

# **Auslegung einer multispektralen Kameraanordnung für einen automobilen Einsatz**

Dem Fachbereich Maschinenbau  
an der Technische Universität Darmstadt  
zur  
Erlangung des Grades eines Doktor - Ingenieur (Dr.-Ing.)  
genehmigte

D i s s e r t a t i o n

vorgelegt von

**Dipl.-Ing. Thomas Weidner**

aus Leipzig

Berichterstatter:	Prof. Dr. rer. nat. Hermann Winner
Mitberichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Kurt Landau
Tag der Einreichung:	07.12.2004
Tag der mündlichen Prüfung:	08.02.2005

Darmstadt 2004  
D17



## Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Doktorandentätigkeit in der Fahrzeugforschung der BMW Group in München. Sie wurde von mir an der Technischen Universität Darmstadt als Dissertation eingereicht.

Mein ganz besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. rer. nat. H. Winner, Leiter des Fachgebietes für Fahrzeugtechnik an der Technischen Universität Darmstadt, für die wissenschaftliche Betreuung der Arbeit. Durch die jederzeit konstruktive und faire Zusammenarbeit mit ihm konnte ich mich sowohl fachlich als auch persönlich weiterentwickeln. Ich danke ihn für die wertvollen Hinweise, Anregungen und sein Engagement.

Weiterhin danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. K. Landau, Leiter des Institutes für Arbeitswissenschaft an der Technischen Universität Darmstadt, für die Übernahme des Korreferates. Herrn Prof. Dr.-Ing. H. Schürmann danke ich für die Übernahme des Vorsitzes im Promotionsausschuss.

Ganz besonders und herzlich möchte ich Herrn Dipl.-Phys. W. Hahn für die herausragende Betreuung seitens der BMW Group danken. Seine wertvollen fachlichen Anregungen und Tips sowie die sehr gute persönliche Zusammenarbeit haben entscheidend zum Gelingen der Arbeit beigetragen. Er war und ist mir nicht nur ein sehr guter Kollege, sondern auch ein Freund über die Arbeit hinaus.

Herrn Dr. phil. J. Schumann möchte ich für die Unterstützung bei der Vorbereitung, Durchführung und Auswertung der Versuche danken.

Darüber hinaus möchte ich mich bei den Kollegen der BMW Group bedanken, die mich durch ihre Mitarbeit unterstützt und mir die notwendigen Freiräume geschaffen haben. Von diesen Kollegen möchte ich Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. R. Freymann, Herrn Dr.-Ing. D. Wisselmann, Herrn Dr. phil. K. Bengler, Herrn H. Barbian, Herrn H. Hanus und Herrn H. Dumke danken.

Ganz besonders danke ich meiner Freundin Mandy Frenkel, M.A. für die stetige Unterstützung, die Geduld und das mir entgegengebrachte Verständnis. Durch sie habe ich besonders in den letzten Monaten die notwendigen Freiräume und die notwendige Kraft bis zur Fertigstellung der Arbeit erhalten.

An dieser Stelle möchte ich meinen Eltern danken, die mich während meiner Promotion sowohl materiell als auch ideell unterstützt und durch ihr stetiges Interesse in meiner Motivation bestärkt haben.

## **Widmung**

Diese Arbeit widme ich meinen Eltern

Dr. oec. Editha Weidner und Dipl.-Ing. Werner Weidner

und meiner Freundin

Mandy Frenkel, M.A.

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1. Motivation der Arbeit . . . . .	2
1.2. Ziel der Arbeit . . . . .	3
1.3. Aufbau der Arbeit . . . . .	4
<b>2. Vorbetrachtungen</b>	<b>7</b>
2.1. Physikalische Grundlagen . . . . .	7
2.2. Definitionen . . . . .	10
2.3. Stand der Technik: Systeme zur Sichtverbesserung bei Nacht . . . . .	12
2.3.1. Aufbau von Nachtsichtsystemen . . . . .	13
2.3.2. Kamertechnologie - Sensorik zur bildhaften Fahrumgebungserfassung . .	15
2.3.3. Displaytechnologien . . . . .	19
2.3.4. Untersuchungen zur Nutzung von Nachtsichtsystemen . . . . .	21
2.4. Stand der Technik: Verfahren der Bildfusion . . . . .	22
2.4.1. Einsatzgebiete der Bildfusion . . . . .	23
2.4.2. Algorithmen zur Bildfusion . . . . .	25
2.4.3. Abschätzung des Berechnungsaufwandes . . . . .	31
2.5. Motivation der Bildfusion für Nachtsichtanwendungen im Automobil . . . . .	33
2.6. Fazit . . . . .	35
<b>3. Geometrische Modellierung der multispektralen Kameraanordnung</b>	<b>37</b>
3.1. Modellierung der Objektabbildung eines Dualkamerasystems . . . . .	38
3.1.1. Koordinatentransformation . . . . .	38
3.1.2. Einzelkamarasystem . . . . .	41
3.1.3. Bestimmung des gemeinsamen Gesichtsfelds . . . . .	45
3.2. Optimierung der Bildausrichtung zur Versatzminimierung . . . . .	49
3.2.1. Bestimmung der optimalen Transformationsmatrix . . . . .	49
3.2.2. Bedeutung und Abhängigkeit der Matrixelemente . . . . .	53
3.2.3. Übertragung der Matrixelemente in die Ausrichtungsparameter . . . . .	54
3.2.4. Einfluss der Registrierentfernung auf die Ausrichtungsmatrix . . . . .	55
3.3. Betrachtung des Ausrichtungsfehlers . . . . .	56
3.3.1. Allgemeine Bestimmung des Ausrichtungsfehlers . . . . .	56
3.3.2. Fehlersensitivität des Versatzfehlers . . . . .	57
3.4. Messtechnische Validierung des Modells . . . . .	62
3.4.1. Ableitung des Validierungskriteriums . . . . .	62
3.4.2. Versuchsaufbau und Versuchsablauf . . . . .	66
3.4.3. Messergebnisse . . . . .	68
3.4.4. Auswertung und Schlussfolgerungen . . . . .	69
3.5. Anwendung des Modells . . . . .	78
3.5.1. Bestimmung des Parameterraums für den Kameraversatz . . . . .	79

---

3.5.2. Auslegung eines Dualkamerasystems . . . . .	83
3.6. Räumliche Digitalisierung der Bildinformation . . . . .	88
3.7. Fazit . . . . .	94
<b>4. Bestimmung des maximalen Abbildungsversatzes</b>	<b>96</b>
4.1. Motivation der Betrachtungen . . . . .	96
4.2. Aufbau und Ablauf des Experimentes . . . . .	97
4.3. Ergebnisse . . . . .	99
4.4. Auswertung und Diskussion . . . . .	102
4.5. Fazit . . . . .	103
<b>5. Testsystem zur Darstellung der Bildfusion</b>	<b>104</b>
5.1. Aufbau des Testsystems im Versuchsfahrzeug . . . . .	104
5.1.1. Zeitliche Randbedingungen . . . . .	104
5.1.2. Hardwarearchitektur und Fahrzeugaufbau . . . . .	105
5.1.3. Ableitung und Optimierung der Systemarchitektur . . . . .	107
5.1.4. Softwarearchitektur . . . . .	114
5.2. Ablauf der Untersuchung . . . . .	116
5.2.1. Kalibrierung der eingesetzten Kamerasysteme . . . . .	118
5.2.2. Bestimmung des Einsatzbereiches des Testsystems . . . . .	119
5.2.3. Analyse der zeitlichen Abläufe im Testsystem . . . . .	120
5.3. Fazit . . . . .	121
<b>6. Ergebnisse der Untersuchung des Testsystems</b>	<b>123</b>
6.1. Parameter der eingesetzten Kamerasysteme . . . . .	123
6.2. Gegenüberstellung von Modell und Messung . . . . .	125
6.2.1. Ausrichtungparameter . . . . .	125
6.2.2. Verlauf des Versatzfehlers . . . . .	126
6.2.3. Fehlerbetrachtung . . . . .	128
6.3. Nutzungsbereich des Testsystems . . . . .	130
6.4. Überprüfung des Zeitkriteriums der Bildwiedergabe . . . . .	132
6.5. Übertragbarkeit der Ergebnisse . . . . .	135
6.6. Fazit . . . . .	135
<b>7. Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>137</b>
<b>Anhänge</b>	<b>139</b>
<b>A. Vollständige Lösung der Ausrichtungsmatrix</b>	<b>140</b>
<b>B. Versuchsanleitung</b>	<b>141</b>
<b>Literatur</b>	<b>143</b>

## Formelzeichenverzeichnis

### Lateinische Buchstaben

<b>A</b>	Autokorrelationsmatrix
<b>C</b>	Kreuzkorrelationsmatrix
$C_i^x$	horizontaler Aufpunkt der optischen Achse des Kamerasystems $i$
$C_i^y$	vertikaler Aufpunkt der optischen Achse des Kamerasystems $i$
$D_i^x$	horizontale Pixelgröße des Kamerasystems $i$
$D_i^y$	vertikale Pixelgröße des Kamerasystems $i$
<b>E</b>	Ausrichtungsfehler
$E_{MAX}$	maximaler Versatzfehler
$E_{REG}$	Registrierungsfehler
$\mathbf{F}_i(\cdot)$	Farbvektor des Kamerasystems $i$
$\mathbf{F}_f(\cdot)$	Farbvektor des fusionierten Bildes
$\mathbf{F}_i^g(\cdot)$	Farbvektor des geometrisch korrigierten Bildes des Kamerasystems $i$
$f_i$	Brennweite des Kamerasystems $i$
$\mathbf{H}^n$	affine Transformationsmatrix der Dimension $n$
$\mathbf{H}_P^2$	Transformationsmatrix zur Gesichtsfeldumschaltung und -nachführung
$\mathbf{H}_R^2$	Transformationsmatrix zur registrierten Bildausrichtung
$i$	Nummer des Kamerasystems, $i \in \{1, 2\}$
$\mathbf{K}^n$	Scherungsmatrix der Dimension $n$
$\mathbf{K}_i$	Parameter des Kamerasystems $i$
$L_j$	$j$ -ter Verweis auf die Adresse eines Farbvektors
$N_x$	Anzahl der horizontalen Teilabschnitte des gemeinsamen Gesichtsfelds
$N_y$	Anzahl der vertikalen Teilabschnitte des gemeinsamen Gesichtsfelds
$\mathbf{R}^n$	Rotationsmatrix der Dimension $n$
$\mathbf{S}^n$	Skalierungsmatrix der Dimension $n$
$s_p$	Skalierungsfaktor des Gesichtsfelds
<b>T</b>	Verschiebungsvektor bei Montage
$\mathbf{T}^n$	Verschiebungsmatrix der Dimension $n$
$T_x$	horizontale Verschiebung
$T_x^{max}$	maximale horizontale Verschiebung
$T_y$	vertikale Verschiebung
$T_y^{max}$	maximale vertikale Verschiebung
$T_z$	Verschiebung in der Tiefe
$T_z^{max}$	maximale Verschiebung in der Tiefe
$w_i^c$	Mass für die Kanalwichtung
$w_i^o(\cdot)$	objektives Wichtungsmass im Kamerabild $i$
$w_i(\cdot)$	Wichtungsmass im Kamerabild $i$ bestehend
$w_{max}^c$	maximales Mass für die Kanalwichtung

---

$w_{max}^o$	maximales objektives Wichtungsmass
$\mathbf{x}^A$	Vektor der Bildschirmkoordinaten mit ganzzahligen Koordinaten
$x^A$	ganzzahlige horizontale Bildschirmkoordinate
$\mathbf{x}^a$	Vektor der Bildschirmkoordinaten
$x^a$	horizontale Bildschirmkoordinate
$\mathbf{x}_i^c$	Vektor der Bildkoordinaten des Aufpunktes der optischen Achse im Bild des Kamerasystems $i$
$x_i^c$	horizontale Bildkoordinate des Aufpunktes der optischen Achse im Bild des Kamerasystems $i$
$X_i^c$	X-Koordinate eines Punktes im Koordinatensystem des Kamerasystems $i$
$\mathbf{X}_i^c$	Punkt im Koordinatensystem des Kamerasystems $i$
$\mathbf{x}_i^d$	Bildpunkt nach verzeichnungsbehafteter Projektion durch Kamerasystems $i$
$x_i^d$	horizontale Koordinate eines Bildpunktes nach verzeichnungsbehafteter Projektion durch Kamerasystem $i$
$\mathbf{x}_i^G$	ganzzahlige Objektkoordinaten im Bild des Kamerasystems $i$
$x_i^G$	ganzzahlige, horizontale Objektkoordinaten im Bild des Kamerasystems $i$
$\mathbf{x}_i^g$	Objektkoordinaten im Bild des Kamerasystems $i$
$x_i^g$	horizontale Objektkoordinaten im Bild des Kamerasystems $i$
$\mathbf{x}_i^n$	normalisierte Objektkoordinaten im Bild des Kamerasystems $i$
$x_i^n$	horizontale, normalisierte Objektkoordinaten im Bild des Kamerasystems $i$
$\mathbf{x}_i^r$	registrierte Objektkoordinaten im Bild des Kamerasystems $i$
$x_i^r$	horizontale, registrierte Objektkoordinaten im Bild des Kamerasystems $i$
$\mathbf{x}_i^u$	Bildpunkt nach verzeichnungsfreier Projektion durch Kamerasystems $i$
$x_i^u$	horizontale Koordinate eines Bildpunktes nach verzeichnungsfreier Projektion durch Kamerasystem $i$
$X_0$	X-Koordinate des Basispunktes für die Approximation des gemeinsamen Gesichtsfelds
$x_p$	horizontale Blickfeldverschiebung
$X_w$	X-Koordinate eines Punktes im Weltkoordinatensystem
$\mathbf{X}_w$	Punkt im Weltkoordinatensystem
$y^A$	ganzzahlige vertikale Bildschirmkoordinate
$y^a$	vertikale Bildschirmkoordinate
$y_i^c$	vertikale Bildkoordinate des Aufpunktes der optischen Achse im Bild des Kamerasystems $i$
$Y_i^c$	Y-Koordinate eines Punktes im Koordinatensystem des Kamerasystems $i$
$y_i^d$	vertikale Koordinate eines Bildpunktes nach verzeichnungsbehafteter Projektion durch Kamerasystem $i$
$y_i^G$	ganzzahlige, vertikale Objektkoordinaten im Bild des Kamerasystems $i$
$y_i^g$	vertikale Objektkoordinaten im Bild des Kamerasystems $i$
$y_i^n$	vertikale, normalisierte Objektkoordinaten im Bild des Kamerasystems $i$
$y_i^r$	vertikale, registrierte Objektkoordinaten im Bild des Kamerasystems $i$

---

$y_i^u$	vertikale Koordinate eines Bildpunktes nach verzeichnungsfreier Projektion durch Kamerasystem $i$
$Y_0$	Y-Koordinate des Basispunktes für die Approximation des gemeinsamen Gesichtsfelds
$y_p$	vertikale Blickfeldverschiebung
$Y_w$	Y-Koordinate eines Punktes im Weltkoordinatensystem
$Z_i^c$	Z-Koordinate eines Punktes im Koordinatensystem des Kamerasystems $i$
$Z_0$	Z-Koordinate des Basispunktes für die Approximation des gemeinsamen Gesichtsfelds
$Z_w$	Z-Koordinate eines Punktes im Weltkoordinatensystem
$Z_{CHAR}$	Charakteristische Entfernung
$Z_{MAX}$	maximale Objektentfernung
$Z_{MIN}$	minimale Objektentfernung
$Z_{OBJ}$	Entfernung zum Objekt
$Z_{REG}$	Registrierungsentfernung

### Griechische Buchstaben

$\Omega_c$	gemeinsames Gesichtsfeld beider Kamerasysteme
$\Omega_i$	Gesichtsfeld des Kamerasystems $i$
$\Omega_P$	durch Pyramidenstumpf approximiertes gemeinsames Gesichtsfeld beider Kamerasysteme
$\Delta X$	Abstand zwischen den Punkten in X-Richtung des Basispunktes innerhalb des gemeinsamen Gesichtsfelds
$\Delta Y$	Abstand zwischen den Punkten in Y-Richtung des Basispunktes innerhalb des gemeinsamen Gesichtsfelds
$\alpha_i$	Kippwinkel des Kamerasystems $i$ (Rotation um X-Achse)
$\beta_i$	Gierwinkel des Kamerasystems $i$ (Rotation um Y-Achse)
$\gamma_i$	Rollwinkel des Kamerasystems $i$ (Rotation um Z-Achse)
$\kappa_i$	Verzeichnungskoeffizient des Kamerasystems $i$
$\theta_i^h$	horizontaler Öffnungswinkel des Kamerasystems $i$
$\theta_i^v$	vertikaler Öffnungswinkel des Kamerasystems $i$

### Funktionen

$\mathcal{D}_i(\cdot)$	Funktion der Digitalisierung durch Kamerasystem $i$
$\mathcal{G}$	Funktion zur Transformation der Korrekturinformation
$\mathcal{K}_i(\cdot)$	Funktion der Kameraabbildung durch $i$
$\mathcal{P}_i(\cdot)$	Funktion der Projektion durch Kamerasystem $i$
$\mathcal{V}_i(\cdot)$	Funktion der Verzeichnung durch Kamerasystem $i$

## Abkürzungsverzeichnis

ABS	Anti-Blocking-System (engl.)
ACC	Adaptiv-Cruise-Control (engl.) nach ISO 15622
BST	Barium Strontium Titanat
CAN	Car Area Network (engl.)
CCD	Charge Coupled Device (engl.)
CMOS	Complementary Metal Oxid Sensor (engl.)
CSN	Center Surrounded Network
CT	Computer-Tomographie
DSC	Dynamic-Stability-Control (engl.)
DSP	Digitaler-Signal-Prozessor
FIR	Far Infra Red (engl.)
HDD	Head Down Display (engl.)
HSI	Hue Saturation Intensity (engl.): Farbwert, Sättigung, Intensität
HUD	Head Up Display (engl.)
HgCaTe	Quecksilber Kalzium Tellur
LUT	Look Up Table (engl.)
MIT	Massachusetts Institute of Technology (engl.)
MMX	Multi-Media-Extension (engl.)
MRT	Magnet-Resonanz-Tomographie
NIR	Near Infra Red (engl.)
NTSC	National Television System Committee, Videostandard in den USA und Kanada
PAL	Phase Alternation by Line, Videostandard für westeuropäische Länder
PCA	Principal Component Analysis (engl.)
RGB	Rot Grün Blau
SPOT	Bezeichnung für einen Satelliten mit multispektraler Sensorik
TNO	Niederländisches Forschungsinstitut
VES	Vision-Enhancement-System (engl.)

