 7.12, rechts).

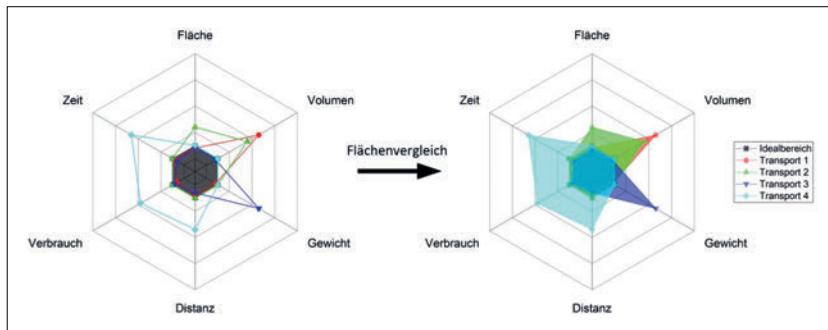


Abbildung 7.12: Auswertesystematik für verschiedene Transportszenarien

Für jedes Transportszenario ergibt sich dadurch jeweils ein Flächenverlauf, der die Abweichung zum Flächenoptimum sowie zu den jeweils anderen Transportszenarien verdeutlicht. Durch eine Extraktion der jeweiligen Einzelflächen lassen sich insbesondere die Abweichungen bei den jeweiligen Transportvariablen hervorheben. Durch diese grafische Aufbereitung lässt sich letztendlich herausstellen, welche Variable konkret auf den Transport restriktiv einwirkt (s. Abbildung 7.13).

Die Bereitstellung der erforderlichen Auswertedaten erfolgt automatisch und vollständig digital. Hierfür wird zum einen auf das Ergebnis der erarbeiteten Laderraumvolumenanalyse zurückgegriffen. Und zum anderen wird die Auswertung durch die Ausgabedaten der bereits im Fahrzeug integrierten Auswertesysteme und die damit verbundenen Informationsflüsse ergänzt (digitaler Tachograf, Telematik-/Flottenmanagementsystem etc.).⁵⁸

Somit lässt sich transportbegleitend für jedes Fahrzeug eine Effizienzbewertung vornehmen, um entsprechende Defizite zu identifizieren sowie erforderliche Optimierungsmaßnahmen einleiten zu können. Des Weiteren lassen sich anhand der dahinter stehenden Absolutzahlen die bereits zuvor aufgeführten Vergleichsgrößen ermitteln. Hierzu gehören insbesondere die geleisteten Volumenkilometer ($m^3 \cdot km$), um diese mit den aufgeführten Tonnenkilometern (tkm) vergleichen zu können. Ferner stellt die spezifische Beladungsdichte in Relation zur Laderraumdichte (m^3 / t) ein weiteres Bewertungskriterium für die optimale Auslastung des Laderaums dar.

⁵⁸ Dies setzt die entsprechende technische Ausstattung sowie die damit verbundene Konnektivität des eingesetzten Transportmittels voraus.

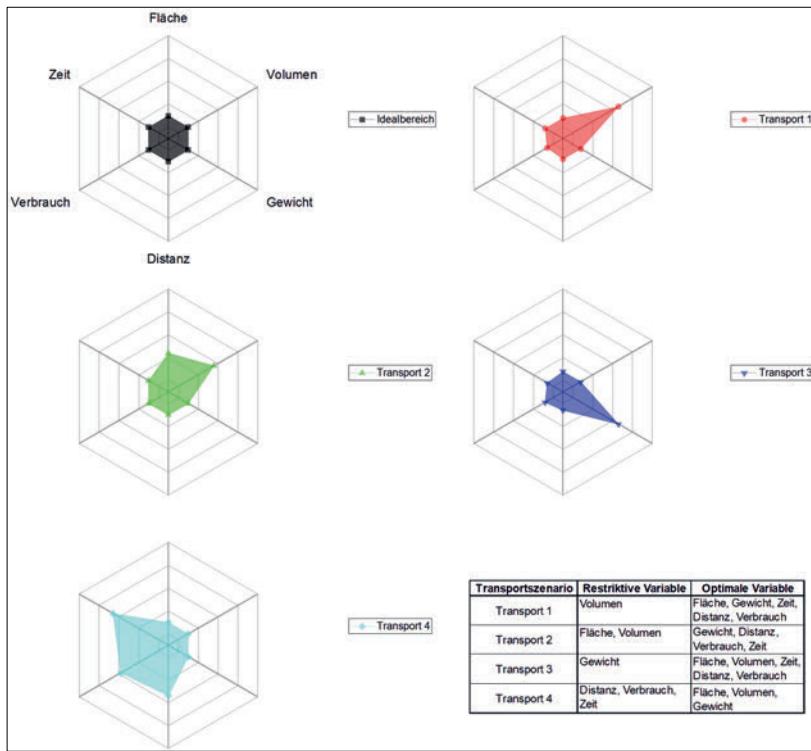


Abbildung 7.13: Extraktion und Vergleich der Einzelflächen zu den jeweils aufgeführten Transport- und Laderraumszenarien

Anhand der generierten und hinterlegten Daten lassen sich die in Kapitel 3.1.2 aufgeführten und geforderten Auswertegrößen nach folgenden Formeln bestimmen:

$$\text{Volumenkilometer} = \text{Transportvolumen} \times \text{Beförderungsdistanz} \quad (7.4)$$

$$\text{Beladungsdichte} = \frac{\text{Transportgewicht}}{\text{Transportvolumen}} \quad (7.5)$$

$$\text{Laderaumdichte} = \frac{\text{Nutzlast Transportmittel}}{\text{Laderaumvolumen}} \quad (7.6)$$

Anhand der neu generierten Laderraumdaten und der aufgeführten Vergleichsgrößen lassen sich verschiedene Möglichkeiten für eine spezifische Transportanalyse ableiten. Durch die gewählte Auswertesystematik lassen sich insbesondere Unter- oder Überschreitungen bei den einzelnen Transportvariablen frühzeitig identifizieren. Die betroffenen Anwender aus

der Transportbranche werden somit in die Lage versetzt, ein individuelles Bewertungswerkzeug aufzubauen, welches es dem verantwortlichen Transporteur ermöglicht, die jeweiligen Transport-/Auslastungsdefizite zeitnah zu identifizieren sowie entsprechende Optimierungsmaßnahmen einzuleiten. Ferner ist an dieser Stelle festzuhalten, dass die konsequente Ausweitung dieser Analyseform in Kombination mit einer digitalen Vernetzung des gesamten Laderraums sowie die Verknüpfung sämtlicher Ladeobjektdaten fortan zu einer ganzheitlichen Analyse und Strukturierung der Transportkette führen würde. Dies würde wiederum nicht nur eine zusätzliche Steigerung der Prozesstransparenz und der Transporteffizienz mit sich bringen, sondern insbesondere im Hinblick auf die zukünftigen Transportanforderungen wäre dies als ein deutlicher Innovationsschritt hinsichtlich der derzeitigen Auslastungserfassung und der zukünftigen Transportmittelbewertung anzusehen (s. Kapitel 8.2).

8 Schlussbetrachtung

8.1 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die automatische Erfassung des tatsächlich genutzten Laderraumvolumens bietet für den Straßengüterverkehr ein erhebliches Leistungspotenzial, um die unabdingbaren Gütertransporte zukünftig effizienter auszuführen. Eine konsistente Datenbasis zur Erfassung aller relevanten Auslastungsdaten existiert derzeit allerdings nicht. Aus diesem Grund wurde im Rahmen dieser Arbeit eine Erfassungsmethodik konzipiert, welche es ermöglicht, neue geeignete Zielgrößen für die Laderraumauslastung zu generieren und in einem darauf abgestimmten Bewertungssystem zu präsentieren, um zukünftig eine fundierte und konsistente Datenerfassung realisieren zu können. Die hierfür erforderliche Vorgehensweise wurde schrittweise entwickelt und in einer ersten experimentellen Phase erprobt.

Zur Umsetzung der volumenbezogenen Laderraumerfassung wurde zunächst die Auslastungsproblematik innerhalb des Straßengüterverkehrs detailliert aufgearbeitet. Es konnte aufgezeigt werden, welche Konfliktpotenziale derzeit bestehen und welche Anforderungen zur Erzielung einer besseren Laderraumauslastung erfüllt werden müssen. Anhand der systematischen Eingrenzung der einzelnen Funktionsumfänge konnte für die erforderliche Systemauslegung eine Vorauswahl bezüglich der einzusetzenden Sensorik getroffen und die Arbeitsschwerpunkte Datengenerierung, -verarbeitung und -auswertung definiert werden.

Die Ausgangsbasis zur Datengewinnung bildet die Einbindung mehrerer 3D-Tiefenbildkameras im Laderraum. Hierfür wurde eine skalierbare Ausrichtung und Anordnung der ausgewählten Time-of-Flight-Sensoren bestimmt, um u. a. den Einsatz in unterschiedlich großen Laderäumen gewährleisten zu können. Zur adäquaten Akquisition der 3D-Bilddaten wurden zunächst die technischen Grundlagen anhand einer klassischen Laderraumszene erläutert. Durch die detaillierte Beschreibung des technischen Funktionsprinzips und des digitalen Abbildungsvorgangs konnte aufgezeigt werden, dass die Datengenerierung von verschiedenen Parametern und Variablen beeinflusst wird. Damit die Qualität der Daten verbessert sowie eine adäquate Datenüberführung gewährleistet werden kann, wurde anschließend die Güte der generierten Sensordaten für den Einsatz im Laderraum analysiert. Hierzu wurden verschiedene Messanalysen mit unterschiedlichen Versuchsaufbauten durchgeführt. Dabei konnte festgestellt werden, dass der Betrieb der Tiefenbildkamera insbesondere durch die Sensoranordnung, die Temperaturrentwicklung sowie die Materialreflexionen beeinflusst wird. Anhand der Laborversuche konnten somit zum einen die

relevanten Störfaktoren identifiziert und zum anderen deren Auswirkungen auf das Messverhalten quantifiziert werden.