---

## Verzeichnis der Funktionsbezeichnungen

$\lfloor \cdot \rfloor$	Abrunden auf die nächstkleinste ganze Zahl
$\lceil \cdot \rceil$	Aufrunden auf die nächstgrößte ganze Zahl
$(\cdot)^{-1}$	Matrixinvertierung
$(\cdot)^T$	Transponierte Matrix

---



---

# 1. Einleitung

Die Verkehrsleistung in Deutschland hat sich in den letzten 50 Jahren um nahezu 1300% erhöht, wobei sich gleichzeitig die Anzahl der Verkehrsunfälle im gleichen Zeitraum „nur“ um 480% erhöht hat. Währenddessen ist die Anzahl der im Straßenverkehr getöteten Personen im Betrachtungszeitraum sogar um 55% Prozent zurückgegangen. Dieser Trend ist zu einem großen Teil auf Verbesserungen bei der passiven Sicherheit zurückzuführen [Freymann 2004].

Passive Sicherheit resultiert dabei vorrangig in einer Reduktion der Unfallschwere in der Post-Crash-Phase, während aktive Sicherheit die Unfallvermeidung zum Ziel hat [Freymann 2003]. Fahrerassistenzsysteme, die den Fahrer bei der Ausführung der Fahraufgabe unterstützen, zielen auf eine Erhöhung der Sicherheit oder eine Verbesserung des Komforts ab, und werden daher Sicherheits- bzw. Komfortsysteme genannt. Nach [Donges 1992] werden drei Ebenen bei der Ausführung der Fahraufgabe unterschieden: Stabilisieren, Führen und Navigieren seines Fahrzeuges. Wichtige Sicherheitssysteme sind dabei das ABS und DSC, die den Fahrer bei der Fahrzeugstabilisierung unterstützen und aktiv in die Fahrdynamik eingreifen können. Als ein Komfortsystem ist das ACC zu nennen, das den Fahrer bei der Längsführung, somit der Abstandshaltung und Geschwindigkeitsanpassung, unterstützt.

Durch die Übernahme von Routineaufgaben durch die Fahrerassistenzfunktionen wird der Fahrer entlastet. Bei der Nutzung der Funktionalität von Komfortsystemen ist er aber nicht von der Kontrolle der Systeme entbunden. Aufgrund der Entlastung kann die limitierte kognitive Leistung des Fahrers für andere Aufgaben, wie beispielsweise für eine Verbesserung der Voraussicht eingesetzt werden. Durch diese größere Voraussicht könnten somit diese Komfortsysteme auch einen möglichen Beitrag zur Unfallvermeidung liefern [Freymann 2004].

Eine Teilgruppe von Verkehrsunfällen stellen die Nachtunfälle dar. In [Langwieder 1997] wird diese Gruppe hinsichtlich der Unfallbeteiligten und des Unfallortes analysiert. Es zeigt sich, dass besonders Fußgänger nachts weitaus stärker als am Tag in tödlich verlaufende Unfälle verwickelt sind. Die Wahrscheinlichkeit, als Fußgänger bei Dunkelheit in einen tödlichen Verkehrsunfall verwickelt zu werden, liegt somit, bezogen auf die Fahrleistung, 2,4-mal höher als am Tag. Dabei liegt der Schwerpunkt mit ca. 80% auf Unfällen außerhalb geschlossener Ortschaften, wobei die Personen dunkel gekleidet waren [Langwieder 1997, Klapper 2003]. Nach [Langwieder 1997] liegen somit deutliche Hinweise vor, ungünstige Wahrnehmungsbedingungen als unfallauslösenden Faktor zu betrachten.

Um den Einfluss der reduzierten mentalen Leistungsfähigkeit des Fahrers bei Nachtunfällen und den der reduzierten Sichtbedingungen bei Nachtunfällen von einander zu isolieren, wurde das Verhältnis zwischen Tag- und Nachtunfall während der Sommer- und Winterzeitumstellung über eine Woche vor und eine Woche nach der Zeitumstellung analysiert [Sullivan 2001]. Das erhöhte Unfallrisiko für Fußgänger konnte durch diese Studie bestätigt werden, so dass sich hier wiederum Hinweise auf die ungünstigen Wahrnehmungsbedingungen und weniger die veränderte mentale Leistungsfähigkeit als unfallauslösenden Faktor andeuten.

---

## 1.1. Motivation der Arbeit

Da nach [Sivak 1996] die Mehrheit aller für das Autofahren notwendigen Informationen über den visuellen Kanal aufgenommen werden <sup>1</sup>, besteht in einer Unterstützung der visuellen Wahrnehmung eine weitere Möglichkeit, den Komfort (und die Sicherheit) durch eine Erhöhung der Vorausschau zu verbessern. Somit würde dem Fahrer von der Detektion bis zum Eintreten der potentiellen kritischen Situation mehr Zeit zur Verfügung stehen, angemessen auf diese Situation zu reagieren.

In [Rumar 1990] wird die zu späte Entdeckung von Umweltreizen als ein wichtiger Grund für Verkehrsunfälle nachgewiesen. Nach [Rumar 1990] treten dabei Fehler auf der Ebene der Wahrnehmung und der Ebene der Interpretation auf. Während der Wahrnehmung der Umgebungsreize kann das Übersehen oder das falsche Erkennen von Umgebungsreizen zu Fehlern in der Wahrnehmung führen. Auf der Ebene der Interpretation der wahrgenommenen Umgebungsreize kann es aufgrund falscher Erwartungen der in der aktuellen Situation stattfindenden Ereignisse zu verspäteter oder fehlerhafter Entdeckung der vorhandenen Objekte oder der Ereignisse führen. Aus der zu späten Entdeckung leitet sich nach [Rumar 1990] eine zu späte Reaktion ab.

Eine Möglichkeit, die Entdeckung von Umweltreizen zu verbessern, besteht in der Verbesserung der visuellen Ausleuchtung durch eine Optimierung der situationsabhängigen Scheinwerfercharakteristiken [Wördenweber 2003, Enders 2003]. Da aber die minimal zulässige Neigung vom Gesetzgeber auf 1% beschränkt wurde, um eine Blendung anderer Verkehrsteilnehmer zu verhindern, resultiert dies in Verbindung mit der Montagehöhe der Frontscheinwerfer in einer maximalen Leuchtweite [Opgen-Rhein 2003]. Die Detektionsweite von nicht selbstleuchtenden Objekten in der Fahrumgebung ist somit auf die Reichweite der Scheinwerfer begrenzt. Um eine Erhöhung der Detektionsweite zu erreichen, stehen als Alternative Systeme zur Verfügung, die nicht den visuellen Spektralbereich zur Objektdetektion in der Fahrumgebung nutzen. Diese Systeme werden als Nachtsichtsysteme bezeichnet.

Daher wird der Einsatz von Nachtsichtsystemen, die den Fahrer nachts beim Führen seines Fahrzeuges unterstützen, von zahlreichen Automobilherstellern und Zulieferern untersucht, vorbereitet oder bereits in den Serienmarkt eingeführt [Eichhorn 2001, Knoll 2001, Martinelli 2000].

Da die dargestellte Information nicht dem visuellen Eindruck des Fahrers entspricht, kann dies die Interpretation der dargestellten Information erschweren oder zu Widersprüchen führen. Besonders die räumliche Einordnung der im Nachtsichtbild dargestellten Objekte kann aufgrund der nicht vorhandenen visuellen Umgebungsinformation, die der Fahrer durch die Windschutzscheibe wahrnimmt, erschwert werden. Eine Möglichkeit, die Interpretation zu verbessern und die Lokalisierung von Objekten in der Fahrspur zu erleichtern, bietet die Überlagerung oder Bildfusion des Nachtsichtbildes mit der verfügbaren visuellen Information.

---

<sup>1</sup>Nach Expertenmeinung bis zu 90%



(a) objektreu ausgerichtetes und fusioniertes Bildpaar (b) nicht objektreu ausgerichtetes und fusioniertes Bildpaar

**Bild 1.1:** Beispiel zur objektreuen Ausrichtung

Untersuchungen von [Waxmann 1995, Scribner 2000, Essock 1999] betrachten die Bildfusion im Rahmen militärischer Anwendungen und stellen die Vorteile gegenüber den nicht fusionierten Bildern heraus. Die fusionierte Bilder kombinierten die Vorteile der betrachteten Spektralbereiche, wie beispielsweise die unterschiedlichen Detektionsentfernungen, die Darstellbarkeit von Farbinformation und die Einortbarkeit der dargestellten Umgebungsinformation. Bei diesen Betrachtungen werden die Einflüsse des Abstandes zwischen den eingesetzten Kamerasystemen auf die Wahrnehmbarkeit und Qualität der dargestellten Bildinformation nicht untersucht.

## 1.2. Ziel der Arbeit

Durch die Überlagerung des Nachtsichtbildes mit der visuellen Umgebungsinformation soll die Interpretierbarkeit von Nachtsichtbildern aus dem fernen Infrarot verbessert werden. Ein wichtiges Kriterium bei der Überlagerung beider Informationskanäle liegt in der räumlichen Relation zwischen den dargestellten Strahlungsanteilen der abgebildeten Objekte. Bei der Überlagerung ist die lokale Relation der detektierten Objekte in der Fahrumgebung zu beachten; ein Objekt, das sich, durch die Windschutzscheibe gesehen, vor einem zweiten befindet, muss auch im Bild als vorderstes Objekt erkennbar sein.

Desweiteren ist die geometrische Relation zwischen den zu fusionierenden Spektralanteilen zu beachten. Wird ein und dasselbe Objekt durch beide Informationskanäle detektiert, so ist dieses auch im überlagerten Bild als ein Objekt wiederzugeben. Die relative Lokalisation von Objekten, deren Detektion nur in einem Kanal erfolgt, hat auch im überlagerten Bild mit der relativen Position in der Fahrumgebung übereinzustimmen. Dieses Kriterium wird desweiteren als „Objekttrue“ bezeichnet. Bild 1.1 zeigt anschaulich an der Ausrichtung der Rücklichter des dargestellten Fahrzeugs die Beachtung (vgl. Bild 1.1(a)) und die deutliche Verletzung der Objekttrue (vgl. Bild 1.1(b)).

Die geometrische Auslegung eines Dualkamerasystems, das aus zwei optisch autonomen Kamerasystemen besteht, ist das zentrale Thema dieser Arbeit. Die geometrische Auslegung betrachtet den Montageabstand beider Kamerasysteme zueinander und den Einsatzbereich des gebildeten Dualkamerasystems. Zur Betrachtung der geometrischen Relationen werden, ausgehend von der geometrischen Modellierung eines Dualkamerasystems, Auslegungsvorschriften aufgestellt. Die Modellierung des Dualkamerasystems hat das Ziel, die optimale Ausrichtungsmatrix zu bestimmen, die auftretenden Abbildungsunterschiede abzuschätzen und aus diesen Erkenntnissen mithilfe des Maximalversatzes, der den freien Parameter bei der Auslegung bildet, den zulässigen Montageraum und den möglichen Einsatzbereich des Systems zu bestimmen. Anhand dieser Auslegungsvorschriften kann geprüft werden, ob zwei vorhandene Kamerasysteme zu einem Dualkamerasystem kombiniert werden können, bzw. wie diese Kamerasysteme angeordnet sein müssen, um einen gegebenen Einsatzbereich abzudecken, ohne den vorgegebenen Maximalversatz zu überschreiten.

Desweiteren wird eine Systemarchitektur entwickelt, durch die ein Nachtsichtsystem mit Bildfusion darstellbar ist. Im Verlauf der Entwicklung und Optimierung werden die Kriterien diskutiert, die den Aufbau und die Eigenschaften dieser Systemarchitektur beeinflussen. Durch die Realisierung eines Gesamtsystems sollen sowohl die Auslegungsvorschriften praktisch validiert und die Eigenschaften der Systemarchitektur überprüft werden.

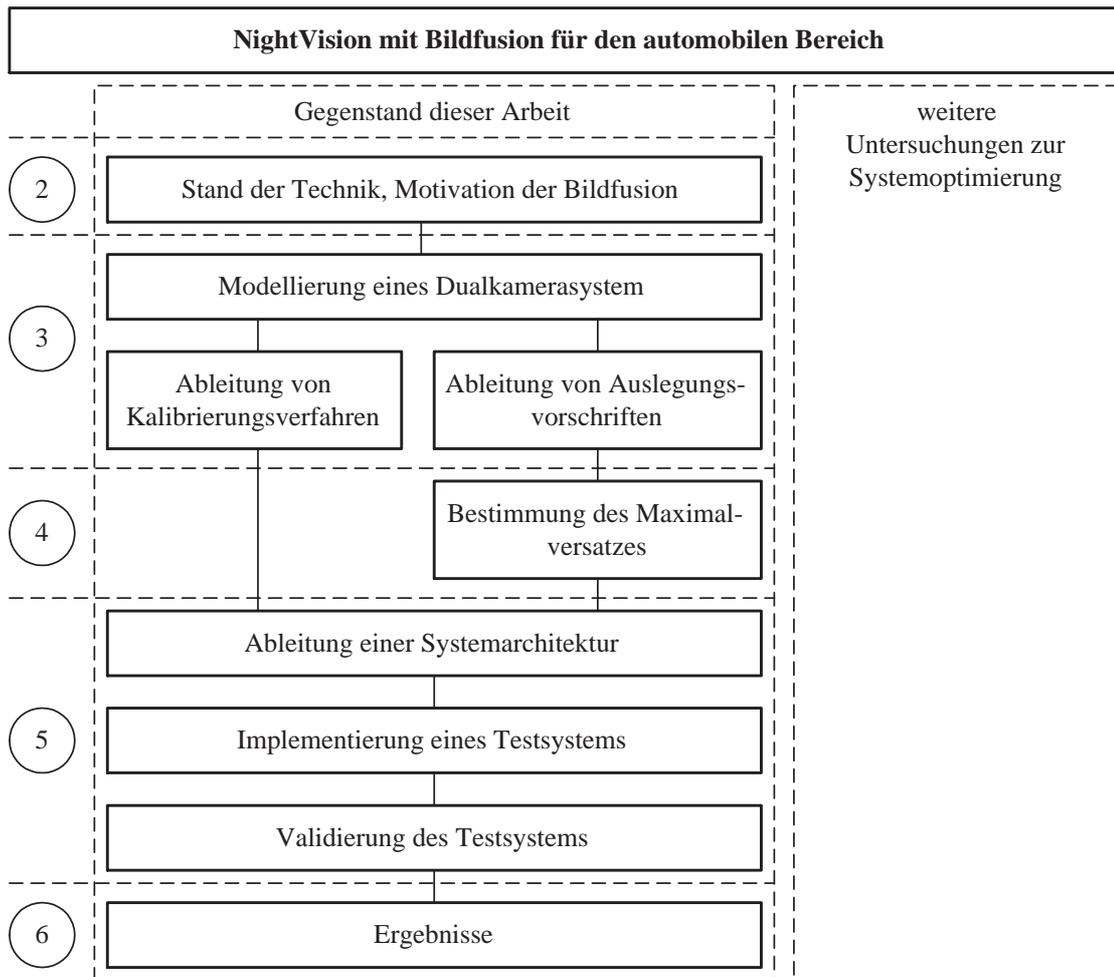
### **1.3. Aufbau der Arbeit**

Die Arbeit ist in sieben Kapitel gegliedert. Bild 1.2 stellt die Gesamtmethodik und die thematische Einordnung der Arbeit dar. Thematisch werden im Rahmen dieser Arbeit die technischen Aspekte eines Nachtsichtsystems mit Bildfusion betrachtet. Hierzu gehören die Entwicklung von Auslegungsvorschriften und die Ableitung einer möglichen Systemarchitektur.

Im zweiten Kapitel wird ausgehend von den physikalischen Grundlagen und von Definitionen detaillierter auf die aktuell verfügbaren Systeme zur Sichtverbesserung bei Dunkelheit eingegangen. Diese werden hinsichtlich ihres Aufbaus vorgestellt und bezüglich ihrer Eigenschaften gegenübergestellt. Bezüglich der physikalischen Eigenschaften dieser Systeme wird untersucht, welches dieser Nachtsichtsysteme sich besonders für einen Einsatz in einem System zur Bildfusion anbietet. Hierbei ist zu betrachten, welches der Nachtsichtsysteme das größte Verbesserungspotential bei der Bildfusion aufweist. Dazu ist das System zu wählen, dessen Eigenschaften die eines visuellen Kamerasystems am besten ergänzt.

Im Anschluss an diesen Abschnitt werden verfügbare Verfahren der Bildfusion vorgestellt und hinsichtlich eines automobilen Einsatzes bewertet. Als Kriterien für diese Gegenüberstellung wurden der Einfluss auf die Farbdarstellung und die Komplexität ausgewählt. Aus diesen Betrachtungen leiten sich Aussagen über eine mögliche Realisierbarkeit und die notwendigen Bedingungen für die Realisierung dieser Algorithmen zur Bildfusion ab.

---



**Bild 1.2:** Darstellung der Gesamtmethodik und der thematischen Einordnung der Arbeit

Im letzten Abschnitt des zweiten Kapitels wird untersucht, ob sich die Bildfusion auch aus einer wahrnehmungspsychologischen Betrachtung heraus, für einen automobilen Einsatz eignet und auf welche Faktoren zu beachten sind. Ausgehend vom Wahrnehmungsmodell nach [Wickens 2000] werden die Problemfelder bei der Interpretation von Nachtsichtbildern isoliert und daraus Möglichkeiten zur Verbesserung der Interpretierbarkeit abgeleitet. Hierbei wird besonders diskutiert, ob die Überlagerung des Nachtsichtbildes mit der visuellen Information, den Wahrnehmungsprozess unterstützen kann.

Bei den in Kapitel 2 vorgestellten Betrachtungen und Untersuchungen werden die räumlichen Relationen zwischen den durch die eingesetzten Kamerasysteme abgebildeten Objekte nicht betrachtet. Daher werden desweiteren die Einflüsse, die durch die versetzt montierten Kamerasysteme entstehen, im dritten Kapitel betrachtet.