Einen weiteren Kern der Arbeit bildeten die Aufbereitung und die Weiterverarbeitung der erfassten Laderraumdaten in Form einer grafischen Verarbeitungskette. Hierzu wurden anhand eines miniaturisierten Laderraummodells die entsprechenden Verarbeitungsschritte erprobt und in ein entsprechendes Ablaufschema integriert. Anhand dieses Funktionsschemas können – unabhängig vom ausgewählten Tiefenbildsensor und Laderraumtyp – die einzelnen Laderraumszenen zusammengefasst werden, um anschließend das Volumen des gesamten Laderraums grafisch auszuwerten. Basierend auf den ausgewählten Segmentierungsprozessen konnten alle relevanten Ladeobjektflächen identifiziert werden, sodass die ermittelten Oberflächenpunkte zur Bestimmung des Höhenprofils herangezogen wurden. In Kombination mit einer vektoriellen Höhenberechnung sowie einer Projektion der Laderraumdaten auf eine definierte Referenzebene (Ladeflächenraster) wurde letztlich ein geschlossenes Volumenmodell von dem akquirierten Laderraumszenario generiert. Anhand dieses Ausgangsmodells wurde anschließend eine dreidimensionale Volumendarstellung des gesamten Laderrauminhalts bestimmt. In Kombination mit den bereits hinterlegten Laderraumdaten lässt sich daraus das tatsächlich in Anspruch genommene Laderraumvolumen als neue sowie hinreichend genaue Zielgröße bei der Auslastungsbestimmung ermitteln.

Basierend auf den Erkenntnissen aus der Datenaufbereitung wurde abschließend die Funktionsweise der entwickelten Methodik anhand eines realen Laderraumszenarios erprobt. Durch die Integration von 8 ToF-Tiefenbildkameras in den Laderraum konnten verschiedene Teilszenarien erfasst werden, die anschließend herangezogen wurden, um die Volumenauslastung des Laderraums – gemäß des erarbeiteten Analyseschemas – zu ermitteln. Neben der experimentellen Systemerprobung wurde ferner eine Auswertesystematik aufgezeigt, wodurch sich die volumenbezogene Laderaumerfassung in ein quantitativ messbares Bewertungsinstrument integrieren lässt. Anhand der systematischen Verknüpfung der Transportdaten konnte ein Kennzahlensystem aufgezeigt werden, welches eine präzisere und ganzheitliche Bewertung der zukünftigen Transporte ermöglicht.

8.2 Ausblick und weiterer Forschungsbedarf

Anhand der erarbeiteten Arbeitsinhalte konnten sowohl die Stärken als auch die einzelnen Schwächen für eine volumenbezogene Laderaumanalyse vorgestellt werden. Bei der verwendeten Kameratechnologie führen insbesondere die Reflexionseigenschaften, die Temperaturrentwicklung und die Sensoranordnung zu potenziellen Messungenauigkeiten oder Messwertverfälschungen. Einen wesentlichen Bestandteil zukünftiger Forschungsarbeiten bilden somit die Weiterentwicklung der verwendeten Messtechniken sowie die Implementierung weiterer Mechanismen zur Fehlerkompensation. Der stetige Fortschritt in diesem

Bereich zeigt, dass die neuen Tiefenbildkameras leistungsfähiger werden und zum Teil ausgereiftere Funktionsprinzipien zur Datenakquisitionen enthalten (vgl. Tabelle 8.1). Die gleichzeitige Miniaturisierung der Kameras ist in Kombination mit den massentauglichen Herstellungskosten als ein zusätzliches Argument anzusehen, um zukünftig 3D-Kameras verstärkt für die Laderaumanalyse einzusetzen. In Anbetracht dieser Entwicklungen besteht insbesondere weiterer Untersuchungsbedarf bezüglich der Laderaumkompatibilität. Im Detail bedeutet dies, die kameraspezifischen Wirkzusammenhänge aufzuarbeiten und diese hinsichtlich der identifizierten sowie weiteren Störfaktoren zu evaluieren.

Tabelle 8.1: Auflistung neuer 3D-Kameragenerationen mit Parametervergleich (Angaben nach ([Int19]; [Mic19]; [Nov20]; [PMD19]))

	Microsoft® Azure Kinect™	pmd[vision]® Pico Monstar	Intel® Realsense™ L515
Funktionsprinzip	ToF	ToF	LiDAR
Auflösung	512 x 512 Pixel	352 x 287 Pixel	1024 x 768 Pixel
Sichtfeld	120 ° (h), 120 ° (v)	100 ° (h), 85 ° (v)	70 ° (h), 55 ° (v)
Abmessungen	103 mm x 126 mm x 39 mm	62 mm x 66 mm x 29 mm	61 mm x 26 mm
Gewicht	440 g	142 g	100 g

Ein weiteres Forschungsfeld stellt die Implementierung einer intelligenten Steuereinheit für die simultane Datenerfassung beim Einsatz mehrerer Kameras dar (Stichwort: Interferenzen). Hierzu gehört auch der Ausbau der vorgestellten grafischen Verarbeitungskette (s. Kapitel 6). Die erforderlichen Verbesserungen in Bezug auf die 3D-Laderaummodellierung betreffen insbesondere das Fusionsprinzip der einzelnen Laderaumszenen sowie der Ausbau der Methode zur Identifizierung der geometrischen Strukturen (Ladeobjekte). Dies beinhaltet primär die Umsetzung einer anwendergerechten Applikation, die die erforderlichen Laderaumdaten echtzeitnah bereitstellt und automatisiert aufbereitet (Stichwort: künstliche Intelligenz).

Neben dem technischen Forschungsbedarf in Bezug auf die 3D-Kamerasensorik sind allerdings auch die weiteren Entwicklungen im logistischen Sinne zu berücksichtigen. Wie in Kapitel 7 bereits aufgezeigt werden konnte, bietet die Verknüpfung der generierten Laderaumdaten mit weiteren Transportvariablen das Potenzial, neue Zielgrößen zu definieren und somit auch die tatsächliche Auslastung der Transportmittel zu präzisieren. Eine wesentliche Voraussetzung hierfür stellt die grundsätzliche Bereitstellung und Verarbeitung aller relevanten Daten dar. Dies erfordert wiederum den Ausbau der Informations- und Kommunikationstechnologien auf der Laderaumbene und entlang der gesamten Trans-

portkette, um die damit einhergehenden Innovationsschwerpunkte nicht auf einzelne Kernbereiche zu reduzieren, sondern von Beginn an prozessübergreifende Ansätze bei der Systemimplementierung verfolgen zu können. Nur so würden sich eine automatisierte Erhebung der statistischen Amtsdaten sowie eine intelligente Planung und Durchführung der Transporte realisieren lassen (Stichwort: Blockchain).

Ferner gilt es auch, die Auswirkungen auf die Ladeeinheitenbildung zu untersuchen. Wie bereits erwähnt, lassen sich anhand der bereitgestellten Volumendaten Rückschlüsse auf die einzelnen Ladeobjekthöhen ziehen. Dies eröffnet wiederum das Potenzial, die Dichte der jeweils zu transportierenden Ladeeinheit zu optimieren. Wie in Kapitel 3.2 verdeutlicht werden konnte, ergibt sich durch die derzeit ungenutzte Ladeobjekthöhe eine deutliche Volumenverschwendungen im Laderaum. In diesem Zusammenhang stellen die Optimierung der Ladeeinheitenbildung sowie die Verifikation der damit verbundenen Ladeeinheitensicherung ein weiteres Arbeitsfeld dar. In Form von ersten Versuchen konnte im institutseigenen Prüflabor aufgezeigt werden, dass sich durchaus höhere Ladeeinheiten für eine auslastungsgerechtere Verladung im Laderaum realisieren lassen, ohne dabei die Transportsicherheit zu gefährden.

Die konsequente Auswertung der generierten Laderaumdaten beschränkt sich dabei nicht nur auf die Optimierung des Laderaums sowie der Ladeeinheiten, sondern es lassen sich auch neue aufeinander abgestimmte logistische Systeme und Einheiten (Verpackungen, Ladungsträger, Ladeeinheiten, Transportmittel etc.) daraus ableiten. Damit eine bessere Auslastung generiert werden kann, ist es in diesem Zusammenhang erforderlich, Optimierungen auf der Verpackungs-, Ladungsträger- und Transportmittelebene durchzuführen, aus denen sich wiederum bessere Ladeeinheitengrundformen generieren lassen (Stichwort: Modulmaße). Nur durch die konsequente Gesamtbetrachtung lässt sich garantieren, dass alle betroffenen Einheiten entlang der Transportkette den Erfordernissen entsprechen, um langfristig eine weitaus höhere Auslastung sowie bessere Transporteffizienz im Straßengüterverkehr erzielen zu können (Stichwort: autonome Transportkette). Hierfür müsste jedoch ein umfangreicher Pilotbetrieb mit allen betroffenen Akteuren initiiert werden, um eine valide Datenbasis zu liefern, die als hinreichende Untersuchungsgrundlage anzusehen wäre und somit eine Bewertung der genannten Skaleneffekte ermöglichen würde.

Literaturverzeichnis

- [AAB⁺¹⁷] Antakli, André; Alvarado Moya, Pablo; Brüderlin, Beat; Canzler, Ulrich; Dammeritz, Holger; Enderlein, Volker; Grüninger, Jürgen; Harth, Andreas; Hoffmann, Hilko; Jundt, Eduard; Keitler, Peter; Keppmann, Felix Leif; Krzikalla, Roland; Lampe, Sebastian; Löffler, Alexander; Meder, Julian; Otto, Michael; Pankratz, Frieder; Pfützner, Sebastian; Roth, Matthias; Sauerbier, Richard; Schreiber, Werner; Stechow, Roland; Tümler, Johannes; Vogelgesang, Christian; Wasenmüller, Oliver; Weinmann, Andreas; Willneff, Jochen; Wirsching, Hans-Joachim; Zinnikus, Ingo; Zürl, Konrad: *Virtuelle Techniken und Semantic-Web*. In: Schreiber, Werner; Zürl, Konrad; Zimmermann, Peter (Hrsg.): Web-basierte Anwendungen Virtueller Techniken: Das ARVIDA-Projekt – Dienste-basierte Software-Architektur und Anwendungsszenarien für die Industrie. Berlin: Springer Verlag, 2017, S. 17–116
- [Abe05] Aberle, Gerd: *Zukünftige Entwicklung des Güterverkehrs: Sind Sättigungsgrenzen erkennbar?* Diskussionsbeitrag, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Institut für Verkehrswissenschaft und Regionalpolitik, 2005
- [ADA20] ADAC – Allgemeiner Deutscher Automobil-Club: *Gesamte Staulänge auf Autobahnen in Deutschland in den Jahren 2002 bis 2019*. URL <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/200201/umfrage/gesamte-staulaenge-auf-autobahnen-in-deutschland> – Abrufdatum: 28.05.2020
- [ABF⁺¹⁴] Albrecht, Ella; Bleuel, Timo; Finkeldey, Felix; Gillet, Sarah; Kloß, Markus; Krämer, Tim; Lenssen, Jan Eric; Mahmalat, Samir; Reher, David; Schaefer, Daniel; Schulz, Romano; Will, Florian: *DynOLog – Dynamische Detektion von Objekten im Kontext von logistischen Anwendungsfällen*. Endbericht der Projektgruppe 575. Technische Universität Dortmund, Fakultät für Informatik, 2014
- [AGD07] Azad, Pedram; Gockel, Tilo; Dillmann, Rüdiger: *Computer Vision – Das Praxisbuch*. Aachen: Elektor-Verlag, 2007
- [Alb07] Albrecht, Martin: *Untersuchung von Photogate-PMD-Sensoren hinsichtlich qualifizierender Charakterisierungsparameter und -methoden*. Dissertation, Universität Siegen, 2007
- [Alt92] Altman, N. S.: *An Introduction to Kernel and Nearest-Neighbor Nonparametric Regression*. In: *The American Statistician* 46 (1992), Nr. 3, S. 175–185
- [App13] Appel, Wolfgang: *Nutzfahrzeugtechnik: Grundlagen, Systeme, Komponenten*. Wiesbaden: Vieweg Teubner Verlag, 2013
- [Arb14] Arbeiter, Georg: *3-D-Umgebungserfassung für teil-autonome mobile Roboter*. Dissertation, Universität Stuttgart, 2014

- [Arn10] Arndt, Wulf-Holger: *Optimierungspotenziale im Wirtschaftsverkehr durch bestellervereitige Kooperation*. Dissertation, Technische Universität Berlin, 2010
- [AST14] ASTM D4332: *Practice for Conditioning Containers, Packages, or Packaging Components for Testing*. ASTM International (Hrsg.), 2014
- [AST16] ASTM D4169 – *Practice for Performance Testing of Shipping Containers and Systems*. ASTM International (Hrsg.), 2016
- [Aut19] AutoVimation (Hrsg.): *Produktkatalog 2019: Kameragehäuse – Montagelösungen – Zubehör*. URL <https://www.autovimation.com/de/downloads> – Abrufdatum: 14.03.2019
- [BAG15] BAG – Bundesamt für Güterverkehr (Hrsg.): *Marktbeobachtungen Güterverkehr 2014*. Jahresbericht, Köln, 2015
- [BAG20] BAG – Bundesamt für Güterverkehr (Hrsg.): *Mautstatistik 2019*. Jahrestabellen, Köln, 2020
- [Bal16] Ballarin, Christian: *Der Lkw auf dem Weg zum autonomen Transportmittel*. In: ATZ Extra, Nr. 8, 2016, S. 36–41
- [Bau06] Baumgartner, Michael: *Vorrichtung und Verfahren zur Erfassung der Ausnutzung eines bewegbaren Laderraums*. Patentschrift, Max-Planck-Gesellschaft zur Förderung der Wissenschaften e. V. (Anmelder), Veröffentlichungsnummer: DE102005001480B3, 2006
- [Bäu18] Bäumler, Ilja: *Entwicklungspfade intelligenter Transportsysteme für den Straßengüterverkehr*. Dissertation, Universität Bremen, 2018
- [BCD05] Bowersox, Dinald J.; Closs, David J.; Drayer, Ralph: *The Digital Transformation: Technology and Beyond*. In: Supply Chain Management Review 9, Nr. 1, 2005, S. 22–29
- [Bes88] Besl, Paul: *Active, optical range imaging sensors*. In: Machine Vision and Applications 1, Nr. 2, 1988, S. 127–152
- [BFC18] Becker, Till; Funke, Thorben; Coordes, Joshua: *Auslastungsmessung in LKW-Laderäumen: Ein Überblick über vorhandene Technologien und ein Praxistest mit Ultraschallsensorik in der Automobillogistik*. In: Industrie 4.0, Nr. 5, 2015, S. 29–32
- [BFI⁺14] Bhandari, Ayush; Feigin, Micha; Izadi, Shahram; Rhemann, Christoph; Schmidt, Mirko; Raskar, Ramesh: *Resolving multipath interference in Kinect – An inverse problem approach*. In: IEEE Sensors Proceedings, 2014, S. 614–617
- [BfJ16] BfJ – Bundesamt für Justiz: *Verkehrsstatistikgesetz* – in der Fassung der Bekanntmachung vom 20. Februar 2004 (BGBl. I S. 318), das zuletzt durch Artikel 8 des Gesetzes vom 24. Mai 2016 (BGBl. I S. 1217) geändert worden ist. URL <https://www.gesetze-im-internet.de/verkstatg/> BJNR245210999.html – Abrufdatum: 24.05.2016
- [BH02] Biermann, Norbert; Hirschberg, André: *Einsatzmöglichkeiten und -grenzen alternativer Ladungsträger*. Schriftenreihe Transport- und Verpackungs-

- logistik, Band 58. Frankfurt: Deutscher Fachverlag, 2002
- [BH10] Berggold, Wolfgang; Häusler, Gerd: *Optische 3D-Sensoren*. In: Optik & Photonik, Nr. 3, 2010, S. 28–32
- [BHL⁺12] Buxbaum, Bernd; Hagebeuker, Bianca; Lange, Robert; Ringbeck, Thorsten: *3D Time-of-Flight (ToF)*. In: Winner, Hermann; Hakuli, Stephan; Wolf, Gabriele (Hrsg.): Handbuch Fahrerassistenzsysteme. Wiesbaden: Vieweg Teubner Verlag, 2012, S. 187–197
- [BK13] Burgeth, Bernhard; Kern, Florian: *Bildverarbeitung: Mathematik arbeiten sehen*. In: Computeralgebra-Rundbrief 27, Nr. 1, 2013, S. 18–21
- [Bla04] Blais, Francois: *Review of 20 years of range sensor development*. In: Journal of Electronic Imaging 13, Nr. 1, 2004, S. 231–240
- [BLR15] Buxbaum, Bernd; Lange, Robert; Ringbeck, Thorsten: *3D Time-of-Flight*. In: Winner, Hermann; Hakuli, Stephan; Lotz, Felix; Singer, Christina (Hrsg.): Handbuch Fahrerassistenzsysteme. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2015, S. 335–346
- [BM92] Besl, Paul; McKay, Neil: *A method for registration of 3-D shapes*. In: IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence 14, Nr. 2, 1992, S. 239–256
- [BMV16] BMVI – Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (Hrsg.): *Bundesverkehrswegeplan 2030*. Berlin, 2016
- [BMV18] BMVI – Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (Hrsg.): *Verkehr in Zahlen 2018/2019: 47. Jahrgang*. Flensburg, 2018
- [BMV19] BMVI – Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (Hrsg.): *Verkehr in Zahlen 2019/2020: 48. Jahrgang*. Flensburg, 2019
- [BO11] Burkhardt, Michael; Ott, Frank: Openmatics – Eine offene Telematikplattform für Fahrzeug-Statusinformationen in Echtzeit. In: VDI Wissensforum GmbH (Hrsg.): Truck, Bus, Van, Trailer – 11. Internationale Fachtagung Nutzfahrzeuge. Düsseldorf: VDI-Verlag, 2011
- [BOE⁺15] Bamji, Cyrus S.; O'Connor, Patrick; Elkhatib, Tamer; Mehta, Swati; Thompson, Barry; Prather, Lawrence A.; Snow, Dane; Akkaya, Onur Can; Daniel, Andy; Payne, Andrew D.; Perry, Travis; Fenton, Mike; Chan, Vei-Han: *A 0.13 μm CMOS System-on-Chip for a 512 × 424 Time-of-Flight Image Sensor With Multi-Frequency Photo-Demodulation up to 130 MHz and 2 GS/s ADC*. In: IEEE Journal of Solid-State Circuits, Nr. 1, 2015, S. 303–319
- [Bog08] Bogatu, Christian: *Smartcontainer als Antwort auf logistische und sicherheitsrelevante Herausforderungen in der Lieferkette*. Dissertation, Technische Universität Berlin, 2008
- [Bou15] Bouquet, Jean-Yves: *Camera Calibration Toolbox for Matlab*. URL http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/index.html – Abrufdatum: 03.06.2016

- [BP97] Bisping, Michael; Petzoldt, Johannes D.: *Entwicklung einer Auswahl-systematik zur Ladungssicherung bei Sammelladungen*. Schriftenreihe Transport- und Verpackungslogistik, Band 32. Frankfurt: Deutscher Fachverlag, 1997
- [BPF12] Beyerer, Jürgen; Puent León, Fernando; Frese, Christian: *Automatische Sichtprüfung: Grundlagen, Methoden und Praxis der Bildgewinnung und Bildauswertung*. Berlin: Springer, 2012
- [BR04] Beutelspacher, Albrecht; Rosenbaum, Ute: *Projektive Geometrie*. Wiesbaden: Vieweg Teubner Verlag, 2004
- [BR16] Bhandari, Ayush; Raskar, Ramesh: *Signal Processing for Time-of-Flight Imaging Sensors – An introduction to inverse problems in computational 3-D imaging*. In: IEEE Signal Processing Magazine 33, Nr. 5, 2016, S. 45–58
- [Bri12] Brinkmann, Burghart: *Internationales Wörterbuch der Metrologie: Grundlegende und allgemeine Begriffe und zugeordnete Benennungen*. Berlin: Beuth Verlag 2012
- [Bur16] Burger, Wilhelm: *Zhang's Camera Calibration Algorithm: In-Depth Tutorial and Implementation*. Technical Report (HGB16-05). Fachhochschule Oberösterreich, Hagenberg, 2016
- [But14] Butkiewicz, Thomas: *Low-cost coastal mapping using Kinect v2 time-of-flight cameras*. In: 2014 Oceans Conference, St. John's, 2014, S. 1–9
- [Car19] Cargometer (Hrsg.): *Produktinformationen und Pressemitteilungen*. URL <http://www.cargometer.com/de/news/> – Abrufdatum: 16.07.2019
- [Cas12] Castaneda-Zeman, Victor Antonio: *Constructive interference for Multi-view Time-of-Flight acquisition*. Dissertation, Technische Universität München, 2012
- [CBL⁺18] Cox, Michael; Berghausen, Martin; Linz, Stefan; Fries, Claudia; Völker, Julia: *Digitale Prozessdaten aus der Lkw-Mauterhebung: Neuer Baustein der amtlichen Konjunkturstatistiken*. In: *WISTA – Wirtschaft und Statistik*, Nr. 6, 2018, S. 11–32
- [CCP⁺09] Chiabrando, Filiberto; Chiabrando, Roberto; Piatti, Dario; Rinaudo, Fulvio: *Sensors for 3D Imaging: Metric Evaluation and Calibration of a CCD/CMOS Time-of-Flight Camera*. In: Sensors 9, Nr. 12, 2009, S. 10080–10096
- [CG13] Clausen, Uwe; Geiger, Christiane: *Verkehrs- und Transportlogistik*. Berlin: Springer Verlag, 2013
- [CGM⁺16] Corti, Andrea; Giancola, Silvio; Mainetti, Giacomo; Sala, Remo: *A metrological characterization of the Kinect V2 time-of-flight camera*. In: Robotics and Autonomous Systems 75, 2016, S. 584–594.
- [CR13] Chiabrando, Filiberto; Rinaudo, Fulvio: *TOF Cameras for Architectural Surveys*. In: Remondino, Fabio; Stoppa, David (Hrsg.): *TOF Range-Imaging Cameras*. Berlin: Springer Verlag, 2013, S. 139–164