Das dritte Kapitel hat die geometrische Modellierung des Dualkamerasystems zum Inhalt, um daraus Auslegungsrichtlinien zu entwickeln. Ausgehend von einem geometrischen Modell eines Einzelkamerasystems wird ein Modell für ein Dualkamerasystem aufgestellt, das die geometrischen Zusammenhänge zwischen den Objekten in der Umgebung und deren Abbildung durch die beiden, versetzt montierten Kamerasysteme nachbildet. Dieses Modell wird durch ein Experiment

validiert. Mithilfe des Modells soll für ein vorgegebenes Dualkamerasystem die optimale Ausrichtungsmatrix und der Ausrichtungsfehler in Abhängigkeit der Objektentfernung bestimmbar sein. Als Resultat dieser Betrachtungen stehen Auslegungsrichtlinien für die optimale Kalibrierentfernung und den maximalen radialen Abstand zwischen den eingesetzten Kamerasystemen. Mithilfe dieser Aussagen soll ein beliebiges Dualkamerasystem für einen vorgegebenen Einsatzbereich dimensioniert werden können. Aus diesen Betrachtungen stellt sich der maximale Versatz zwischen der Abbildung eines identischen Objektes als freier Parameter heraus.

Im vierten Kapitel wird eine Methode vorgestellt, mit der dieser Maximalversatz durch ein Bewertungsexperiment bestimmt werden kann. Es wird exemplarisch nach dieser Methode für die im Versuchsfahrzeug eingesetzten Kamerasysteme und die gegebene Entfernung des Betrachters zum Display der Maximalversatz bestimmt.

Für die Überprüfung der in Kapitel 3 aufgestellten Auslegungsrichtlinien und die Demonstration der Bildfusion für einen automobilen Einsatz ist ein Versuchsfahrzeug aufzubauen. Das fünfte Kapitel stellt den Aufbau der Hard- und Softwarearchitektur dieses Versuchsfahrzeugs vor. Im Rahmen dieses Kapitel wird einen Systemarchitektur entwickelt, die hinsichtlich der Ausführungsgeschwindigkeit optimiert wird. Für Untersuchungen der Bildwiederholrate ist die Ausführungsgeschwindigkeit zu dokumentieren. Bei der Aufstellung der Gesamtarchitektur ist zu berücksichtigen, dass die Architektur skalierbar ausgelegt ist und dass eine offene Schnittstelle für eine Funktionserweiterung vorgesehen wird.

Für die Bestimmung des Einsatzbereiches wird ein Versuchsablauf vorgestellt, der exemplarisch für das aufgebaute Versuchsfahrzeug praktisch angewendet wird. Hierzu wird ein geeigneter Aufbau einer Kalibrierplatte vorgestellt, um eindeutige Objektreferenzen in beiden Kamerabildern zu erhalten.

Im sechsten Kapitel werden die Ergebnisse der Kalibrierung des Versuchsträger vorgestellt. Durch Gegenüberstellung vom Modell und Messung wird geklärt, ob das parametrisierte Dualkameramodell die real vorliegenden Bedingungen abbilden kann.

Das siebente Kapitel fasst die Kernaussagen der Arbeit zusammen.

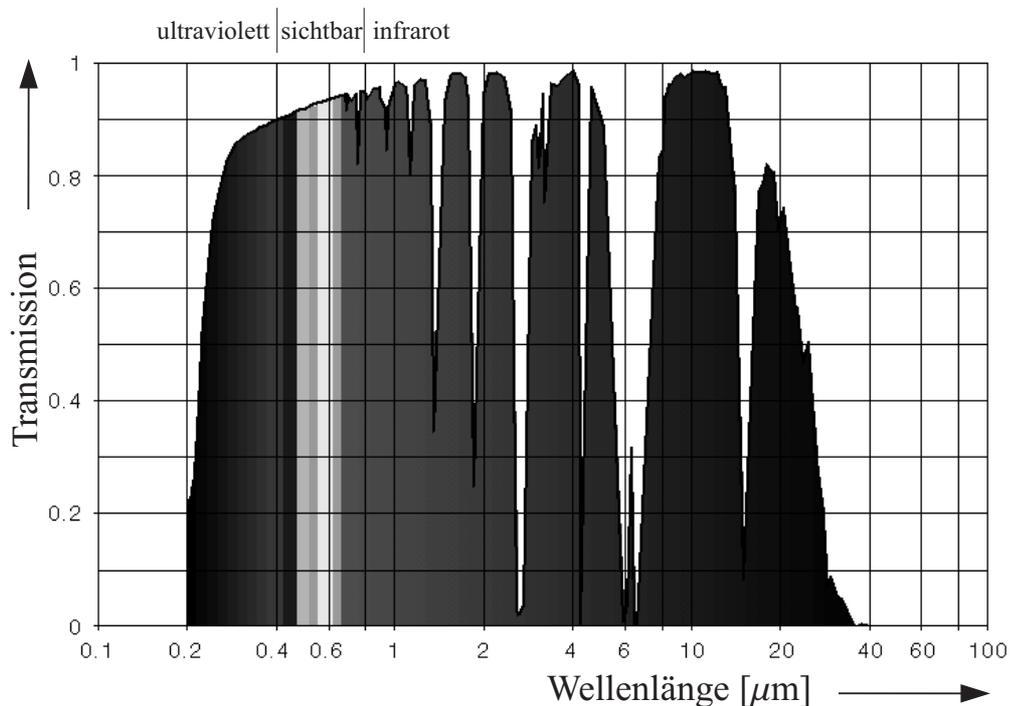
---

## 2. Vorbetrachtungen

### 2.1. Physikalische Grundlagen

Die im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Kamerasysteme arbeiten in unterschiedlichen Spektralbereichen. Aus diesem Grund wird in diesem Abschnitt auf die Eigenschaften der unterschiedlichen Anteile des optischen Spektrums eingegangen.

Die in der Atmosphäre enthaltenen Spurenelemente beeinflussen das Transmissionsverhalten der Strahlung des optischen Spektrums [Hahn 1994]. Durch die Absorption bestimmter Teilbereiche wird das Spektrum in verschiedene Fenster eingeteilt. Bild 2.1 zeigt das Transmissionsverhalten der Atmosphäre im Bereich von  $0,2 - 40\mu m$ .



**Bild 2.1:** Transmissionsverhalten der Atmosphäre [Hahn 1994]

Im Bereich von  $360nm - 830nm$  Wellenlänge, dem visuellen Spektralbereich, kann die Atmosphäre von elektromagnetischer Strahlung nahezu verlustfrei passiert werden. In diesem Bereich findet das menschliche Sehen statt. Die von einem Strahler emittierte visuelle Strahlung wird von Objekten in der Umgebung teilweise reflektiert und teilweise absorbiert. Die von den Objekten emittierte und reflektierte visuelle Strahlung nimmt das menschliche Auge wahr und das Gehirn verarbeitet diese Information [Marr 1983].

Der sich anschließende Infrarotbereich wird jedoch durch Spurenelemente in der Atmosphäre in seinem Transmissionsverhalten in drei Bereiche eingeteilt:

1. **NIR, Nahes Infrarot:**  $800nm - 2\mu m$  Wellenlänge
2. **MIR, Mittleres Infrarot:**  $3\mu m - 5\mu m$  Wellenlänge

### 3. FIR, Fernes Infrarot $8\mu m - 14\mu m$ Wellenlänge

Diese drei Fenster zeigen unterschiedliche physikalische Eigenschaften in Bezug auf die einzusetzenden Materialien für die Optiken und die Detektoren. So können beispielsweise Optiken und Kamerasysteme, die für den visuellen Spektralbereich entwickelt wurden, auch im NIR-Bereich eingesetzt werden [Rogalski 2002]. Im mittleren und fernen Infrarot sind diese Optiken nicht mehr transparent, hier müssen andere Materialien für die optischen Elemente verwendet werden. Ebenfalls werden für die Detektion der Bildinformation in diesen Spektralbereiche andere Detektormaterialien oder andere Detektionsverfahren eingesetzt (siehe Abschnitt 2.3.2).

Anhand der Einordnung des visuellen und des infraroten Spektralbereiches in das elektromagnetische Spektrum kann aber noch nicht geklärt werden, warum das menschliche Auge im Bereich von  $360nm - 860nm$  empfindlich ist und warum durch ein FIR-Kamerasystem auch nachts Umgebungsinformation detektiert werden kann. Diese Fragestellungen kann anhand der Planckschen Kurven beantwortet werden, die die Strahldichte der emittierten Strahlung eines Schwarzen Körpers<sup>2</sup> einer bestimmten Oberflächentemperatur mit der emittierten Wellenlänge in Beziehung setzt.

Mathematisch lässt sich dieser Zusammenhang durch das Plancksche Strahlungsgesetz für einen schwarzen Strahler ausdrücken [Lenk 1989] (vgl. Gleichung (2.1)).

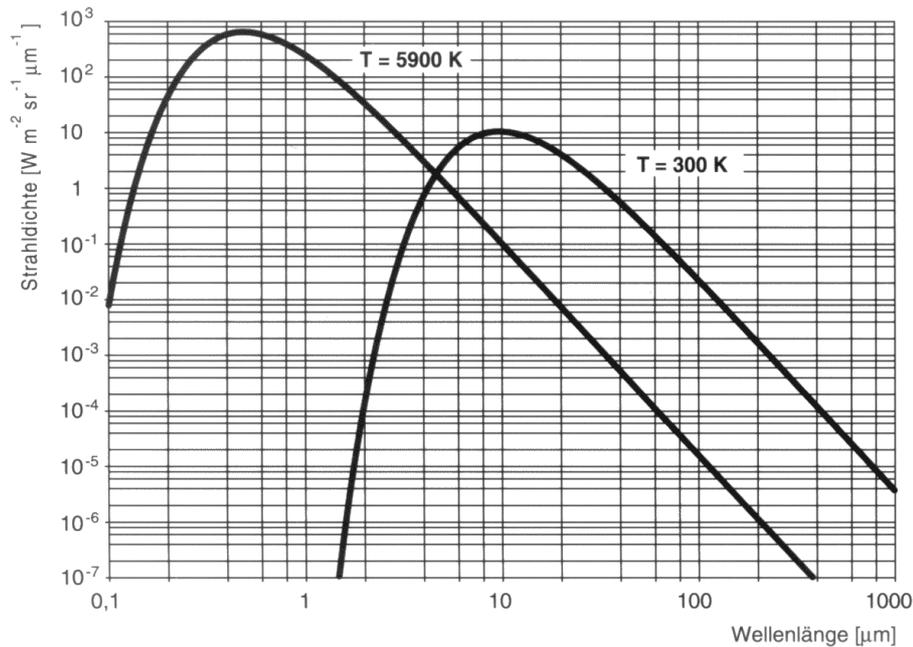
$$L(\lambda, T) = 2 \frac{c_0^2}{\lambda^5} \frac{h}{e^{\frac{hc_0}{k\lambda T}} - 1}, \quad (2.1)$$

wobei:	$L(\lambda, T)$	Spektrale Strahlungsdichte
	$c_0 = 3 \cdot 10^8 m/s$	Lichtgeschwindigkeit
	$h = 6,6 \cdot 10^{-34} Js$	Plancksches Wirkungsquantum
	$\lambda$	Wellenlänge
	$k = 1,4 \cdot 10^{-23} J/K$	Boltzmannkonstante
	$T$	Absolute Temperatur

In Bild 2.2 sind die Strahlungsdichten für zwei Körper mit unterschiedlicher Oberflächentemperatur dargestellt, wobei der atmosphärische Einfluss durch das Transmissionsspektrum auf die Strahlungsdichten nicht berücksichtigt wurde. Die Kurve  $T = 5900K$  zeigt die Strahlungsdichteverteilung der Sonne auf der Erde ohne atmosphärische Einflüsse; zu erkennen ist hier, dass das Maximum dieser Verteilung bei ca.  $500nm$  und somit im visuellen Spektralbereich liegt. Dies könnte aus evolutionären Gründen erklären, warum das Auge im visuellen Spektralbereich empfindlich ist.

Für natürlich vorkommende Objekte, deren Oberflächentemperatur mit ca.  $300K \approx 27^\circ C$  angenommen werden kann, zeigt die Kurve  $T = 300K$  die entsprechende Verteilung der Strahlungsdichte. Das Maximum liegt bei ca.  $10\mu m$ , somit im fernen Infrarot. Dies bedeutet, dass Sensorsysteme, die im FIR-Bereich arbeiten, natürlich vorkommende Objekte aufgrund deren Eigenwärme detektieren und somit unabhängig von externen Beleuchtungssystemen sind, da nur zu einem

<sup>2</sup>Körper, der die gesamte auftretende Energie absorbiert



**Bild 2.2:** Plancksche Kurven: Strahlidichte auf der Erde für zweier Körper mit unterschiedlicher Oberflächentemperatur gemäß Gleichung 2.1, Illustration nach [Hahn 1994]

geringen Teil und unter bestimmten Voraussetzungen reflektierte thermische Strahlung detektiert wird.

Tagsüber haben beide Körper einen Einfluss auf die Strahlungsdichteverteilung im FIR-Bereich. Jedoch beträgt der Unterschied zwischen beiden Kurven in diesem Bereich ca. 2 Größenordnungen, sodass eine FIR-Kamera durch die von der Sonne emittierte und an den Objekten in der Fahrumgebung reflektierter visuelle Strahlung nicht geblendet werden kann. Bei direktem Blick in die Sonne kann eine Blendung nicht ausgeschlossen werden.

Nachts verändert sich die Lage der  $T = 300\text{K}$  Kurve nicht, der Einfluss der Sonne verschwindet jedoch gänzlich. Somit ist die Funktionsweise eines FIR-Kamerasystems fast vollständig von der Tageszeit unabhängig und erzeugt tags wie nachts eine nahezu identische Abbildung.<sup>3</sup>

Die sich aus den physikalischen Eigenschaften ergebenden Randwerte sind in Tabelle 2.1 für den visuellen und ferninfraroten Spektralbereich zusammengefasst.

Mit diesen physikalischen Grundlagen können nun die Systeme, die zur Sichtverbesserung bei Nacht Anwendung finden, erklärt werden. Diese Systeme werden im Anschluss an den nächsten Abschnitt vorgestellt.

Doch im Vorfeld der detaillierten Systembeschreibungen werden noch die für die Betrachtung der digitalen Bilder notwendigen Definitionen eingeführt. Basierend auf diesen Definitionen werden

<sup>3</sup>Durch die Sonneneinstrahlung am Tage können sich Temperaturunterschiede in der Umgebung bilden, die noch bis in die Nacht bestehen bleiben. Somit ist die Darstellung bei Nacht auch bedingt von der Bestrahlung durch die Sonne am Tage abhängig.

**Tabelle 2.1:** Eigenschaften des visuellen und ferninfraroten Spektralbereiches bei einem automatisierten Einsatz

Kriterium	visueller Spektralbereich	Fernes Infrarot
Spektralbereich	500nm – 750nm	8 $\mu$ m – 14 $\mu$ m
Art der detektierten Strahlung	emittierte und reflektierte visuelle Strahlung	emittierte thermische Strahlung
mögliche Detektionsreichweite	abh. vom Scheinwerfer	ca. 150 – 250m
Interpretation der Bildinformation	gute Interpretierbarkeit, da Wiedergabe visueller Strahlungsinformation	mögliche Widersprüche, da anderer Spektralbereich
Wiedergabe von Farbe	ja	nein
Visuelle Blendung möglich	ja	nein

anschließend die Systemen zur Sichtverbesserung bei Dunkelheit und aktuelle Fusionsalgorithmen vorgestellt.

## 2.2. Definitionen

Die Bildinformation, die die eingesetzten Kamerasysteme zur Verfügung stellen, stellt eine flächenhafte Verteilung der Bestrahlstärke in eine Ebene dar [Jähne 2001]. Für eine informationstechnische Weiterverarbeitung wird die detektierte Strahlungsinformation sowohl hinsichtlich der räumlichen Auflösung als auch hinsichtlich der Bestrahlstärke quantisiert. Dies führt zur Betrachtung der Bildgeometrie und der Darstellung der Bestrahlstärke in Farbräumen.

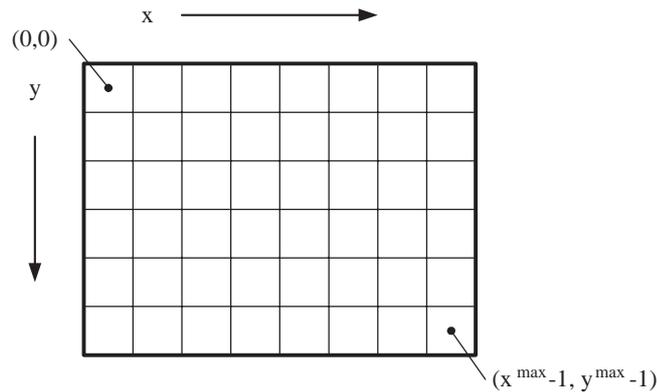
**Bildgeometrie:** Die Bilder werden als zweidimensionale Punktfelder  $\mathbf{x} = (x, y)$  der Größe  $x^{MAX} \times y^{MAX}$  abgespeichert, wobei  $x, y \in \{0, \mathbb{N}\}$ . Bei der Adressierung der einzelnen Bildelemente, sogenannte *Pixels*, sind entweder die Matrixnotation<sup>4</sup> oder die Koordinatennotation<sup>5</sup> üblich. In dieser Arbeit wird die Koordinatennotation angewendet, da durch diese die zusätzliche Transformation zwischen den Koordinatensystemen entfällt.

Die gewählte Notation veranschaulicht Bild 2.3. Als Ursprung wird dabei der Punkt (0, 0) definiert.