- [CS94] Caplice, Chris; Sheffi, Yossi: *A Review and Evaluation of Logistics Metrics*. In: The International Journal of Logistics Management 5, Nr. 2, 1995, S. 11–28
- [CST⁺13] Cui, Yan; Schuon, Sebastian; Thrun, Sebastian; Stricker, Didier; Theobalt, Christian: *Algorithms for 3D shape scanning with a depth camera*. In: IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence 35, Nr. 5, 2013, S. 1039–1050
- [DB12] Drouin, Marc-Antoine; Beraldin, Jean-Angelo: *Active 3D Imaging Systems*. In: Pears, Nick; Liu, Yonghuai; Bunting, Peter (Hrsg.): *3D Imaging, Analysis and Applications*. London: Springer Verlag, 2012, S. 95–138
- [Des19] Destatis – Statistisches Bundesamt (Hrsg.): *Umweltnutzung und Wirtschaft: Tabellen zu den Umweltökonomischen Gesamtrechnungen Teil 5: Verkehr und Umwelt*. Bonn, 2019
- [DIN01] DIN EN ISO 2233: *Verpackung – Versandfertige Packstücke und Ladeeinheiten – Klimatische Vorbehandlung für die Prüfung*. Deutsches Institut für Normung e. V. (Hrsg.). Berlin: Beuth Verlag, 2001
- [DIN03] DIN 1335: *Geometrische Optik – Bezeichnungen und Definitionen*. Deutsches Institut für Normung e. V. (Hrsg.). Berlin: Beuth Verlag, 2003
- [DIN05] DIN 55510: *Verpackung – Modulare Koordination im Verpackungswesen – Teil 1: Grundlagen*. Deutsches Institut für Normung e. V. (Hrsg.). Berlin: Beuth Verlag, 2005
- [DIN14] DIN 55405: *Verpackung – Terminologie – Begriffe*. Deutsches Institut für Normung e. V. (Hrsg.). Berlin: Beuth Verlag, 2014
- [DIN15] DIN 30786–1: *Transportbelastungen – Datensammlung von mechanisch-dynamischen Belastungen – Teil 1: Allgemeine Grundlagen und Übersicht über die Normenstruktur*. Deutsches Institut für Normung e. V. (Hrsg.). Berlin: Beuth Verlag, 2015
- [DL16] Drap, Pierre; Lefèvre, Julien: *An Exact Formula for Calculating Inverse Radial Lens Distortions*. In: Sensors 16, Nr. 6, 2016, S. 1–18
- [DP11] Dunn, Fletcher; Parberry, Ian: *3D Math Primer for Graphics and Game Development*. Boca Raton, FL: A K Peters/CRC Press, 2011
- [DS08] Dyckhoff, Harald; Souren, Rainer: *Nachhaltige Unternehmensführung*. Berlin: Springer Verlag, 2008
- [Eur05] Europäische Kommission (Hrsg.): *Reference manual for the implementation of Council Regulation No 1172/98 on statistics on the carriage of goods by road*. Luxembourg, 2005
- [Eur15] Europäisches Parlament und Europäischer Rat (Hrsg.): *Verordnung (EU) Nr. 70/2012 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 18. Januar 2012 über die statistische Erfassung des Güterkraftverkehrs (2015-07-17)* URL <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:02012R0070-20130701&from=DE> – Abrufdatum: 17.07.2015

- [FAT11] Foix, Sergi; Alenya, Guillem; Torras, Carme: *Lock-in Time-of-Flight (ToF) Cameras: A Survey*. In: IEEE Sensors Journal 11, Nr. 9, 2011, S. 1917–1926
- [FB81] Fischler, Martin A.; Bolles, Robert C.: *Random sample consensus: A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography*. In: Communications of the ACM 24, Nr. 6, 1981, S. 381–395
- [FBR⁺15] Fankhauser, Peter; Bloesch, Michael; Rodriguez, Diego; Kaestner, Ralf; Hutter, Marco; Siegwart, Roland: *Kinect v2 for mobile robot navigation: Evaluation and modeling*. In: 2015 International Conference on Advanced Robotics (ICAR), Istanbul, 2015, S. 388–394
- [FDP⁺16] Fuersattel, Peter; Dotenco, Sergiu; Placht, Simon; Balda, Michael; Maier, Andreas; Riess, Christian: OCPAD – Occluded checkerboard pattern detector. In: 2016 IEEE Winter Conference on Applications of Computer Vision (WACV), Lake Placid, NY, 2016, S. 1–9
- [FHK⁺16] Fahrmeir, Ludwig; Heumann, Christian; Künstler, Rita; Pigeot, Iris; Tutz, Gerhard: *Statistik*. Berlin: Springer Verlag, 2016
- [Fie14] Fiedler, David: *Beiträge zur Analyse, Modellierung und Kalibrierung von Kameras und 3D-Tiefensensoren*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, 2014
- [Fle03] Fleischer, Matthias: *Signalverarbeitung in der optischen 3D-Messtechnik*. Dissertation, Universität Stuttgart, 2003
- [FM13] Fiedler, David; Müller, Heinrich: *Impact of Thermal and Environmental Conditions on the Kinect Sensor*. In: Hutchinson, David; Kanade, Takeo; Kittler, Josef; Kleinberg, Jon M.; Mattern, Friedemann; Mitchell, John C.; Naor, Moni; Nierstrasz Oscar; Steffen, Bernhard; Sudan, Madhu; Terzopoulos, Demetri; Tygar, Doug; Vardi, Moshe Y.; Weikum, Gerhard; Jiang, Xiaoyi; Bellon, Olga Regina Pereira; Goldof, Dmitry; Oishi Takeshi (Hrsg.): *Advances in Depth Image Analysis and Applications*. Berlin: Springer Verlag, 2013, S. 21–31
- [Fol94] Foley, James D.: *Grundlagen der Computergraphik: Einführung, Konzepte, Methoden*. Bonn: Addison-Wesley Verlag, 1994
- [FPB⁺16] Fürsattel, Peter; Placht, Simon; Balda, Michael; Schaller, Christian; Hofmann, Hannes; Maier, Andreas; Riess, Christian: *A Comparative Error Analysis of Current Time-of-Flight Sensors*. In: IEEE Transactions on Computational Imaging 2, Nr. 1, 2016, S. 27–41
- [FSK⁺14] Freedman, Daniel; Smolin, Yoni; Krupka, Eyal; Leichter, Ido; Schmidt, Mirko: *SRA: Fast Removal of General Multipath for ToF Sensors*. In: Fleet, David; Pajdla Tomas; Schiele, Bernt; Tuytelaars, Tinne (Hrsg.): *Computer Vision – ECCV 2014*. Cham: Springer International Publishing, 2014, S. 234–249
- [Fuc12] Fuchs, Stefan: *Calibration and Multipath Mitigation for Increased Accuracy of Time-of-Flight Camera Measurements in Robotic Applications*. Dissertation, Technische Universität Berlin, 2012

- [Gan02] Gandyra, Michael: *Entwicklung eines 3D-Sensors zur Form erfassung spiegelnder Freiformflächen auf Basis gemessener Oberflächennormalen für die CAD-Flächenrekonstruktion*. Dissertation, Universität Kaiserslautern, 2002
- [GBT⁺⁰²] Godin, Guy; Beraldin, J.-Angelo; Taylor, John; Cournoyer, Luc; Rioux, Marc; El-Hakim, Sabry F.; Baribeau, Réjean; Blais, François; Boulanger, Pierre; Domey, Jacques; Picard, Michel: *Active Optical 3D Imaging for Heritage Applications*. In: IEEE Computer Graphics and Applications 22, Nr. 5, 2002, S. 24–36
- [GDV18] GDV – Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V. (Hrsg.): *Klima im Container*. URL <http://www.tis-gdv.de/tis/containe/klima/klima.htm> – Abrufdatum 05.07.2018
- [GN10] Gommel, Christoph; Neugebauer, Mario: *Verfahren und Anordnung zur Leerraummessung für Lager- und Transporträume*. Patentschrift, Ubigrate GmbH (Anmelder), Veröffentlichungsnummer: EP2178035A1, 2010
- [GK07] Grossmann, Gerhard; Kaßmann, Monika: *Transportsichere Verpackung und Ladungssicherung: Ratgeber für Verpacker, Verlader und Transporteure*. Renningen: Expert Verlag, 2007
- [Gru12] Grund, Nico: *Rekonstruktion und Verarbeitung von Objekten und Szenen aus Kamerabildern*. Dissertation, Philipps-Universität Marburg, 2012
- [GSS15] Gasser, Tom Michael; Seeck, Andre; Smith, Bryant Walker: *Rahmenbedingungen für die Fahrerassistenzentwicklung*. In: WINNER, Winner, Hermann; Hakuli, Stephan; Lotz, Felix; Singer, Christina (Hrsg.): *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2015, S. 27–54
- [GVS18] Giancola, Silvio; Valenti, Matteo; Sala, Remo: *A Survey on 3D Cameras: Metrological Comparison of Time-of-Flight, Structured-Light and Active Stereoscopy Technologies*. Cham, Springer International Publishing, 2018
- [Güh02] Gühring, Jens: *3D-Erfassung und Objektrekonstruktion mittels Streifenprojektion*. Dissertation, Universität Stuttgart, 2002
- [Heb12] Hebel, Marcus: *Änderungsdetektion in urbanen Gebieten durch objektbasierte Analyse und schritthaltenden Vergleich von Multi-Aspekt ALS-Daten*. Dissertation, Technische Universität München, 2012
- [Hec95] Heckel, Werner: *Optische 3D-Konturerfassung und On-line-Biegewinkelmessung mit dem Lichtschnittverfahren*. München: Hanser Verlag, 1995
- [Heh11] Hohenberger, Peter: *Computerunterstützte Fertigung*. Berlin: Springer Verlag, 2011
- [Hei01] Heinol, Horst G.: *Untersuchung und Entwicklung von modulationslaufzeitbasierten 3D-Sichtsystemen*. Dissertation, Universität Siegen, 2001
- [Hen04] Henkies, André: *Entwurf und Optimierung fremdlichttoleranter Tiefenkamerasysteme auf der Basis indirekter Lichtlaufzeitmessung*. Dissertation, Universität Duisburg-Essen, 2004