**Farbräume:** Die eigentliche Information des Bildes liegt in der Bestrahlstärke der Szene, die durch jedes Bildelement, das sogenannte Pixel detektiert wird. Jedes Pixel ist dabei einem bestimmten Raumwinkelelement zugeordnet; die Information jedes Pixels ist dabei proportional zum Integral der Strahlungsenergie in dem zugeordneten Raumwinkelelement. Die Wiedergabe dieser kontinuierlichen Information geschieht durch Quantisierung und anschließende Kodierung. Die

<sup>4</sup>Adressierung über (Zeile, Spalte)

<sup>5</sup>Adressierung über (horizontale Koordinate, vertikale Koordinate)

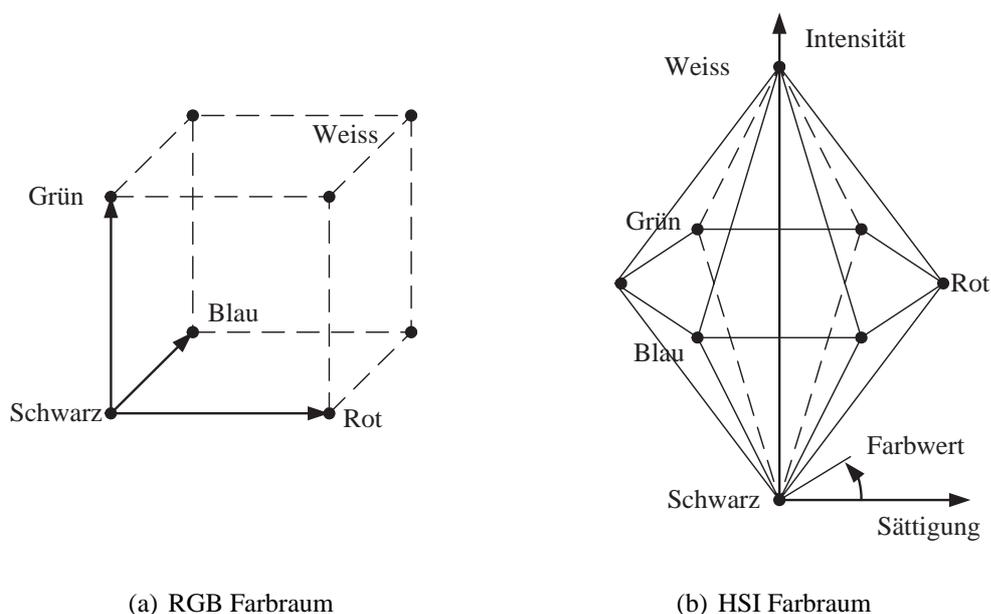


**Bild 2.3:** Notation der Adressierung der einzelnen Bildelemente (vgl. auch [Jähne 2001])

Quantisierung wird hierbei durch das Kamera-Digitalisierungs-System vorgegeben. Die Kodierung erfolgt in sogenannten *Farbräumen*.

In der Computergrafik haben sich unter anderem die beiden Standards *i)* RGB und *ii)* HSI durchgesetzt. Im RGB-Farbraum setzt sich ein Farbwert aus den drei Farbkomponenten Rot, Grün und Blau zusammen. Die Intensität des entsprechenden Pixels bestimmt sich aus dem Betrag des Farbvektors. Im HSI-Farbraum wird die Farbinformation in die drei Komponenten Farbwert (Hue), Sättigung (Saturation) und Intensität (Intensity) aufgespalten. Bild 2.4 zeigt schematisch den Aufbau beider Farbräume. Es zeigt sich, dass die einzelnen Komponenten elementweise senkrecht aufeinander stehen und somit eine orthogonale Basis bilden.

Diese Darstellungen können eindeutig und umkehrbar in einander umgewandelt werden [Pohl 1998]. Somit bedeutet die Festlegung, im Rahmen dieser Arbeit das RGB-System zu nutzen, keine Einschränkung der Allgemeinheit.



(a) RGB Farbraum

(b) HSI Farbraum

**Bild 2.4:** Genutzte Farbräume nach [Jack 2001]

**Tabelle 2.2:** Sichtweite für Objekte unterschiedlicher Größe und unterschiedlicher Helligkeit [Kokoschka 2000] (kleines Objekt: quadratische Form mit  $0,3m$  Kantenlänge; großes Objekt: schematisierte Fahrzeugrückansicht der Größe  $1,75m \times 1,2m$ , Kriterium: sicher erkannt)

	kleines Objekt hell	kleines Objekt dunkel	großes Objekt dunkel
Sichtweite [m]	50 - 70	45 - 65	45 - 70
Passierzeit [s]	1,8 - 2,5	1,6 - 2,3	1,6 - 2,5

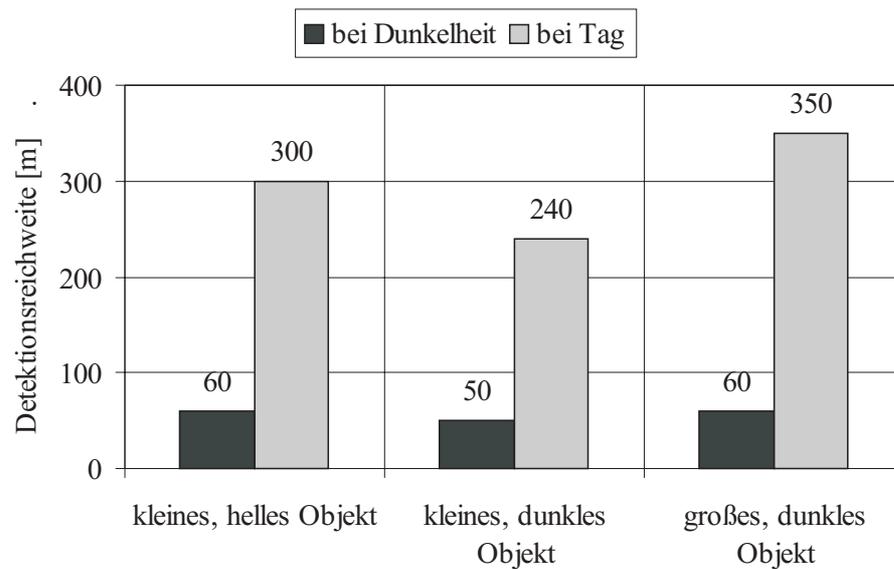
### 2.3. Stand der Technik: Systeme zur Sichtverbesserung bei Nacht

Durch die Dunkelheit bei Nacht ist die Sichtweite des Fahrers eingeschränkt. Lediglich Objekte, die durch die eigenen Scheinwerfer erfasst werden oder selbst Licht emittieren, können durch den Fahrer detektiert werden. Zusätzlich zu diesen verschlechterten Umfeldbedingungen sinkt nachts die Sehschärfe und die Kontrastempfindlichkeit des menschlichen Auges im Vergleich zum Tagsehen [Plainis 1997]. Somit besteht ein Ansatzpunkt für die Reduzierung der Anzahl von Nachtunfällen, vor allem der Unfälle mit beteiligten Fußgängern, in der Verbesserung der Sichtbedingungen des Fahrers.

Die Leuchtstärke, die von den Front-Scheinwerfern emittiert werden darf, ist jedoch gesetzlich begrenzt (in der EU auf  $140kcd$ , in der USA auf  $75kcd$  bei  $12.8V$  beschränkt), um eine Blendung des Gegenverkehrs zu verhindern [Rumar 2001]. Somit kann die Leistung der Scheinwerfersysteme nicht über diese Grenze gesteigert werden, um die Ausleuchtung der aktuellen Fahrszene zu verbessern. Der Einsatz aktiver Scheinwerfersysteme ermöglicht eine Anpassung der Ausleuchtungscharakteristik an die aktuelle Fahrszene und die aktuelle Situation [Hendrischk 2002, Kauschke 2003].

Durch die Charakteristik und den Wirkungsgrad des Scheinwerfers sowie die Begrenzung der minimalen Neigung der Frontscheinwerfer auf  $1\%$  wird die maximale Leuchtweite bestimmt, die typischerweise im Bereich von  $60m - 80m$  für Abblendlicht liegt [Fleury 2003, Opgen-Rhein 2003]. Doch gerade für Fahrten außerhalb geschlossener Ortschaften liegen diese Werte noch unterhalb des notwendigen Anhalteweges, der sich aus Reaktions- und Bremsweg zusammensetzt. In [Kokoschka 2000] wurde daher untersucht, welche realistischen Sichtweiten für Objekte mit unterschiedlicher Größe und unterschiedlicher Helligkeit festgestellt werden können. Tabelle 2.2 stellt daher diesen Werten die Zeit gegenüber, die ein Fahrzeug mit einer Geschwindigkeit von  $100$  Stundenkilometer benötigt, um diese Strecke der Sichtweite zu durchfahren. Es zeigt sich, dass abzüglich einer Reaktionszeit von ca.  $1$  Sekunde teilweise weniger als eine Sekunde zur Verfügung steht, um angemessen auf die Situation zu reagieren und zu handeln.

In Bild 2.5 sind für drei nicht selbstleuchtende Objekte mit verschiedenen Reflexionskoeffizienten die Detektionsreichweite bei Tag und bei Dunkelheit gegenübergestellt. Es zeigt sich deutlich eine Begrenzung der Detektionsreichweite auf die Reichweite der eigenen Scheinwerfer.



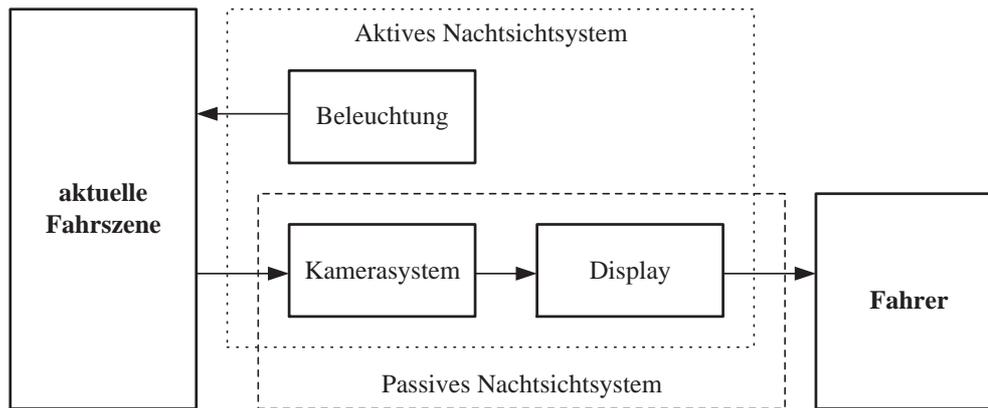
**Bild 2.5:** Detektionsreichweiten für drei nicht selbstleuchtende Objekte aus Tabelle 2.2 nach [Kokoschka 2000]

Um auch Objekte jenseits der Detektionsentfernung, die durch die Scheinwerfer vorgegeben wird, für den Fahrer „sichtbar“ zu machen, ohne gleichzeitig andere Verkehrsteilnehmer zu blenden, wird auf andere Spektralbereiche ausgewichen, für die das menschliche Auge nicht empfindlich ist. Die Vorstellung des Aufbaus solcher Nachtsichtsysteme wird Gegenstand des nächsten Abschnitts sein.

### 2.3.1. Aufbau von Nachtsichtsystemen

Nutzt ein Nachtsichtsystem andere als visuelle Strahlung um Objekte in der aktuellen Fahrumgebung zu detektieren, so liegt die Hauptaufgabe in der Übertragung der durch ein geeignetes Kamerasystem detektierten Strahlungsinformation auf einen für den Fahrer verwertbaren Informationskanal. Im Falle der hier genutzten bildgebenden Sensorik wird diese Information dem Fahrer über den visuellen Kanal als bildhafte Darstellung auf einem Display dargeboten.

Der prinzipielle Aufbau eines Nachtsichtsystems ist in Bild 2.6 schematisch dargestellt. Dieses Bild verdeutlicht den Unterschied zwischen den beiden möglichen Architekturen eines Nachtsichtsystems: *i)* ein aktives oder *ii)* ein passives System. Ein aktives Nachtsichtsystem benötigt eine aktive Beleuchtung der Fahrszene und zur Detektion der reflektierten Strahlung ein auf die Beleuchtung abgestimmtes Kamerasystem. Passive Nachtsichtsysteme hingegen detektieren die Strahlungsinformation, die durch die „selbstleuchtenden“ Objekte erzeugt wird, und benötigen daher keine aktive Beleuchtung der Szene.



**Bild 2.6:** Schematischer Aufbau eines Nachtsichtsystems

**Aktives Nachtsichtsystem:** Als einer der ersten Hersteller hat Jaguar ein Nachtsichtsystem basierend auf der NIR-Technologie vorgestellt und untersucht [Berham 1999]. Die aktuelle Fahrscene wird durch einen Scheinwerfer, der NIR-Strahlung emittiert, beleuchtet und die reflektierte Strahlung durch ein geeignetes Kamerasystem detektiert, das auf der CMOS- oder CCD-Videotechnologie aufbaut. Das erzeugte Bild wird dem Fahrer auf einem kontaktanalogen Head-Up-Display<sup>6</sup> dargestellt. Dieses Verfahren ermöglicht die Überlagerung der Zusatzinformation mit der Fahrscene und soll so die Einordnung der detektierten Objekte erleichtern. Ein ähnliches System bietet auch Toyota an [Knoll 2001].

Die für die Beleuchtung eingesetzten Scheinwerfer mit Fernlichtcharakter emittieren Licht im nahen Infrarot [Eichhorn 2001]. Da das menschliche Auge in diesem Bereich des optischen Spektrums nicht empfindlich ist, können andere Verkehrsteilnehmer nicht geblendet werden. Jedoch kann sich das menschliche Auge aufgrund der Unempfindlichkeit nicht auf die Veränderung der eintreffenden Strahlungsintensität einstellen, was unmittelbar zu einer Schädigung des Auges führen kann. Aus diesem Grund muss bei diesen Systemen auf den Punkt der Augensicherheit geachtet werden.

Desweiteren spielt bei diesen Systemen die Qualität der Sensorik eine große Rolle. Im Begegnungsfall von zwei gleich ausgestatteten Fahrzeugen, darf durch die Strahlungsquelle des einen die Bildinformation des anderen Teilnehmers nicht wesentlich beeinträchtigt werden.

**Passives Nachtsichtsystem:** In den USA wurde bereits im Jahre 2000 durch Cadillac ein Nachtsichtsystem in den Markt eingeführt, das Objekte in der aktuellen Fahrscene mit einem FIR-Kamerasystem detektiert [Martinelli 2000]. Das aufgenommene Bild wird im Cadillac Deville dem Fahrer über ein Head-Up-Display dargeboten, das das Nachtsichtbild am unteren Rand der Windschutzscheibe platziert. Da das System keine aktive Beleuchtung einsetzt, besteht keine Gefährdung andere Verkehrsteilnehmer durch zu hohe Strahlungsintensitäten. Weiterhin interferieren passive Nachtsichtsysteme nicht gegenseitig.

<sup>6</sup>kontaktanalogen HuD: Die Einblendung der Information erfolgt in der Richtung und Größe, wie der Fahrer das dargestellte Objekt durch die Windschutzscheibe sehen würde. Die Darstellung erfolgt synchronisiert zur Umgebung.

**Tabelle 2.3:** Gegenüberstellung der Eigenschaften von aktiven und passiven Nachtsichtsystemen nach [Knoll 2003]

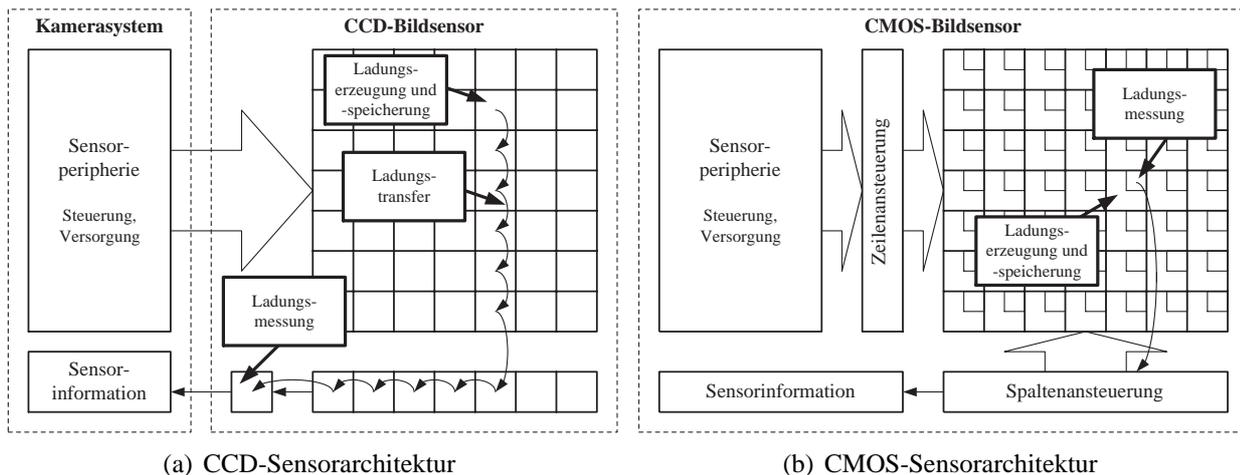
<b>Kriterium</b>	<b>aktives System</b>	<b>passives System</b>
Detektionsreichweite	abhängig vom Beleuchtungssystem	max. 150m-250m
Detektionsgebiet	abhängig vom Beleuchtungssystem und Verdeckungen	im gesamten Gesichtsfeld des Kamerasystems
Detektion von Personen	durchschnittlich gut	sehr gut
Detektion von Wild	durchschnittlich gut	sehr gut
Wetterabhängigkeit	Beeinflussung der Reflexionskoeffizienten	keine Funktion bei Regen oder Schnee
Blendbarkeit	durch gleichausgestattete Fahrzeuge oder NIR-Strahler	durch starke Wärmequellen
Lesbarkeit von Verkehrsschildern	bei unterschiedlichen Reflexionskoeffizienten	bei Temperaturdifferenzen möglich
Lesbarkeit von Fahrbahnmarkierungen	bei unterschiedlichen Reflexionskoeffizienten	bei Temperaturdifferenzen möglich
Augensicherheit	zu beachten	keine Gefährdung der Augen

Abschließend zum allgemeinen Aufbau eines Nachtsichtsystems werden in Tabelle 2.3 die Eigenschaften der vorgestellten Systeme vergleichend zusammengefasst. Neben den in der Literatur angefügten Kriterien sind noch weitere Gesichtspunkte aufgenommen wurden. Diese Gegenüberstellung zeigt deutlich die unterschiedlichen Eigenschaften und die damit verbundenen Vorteile und Einschränkungen der beiden Nachtsichtsysteme. Beide Nachtsichtsysteme zeichnen sich durch eine Erhöhung der Detektionsreichweite gegenüber dem visuellen Spektralbereich, den der Fahrer zur Verfügung hat, aus. Bezüglich dieses wichtigen Kriteriums ist das passive System dem aktiven System überlegen. Denn gerade diese erhöhte Detektionsentfernung ermöglicht ein vorausschauenderes Fahren und das frühzeitige Erkennen gefährdeter Personen, wie auch die Untersuchungen von [Hollnagel 2003] zeigen.

Der Vergleich der Eigenschaften beider Nachtsichtsysteme zeigt für das FIR-Nachtsichtsystem ein größeres Potential bezüglich einer Bildfusion mit visueller Strahlungsinformation, da der Zusatznutzen einer Fusion von visueller Information und Information aus dem nahen Infrarot geringer ausfällt.

### 2.3.2. Kamertechnologie - Sensorik zur bildhaften Fahrumgebungserfassung

Im ersten Teil dieses Abschnitts wird die Technologie vorgestellt, die zur Detektion von Strahlung im visuellen und im nahinfraroten Strahlungsbereich eingesetzt wird. Die aktuelle FIR-Kameratechnologie wird anschließend erläutert.



**Bild 2.7:** Vergleich der Architektur der CMOS- und der CCD Sensortechnologie, schematisiert nach [Litwiller 2001]

**Visuelle Kameratechnologie:** Aktuell werden für die Detektion von Strahlung im Visuellen und nahen Infrarot zwei Technologien eingesetzt: CCD- und CMOS-Sensoren. Die Bilderzeugung kann für beide Verfahren in die vier Stufen Ladungserzeugung, Ladungsspeicherung, Ladungstransfer und Ladungsmessung aufgeteilt werden [Janesick 2002]. Diese Unterschiede in den vier Stufen der Bilderzeugung resultieren aus den entsprechenden Sensorarchitekturen (siehe Bild 2.7).

Bei der Ladungserzeugung spielt die Effizienz der Umwandlung der eintreffenden Strahlung in Elektronen eine entscheidende Rolle für die Empfindlichkeit des Detektors. Diese Effizienz ist direkt proportional zum Füllfaktor des Sensors, der als Quotient von strahlungsempfindlicher und gesamter Fläche des Sensors gebildet wird. Da bei CMOS-Sensoren die Elektronen-Spannungswandlung und die Auslesestruktur auf dem Bildsensor integriert sind, verringert sich der Füllfaktor und somit die Empfindlichkeit des Sensor. Bei CCD-Sensoren wird ein Füllfaktor von 100% erreicht, da die Signalverarbeitung peripher erfolgt [Janesick 2002].

Im nächsten Schritt, der Ladungsspeicherung, werden die bei der Ladungserzeugung generierten Elektronen in den entsprechenden Pixelbereichen gesammelt. Hierbei ist es wichtig, das zwischen benachbarten Pixeln ein Übersprechen, ein Austausch an Elektronen verhindert wird, da dies zu einer Verschlechterung der Schärfe führt. Dies geschieht durch den Einsatz spezieller Materialien oder den Einsatz höherer Spannungen, um die Elektronen durch elektrische Felder an der Diffusion in andere Pixel zu hindern [Janesick 2002].

Der dritte Prozessschritt ist für die CCD-Technologie sehr kritisch [Janesick 2002]. Die erzeugten Ladungen werden spaltenweise über die Sensorfläche zum Ausleseverstärker geleitet. Gerade bei größeren Ladungsmengen, wie sie bei der Abbildung besonders heller Objekte entstehen, kann es beim Ladungstransport zur Überschreitung der Kapazitäten der Bildbereiche kommen. Dies führt zu einer Zerstörung der Information in diesen Bildbereichen und in den Nachbarbereichen. Da bei CMOS-Sensoren keine Ladungen über die Sensorfläche übertragen werden, ist diese Technologie resistent gegenüber dieses als Blooming bezeichneten Effektes.

**Tabelle 2.4:** Eigenschaften der CCD- und CMOS-Sensoren nach [Litwiller 2001, Janesick 2002]

Kriterium	CCD	CMOS
Signal am Pixel	Ladung	Spannung
Füllfaktor	hoch	mittel
Effizienz der Ladungsspeicherung	hoch	mittel
Verstärkungsunterschiede	keine	mittel
Rauschempfindlichkeit	gering	mittel
Komplexität des Sensors	gering	hoch
Komplexität der Peripherie	hoch	gering
Empfindlichkeit	hoch	mittel
Dynamik	mittel	hoch
Gleichförmigkeit	hoch	mittel
Geschwindigkeit	mittel	hoch
Definition des Auslesebereichs	bed. möglich	frei adressierbar
Resistenz gegenüber Blooming	bedingt	hoch

Die abschließende Umwandlung der gespeicherten Ladung in eine elektrische Spannung ist für beide Technologien identisch [Janesick 2002]. Jedoch muss bei CMOS-Sensoren darauf geachtet werden, dass die Konvertierelemente und Verstärker der einzelnen Pixel auf einander abgeglichen sind, um eine Gleichförmigkeit der Bilddarstellung zu erreichen. Desweiteren erhöht sich durch die Kompaktheit des CMOS-Sensors und die Unabhängigkeit der Ladungskonverter die Rauschempfindlichkeit des Sensors. Bei CCD-Sensoren kann diese durch eine Optimierung des einzigen, für alle Elemente gleichen Konverters verringert werden.

In Tabelle 2.4 sind die Eigenschaften beider Sensoren vergleichend gegenübergestellt.

Für Nachtanwendungen im Fahrzeug stellen die Empfindlichkeit und die Dynamik des Sensors die wichtigsten Kriterien dar, da in diesen Fällen minimal beleuchtete Objekte, wie z.B. Fußgänger, und sehr helle Objekte, wie z.B. Scheinwerfer entgegenkommender Fahrzeuge, vorkommen. Durch die Blooming-Resistenz wird sichergestellt, dass intensive Strahlungsquellen nicht zur Zerstörung der Bildinformation führt.

Durch eine Weiterentwicklung der CMOS-Technologie werden in Zukunft Sensoren verfügbar sein, die eine ähnliche Empfindlichkeit wie CCD-Sensoren aufweisen [Blanc 2001]. Ebenfalls kann bei CMOS-Sensoren die Kennlinie der Pixelelemente angepasst werden, was auch bei großen Intensitätsunterschieden eine gute Auflösung der Strahlungsintensität ermöglicht [Wány 2002]. Auch aufgrund der freien Adressierbarkeit der CMOS-Bildbereiche und die Integration von Vorverarbeitungsstufen direkt auf dem Sensor empfiehlt sich diese Technologie für einen automobilen Einsatz.

**FIR-Kameratechnologie:** Der prinzipielle Aufbau eines FIR-Kamerasystems ist in Bild 2.8 dargestellt. Analog zu den visuellen Kamerasystemen bestehen diese System aus einer Optik, einem Detektor und einem entsprechenden Ausgabemodul, über das die Bildinformation an ein Display weitergegeben wird.



**Bild 2.8:** Prinzipieller Aufbau eines FIR-Kamerasystems

Für die Optiken können keine Materialien wie Glas oder Plastik genutzt werden, da diese im FIR-Bereich nicht transparent sind. Hier kommen andere Materialien wie beispielsweise Germanium zum Einsatz [Rogalski 2002].

Für die Strahlungsdetektion im fernen Infrarot werden aktuell zwei Messverfahren eingesetzt: absolute und relative Messverfahren. Das relative Verfahren nutzt den ferroelektrischen Effekt: Wird an ein ferroelektrisches Material ein elektrisches Feld angelegt, so vollzieht sich im Material eine Polarisierung, die auch nach Abschaltung des elektrischen Feldes erhalten bleibt. Die verbleibende Polarisation ist dabei abhängig von der Temperaturänderung, die zwischen der Temperatur der eingesetzten Referenz und der Temperatur des Objektes in dem entsprechenden Raumwinkelement besteht [Hanson 1994]. Da es sich um ein relatives Verfahren handelt, benötigen diese Kamerasysteme eine definierte Referenz, einen so genannten Chopper. Durch das Einblenden des geschlossenen Bereiches des Choppers werden die einzelnen Bildelemente auf einen Initialzustand gesetzt. Im geöffneten Zustand erfolgt die Detektion der Temperaturverteilung relativ zur Temperatur des Choppers. Über eine CMOS-ähnliche Architektur kann die detektierte Information pixeladressiert ausgelesen.

In Bild 2.3.2 sind zwei verfügbare, für den automobilen Serieneinsatz geeignete FIR-Kamerasysteme dargestellt. Das zweite Verfahren zur Detektion von FIR-Information setzt das so genannte Micro-



(a) im Cadillac eingesetztes FIR-Kamerasystem



(b) weiterentwickeltes FIR-Kamerasystem

**Bild 2.9:** FIR-Kamerasystem der Firma Raytheon für den automobilen Einsatz [Klapper 2001]

**Tabelle 2.5:** Gegenüberstellung der Sensortechnologie zur Detektion von Strahlung im fernen Infrarot [Castaldo 1996]

Kriterium	Quantendetektor	Bolometer	Ferroelektrisch
Detektor	Quantendetektor	Energiedetektor	Energiedetektor
Detektionsprinzip	absolut	absolut	relativ
Detektormaterial	HgCaTe	Silizium, Vanadium-Oxid	BST
Betriebstemperatur	77K	300K	300K
Gesamtsystem			
Leistungsaufnahme	75W	6W	6W
Betriebsspannung	12V	6V	12V
Gewicht	12kg	2kg	4kg
Hersteller	FLIR-Systems, Carl-Zeiss	Raytheon, Sofradir	Raytheon

bolometer als direktes Messverfahren ein. Zur Detektion von FIR-Strahlung wird die Abhängigkeit des Widerstandes von der Temperatur des eingesetzten Detektormaterials ausgenutzt. Aus der Änderung des Stromes oder der Spannung kann, bei konstanten äußeren elektrischen Verhältnissen, über die Widerstandsänderung die eingetroffene Strahlungsmenge berechnet werden. Eine mögliche, CMOS-ähnliche Struktur ist in [Tezcan 1999] beschrieben. Eine Realisierung für einen automobilen Serieneinsatz ist nicht bekannt.

Für die Detektion von Strahlung im fernen Infrarot existieren noch andere Verfahren, die auf der Detektion von Quanten beruhen. In Tabelle 2.5 sind die Eigenschaften von drei Detektorsystemen gegenübergestellt, die in der Flugüberwachung eingesetzt werden [Castaldo 1996].

Quanten detektierende Systeme müssen aktiv gekühlt werden. Die eingesetzten Detektoren können nicht, wie die Detektoren der ungekühlten Systeme, bei Umgebungstemperatur betrieben werden. Ein Einsatz im Automobil entfällt daher vorrangig aus Gewichtsgründen und aufgrund der hohen Leistungsaufnahme.

### 2.3.3. Displaytechnologien

Aktuell finden im Automobil für die bildhafte Wiedergabe von Informationen das Displaykonzept des Monitors und das des Head-Up-Displays Anwendung.

Im Monitor wird die Information als reales Bild dargestellt, das der Fahrer direkt betrachten kann. Der Monitor kann im zentralen oder im peripheren Sichtfeld des Fahrer angeordnet sein. Bild 2.10 zeigt beispielhaft ein Display im peripheren Gesichtsfeld des Fahrers, das zur Anzeige unterschiedlicher Information genutzt wird.

Das Head-Up-Display stellt dem Fahrer Informationen im zentralen Sichtfeld dar. Es bildet ein optisches System, bestehend aus Linsen und Spiegeln, wobei die Windschutzscheibe des Fahrzeugs als letzter Umlenkspiegel genutzt wird. Der Fahrer betrachtet ein virtuelles Bild, das ca. 2,5m vor

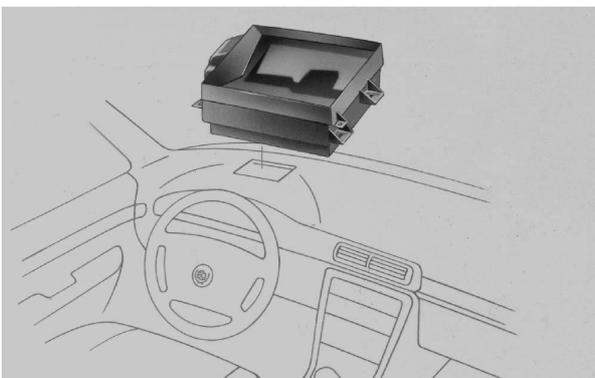


**Bild 2.10:** Monitor im peripheren Sichtfeld des Fahrers (Quelle: BMW)

dem Fahrer, dicht oberhalb der Motorhaube erscheint [Meier-Arendt 2003]. Bild 2.11 zeigt den prinzipiellen Aufbau eines Head-Up-Displays und die entsprechende Anzeige eines Nachtsichtbildes.

Da die im Rahmen dieser Arbeit vorgestellte Thematik unabhängig von der genutzten Display-technologie ist, wird an dieser Stelle auf eine ausführliche Diskussion der Vor- und Nachteile der beiden Anzeigeconzepte verzichtet werden, da für die Auslegung des Dualkameranystems der Ort der Anzeige irrelevant ist. Bei der Ableitung der Auslegungskriterien, zu denen der maximal tolerierbare Versatzfehler zählt, ist das jeweils gewählte Display und die gewählte Displayanordnung zu berücksichtigen.

Untersuchungen, die sich mit der Nutzung und der Auslegung von Anzeigen für eine Nachtsichtanwendung beschäftigen, finden sich in [Druid 2002, Nilsson 2003, Mayer 2003].

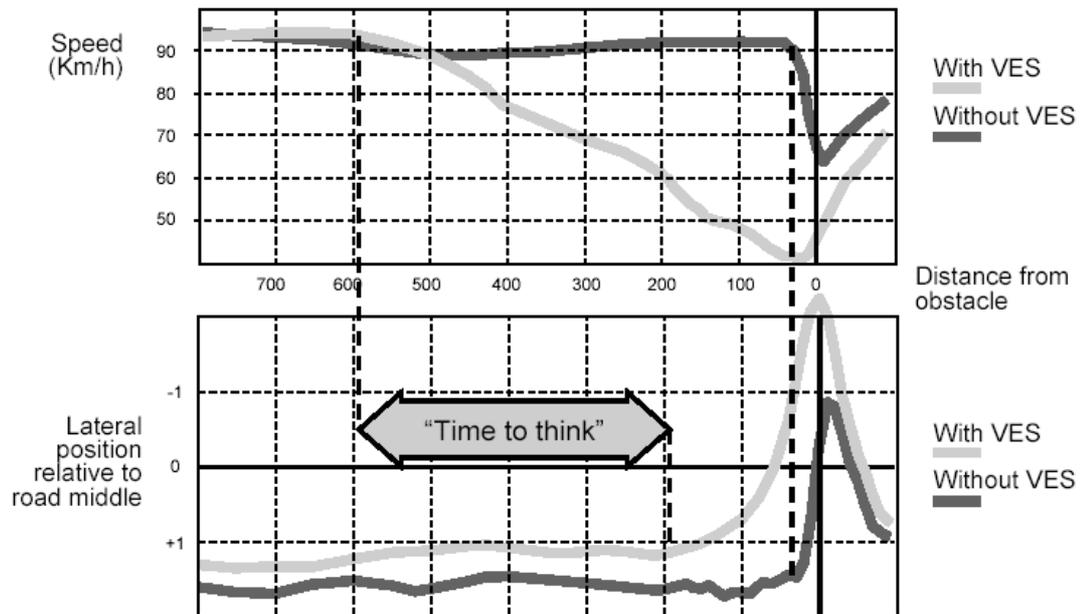


(a) Head-Up-Display Einheit [Martinelli 2000]



(b) Informationsdarstellung in einem Head-Up-Display [Martinelli 2000]

**Bild 2.11:** Aufbau und Informationsdarstellung in einem Head-Up-Display



**Bild 2.12:** Verbesserung der Geschwindigkeitsanpassung (oben) und Spurhaltung (unten) durch eine verbesserte Voraussicht vor einem Hindernis [Hollnagel 2003]

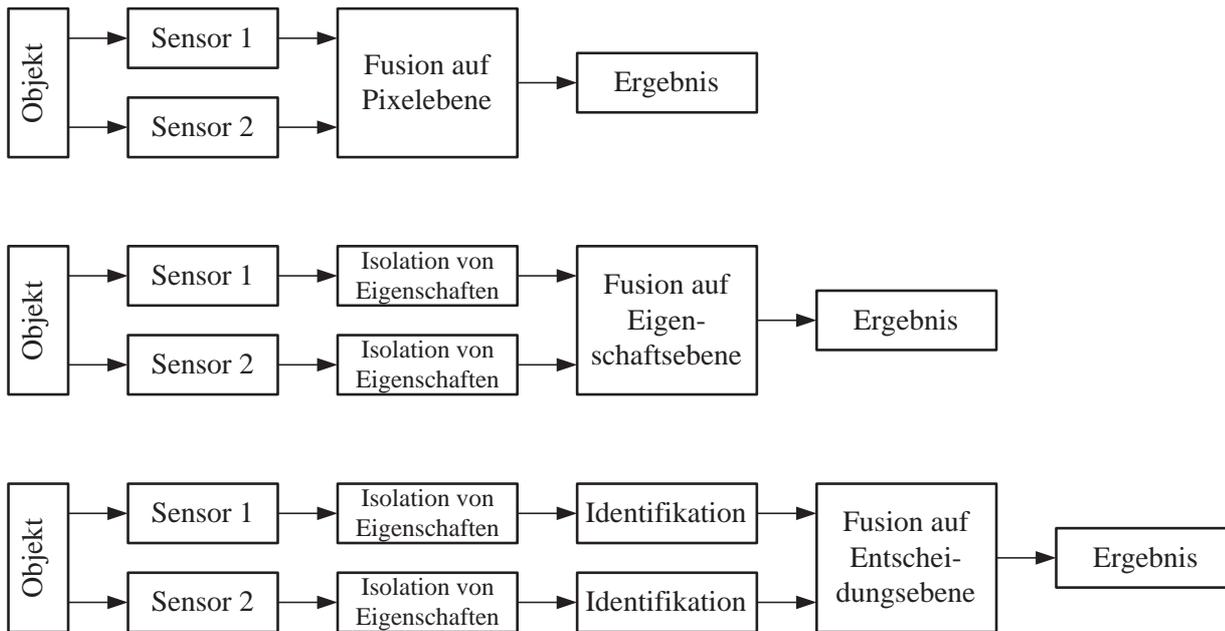
#### 2.3.4. Untersuchungen zur Nutzung von Nachtsichtsystemen

Seit der Verfügbarkeit von Nachtsichtsystemen wird deren Nutzen und das Nutzerverhalten auch in kommerziellen Anwendungen untersucht. Da der Hauptaugenmerk dieser Arbeit auf der Weiterentwicklung eines Nachtsichtsystems basierend auf der FIR-Kameratechnologie liegt, werden in diesem Abschnitt vorrangig Ergebnisse zum Nutzen dieses Systems vorgestellt.