- [Her17] Heredia Conde, Miguel: *Compressive Sensing for the Photonic Mixer Device*. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2017
- [HH03] Halfmann, Christoph; Holzmann, Henning: *Adaptive Modelle für die Kraftfahrzeugdynamik*. Berlin: Springer Verlag, 2003
- [HIT⁺15] Holz, Dirk; Ichim, Alexandru E.; Tombari, Federico; Rusu, Radu B.; Behnke, Sven: *Registration with the Point Cloud Library: A Modular Framework for Aligning in 3-D*. In: IEEE Robotics & Automation Magazine 22, Nr. 4, 2015, S. 110–124
- [HJW⁺17] Han, Xian-Feng; Jin, Jesse S.; Wang, Ming-Jie; Jiang, Wei; Gao, Lei; Xiao, Liping: *A review of algorithms for filtering the 3D point cloud*. In: Signal Processing: Image Communication 57, 2017, S. 103–112
- [HKK⁺13] Hutchison, David; Kanade, Takeo; Kittler, Josef; Kleinberg, Jon M.; Mattern, Friedemann; Mitchell, John C.; Naor, Moni; Nierstrasz, Oscar; Pandu Rangan, C.; Steffen, Bernhard; Sudan, Madhu; Terzopoulos, Demetri; Tygar, Doug; Vardi, Moshe Y.; Weikum, Gerhard; Grzegorzek, Marcin; Theobalt, Christian; Koch, Reinhard; Kolb, Andreas: *Time-of-Flight and Depth Imaging. Sensors, Algorithms, and Applications*. Berlin: Springer Verlag, 2013
- [HO16] Hofmann, Erik; Oettmeier, Katrin: *Zusammenhang zwischen Güterverkehrsleistung und BIP-Entwicklung*. In: Logistik & Fördertechnik Nr. 07–08, 2016, S. 46–47
- [Hof12] Hoffmann, Jörg: *Handbuch der Messtechnik*. München: Hanser Verlag, 2012
- [Hof17] Hofmann, Sabine: *Potential von LiDAR Mobile Mapping für hochgenaue Karten*. Dissertation, Deutsche Geodätische Kommission, München: Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, 2017
- [Hol15] Holtzhausen, Stefan: *Erfassungsplanung nach dem Optimierungsprinzip am Beispiel des Streifenprojektionsverfahrens*. Dissertation, Technische Universität Dresden, 2015
- [Hol17] Holz, Dirk: *Efficient 3D Segmentation, Registration and Mapping for Mobile Robots*. Dissertation, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, 2017
- [HSD18] Hompel, Michael ten; Schmidt, Thorsten; Dregger, Johannes: *Materialflusssysteme*. Berlin: Springer Verlag, 2018
- [Hus00] Hussmann, Stephan: *Schnelle 3D-Objektvermessung mittels PMD-, CMOS-Kombizeilensensor und Signalkompressions-Hardware*. Dissertation, Universität Siegen, 2000
- [Hüt16] Hüttner, Andrea: *Güterverkehr in Deutschland 2014*. In: WISTA: Wirtschaft und Statistik, Nr. 1, 2016, S. 47–62
- [HZ04] Hartley, Richard; Zisserman, Andrew: *Multiple View Geometry in Computer Vision*. Cambridge, Cambridge University Press, 2004

- [HZ08] Hartley, Richard; Zisserman, Andrew: *Multiple view geometry in Computer Vision*. Cambridge, Cambridge University Press, 2008
- [Ihd01] Ihde, Gösta B.: *Transport, Verkehr, Logistik: gesamtwirtschaftliche Aspekte und einzelwirtschaftliche Handhabung*. München: Verlag Franz Vahlen, 2001
- [Int19] Intel (Hrsg.): *RealSense LiDAR camera L515 – Produktdokumentation*. URL <https://www.intelrealsense.com/download/7691> – Abrufdatum: 04.12.2019
- [IST06] ISTA – International Safe Transit Association (Hrsg.): *Procedure 2B: Packaged-Products weighing over 150 lb*. East Lansing, MI, 2006
- [Jar83] Jarvis, Ray A.: *A Perspective on Range Finding Techniques for Computer Vision*. In: IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Nr. 2, 1983, S. 122–139
- [Jäh12] Jähne, Bernd: *Digitale Bildverarbeitung und Bildgewinnung*. Berlin: Springer Vieweg Verlag, 2012
- [JB97] Jiang, Xiaoyi; Bunke, Horst: *Dreidimensionales Computersehen: Gewinnung und Analyse von Tiefenbildern*. Berlin: Springer Verlag, 1997
- [Jeh80] Jehle, Claus-Uwe: *Kombinierter Verkehr: Erster Teil – Organiatorisch-Technische Entwicklung*. Berlin, Duncker und Humblot, 1980
- [JHG99] Jähne, Bernd; Haussecker, Horst; Geissler, Peter: *Handbook of computer vision and applications*. London: Academic Press, 1999
- [JHP09] Jansen, Rolf; Hustadt, Jan; Pietzarka, Stefan: *Analyse und Modellierung von Redistributionsnetzen*. In: Buchholz, Peter; Clausen Uwe (Hrsg.): *Große Netze der Logistik*. Berlin: Springer Verlag, 2009, S. 323–353
- [JL17] Janssen, Jürgen; Laatz, Wilfried: *Statistische Datenanalyse mit SPSS*. Berlin: Springer Verlag, 2017
- [JS18] Janz, Alexej; Schob, Uwe: *Hochautomatisiertes Lkw-Fahren auf der Autobahn und in der Stadt*. In: ATZ – Automobiltechnische Zeitschrift 120, Nr. 1, 2018, S. 72–76
- [JV12] Jansen, Rolf; Vukovic, Denis: *Risiken bei der Ladungssicherung mit Antirutschmatten*. In: Wolf-Kluthausen, Hanne (Hrsg.): *Logistik Jahrbuch 2012*. Korschenbroich: free beratung GmbH, 2012, S. 221–225
- [JV17] Jansen, Rolf; Vukovic, Denis: *Digitale Transformation des Stückguttransports*. In: Schletter, Jan; Dunckert, Ronald (Hrsg.): *Jahrbuch Logistik 2017*. Wuppertal: unikat Werbeagentur GmbH, 2017, S. 110–113
- [JYT⁺17] Jiao, Jichao; Yuan, Libin; Tang, Weihua; Deng, Zhongliang; Wu, Qi: *A Post-Rectification Approach of Depth Images of Kinect v2 for 3D Reconstruction of Indoor Scenes*. In: ISPRS International Journal of Geo-Information 6, 349, Nr. 11, 2017, S. 1–15
- [KAB⁺12] Kondermann, Daniel; Abraham, Steffen; Brostow, Gabriel; Förstner, Wolfgang; Gehrig, Stefan; Imaiya, Atsushi; Jähne, Bernd; Klose, Felix;

- Magnor, Marcus; Mayer, Helmut; Mester, Rudolf; Pajdla, Tomas; Reulke, Ralf; Zimmer, Henning: *On Performance Analysis of Optical Flow Algorithms*. In: Hutchison, David; Kanade, Takeo; Kittler, Josef; Kleinberg, Jon M.; Mattern, Friedemann; Mitchell, John C.; Naor, Moni; Nierstrasz, Oscar; Pandu Rangan, C.; Steffen, Bernhard; Sudan, Madhu; Terzopoulos, Demetri; Tygar, Doug; Vardi, Moshe Y.; Weikum, Gerhard; Dellaert, Frank; Frahm, Jan-Michael; Pollefeys, Marc; Leal-Taixé, Laura; Rosenhahn, Bodo (Hrsg.): *Outdoor and Large-Scale Real-World Scene Analysis*. Berlin: Springer Verlag, 2012, S. 329–355
- [Kah08] Kahlmann, Timo: *Range Imaging Metrology: Investigation, Calibration and Development*. Dissertation, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, 2008
- [Kaß11] Kaßmann, Monika: *Grundlagen der Verpackung – Leitfaden für die fächerübergreifende Verpackungsausbildung*. Berlin: Beuth Verlag, 2011
- [KBA06] KBA – Kraftfahrt-Bundesamt (Hrsg.): *Verkehr deutscher Lastkraftfahrzeuge (VD): Verkehrsaufkommen Jahr 2006*. Flensburg, 2006
- [KBA11] KBA – Kraftfahrt-Bundesamt (Hrsg.): *Verkehr deutscher Lastkraftfahrzeuge (VD): Verkehrsaufkommen Jahr 2010*. Flensburg, 2011
- [KBA16] Kunz, Andreas; Brogli, Luzius; Alavi, Ali: Interference measurement of kinect for xbox one. In: Kranzlmüller, Dieter; Klinker, Gudrun (Hrsg.): *Proceedings of the 22nd ACM Conference on Virtual Reality Software and Technology – VRST*. New York: ACM Press, 2016, S. 345–346
- [KBA18] KBA – Kraftfahrt-Bundesamt (Hrsg.): *Verzeichnis zur Systematisierung von Kraftfahrzeugen und ihren Anhängern (SVI)*. Flensburg, 2018
- [KBA19] KBA – Kraftfahrt-Bundesamt (Hrsg.): *Verkehr deutscher Lastkraftfahrzeuge (VD): Verkehrsaufkommen Jahr 2018*. Flensburg, 2019
- [KBR14] Kadambi, Achuta; Bhandari, Ayush; Raskar, Ramesh: *3D Depth Cameras in Vision – Benefits and Limitations of the Hardware*. In: Shao, Ling; Han, Jungong; Kohli, Pushmeet; Zhang, Zhengyou (Hrsg.): *Computer Vision and Machine Learning with RGB-D Sensors*. Cham: Springer International Publishing, 2014, S. 3–26
- [Kel16] Kellerhoff, Peter: *Über Grenzen hinaus denken*. In: VDI Nachrichten, Nr. 42, 2016, S. 4
- [KGPI2] Karel, Wilfried; Ghuffar, Sajid; Pfeifer, Norbert: *Modelling and Compensating Internal Light Scattering in Time of Flight Range Cameras*. In: *The Photogrammetric Record* 27, Nr. 138, 2012, S. 155–174
- [KH13] Kazhdan, Michael; Hoppe, Hugues: *Screened poisson surface reconstruction*. In: *ACM Transactions on Graphics* 32, Nr. 3, 2013, S. 1–13
- [KI08] Kahlmann, Timo; Ingensand, Hilmar: *Calibration and development for increased accuracy of 3D range imaging cameras*. In: *Journal of Applied Geodesy* 2, Nr. 1, 2008, S. 1–11
- [Kie12] Kienzler, Hans-Paul: *Einsatz- und Marktpotenzial neuer verbrauchseffizienter*

- [Kil10] Kille, Christian: *Güteraufkommen nach Branchen*. Köln: Josef Eul Verlag, 2010
- [KKS96] Klette, Reinhard; Koschan, Andreas; Schlüns, Karsten: *Computer Vision: Räumliche Information aus digitalen Bildern*. Wiesbaden: Vieweg Teubner Verlag, 1996
- [Koc98] Koch, Alexander W.: *Optische Messtechnik an technischen Oberflächen*. Renningen: Expert Verlag, 1998
- [Kri92] Krieg, Bernhard: *Automatisieren mit Optoelektronik: Bauteile, Funktionen, Anwendungen*. Würzburg: Vogel-Fachbuch Verlag, 1992
- [Kro18] Krone (Hrsg.): *Krone präsentiert intelligente Laderaumerkennung*. URL <https://www.krone-trailer.com/news/iaa-2018-special/iaa-neuheiten/krone-praesentiert-intelligente-laderaumerkennung/> – Abrufdatum: 19.11.2018
- [Kry15] Krystek, Michael: *Berechnung der Messunsicherheit: Grundlagen und Anleitung für die praktische Anwendung*. Berlin: Beuth Verlag, 2015
- [KSB15] Kurban, Rifat; Skuka, Florenc; Bozpolat, Hakki: Plane Segmentation of Kinect Point Clouds using RANSAC. In: The 7th International Conference on Information Technology, Al-Zaytoonah University of Jordan, 2015, S. 545–551
- [Lan00] Lange, Robert: *3D time of flight distance measurement with custom solid state image sensors in CMOS, CCD technology*. Dissertation, Universität Siegen, 2000
- [Lau16] Laux, Dennis: *Terrestrisches Laserscanning zur Quantifizierung von Trennflächenparametern für statistisch signifikante Discrete-Fracture-Network-Modelle*. Dissertation, Technische Universität Darmstadt, 2016
- [LB04] Léonardi, Jacques; Baumgartner, Michael: *CO₂ efficiency in road freight transportation: Status quo, measures and potential*. In: Transportation Research Part D: Transport and Environment 9, Nr. 6, 2004, S. 451–464
- [LBK04] Léonardi, Jacques; Baumgartner, Michael; Krusch, Oliver: *CO₂-Reduktion und Energieeffizienz im Straßengüterverkehr*. Endbericht, Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg, 2004
- [LBK05] Leonardi, Jacques; Baumgartner, Michael; Krusch, Oliver: *NESTOR 2: Nachhaltigkeitseffekte von Effizienzmaßnahmen im Straßengüterverkehr mit Fokus auf KEP-Dienste und Speditionskooperationen*. Endbericht, Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg, 2005
- [LFO16] Lawin, Felix Järemo; Forssén, Per-Erik; Ovrén, Hannes: *Efficient Multi-frequency Phase Unwrapping Using Kernel Density Estimation*. In: Leibe, Bastian; Matas, Jiri; Sebe, Nicu; Welling, Max (Hrsg.): Computer Vision – ECCV 2016: 14th European Conference, Amsterdam, 2016, S. 170–185
- [Lin10] Lindner, Marvin: *Calibration and Realtime Processing of Time-of-Flight Range Data*. Dissertation, Universität Siegen, 2010

- [LK07] Lindner, Marvin; Kolb, Andreas: *Calibration of the intensity-related distance error of the PMD TOF-camera*. In: Casasent, David P.; Hall, Ernest L.; Röning, Juha (Hrsg.): SPIE Proceedings, Intelligent Robots and Computer Vision XXV, 6764, 2007, S. 6764–6735
- [LK11] Lichti, Derek D.; Kim, Changjae: *A Comparison of Three Geometric Self-Calibration Methods for Range Cameras*. In: Remote Sensing 3, Nr. 5, 2011, S. 1014–1028
- [LMM⁺15] Lachat, E.; Macher, H.; Mittet, M.-A.; Landes, T.; Grussenmeyer, P.: *First experiences with Kinect V2 sensor for close range 3D modelling*. In: ISPRS – International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2015, S. 93–100
- [LML⁺15] Lachat, Elise; Macher, Hélène; Landes, Tania; Grussenmeyer, Pierre: *Assessment and Calibration of a RGB-D Camera (Kinect v2 Sensor) Towards a Potential Use for Close-Range 3D Modeling*. In: Remote Sensing 7, Nr. 10, 2015, S. 13070–13097
- [LNL⁺13] Lefloch, Damien; Nair, Rahul; Lenzen, Frank; Schäfer, Henrik; Streeter, Lee; Cree, Michael J.; Koch, Reinhard; Kolb, Andreas: *Technical Foundation and Calibration Methods for Time-of-Flight Cameras*. In: Hutchison, David; Kanade, Takeo; Kittler, Josef; Kleinberg, Jon M.; Mattern, Friedemann; Mitchell, John C.; Naor, Moni; Nierstrasz, Oscar; Pandu Rangan, C.; Steffen, Bernhard; Sudan, Madhu; Terzopoulos, Demetri; Tygar, Doug; Vardi, Moshe Y.; Weikum, Gerhard; Grzegorzek, Marcin; Theobalt, Christian; Koch, Reinhard; Kolb, Andreas (Hrsg.): Time-of-Flight and Depth Imaging – Sensors, Algorithms, and Applications. Berlin: Springer Verlag, 2013, S. 3–24
- [LS80] Lee, D. T.; Schachter, B. J.: *Two algorithms for constructing a Delaunay triangulation*. In: International Journal of Computer & Information Sciences 9, Nr. 3, 1980, S. 219–242
- [LST⁺12] Liimatainen, Heikki; Stenholm, Pekka; Tapiola, Petri; McKinnon, Alan: *Energy efficiency practices among road freight hauliers*. In: Energy Policy 50, 2012, S. 833–842
- [LSK⁺10] Lindner, Marvin; Schiller, Ingo; Kolb, Andreas; Koch, Reinhard: *Time-of-Flight sensor calibration for accurate range sensing*. In: Computer Vision and Image Understanding 114, Nr. 12, 2010, S. 1318–1328
- [Luh10a] Luhmann, Thomas: *Erweiterte Verfahren zur geometrischen Kamerakalibrierung in der Nahbereichsphotogrammetrie*. Habilitation, Deutsche Geodätische Kommission, München: Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, 2017
- [Luh10b] Luhmann, Thomas: *Nahbereichsphotogrammetrie: Grundlagen, Methoden und Anwendungen*. Berlin: Wichmann, 2010
- [Luh18] Luhmann, Thomas: *Nahbereichsphotogrammetrie: Grundlagen, Methoden, Beispiele*. Berlin: Wichmann, 2018
- [Lum04] Lumsden, Kent: *Truck masses and dimensions: Impact on transport efficiency*. Report for the 8th ACEA Scientific Advisory Group Meeting,

Brüssel, 2004

- [Mal79] Maluche, Christoph: *Entwicklung eines Kennzahlensystems für den Produktionsbereich auf der Basis sekundär-statistischer Daten*. Dissertation, Technische Hochschule Aachen, 1979
- [MBW⁺15] McKinnon, Alan; Browne, Michael; Whiteing, Anthony; Piecyk, Maja: *Green Logistics: Improving the Environmental Sustainability of Logistics*. London: Kogan Page, 2015
- [McK03] McKinnon, Alan C.: *Logistics and the Environment*. In: Hensher, David A.; Button, Kenneth J. (Hrsg.): *Handbook of Transport and the Environment*: Emerald Group Publishing Limited, 2003, S. 665–685
- [McK09] McKinnon, Alan C.: *Benchmarking road freight transport: Review of a government-sponsored programme*. In: Benchmarking: An International Journal 16, Nr. 5, 2009, S. 640–656
- [McK10] McKinnon, Alan: *European Freight Transport Statistics: Limitations, Misinterpretations and Aspirations*. Report for the 15th ACEA Scientific Advisory Group Meeting, Brüssel, 2010
- [McK12] McKinnon, Alan: *Improving the Sustainability of Road Freight Transport by Relaxing Truck Size and Weight Restrictions*. In: Evangelista, Pietro (Hrsg.): Supply chain innovation for competing in highly dynamic markets: Challenges and solutions. Hershey, PA: Business Science Reference, 2012, S. 185–198
- [McK15] McKinnon, Alan: *Opportunities for improving vehicle utilization*. In: McKinnon, Alan; Browne, Michael; Whiteing, Anthony; Piecyk, Maja (Hrsg.): *Green Logistics: Improving the Environmental Sustainability of Logistics*. London: Kogan Page, 2015, S. 243–261
- [Met16] Metrilus GmbH (Hrsg.): *MetriCam*. URL www.metricam.net – Abrufdatum 10.07.2016
- [Met19a] Metrilus GmbH (Hrsg.): *KeyAC – Software User´s Manual*. URL <https://www.metrilus.de/keyac/> – Abrufdatum 01.07.2019
- [Met19b] Metrixfreight (Hrsg.): *Produktspezifikationen und Produktdokumentation*. URL <http://www.metrixfreight.de/> – Abrufdatum: 11.12.2019
- [MF18] Molter, Benjamin; Fottner, Johannes: *Real-time Pallet Localization with 3D Camera Technology for Forklifts in Logistic Environments*. In: 2018 IEEE International Conference on Service Operations and Logistics, and Informatics (SOLI). IEEE, 2018, S. 297–302
- [MG07] McKinnon, Alan C.; Ge, Yongli: *Use of a synchronised vehicle audit to determine opportunities for improving transport efficiency in a supply chain*. In: International Journal of Logistics Research and Applications 7, Nr. 3, 2007, S. 219–238
- [Mic19] Microsoft Research (Hrsg.): *Azure Kinect DK: Produktdokumentation*. URL <https://aka.ms/kinectdocs> – Abrufdatum: 20.02.2019