Weitere Ergebnisse, die den Nutzen von NIR-Systemen betrachten, finden sich beispielsweise in [Locher 2003, Gish 1999]. In diesen Studien wird die Erhöhung der Detektionsentfernung bei der Nutzung eines NIR-Nachtsichtsystems gegenüber Scheinwerfern hervorgehoben. Ebenfalls wird aufgrund der Darstellung reflektierter Strahlung die bessere Interpretierbarkeit von NIR-Nachtsichtbildern hervorgehoben.

[Hollnagel 2003] untersucht den Einsatz eines Nachtsichtsystems basierend auf der FIR-Technologie für einen automobilen Einsatz. Im Simulator konnte dabei nachgewiesen werden, dass durch den Einsatz des Nachtsichtsystems die Detektionsreichweite erhöht wurde und damit ein Zeitgewinn zu verzeichnen war. In dieser zusätzlichen Zeit konnte die Situation besser abgeschätzt und die geeignete Handlung, beispielsweise ein Ausweichmanöver, ausgewählt werden. Bild 2.12 zeigt den Geschwindigkeitsverlauf und den Verlauf der relativen Position in der Fahrspur vor dem Auftreten des Hindernisses einmal mit und einmal ohne Nutzung eines Nachtsichtsystems.

Bild 2.12 zeigt deutlich, dass die Geschwindigkeit bei der Nutzung des Nachtsichtsystems wesentlich zeitiger angepasst wurde und auch das Ausweichmanöver früher eingeleitet wurde. Während des gesamten Versuches konnte keine signifikante Erhöhung der Geschwindigkeit festgestellt werden. Somit könnte eine Risikokompensation ausgeschlossen werden.



**Bild 2.13:** Abstraktionsniveaus der Bildfusion [Wang 2000]

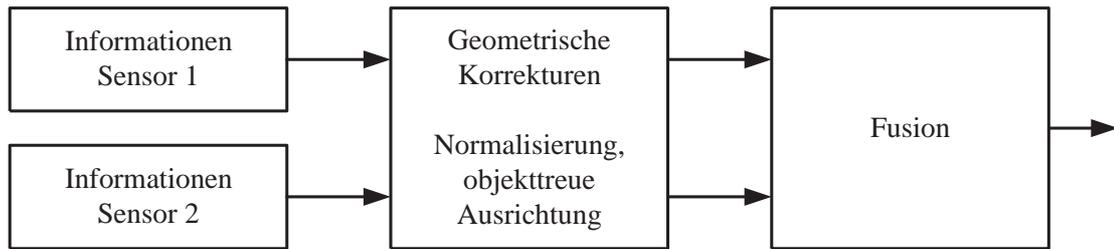
In [Martinelli 2000] wurde das von Cadillac angebotene Nachtsichtsystem untersucht. Dabei konnte für das Kamerasystem mit einem horizontalen Öffnungswinkel von  $11,25^\circ$  eine Detektionsreichweite für eine Person von bis zu 300m festgestellt werden. Im Gegensatz dazu wurde der Entfernungsbereich des Abblendlichtes mit 75-100m angegeben.

Zusammenfassend zeigt sich, dass durch ein Nachtsichtsystem die Detektionsentfernung vergrößert werden kann und sich somit die Zeit für die Situationserkennung und die Handlungsauswahl für den Fahrer vergrößert. Da durch die artifizielle Darstellung die Wahrnehmbarkeit von Objekten beeinträchtigt werden kann, sieht [Hollnagel 2003] den Vorteil von Nachtsichtsystemen hauptsächlich in der Unterstützung des Fahrers bei der Detektion und weniger bei der Identifikation von Objekten.

## 2.4. Stand der Technik: Verfahren der Bildfusion

Aufbauend auf der vorgestellten Sensortechnologie zur bildhaften Umgebungserfassung werden im folgenden Abschnitt die Anwendungsbereiche und die Algorithmen der Bildfusion Gegenstand der Betrachtung sein. Ein besonderer Augenmerk wird auf der Berücksichtigung von Aspekten der Ergonomie und auf der Betrachtung des notwendigen Rechenbedarfs der vorgestellten Algorithmen liegen, soweit der Rechenbedarf deterministisch bestimmt werden kann.

Die Bildfusion kann auf drei verschiedenen Abstraktionsniveaus erfolgen: *i)* auf dem Niveau der Pixelinformation, *ii)* auf dem Niveau der Objektinformation oder *iii)* auf dem Niveau der Entscheidungsinformation [Wang 2000]. In Bild 2.13 sind diese drei unterschiedlichen Abstraktionsniveaus anschaulich dargestellt.



**Bild 2.14:** Architektur eines Systems zur Fusion von zwei Eingangsbildern

Die im Rahmen dieser Arbeit vorgestellten Ansätze und Ergebnisse beziehen sich auf eine Fusion auf dem ersten Abstraktionsniveau, der Pixelinformation. Eine mögliche Architektur eines Systems zur Fusion der Pixelinformation zweier Ursprungsbilder zeigt Bild 2.14. Die Sensorinformationen werden vor der Fusion geometrisch vorverarbeitet und zueinander ausgerichtet. Die detaillierte Betrachtung der Bildausrichtung erfolgt in Kapitel 3. Abschließend werden die Bilder fusioniert.

Die Einsatzgebiete der Bildfusion, um entweder die Übersichtlichkeit der mehrkanaligen Informationsdarstellung zu erhöhen, oder die Interpretierbarkeit der dargestellten Information zu verbessern, werden im folgenden Teilabschnitt detaillierter beleuchtet.

### 2.4.1. Einsatzgebiete der Bildfusion

Die Fusion von Bildern unterschiedlicher Modalitäten findet in vielen Bereichen Anwendung. Gerade bei Anwendungen, in denen mehrere Sensoren mit unterschiedlichen Charakteristiken, evtl. sogar mit komplementärem Verhalten eingesetzt werden, bietet sich der Einsatz der Bildfusion an. Auf diesem Wege können die Informationen der eingesetzten Sensoren zu einer einzigen Abbildung zu Gunsten der Übersichtlichkeit und der möglichen Verbesserung der Interpretierbarkeit kombiniert werden.

**Geografische Fernerkundung:** Praktisch werden Verfahren der Bildfusion in der geografischen Fernerkundung eingesetzt. In [Lau 1999] wird ein Verfahren beschrieben, dass zur Klassifikation der geographischen Flächennutzung das räumlich hochauflösende Bild eines Farbkamerasystems und das Bild eines multispektralauflösenden Systems, das eine geringe räumliche, aber hohe spektrale Auflösung außerhalb des visuellen Spektrums aufweist, kombiniert. Durch diese Kombination wird sowohl eine räumliche als auch eine spektral hochauflösendes Abbildung des betrachteten Bereiches erzielt. Beide Kamerasysteme sind auf dem SPOT-Satelliten montiert und dienen der Erdfernerkundung.

**Medizinische Diagnostik:** Auch in der medizinischen Diagnostik wird die Bildfusion eingesetzt. Die Kombination von MRT- und CT-Aufnahmen zu einem Gesamtbild ermöglicht einen besseren Überblick über das betrachtete Gewebe [Qu 2001]. In CT-Bildern kann besonders dichtes

**Tabelle 2.6:** Korrelationskoeffizienten für unterschiedliche Strahlungssensoren [Scribner 2000]  
( $f_u$  untere Bandgrenze,  $f_o$  obere Bandgrenz in  $\mu m$ )

Band	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	15	16
$f_u$	0,36	0,42	0,44	0,46	0,48	0,52	0,57	0,64	0,71	0,90	1,23	1,54	9,38	7,17
$f_o$	0,38	0,44	0,46	0,49	0,53	0,57	0,62	0,70	0,87	1,03	1,30	1,64	11,59	12,11
	visuelles Spektrum									nahes Infrarot			fernes Infrarot	
1	1,00													
2	0,97	1,00												
3	0,97	0,99	1,00											
4	0,96	0,99	1,00	1,00										
5	0,94	0,97	0,98	0,98	1,00									
6	0,92	0,96	0,98	0,98	0,99	1,00								
7	0,86	0,90	0,91	0,92	0,96	0,95	1,00							
8	0,86	0,91	0,92	0,93	0,96	0,96	0,99	1,00						
9	0,74	0,78	0,81	0,81	0,83	0,88	0,84	0,85	1,00					
10	0,70	0,74	0,76	0,77	0,78	0,82	0,78	0,80	0,98	1,00				
11	0,77	0,82	0,83	0,84	0,87	0,87	0,89	0,90	0,88	0,90	1,00			
12	0,83	0,88	0,89	0,90	0,92	0,90	0,93	0,94	0,77	0,76	0,95	1,00		
15	-0,49	-0,49	-0,50	-0,48	-0,48	-0,54	-0,48	-0,48	-0,40	-0,26	-0,20	-0,26	1,00	
16	-0,45	-0,44	-0,45	-0,43	-0,43	-0,49	-0,43	-0,43	-0,36	-0,22	-0,15	-0,21	0,96	1,00

Gewebe mit geringen Verzeichnungen sehr gut beobachtet werden, wobei leichtes Gewebe, dann jedoch mit größeren Verzeichnungen behaftet, in MRT-Bildern besser wiedergegeben wird.

**Militärische Anwendungen:** Die Bildfusion wurde und wird auch gerade für militärische Applikationen eingesetzt. Bezogen auf die Fusion der Bildinformation unterschiedlicher Kamerasysteme wurden in [Scribner 2000] zur Veranschaulichung des komplementären Verhaltens die Korrelation zwischen verschiedenen spektralen Bändern gebildet (siehe Tabelle 2.6). Die Korrelationskoeffizienten wurden für die aufgenommene Bildinformation unterschiedlicher Sensoren bestimmt, die auf einem Satelliten montiert sind und eine räumliche Auflösung von 1m auf der Erdoberfläche erlauben.

Diese Aufstellung in Tabelle 2.6 zeigt ein starke Korrelation zwischen den Bändern des sichtbaren Spektrums und eine leichte Korrelation zwischen den visuellen Bändern und denen des nahen Infrarots. Die Korrelationskoeffizienten des mittleren Infrarots wurden zu Gunsten der Übersichtlichkeit nicht mit aufgeführt. Das nahezu komplementäre Verhalten des Visuellen und des fernen Infrarots äußert sich in einer leichten Anti-Korrelation zwischen diesen beiden Spektralbereichen. Dies motiviert aus physikalischer Sicht die Bildfusion dieser beiden Spektralbereiche, um so durch einen Kombination der nahezu komplementären Eigenschaften eine Erhöhung des Informationsgehalts des dargestellten Bildes zu erreichen.

In [Krebs 1998] wird ein Fusionssystem betrachtet, das die während eines Lufteinsatzes gesammelten Aufnahmen eines FIR- und eines visuellen Kamerasystems fusioniert. Die Fusion erfolgte im Nachhinein und musste somit die Echtzeitbedingung nicht erfüllen. Durch einen späteren Versuch mit ausgebildeten Piloten wurde eine Verbesserung des Zielkontrastes und somit eine bessere Erkennbarkeit und Lokalisierbarkeit von Zielen gegenüber den reinen Aufnahmen des FIR-Kamerasystems oder des eingesetzten Lichtverstärkers festgestellt.

[Simard 2000] beschreibt die Bildfusion von FIR-Information mit synthetisch generierter Umgebungsinformation, um Hubschrauberpiloten bei Such- und Rettungsmissionen zu unterstützen. Da

die Untersuchungen in einem Simulator stattfanden und der Hauptaugenmerk auf der Evaluierung der implementierten Fusionsalgorithmen lag, wurde die Echtzeitbedingung nicht beachtet.

Die Aufstellung dieser Literatur zeigt deutlich, dass die Fusion von Informationen unterschiedlicher Spektralbereiche entweder zur Anreicherung eines Spektralbereiches zu Zwecken der besseren Interpretierbarkeit oder aufgrund der Kombination nahezu komplementärer Informationskanäle zur Anreicherung mit Information genutzt wird. Weitere Literatur zum Einsatz und zur Untersuchung von Bildfusionssystemen finden sich in [Fay 2000].

Bei den in der Literatur beschriebenen Verfahren wurde von idealen Bedingungen hinsichtlich der räumlichen Beziehung zwischen den genutzten Kamerasystemen und hinsichtlich der zeitlichen Randbedingungen ausgegangen. Entweder wurden die betrachteten Objekte aus einer großen Entfernung aufgenommen, so dass die Parallaxe vernachlässigt werden konnte und somit die Objektstreue erfüllt wurde, oder die aufgezeichneten Bilder wurden erst im Nachhinein fusioniert, womit der gesamte Prozess der Bildfusion die Echtzeitanforderung nicht erfüllen musste. Desweiteren wurde davon ausgegangen, dass die Bildinformation von geschultem Personal interpretiert wurde, womit keine Diskussion der Interpretierbarkeit der dargestellten Information durch nicht ausgebildetes Personal erfolgte.

Für die vorliegende Arbeit sind somit vorrangig die Algorithmen zur Bildfusion von Interesse, die die Kriterien nach der Ausführbarkeit in Echtzeit und nach der Interpretierbarkeit durch ungeschultes Personal erfüllen und damit für einen automobilen Einsatz geeignet sind.

### 2.4.2. Algorithmen zur Bildfusion

Die Information der im vorhergehenden Abschnitt vorgestellten Sensoren für den ferninfraroten und den visuellen Spektralbereich soll nun durch geeignete Algorithmen zu einem Bild kombiniert werden. Dabei ist zu beachten, dass möglichst die „wichtigen“ Informationen, die für die Fahraufgabe notwendig sind, aus beiden Kamerabildern auch im fusionierten Bild enthalten sind und vorzugsweise sogar hervorgehoben werden.

Desweiteren besteht die Bedingung nach der Ausführbarkeit der Algorithmen in Echtzeit, um eine kontinuierliche und zeitsynchrone Wiedergabe der Bildinformation zu erreichen. Dies richtet sich im entscheidenden Maße nach der Komplexität und dem Rechenbedarf der Algorithmen, bestehend aus der Anzahl und der Art von auszuführenden Operationen. Die Komplexität des Algorithmus und dessen Ausführungsgeschwindigkeit stehen für eine gewählte Hardwarearchitektur in gegenläufigem Zusammenhang [McDaniel 1998].

Die folgende Aufstellung stellt die verfügbaren und untersuchten Algorithmen vor und schätzt deren Berechnungsaufwand ab, bzw. bewertet diese nach einem möglichen Einsatz im Automobil. Die Vorverarbeitungsstufen, wie die Normalisierung, die objektstreue Ausrichtung und die Anpassung der Bildgrößen, werden in die Bestimmung der Komplexität nicht mit einbezogen, da diese für alle Algorithmen auszuführen sind.

---

Die Aufstellung ist in drei Gruppen eingeteilt. Die Algorithmen der ersten Gruppe fusionieren die Ursprungsbilder durch pixelweise Überlagerung, die zweite Gruppe enthält die Algorithmen, die zur Fusion eine Falschfarbendarstellung nutzen und die dritte Gruppe verfolgt einen multiresolutionalen Ansatz, der die Bildinformation in unterschiedlichen Detailebenen fusioniert.

**Ungewichteter Mittelwert:** Der einfachste Ansatz besteht in der Überlagerung beider Bilder durch Mittelwertbildung. Die Informationen beider Bilder fließen gleichverteilt, ungewichtet in das fusionierte Bild ein. Die mathematische Formulierung zur Berechnung des Farbvektors  $\mathbf{F}_f(\cdot)$  des fusionierten Bildes aus den Farbvektoren  $\mathbf{F}_1(\cdot)$  und  $\mathbf{F}_2(\cdot)$  der beiden Ursprungsbilder an der Position  $\mathbf{x}^A$  zeigt Gleichung (2.2).

$$\mathbf{F}_f(\mathbf{x}^A) = \frac{\mathbf{F}_1(\mathbf{x}^A) + \mathbf{F}_2(\mathbf{x}^A)}{2} \quad (2.2)$$

Aufgrund der ungewichteten Überlagerung können bestimmte Bereiche, die sehr viele Details enthalten, nicht hervorgehoben werden. Ebenfalls ist eine Anpassung der Wichtung der Kanäle in Abhängigkeit von äußeren Systemparametern nicht möglich. Die Erweiterung um diese Freiheitsgrade führt zu dem folgenden Fusionsalgorithmus.

**Gewichteter Mittelwert:** Durch die Einführung von lokalen Wichtungsfaktoren kann für jedes Bildelement im fusionierten Bild dessen Zusammensetzung aus den beiden Eingangskanälen bestimmt werden (siehe Gleichung (2.3)).

$$\mathbf{F}_f(\mathbf{x}^A) = \frac{w_1(\mathbf{x}^A) \mathbf{F}_1(\mathbf{x}^A) + w_2(\mathbf{x}^A) \mathbf{F}_2(\mathbf{x}^A)}{w_1(\mathbf{x}^A) + w_2(\mathbf{x}^A)} \quad (2.3)$$

Die entscheidende Bedeutung kommt hierbei der Bestimmung der Wichtungsfaktoren bei. Als Ansatz wird eine multiplikative Verknüpfung aus einem lokaladaptiven Anteil  $w_i^o(\mathbf{x}^A)$  und einem kanaladaptiven Anteil  $w_i^c$  gewählt. Dieser Ansatz ermöglicht die Heraushebung bestimmter Bildbereiche eines Kanals und die Anpassung der Gewichtung eines Kanals. Dieser Ansatz lässt sich durch eine selektive Verarbeitung in einer entsprechenden Systemarchitektur umsetzen (vgl. Abschnitt 5.1.3). Die mathematische Formulierung zeigt Gleichung (2.4).

$$w_i(\mathbf{x}^A) = w_i^c w_i^o(\mathbf{x}^A) \quad (2.4)$$

Durch diese Modellierung ist es möglich, kanalübergreifend eine Adaptierung der Wichtungsfaktoren beispielsweise in Abhängigkeit äußerer Einflußfaktoren vorzunehmen. Durch die lokal adaptierbaren Wichtungsfaktoren können in bestimmten Bildbereichen Anteile eines Spektralbereiches stärker hervorgehoben werden. Für die Bestimmung von Wichtungsfaktoren finden sich

in der Literatur mehrere Algorithmen, von denen einige ausgewählte an dieser Stelle vorgestellt werden.