- [Mod08] Modrow, Daniel: *Echtzeitfähige aktive Stereoskopie für technische und biometrische Anwendungen*. Dissertation. Technische Universität München, 2008
- [Mor78] More, Jorge J.: The Levenberg-Marquardt algorithm: Implementation and theory. In: Watson, G. A. (Hrsg.): Numerical Analysis: Proceedings of the Biennial Conference. Berlin: Springer Verlag, 1978, S. 105–116
- [MRB09] Marton, Zoltan Csaba; Rusu, Radu Bogdan; Beetz, Michael: *On fast surface reconstruction methods for large and noisy point clouds*. In: IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2009, S. 3218–3223
- [MSK*04] Ma, Yi; Soatto, Stefano; Košecká, Jana; Sastry, S. Shankar: *An Invitation to 3-D Vision*. New York, Springer Verlag, 2004
- [Müh17a] Mühl, Thomas: *Elektrische Messtechnik*. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2017
- [Müh17b] Mühl, Thomas: Messabweichung und Messunsicherheit. In: Mühl, Thomas (Hrsg.): *Elektrische Messtechnik*. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2017, S. 19–37
- [Mül11] Müller, Michael: *Nutzfahrzeuge: Treiber für eine offene Fahrzeugplattform – Der Weg zur Universal Onboard Unit*. In: VDI Wissensforum GmbH (Hrsg.): Truck, Bus, Van, Trailer – 11. Internationale Fachtagung Nutzfahrzeuge. Düsseldorf: VDI-Verlag, 2011, S. 357–380
- [Nag08] Nagl, Philipp: *Einflüsse des Ladekapazitätswachstums von Transportmitteln auf die Erstellung von Verkehrsleistungen im Verkehrsträgervergleich unter Fokussierung des Straßengüterverkehrs*. Dissertation, Wirtschaftsuniversität Wien, 2008
- [Nag11] Nagel, Arnfried: *Logistik im Kontext der Nachhaltigkeit: Ökologische Nachhaltigkeit als Zielgröße bei der Gestaltung logistischer Netzwerke*. Dissertation, Technische Universität Berlin, 2011
- [Nov20] Novick, David K.: *Market Survey of Airborne Small Unmanned Aircraft System Sensors*. Technical Report, USDOE National Nuclear Security Administration (NNSA), USA, 2020
- [Ope18] OpenCV.org: Open Source Computer Vision Library: Camera Calibration and 3D Reconstruction. URL https://docs.opencv.org/2.4.13.6/modules/calib3d/doc/camera_calibration_and_3d_reconstruction.html – Abrufdatum 20.06.2018
- [PB12] Pahlén, Pehr-Ola; Börjesson, Fredrik: *Measuring resource efficiency in long haul road freight transport*. In: NOFOMA 2012 – Proceedings of the 24th Annual Nordic Logistics Research Network Conference, 2012, S. 689–702
- [PCM¹⁵] Pinto, Andry Maykol; Costa, Paulo; Moreira, Antonio P.; Rocha, Luis F.; Veiga, Germano; Moreira, Eduardo: *Evaluation of Depth Sensors for Robotic Applications*. In: 2015 IEEE International Conference on Autonomous Robot Systems and Competitions (ICARSC), 2015, S. 139–143

- [PDM⁺14] Payne, Andrew; Daniel, Andy; Mehta, Anik; Thompson, Barry; Bamji, Cyrus S.; Snow, Dane; Oshima, Hideaki; Prather, Larry; Fenton, Mike; Kordus, Lou; O'Connor, Pat; McCauley, Rich; Nayak, Sheetal; Acharya, Sunil; Mehta, Swati; Elkhatib, Tamer; Meyer, Thomas; O'Dwyer, Tod; Perry, Travis; Chan, Vei-Han; Wong, Vincent; Mogallapu, Vishali; Qian, William; Xu, Zhanping: *A 512×424 CMOS 3D Time-of-Flight image sensor with multi-frequency photo-demodulation up to 130MHz and 2GS/s ADC*. In: IEEE (Hrsg.): 2014 IEEE International Solid-State Circuits Conference (ISSCC), 2014, S. 134–135
- [Pet13] Peters, Valerij: *Phänomenologische Modellierung und multistatische Simulation von Time-of-Flight 3D PMD Kameras*. Dissertation, Universität Siegen, 2013
- [Pfe19] Pfennig, Roland: *Nachhaltige Logistik als Säule eines integrierten Nachhaltigkeitsmanagements*. In: Englert, Marco; Ternès, Anabel (Hrsg.): *Nachhaltiges Management*. Berlin: Springer Verlag, 2019, S. 581–592
- [PFM⁺14] Placht, Simon; Fürsattel, Peter; Mengue, Etienne Assoumou; Hofmann, Hannes; Schaller, Christian; Balda, Michael; Angelopoulou, Elli: *RO-CHADE: Robust Checkerboard Advanced Detection for Camera Calibration*. In: Fleet, David; Pajdla, Tomas; Schiele, Bernt; Tuytelaars, Tinne (Hrsg.): Computer Vision – ECCV 2014. Cham: Springer International Publishing, 2014, S. 766–779
- [PMD19] PMDtechnologies (Hrsg.): *PMD Pico Monstar: Produktdokumentation*. URL <https://pmdtec.com/picofamily/> – Abrufdatum.16.08.2019
- [PK11] Puente León, Fernando; Kiencke, Uwe: *Messtechnik: Systemtheorie für Ingenieure und Informatiker*. Berlin: Springer Verlag, 2011
- [PKV⁺05] Page, David; Koschan, Andreas; Voisin, Sophie; Ali, Ngozi; Abidi, Mongi: *3D CAD model generation of mechanical parts using coded pattern projection and laser triangulation systems*. In: Assembly Automation 25, Nr. 3, 2005, S. 230–238
- [PLB12] Pears, Nick; Liu, Yonghuai; Bunting, Peter: *3D Imaging, Analysis and Applications*. London, Springer Verlag, 2012
- [Poe12] Poenick, Olaf: *Projekt IMOTRIS: Intermodales Transport Routing Informations-System*. Schlussbericht, Förderinitiative "Innovative Seehafen-technologien II (ISETEC II)"; Fraunhofer Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung; Magdeburg, 2012
- [Pom16] Pomaska, Günter: *Bildbasierte 3D-Modellierung – Vom digitalen Bild bis zum 3D-Druck*. Berlin: Wichmann, 2016
- [PP15] Pagliari, Diana; Pinto, Livio: *Calibration of Kinect for Xbox One and Comparison between the Two Generations of Microsoft Sensors*. In: Sensors 15, Nr. 11, 2015, S. 27569–27589
- [PRC97] Premkumar, G.; Ramamurthy, K.; Crum, M.: *Determinants of EDI adoption in the transportation industry*. In: European Journal of Information Systems 6, Nr. 2, 1997, S. 107–121

- [PS12] Prokop, Günther; Stoller, André: *Der Güterverkehr von morgen: LKWs zwischen Transporteffizienz und Sicherheit*. Berlin: Heinrich-Böll-Stiftung, 2012
- [PSB⁺15] Prasse, C.; Stenzel, J.; Böckenkamp, A.; Rudak, B.; Lorenz, K.; Weichert, F.; Müller, H.; Hompel, M. ten: *New Approaches for Singularization in Logistic Applications Using Low Cost 3D Sensors*. In: Mason, Alex; Mukhopadhyay, Subhas Chandra; Jayasundera, Krishanthi Padmarani (Hrsg.): *Sensing Technology: Current Status and Future Trends IV*. Cham: Springer International Publishing, 2015, S. 191–215
- [Pte19] PTERNEAS, Vangos (Hrsg.): *Measuring Distances using Kinect – The Right Way*. URL <https://pterneas.com/2016/08/11/measuring-distances-kinect/> – Abrufdatum 06.02.2019
- [Pue15] Puente León, Fernando: *Messtechnik*. Berlin: Springer Verlag, 2015
- [RCM12] Rizet, Christophe; Cruz, Cecilia; Mbacké, Mariame: *Reducing Freight Transport CO₂ Emissions by Increasing the Load Factor*. In: Procedia – Social and Behavioral Sciences 48, 2012, S. 184–195
- [RF06] Remondino, Fabio; Fraser, Clive: *Digital camera calibration methods: Considerations and comparisons*. In: Proceedings of the ISPRS Commission V Symposium, Dresden, 2006
- [Ric10] Richter, Klaus: *TransMat – Lokaler Transportauftragsmarkt für selbständige Nachauftragnehmer der letzten Meile*. Schlussbericht; Förderinitiative "Intelligente Logistik im Güter- und Wirtschaftsverkehr", Magdeburg, 2010
- [RL01] Rusinkiewicz, S.; Levoy, M.: *Efficient variants of the ICP algorithm*. In: Proceedings Third International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling, Quebec, 2001, S. 145–152
- [Rus09] Rusu, Radu Bogdan: *Semantic 3D object maps for everyday manipulation in human living environments*. Dissertation, Technische Universität München, 2009
- [San17a] Sandwall, Peter: *Survey of Kinect v2 Applied to Radiotherapy Patient Positioning*. In: Cancer therapy & Oncology International Journal 8, Nr. 1, 2017, S. 1–8
- [San17b] Santén, Vendela: *Towards more efficient logistics: Increasing load factor in a shipper's road transport*. In: The International Journal of Logistics Management 28, Nr. 2, 2017, S. 228–250
- [Sar99] Sardemann, G.: *Das Kyoto-Protokoll vor dem Hintergrund aktueller Abschätzungen zum Stand und der Entwicklung weltweiter Treibhausgasemissionen*. In: TATuP – Zeitschrift für Technikfolgenabschätzung in Theorie und Praxis 8, Nr. 2, 1999, S. 13–26
- [Sch89] Schüßler, Wolfram: *Ladungssicherung durch Stretchen oder Schrumpfen: Entwicklung eines Entscheidungsmodells zur Auswahl anforderungsge-rechter Ladungssicherungsmaßnahmen*. Schriftenreihe Transport- und Verpackungslogistik, Band 2. Frankfurt: Deutscher Fachverlag, 1989

- [Sch04] Schulz, Wolfgang H.: *Industrieökonomik und Transportsektor: Marktdynamik und Marktanpassungen im Güterverkehr*. Köln, Kölner Wissenschafts-Verlag, 2004
- [Sch05] Schreer, Oliver: *Stereoanalyse und Bildsynthese*. Berlin: Springer Verlag, 2005
- [Sch09] Schneider, Danilo: *Geometrische und stochastische Modelle für die integrierte Auswertung terrestrischer Laserscannerdaten und photogrammetrischer Bilddaten*. Dissertation, Deutsche Geodätische Kommission, München: Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, 2009
- [Sch11] Schaller, Christian: *Time-of-flight – A New Modality for Radiotherapy*. Dissertation, Universität Erlangen-Nürnberg, 2011
- [Sch15] Schöpker, Ulrich: *Fracht und Trailer immer in Echtzeit – volle Transparenz in der Supply Chain*. In: Voß, Peter H. (Hrsg.): Logistik – Eine Industrie, die (sich) bewegt. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2015, S. 55–62
- [SCK16] Schwedes, Oliver; Canzler, Weert; Knie, Andreas: *Handbuch Verkehrspolitik*. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2016
- [SH12] Shirani, Mohsen; Hosseini, Vafa: *Fill Rate Measurement: Road Freight Transport*. Lap Lambert Academic Publishing, 2012
- [SHB⁺99] Schwarte, Rudolf; Heinol, Horst G.; Buxbaum, Bernd; Ringbeck, Thorsten; Xu, Zhanping; Hartmann, Klaus: *Principles of Three-Dimensional Imaging Techniques*. In: Jähne, Bernd; Haussecker, Horst; Geissler, Peter (Hrsg.): Handbook of computer vision and applications. London: Academic Press, 1999, S. 463–484
- [SLC⁺15] Steward, Jeremy; Lichti, Derek; Chow, Jacky; Ferber, Reed; Osis, Sean: *Performance Assessment and Calibration of the Kinect 2.0 Time-of-Flight Range Camera for Use in Motion Capture Applications*. In: Proceedings of the Fig Working Week. Sofia, 2015
- [SLK15] Sarbolandi, Hamed; Lefloch, Damien; Kolb, Andreas: *Kinect range sensing: Structured-light versus Time-of-Flight Kinect*. In: Computer Vision and Image Understanding 139, 2015, S. 1–20
- [SMB13] Seidel, Saskia; Müller, Stephan; Blanquart Corinne: Güterverkehre des Handels: Eine Auswertung der KiD 2010 als Beitrag zur Güterverkehrssystemanalyse. In: ClauseN, Uwe; Thaller, Carina (Hrsg.): Wirtschaftsverkehr 2013: Datenerfassung und verkehrssträgerübergreifende Modellierung des Güterverkehrs als Entscheidungsgrundlage für die Verkehrspolitik. Berlin: Springer Verlag, 2013, S. 110–124
- [SK14] Sommer, Klaus-Dieter; Kessel, Rüdiger: *Messunsicherheit*. In: Tränkler, Hans-Rolf; Reindl, Leonhard M. (Hrsg.): Sensortechnik. Berlin: Springer Verlag, 2014, S. 21–53
- [SO10] Steyer, Bernd; Overmeyer, Ludger: *Berührungslose Oberflächenerfassung mittels PMD-Kameratechnologie im Braunkohletagebau*. In: Logistics Journal Proceedings, Vol. 06, 2010

- [SO14] Sell, John; O'Connor, Patrick: *The Xbox One System on a Chip and Kinect Sensor*. In: IEEE Micro 34, Nr. 2, 2014, S. 44–53
- [STD09] Sansoni, Giovanna; Trebeschi, Marco; Docchio, Franco: *State-of-The-Art and Applications of 3D Imaging Sensors in Industry, Cultural Heritage, Medicine, and Criminal Investigation*. In: Sensors 9, Nr. 1, 2009, S. 568–601
- [Str02] Stricker, Didier: *Computer-Vision-basierte Tracking- und Kalibrierungsverfahren für augmented reality*. Dissertation, Technische Universität Darmstadt, 2002
- [Str08] Strand, Marcus: *Autonome 3D-Umweltmodellierung von Innenräumen auf Basis von dichten Tiefenbildern*. Dissertation, Universität Karlsruhe, 2008
- [Sus05] Sussman, Joseph M.: *Perspectives on Intelligent Transportation Systems (ITS)*. Springer US Verlag, 2005
- [SWK07] Schnabel, R.; Wahl, R.; Klein, R.: *Efficient RANSAC for Point-Cloud Shape Detection*. In: Computer Graphics Forum 26, Nr. 2, 2007, S. 214–226
- [Sys90] Syska, Andreas: *Kennzahlen für die Logistik*. Berlin: Springer Verlag, 1990
- [TH17] Tsai, Chi-Yi; Huang, Chih-Hung: *Indoor Scene Point Cloud Registration Algorithm Based on RGB-D Camera Calibration*. In: Sensors 17, Nr. 8, 2017, 1874
- [Tiz89] Tiziani, Horst: *Optical 3-D Measurement Techniques*. In: Gruen, A.; Kahmen, Heribert (Hrsg.): *Optical 3-D measurement techniques: Applications in inspection, quality control, and robotics*. Karlsruhe: Wichmann, 1989, S. 3–21
- [TS97] Tilanus, Bernhard; Samuelsson, Anders: *A framework efficiency model for goods transportation, with an application to regional less-than-truckload distribution*. In: Transport Logistics 1, Nr. 2, 1997, S. 139–151
- [Tsa87] Tsai, R.: *A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses*. In: IEEE Journal on Robotics and Automation 3, Nr. 4, 1989, S. 323–344
- [Tya81] Tyan, S. G.: *Median Filtering: Deterministic Properties*. In: Two-Dimensional Digital Signal Processing II: Transforms and Median Filters. Berlin: Springer Verlag, 1981, S. 197–217
- [UBA19] UBA – Umweltbundesamt: *Trendtabellen Treibhausgase 1990–2017*. URL <https://www.umweltbundesamt.de/dokument/trendtabellen-treibhausgase-1990–2017> – Abrufdatum: 14.06.2019
- [Ver19] Verkehrs rundschau (Hrsg.): *Telematik-Spezial: Tracking & Tracing 4.0 – Telematik und IT für Speditionen*. München: Verlag Heinrich Vogel, 2019
- [VFA⁺17] Villena-Martínez, Víctor; Fuster-Guilló, Andrés; Azorín-López, Jorge; Saval-Calvo, Marcelo; Mora-Pascual, Jerónimo; García-Rodríguez, José; García-García, Alberto: *A Quantitative Comparison of Calibration Meth-*

- ods for RGB-D Sensors Using Different Technologies.* In: Sensors 17, 2017, 243
- [VMC97] Várdy, Tamás; Martin, Ralph R.; Cox, Jordan: *Reverse engineering of geometric models – an introduction.* In: Computer-Aided Design 29, Nr. 4, 1997, S. 255–268
- [VMC⁺14] Vianello, A.; Michielin, F.; Calvagno, G.; Sartor, P.; Erdler, O.: *Depth images super-resolution: An iterative approach.* In: 2014 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP), Paris, 2014, S. 3778–3782
- [WBS15] Wasenmüller, Oliver; Bleser, Gabriele; Stricker, Didier: *Combined Bilateral Filter for Enhanced Real-time Upsampling of Depth Images.* In: Proceedings of the 10th International Conference on Computer Vision Theory and Applications, Berlin, Science and Technology Publications, 2015, S. 5–12
- [WHL⁺15] Winner, Hermann; Hakuli, Stephan; Lotz, Felix; Singer, Christina: *Handbuch Fahrerassistenzsysteme.* Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2015
- [Wie15] Wiedemeyer, Thimo: *IAI Kinect2: Kinect2 Calibration URL*
https://github.com/code-iai/iai_kinect2 – Abrufdatum 05.06.2016
- [Wil00] Wilke, Wilhelm: *Segmentierung und Approximation großer Punktwolken.* Dissertation, Technische Universität Darmstadt, 2000
- [Wio01] Wiora, Georg: *Optische 3D-Messtechnik Präzise Gestaltvermessung mit einem erweiterten Streifenprojektionsverfahren.* Dissertation, Universität Heidelberg, 2001
- [WS17] Wasenmüller, Oliver; Stricker, Didier: *Comparison of Kinect V1 and V2 Depth Images in Terms of Accuracy and Precision.* In: Chen, Chu-Song; Lu, Jiwen; Ma, Kai-Kuang (Hrsg.): Computer Vision – ACCV 2016 Workshops. Lecture Notes in Computer Science, Taipei, Springer International Publishing, 2017, S. 34–45
- [Zan18] Zanker, Claus: *Branchenanalyse Logistik: Der Logistiksektor zwischen Globalisierung, Industrie 4.0 und Online-Handel.* Düsseldorf: Hans-Böckler-Stiftung, 2018
- [ZMD⁺16] Zanuttigh, Pietro; Marin, Giulio; Dal Mutto, Carlo; Dominio, Fabio; Minotto, Ludovico; Cortelazzo, Guido Maria: *Time-of-Flight and Structured Light Depth Cameras.* Cham: Springer International Publishing, 2016
- [ZMM⁺15] Zennaro, S.; Munaro, M.; Milani, S.; Zanuttigh, P.; Bernardi, A.; Ghidoni, S.; Menegatti, E.: *Performance evaluation of the 1st and 2nd generation Kinect for multimedia applications.* In: IEEE International Conference on Multimedia and Expo (ICME), Turin, 2015, S. 1–6
- [Zha00] Zhang, Zhengyou: *A flexible new technique for camera calibration.* In: IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence 22, Nr. 11, 2000, S. 1330–1334

- [Zha98] Zhang, Zhengyou: *A Flexible New Technique for Camera Calibration*. In: Microsoft Research (Hrsg.): Technical Report MSR-TR-98-71. Redmond, 1998
- [ZHJ19] Zhang, Chenyang; Huang, Teng; Zhao, Qiang: *A New Model of RGB-D Camera Calibration Based On 3D Control Field*. In: Sensors 19, 2019, 5082



O H N E P R O T O T Y P G E H T N I C H T S I N S E R I E .

Unser Podcast ist das Werkzeug, mit dem Sie Ihre Karriere in allen Phasen entwickeln – vom Studium bis zum Chefsessel. Egal, ob Sie Ingenieur*in, Mechatroniker*in oder Wissenschaftler*in sind: Prototyp begleitet Sie. Alle 14 Tage hören Sie die Redaktion von INGENIEUR.de und VDI nachrichten im Gespräch mit prominenten Gästen.

INGENIEUR.de
TECHNIK - KARRIERE - NEWS



PROTOTYP

Karriere-Podcast

JETZT REINHÖREN UND KOSTENFREI ABBESTELLEN:
[WWW.INGENIEUR.DE/PODCAST](http://www.ingenieur.de/podcast)

.....
IN KOOPERATION MIT VDI NACHRICHTEN

Die Reihen der Fortschritt-Berichte VDI:

- 1 Konstruktionstechnik/Maschinenelemente
- 2 Fertigungstechnik
- 3 Verfahrenstechnik
- 4 Bauingenieurwesen
- 5 Grund- und Werkstoffe/Kunststoffe
- 6 Energietechnik
- 7 Strömungstechnik
- 8 Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik
- 9 Elektronik/Mikro- und Nanotechnik
- 10 Informatik/Kommunikation
- 11 Schwingungstechnik
- 12 Verkehrstechnik/Fahrzeugtechnik
- 13 Fördertechnik/Logistik
- 14 Landtechnik/Lebensmitteltechnik
- 15 Umwelttechnik
- 16 Technik und Wirtschaft
- 17 Biotechnik/Medizintechnik
- 18 Mechanik/Bruchmechanik
- 19 Wärmetechnik/Kältetechnik
- 20 Rechnerunterstützte Verfahren (CAD, CAM, CAE CAQ, CIM ...)
- 21 Elektrotechnik
- 22 Mensch-Maschine-Systeme
- 23 Technische Gebäudeausrüstung

ISBN 978-3-18-305913-3