In [Simard 1999] wird ein Algorithmus zur Wichtung der spektralen Anteile beschrieben. Die jeweilige Wichtung des entsprechenden Kanals ist proportional zu seinem Informationsgehalt, wobei als Modell für den Informationsgehalt<sup>7</sup> die statistische Größe der Varianz genutzt wird. Der Wichtungsfaktor setzt sich additiv aus einer Konstanten  $K$  und einer linear vom Inhalt abhängigen Größe zusammen (vgl. Gleichung (2.5)).

$$w_i^c = K + V \sqrt{\text{var}(|\mathbf{F}_i(\mathbf{x}^A)|)} \quad (2.5)$$

Die beiden Parameter  $K$  und  $V$  wurden empirisch durch Analyse einer großen Anzahl an Testaufnahmen so bestimmt, dass einem kontrastarmen Bild ein Wichtungsfaktor von  $w_i^c = 0,5$  und einem kontrastreichen Bild ein Wichtungsfaktor von  $w_i^c = 1,0$  zugewiesen wurde. Zwischenwerte wurden durch die gegebene Funktion interpoliert. Für eine lokale Anwendung dieses Kriteriums wurden die Ursprungsbilder in Teilbereiche eingeteilt, und diese wurden getrennt betrachtet.

Anzumerken sei an dieser Stelle, dass aufgrund des gewählten Kriteriums für den Informationsgehalt eine Übergewichtung von rauschbehafteten Bildbereichen zu erwarten ist. Ebenfalls kann es durch die gewählte, übergangsfreie Einteilung der Bilder zu Sprüngen in den Wichtungsfaktoren kommen, was zu Inkonsistenzen in der Bilddarstellung führen kann.

In [Lallier 2000] werden neben dem Ansatz über die Betrachtung der Varianz noch zwei weitere Ansätze vorgestellt. Der erste Ansatz modelliert die Wichtungsfaktoren in Abhängigkeit der Differenz zwischen aktuellem Pixelwert und über die Mittelwertbildung approximierten Hintergrundwert. Dieses Modell soll die wichtigen Details vom Hintergrund isolieren. Im zweiten Ansatz wird eine Abhängigkeit der Wichtungsfaktoren von der Intensitätsdifferenz zwischen zwei aufeinander folgenden Bildern einer Sequenz vorgeschlagen. Dieser Ansatz wurde jedoch bereits in dieser Literaturstelle aufgrund von Instabilitäten verworfen.

Neben diesen genannten Kriterien für die Bestimmung der Wichtungsfaktoren wird in [Sharma 1999] ein Ansatz zur wahrscheinlichkeitsbasierten Bestimmung vorgestellt. Ausgehend von der Annahme, dass aus den gegebenen Sensorinformationen auf die wahre Szene geschlossen werden kann, wird dann in Abhängigkeit des Signal- und Rauschverhaltens der beiden Ursprungsbilder ein linear überlagertes Bild gebildet. Dieser Ansatz wird hier nur am Rande erwähnt, da die erforderliche Komplexität des Algorithmus eine Realisierung im Automobil aufgrund der notwendigen Anforderungen an die Hardware als unwahrscheinlich erscheinen lässt.

Diese Aufstellung an Ansätzen zur gewichteten Bildfusion zeigt, dass hier der Hauptaugenmerk auf der Bestimmung der Wichtungsfaktoren liegt. Dies bedeutet, dass eine falsche Wahl des Bestimmungskriteriums zu einer Verstärkung des Sensorrauschens bei einer Hochpasscharakteristik oder zu einer Verschlechterung der Detailerhaltung bei einer Tiefpasscharakteristik führt. Ebenfalls

<sup>7</sup>Der Informationsgehalt wird hier als signaltheoretische Größe verwendet. Als ergonomische Größe ist die Definition des Informationsgehalts nicht eindeutig, da dieser auch von der aktuellen Situation abhängig ist.

wird somit der Großteil der notwendigen Komplexität in die Bestimmung der Wichtungsfaktoren verlagert. Auf die Aspekte der objektiven und subjektiven Bewertung von fusionierten Kamerabildern wird im Rahmen dieser Arbeit nicht eingegangen. Desweiteren wird auf eine lokale Adaption der Wichtungsfaktoren verzichtet, wobei durch die in Abschnitt 5.1.3 vorgestellten Systemarchitektur eine lokale Adaption ermöglicht wird. Daher kann mithilfe dieser Systemarchitektur in weiteren Untersuchungen geklärt werden, inwieweit sich eine Integration von Algorithmen zur Anpassung der Wichtungsfaktoren auf die subjektive Bewertung und die Interpretierbarkeit von Fusionsbildern auswirkt.

Eine weitere Gruppe von Fusionsansätzen kombinieren die detektierte Strahlungsinformation zu Falschfarbenbildern. Bei dieser Art von Farbdarstellung setzen sich die Komponenten der Farbvektoren des fusionierten Bildes aus Kombinationen der Intensitäten der Ursprungsinformationen zusammen. Der Einsatz dieser Fusionsalgorithmen bietet sich besonders dann an, wenn monochrome Sensorinformationen überlagert werden sollen.

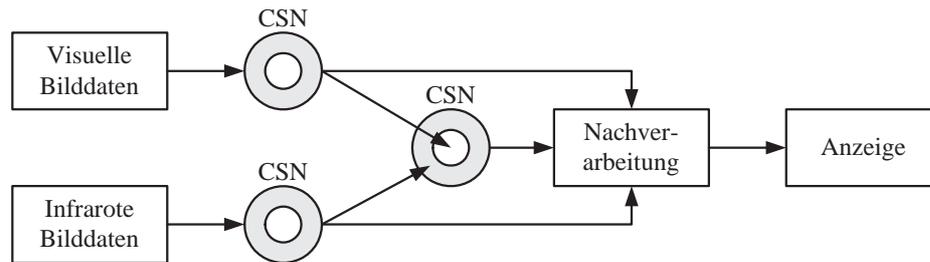
**TNO-Algorithmus:** In [Toet 1996] wird ein Fusionsalgorithmus beschrieben, der die Sensorinformation eines monochromen visuellen Kamerasystems und eines Infrarotkamarasystems kombiniert. In einem Vorverarbeitungsschritt wird zwischen beiden Ursprungssignalen der gemeinsame Anteil bestimmt, der dann jeweils von den Ursprungssignalen subtrahiert wird.

Der Farbvektor des fusionierten Bildes setzt sich aus den Intensitäten der Ursprungssignale und dem gemeinsamen Anteil zusammen (vgl. Gleichung (2.6)).

$$\mathbf{F}_f(\mathbf{x}^a) = \begin{pmatrix} |\mathbf{F}_1(\mathbf{x}^a)| - |\mathbf{F}_2(\mathbf{x}^a)| + \min(|\mathbf{F}_1(\mathbf{x}^a)|, |\mathbf{F}_2(\mathbf{x}^a)|) \\ |\mathbf{F}_2(\mathbf{x}^a)| - |\mathbf{F}_1(\mathbf{x}^a)| + \min(|\mathbf{F}_1(\mathbf{x}^a)|, |\mathbf{F}_2(\mathbf{x}^a)|) \\ |\mathbf{F}_1(\mathbf{x}^a)| - |\mathbf{F}_2(\mathbf{x}^a)| \end{pmatrix} \quad (2.6)$$

Nach der Aussage der Autoren weist ein mit diesem Algorithmus erzeugtes Bild eine nahezu natürliche Erscheinung und könnte aufgrund der geringen Komplexität für Echtzeitanwendungen geeignet sein.

**MIT-Algorithmus:** Analog zu dem präsentierten TNO-Algorithmus setzen sich die Farbvektoren des fusionierten Bildes nach dem in [Waxmann 1995] beschriebenen Ansatz ebenfalls komponentenweise zu einem Falschfarbenbild zusammen. Jedoch erfolgt vor der Kombination eine Vorverarbeitung in einem Center-Surround Netzwerk, das der Wirkungsweise der menschlichen Retina nachempfunden ist. Dieses Netzwerk entspricht prinzipiell einer Hochpassfilterung zur Kontrastanreicherung sowie einer Grauwertanpassung. Die so verarbeiteten Bildinformationen werden dann durch ein dritte Center-Surround Netzwerk zu dem resultierenden Bild zusammengeführt. Der Farbvektor des fusionierten Bildes setzt sich anschließend aus den beiden modifizierten Ursprungssignalen und dem modifizierten Kombinationssignal zusammen. Der gesamte Verarbeitungsprozess ist in Bild 2.15 dargestellt.

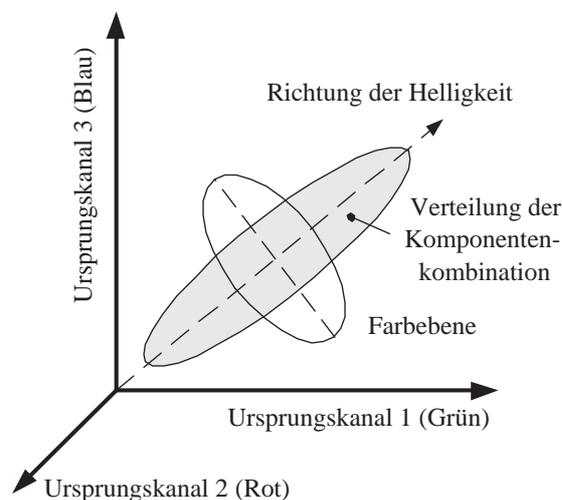


**Bild 2.15:** Fusionsalgorithmus nach [Waxmann 1995]

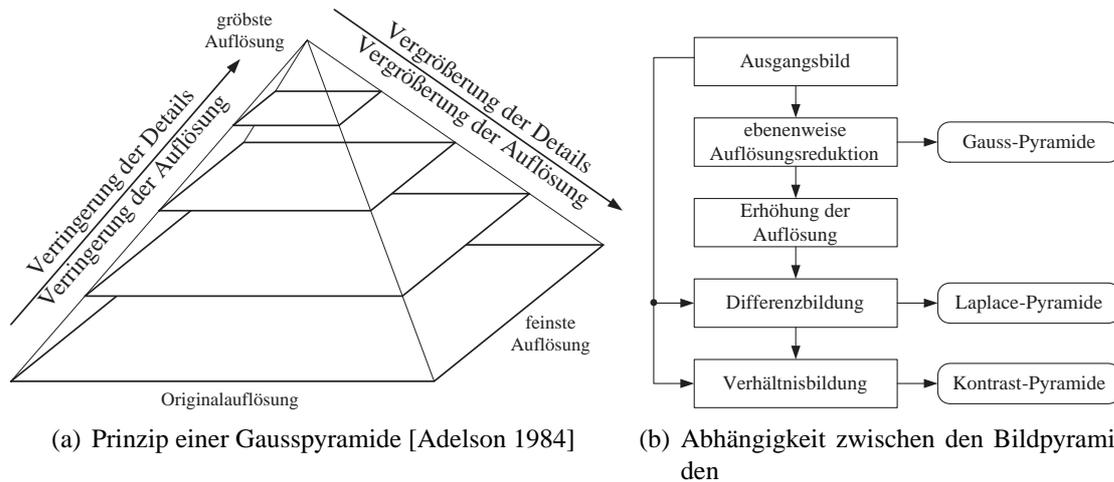
In [Fay 2000] wird der Einsatz weitere Netzwerkstrukturen beschrieben, die zur Fusion von mehr als zwei Kanälen geeignet sind. Analog zu dem Ansatz nach [Waxmann 1995] erzeugen diese Algorithmen aus den Eingangsbildern in der Nachverarbeitung Falschfarbendarstellungen.

**Principal-Component-Analysis:** Der in [Scribner 2000, McDaniel 1998] beschriebene Ansatz ist explizit für die Fusion von zwei und drei monochromen Kamerabildern gedacht. Aus der Korrelationsmatrix der Intensitätswerte der Ursprungssignale wird der maximale Eigenwert und der korrespondierende Eigenvektor bestimmt. In dessen Richtung wird die Helligkeitsachse des HSI-Farbraumes gelegt. Orthogonal zu dieser Achse befindet sich die Ebene in der Farbwert und Sättigung variiert werden können. In Bild 2.16 ist der Aufbau dieses Raumes, der die Farbkorrespondenz bestimmt, schematisch dargestellt. Der Farbvektor eines Pixels im fusionierten Bild wird somit durch eine lineare Kombination aus den Intensitätswerten der Ursprungssignale bestimmt.

Der Einsatz eines Algorithmus aus dieser Gruppe eignet sich besonders dann, wenn keine Farbinformation aus dem Visuellen vorliegt. Dann kann die Falschfarbendarstellung zu einer Verbesserung der Separierbarkeit der Spektralbereiche durch den Betrachter führen. Für eine automobilen Anwendung könnten diese Algorithmen aber aufgrund der Falschfarbendarstellung des fusionierten Bildes nicht geeignet sein, da die Möglichkeit der Verwechslung zwischen den Ereignissen



**Bild 2.16:** Aufbau des Farbraumes bei der Bildfusion mittels PCA nach [Scribner 2000]



**Bild 2.17:** Aufbau einer Bildpyramide und Abhängigkeiten zwischen den Pyramidentypen

„heiß“ und „hell“ sowie „kalt“ und „dunkel“<sup>8</sup> besteht. Zur Nutzung der Falschfarbendarstellung fanden noch keine Untersuchungen statt, die die Interpretierbarkeit untersucht haben. Jedoch ist zu vermuten, dass die Darstellung der Umgebungsinformation in Falsch- bzw. Mischfarben zu keiner Verbesserung der Interpretierbarkeit führt, sondern eher eine Verwirrung der Fahrers hervorruft, wenn für ihn bekannte Ereignisse, wie beispielsweise das Aufleuchten eines Rück- oder Bremslichtes, nicht in der gewohnten Farbe dargestellt werden.

Als letztes soll in dieser Betrachtung die Gruppe der Fusionsalgorithmen erwähnt sein, die die Ursprungsbilder in verschiedene Stufen der Detailauflösung, die so genannten Ortsfrequenzen, zerlegen, wobei die Auflösung von Stufe zu Stufe verringert wird. Aufgrund der Zerlegung in verschiedene Auflösungen werden diese Ansätze als multiresolutional bezeichnet; ein kompletter Satz einer Zerlegung bildet eine Bildpyramide.

**Laplace-Pyramide:** Die Laplace-Pyramide ist eine spezielle Bildpyramide, die in der Bildverarbeitung neben der Gauss-, der Kontrast- bzw. der Verhältnisspyramide zum Einsatz kommt [Adelson 1984, Burt 1988, Toet 1990]. Der prinzipielle Aufbau einer Bildpyramide und die Abhängigkeit zwischen den Pyramidentypen ist in Bild 2.17 dargestellt.

Der Aufbau einer Laplace-Pyramide erfolgt anschaulich in zwei Schritten. Im ersten Schritt erfolgt der Aufbau einer Gauss-Pyramide aus den Ursprungsbildern durch wiederholte Tiefpassfilterung mit einem Gauss-Kernel nach [Burt 1983]. Im zweiten Schritt wird durch ebenenweise Rekonstruktion und Differenzbildung die Laplace-Pyramide für beide Ursprungsbilder aufgebaut.

Durch die kaskadierte Bandpassfilterung wird eine stufenweise Reduktion der Detailinformation erreicht, wenn in erster Näherung angenommen wird, dass die Detailinformation im Hochpassbereich der Ortsfrequenzen liegen. Nun kann durch ein geeignetes Auswahlverfahren aus den beiden Bildpyramiden der Ursprungsbilder die Bildpyramide des fusionierten Bilder aufgebaut

<sup>8</sup>Annahme, dass hohe Temperaturen heller dargestellt werden als kalte

werden. Ein mögliches Auswahlverfahren betrachtet die Signalenergie des betrachteten Bildelements in jeder Ebene und übernimmt die Information des Pixels mit der größten Signalenergie [Adelson 1984]. Die Ebene mit den geringsten Details wird durch Mittelwertbildung der entsprechenden Ebene in den Ursprungspyramiden errechnet. Aus der resultierenden Bildpyramide wird das fusionierte Bild rekonstruiert.

Aufgrund der Linearität der auszuführenden Operation und der Separierbarkeit des eingesetzten Gauss-Kernels kann bei der Umsetzung eines Fusionsalgorithmus mittels der Laplace-Pyramide die Berechnung des fusionierten Bildes hinsichtlich des Berechnungsaufwandes weiter optimiert werden.

Der Einsatz der ebenfalls genannten Bildpyramiden wurde für die Fusion von Bildern untersucht [Toet 1990]. Jedoch stellen die Kontrast- bzw. Verhältnispyramide aufgrund der auszuführenden Division besondere Ansprüche an die Rechengenauigkeit der Verarbeitungshardware, um eine exakte Rekonstruktion der Ursprungsbilder zu ermöglichen.

Neben den hier vorgestellten Algorithmen sind noch andere Verfahren zur Bildfusion dokumentiert, die beispielsweise eine Zerlegung der Ursprungsbilder mittels Wavelet-Transformation durchführen [Li 1995, Rockinger 1997]. Jedoch würde die Auflistung und die Diskussion dieser unterschiedlichen Methoden den Rahmen dieser Arbeit sprengen. Daher wurde an dieser Stelle auf die Algorithmen hingewiesen, deren Umsetzung im Automobil hinsichtlich des Berechnungsaufwandes als möglich erscheint. Eine Qualitätsbeurteilung multiresolutionaler Fusionsalgorithmen findet sich in [Rockinger 1999].

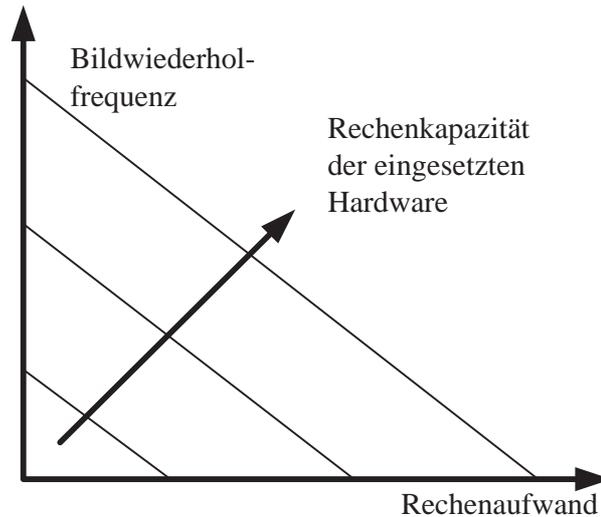
### 2.4.3. Abschätzung des Berechnungsaufwandes

Über die im letzten Teilabschnitt beschriebenen Fusionsalgorithmen wurden keine Aussagen über deren Berechnungsaufwandes gegeben. Für einen Einsatz im Automobil ist jedoch der Bedarf an Rechenkapazität eine wichtige Kenngröße, die bei der Auswahl eines bestimmten Algorithmus zusätzlich beachtet werden muss. Ebenfalls bestimmt sich aus dem notwendigen Berechnungsaufwand und der Kapazität der eingesetzten Verarbeitungshardware die Wiederholfrequenz der Videobilder.

In Bild 2.18 ist der Zusammenhang zwischen diesen drei Parametern Wiederholfrequenz, Rechenkapazität und Algorithmenkomplexität schematisch dargestellt. Da die minimale Bildwiederholfrequenz durch ergonomische Untersuchungen bestimmt wurde (siehe Abschnitt 5.1.1), kann die einzusetzende Rechenhardware über die Komplexität des eingesetzten Algorithmus bestimmt werden.

In [Simard 1999, Sharma 1999, McDaniel 1998] ist der Berechnungsaufwand der in diesen Arbeiten vorgestellten Algorithmen zusammengefasst. Tabelle 2.7 bietet hierzu ein Überblick über diese Abschätzungen des Berechnungsaufwandes. Algorithmen, für die in der Literatur keine Abschätzungen dokumentiert sind, werden in der Tabelle ergänzt.

---



**Bild 2.18:** Schematische Darstellung des Zusammenhangs zwischen Wiederhol- frequenz, Rechenkapazität und Algorithmenkomplexität bei gleich bleibender Bildgröße nach [McDaniel 1998]

Anhand dieser Abschätzung kann die Auswahl der geeigneten Funktionshardware erfolgen, um alle notwendigen Randwerte zu erfüllen. Im Rahmen dieser Abschätzung wurde die Anzahl der Zugriffe auf den Systemspeicher nicht mit abgeschätzt, da diese maßgeblich von der gewählten Umsetzung des Algorithmus abhängig sind. Bei der Umsetzung ist daher ebenfalls auf die Effizienz der Algorithmus bezüglich der Speicherzugriffe zu achten.

Für einen automobilen Einsatz bietet sich der Fusionsalgorithmus mittels Laplace-Pyramide an, da dieser aufgrund der Definition des Algorithmus, die besten Eigenschaften hinsichtlich der Hervorhebung von Detailinformationen in Verbindung mit einem durchschnittlichen Rechenbedarf realisiert. Jedoch kann durch diesen Algorithmus nur eine kanaladaptive und keine lokaladaptive Fusion durchgeführt werden.

Daher bietet sich für die Umsetzung in einem Testsystem der gewichtete Mittelwertalgorithmus

**Tabelle 2.7:** Berechnungsaufwand der einzelnen Algorithmen in Operationen je Pixel

Algorithmus	Addition	Multiplikation	Division	Total
Mittelwert	1	-	1 (Halbierung)	2
gewichteter Mittelwert (ohne Best. der Wichtungsfaktoren)	2	2	1	5
Laplace-Pyramide (für separierbaren $5 \times 5$ Gausskernel)	32	40	-	72
TNO [Simard 1999]	16	7	-	23
MIT [Simard 1999]	28	13	1	42
Wahrscheinlichkeitsbasiert [Sharma 1999]				$\approx 500$

an. Dieser zeichnet sich neben des geringen Rechenaufwands pro Pixel durch die Möglichkeit aus, externe Verfahren zu nutzen, um die Wichtungsfaktoren sowohl kanal- als auch lokaladaptiv zu gestalten. Somit kann durch ein solches Testsystem die Adaptierbarkeit der lokalen Wichtungsfaktoren realisiert und deren Einfluss auf die Interpretierbarkeit des dargestellten Bildes untersucht werden.

Die Verfahren, die zur Überlagerung eine Falschfarbendarstellung nutzen, werden im Rahmen dieser Arbeit nicht weiterführend betrachtet. Denn durch die Falschfarbendarstellung wird ein weiterer Faktor neben dem Abbildungsversatz in die Betrachtung eingeführt, der die Interpretierbarkeit des dargestellten Bildes beeinflusst. Die Benutzer sind nicht auf die Wahrnehmung und Interpretation von Falschfarbenbildern „trainiert“, so dass es zu einer Beeinflussung der Interpretierbarkeit des dargestellten Bildes kommen kann. Um die Einflüsse der beiden Faktoren trennen zu können, erfolgt die Wiedergabe der visuellen Information zu Gunsten der Interpretierbarkeit in den gewohnten, natürlichen Farben.

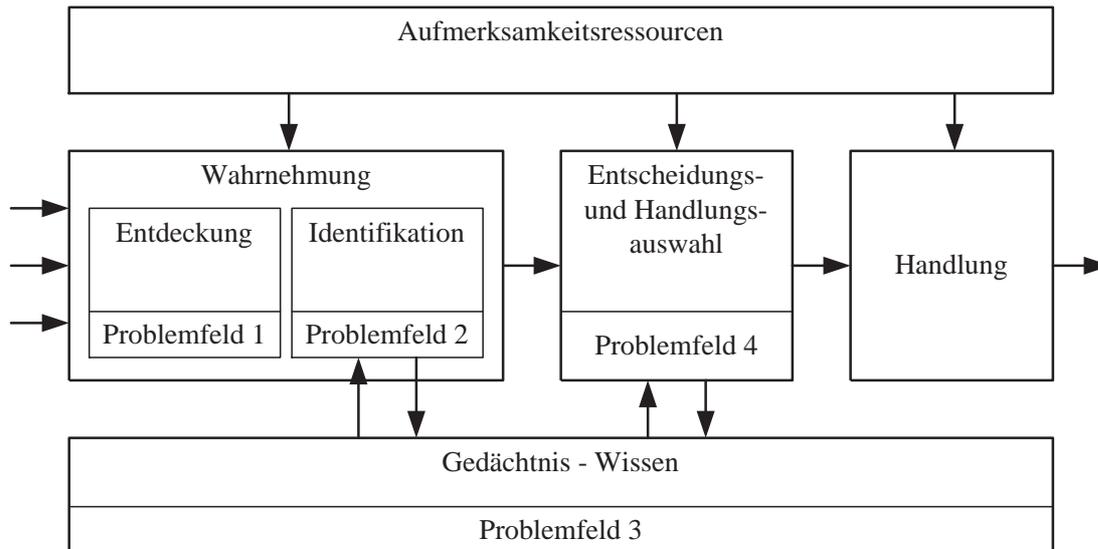
## 2.5. Motivation der Bildfusion für Nachtsichtanwendungen im Automobil

Wie in Abschnitt 2.3.4 gezeigt, kann durch den Einsatz eines Nachtsichtsystems die Detektionswahrscheinlichkeit und auch die Detektionsentfernung straßenverkehrsrelevanter Objekte verbessert werden, was neben einer Verbesserung des Fahrkomforts auch zu einer Erhöhung der Verkehrssicherheit bei einer entsprechenden Nutzung beitragen kann. Besonders bei einem Einsatz eines Nachtsichtsystems basierend auf einer FIR-Kameratechnologie ist zu beachten, dass der Bildentstehung ein anderes physikalisches Prinzip als bei der visuellen Betrachtung derselben Szene zu Grunde liegt. Auch wenn ein FIR-Kamerabild nach der Objektform scheinbar ein Schwarzweißabbild der aktuellen Szene darstellt, wird doch hauptsächlich emittierte und nicht reflektierte Strahlung, wie beim visuellen Sehen, detektiert. In diesem Abschnitt wird daher untersucht, wie sich dieser Unterschied in der Wahrnehmung von FIR-Kamerabildern äußert und wie möglichen Widersprüchen begegnet werden kann.

In [Schumann 2004] wird daher der visuelle Informationsverarbeitungsprozess nach [Wickens 2000] auf die Wahrnehmung von FIR-Kamerabildern angewendet. Dabei konnten die vier, in Bild 2.19 zugeordneten Problemfelder bei der Wahrnehmung von FIR-Bildern isoliert werden. Im folgenden werden diese Problemfelder hinsichtlich ihrer Entstehung und bezüglich Lösungsmöglichkeiten nach [Schumann 2004] diskutiert. Dabei wurden in [Schumann 2004] zur Aufstellung der Problemfelder und zur Diskussion möglicher Lösungsansätze folgende Literatur herangezogen: [Brickner 1989a, Brickner 1989b, Essock 1999, Foyle 1990, Gish 1999, Krebs 2002, Parkes 1995, Recarte 2003, Rumar 1990, Rumar 2002, Stark 1987, Treisman 1993, Wickens 2000].

**Problemfeld 1 - Reizentdeckung:** In diesem ersten Schritt der Informationsverarbeitung werden die durch das menschliche Auge erfassten Reize mit einfachen Suchmechanismen nach

---



**Bild 2.19:** Visueller Informationsprozess nach [Wickens 2000] (über [Schumann 2004])

bestimmten Kriterien wie Bewegung, Form, Farbe, etc. vorverarbeitet, die besonders auf deutlich hervortretende Reizmerkmale reagieren. In diesem Prozessschritt kann es somit mit der Anzahl wärmeemittierender Objekte zu Schwierigkeiten kommen, da ein bestimmtes Reizmuster aus dem monochromatischen Bild nicht wahrnehmbar ist, weil dieses Reizmuster entweder nicht aus dem Bild herausragt, da zu viele Reize auftreten oder das Reizmuster durch einen anderen Reiz teilweise verdeckt wird.

Eine bessere Strukturierung der Umgebungsinformation durch die Überlagerung mit einem visuellen Kamerasystem könnte somit nach [Schumann 2004] die visuellen Suchmechanismen unterstützen und so relevante Objekte aus der Umgebung hervortreten lassen. Dies deckt sich mit den Ergebnissen aus [Essock 1999], dass durch Anreicherung der Bildinformation mit Textur und Farbe die perzeptive Organisation verbessert und dadurch die Objektentdeckung beschleunigt werden kann. Gerade die Farbinformation spielt eine dominante Rolle bei der Detektion [Essock 1999].

**Problemfeld 2 - Identifikation durch visuelle Objektrepräsentation:** In dieser Stufe des Wahrnehmungsprozesses werden die strukturierten Reize mit den im Langzeitgedächtnis gespeicherten visuellen Objektrepräsentationen verglichen und bilden die Grundlage für die Identifikation. Dieser Vorgang ist eng mit den gespeicherten, visuellbasierten Gedächtnisinhalten verknüpft.

Dieser Vergleich der FIR-Objektreferenzen mit den abgespeicherten visuellen Repräsentationen führt nach [Schumann 2004] oft zu einer höheren Beanspruchung, da die Informationen länger miteinander verglichen werden. Die Anreicherung mit visueller Information könnte den gesamten Identifikationsprozess beschleunigen und die so gebundenen Aufmerksamkeitsressourcen schneller wieder freigeben [Schumann 2004].

**Problemfeld 3 - Erschwerte Erlernbarkeit von FIR Bildinformationen:** Dieses Problemfeld ist sehr eng mit der Identifikation verbunden. Im Langzeitgedächtnis werden Objektreferenzen, die während der Identifikation gelernt wurden, abgelegt und stehen für das spätere Vergleichen im Identifikationsprozess zur Verfügung. [Schumann 2004] folgert daher, dass aufgrund der primären Nutzung der visuellen Wahrnehmung bei Nachtfahrten, die FIR-Objektrepräsentationen eher rudimentär und unvollständig im Langzeitgedächtnis vorhanden sind. Daher kann es beim Abruf dieser Objektrepräsentationen zu Schwierigkeiten oder Verzögerungen kommen.

**Problemfeld 4 - Verzögerte bzw. fehlerhafte Handlungsauswahl:** Dieses Problemfeld resultiert aus dem Prozesscharakter des Informationsverarbeitungsprozesses, in den die Stufen der Objektdetektion und -identifikation eingebunden sind. Schwierigkeiten in der Wahrnehmung kann zu Verzögerungen in der Handlungsauswahl und im schlimmsten Fall der Nichtdetektion oder der Fehlidentifikation zu einer fehlerhaften Handlungsauswahl führen.

In [Schumann 2004] wird desweiteren darauf hingewiesen, dass neben der Objektdetektion und -identifikation eine Lokalisierung dieses Objektes in der Fahrumgebung wichtig ist. Durch die Überlagerung mit der visuellen Information kann nach [Schumann 2004] dieser Prozess unterstützt werden.

Eine Überlagerung des Nachtsichtbildes eines FIR-Kamerasystems mit dem entsprechenden visuellen Abbild der aktuellen Szene unterstützt den Wahrnehmungsprozess des Fahrers bei der Strukturierung der dargestellten Information. Die visuelle Information erleichtert den Vergleich der im Bild detektierten Objektreferenzen mit den visuell erlernten und im Langzeitgedächtnis gespeicherten Informationen. Durch die wahrnehmungspsychologische Anpassung des FIR-Kamerabildes mithilfe visueller Information kann nach [Schumann 2004] die aus den genannten Problemfeldern bestehende Fehlerkette bis zur Handlungsauswahl minimiert werden.

Diese Aussage wird durch die in [Krebs 2002] vorgestellten Ergebnisse bestätigt. Mit dem fusionierten Bildmaterial konnte die Reaktionszeit bei Raumorientierungsaufgaben verringert und die Genauigkeit bei der Szenenerkennbarkeit im Vergleich zu den Ursprungsbildern verbessert werden.

Die Bildfusion von Nachtsichtbildern aus dem fernen Infrarot mit der entsprechenden visuellen Information könnte somit zu einer besseren und schnelleren Interpretation der dargestellten Information führen. Ebenfalls unterstützt die überlagerte visuelle Information die Lokalisierung der dargestellten Objekte in der aktuellen Fahrumgebung.

## 2.6. Fazit

Die Analyse von Unfallstatistiken belegt, dass nachts das Unfallrisiko circa dreimal höher als am Tage ist. Als entscheidender Faktor konnte dabei durch [Sullivan 2001] die Sichtverhältnisse identifiziert werden. Dies deckt sich mit der Expertenaussage, dass ca. 90% der beim Fahren benötig-

---

ten Information über den visuellen Kanal wahrgenommen wird, wobei gerade nachts dieser Kanal stark eingeschränkt wird.

Da das Potenzial der konventionellen Lichttechnik prinzipbedingt und gesetzlich limitiert ist, wird für sichtverbessernde Fahrerinformationssysteme auf andere Spektralbereiche ausgewichen. Hier bietet sich vor allem der Einsatz von FIR-Kamerasystemen an, da diese ohne aktive Beleuchtung arbeiten und die Objekte in der Fahrumgebung aufgrund der durch die Körpertemperatur emittierten Strahlung detektieren. Dies ermöglicht einen Reichweitenvorteil gegenüber NIR-Nachtsichtsystemen und der konventionellen Scheinwerfertechnik. Die Eigenschaften dieser beiden Nachtsichtsysteme und der für die Szenendetektion notwendige Aufbau dieser Systeme wurden im Laufe dieses Kapitels diskutiert.

Da die dem Fahrer zur Verfügung gestellte Information der aktuellen Fahrumgebung nicht einem visuellen Szenenabbild entspricht, dessen Interpretation erlernt wurde, kann es bei der Interpretation von FIR-Kamerabildern zu Fehlinterpretationen und somit zu Fehleinschätzungen und Fehlentscheidungen kommen. In [Schumann 2004] wurde daher zur Minimierung der Fehlerkette empfohlen, die Information eines FIR-Kamerabildes mit der normalen, visuellen Information zu fusionieren, was neben einer Beschleunigung der Identifikation der dargestellten Information auch zu einer verbesserten Lokalisierung der dargestellten Objekte führen kann. Diese Ergebnisse decken sich mit Schlussfolgerungen aus [Essock 1999, Krebs 2002, Sinai 1999, Krebs 1999].

Zur Darstellung der Bildfusion wurden der Einsatz verschiedener Fusionsalgorithmen hinsichtlich einer automobilen Anwendung untersucht. Für ein Testsystem wird der Einsatz des gewichteten Mittelwertansatzes empfohlen, da dieser das größte Optimierungspotential hinsichtlich der bestmöglichen Informationsselektion und der geringstmöglichen Komplexität bietet. Ebenfalls kann bei diesem Fusionsansatz durch eine lokale Adaption der Wichtungsfaktoren weitere Umgebungsinformation berücksichtigt werden. Für einen möglichen automobilen Einsatz empfiehlt sich bei einer kanaladaptiven Verarbeitung der Ursprungsbilder die Fusion mittels der Laplace-Pyramide, da dieser die besten Eigenschaften bezüglich der Erhaltung von Detailinformation aufweist.

---

### 3. Geometrische Modellierung der multispektralen Kameraanordnung

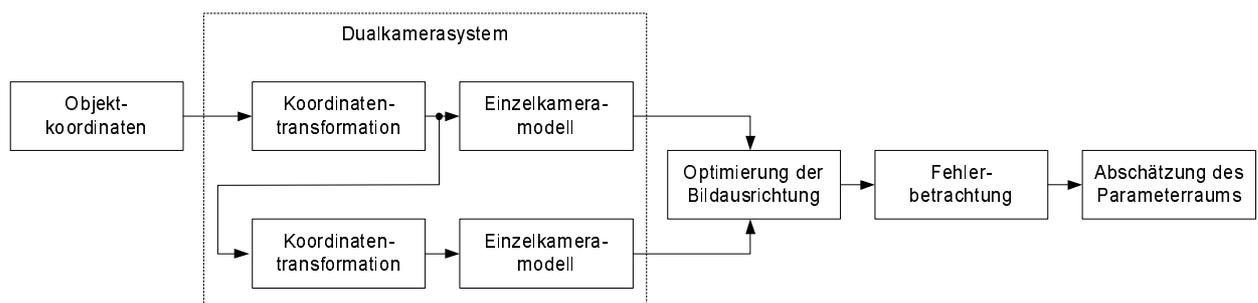
Die Gegenüberstellung der Eigenschaften des visuellen und ferninfraroten Spektralbereiches zeigen komplementäres Verhalten hinsichtlich der dargestellten Information sowie hinsichtlich der physikalischen Eigenschaften. Für die Detektion der Information in den beiden Spektralbereichen werden verschiedenen Kamerasysteme eingesetzt.

Die Integration beider Kamerasysteme zu einem gemeinsamen Gesamtsystems mit einer gemeinsamen optischen Achse kann aufgrund der unterschiedlichen Materialanforderungen an die Optiken nicht erfolgen. Für einen automobilen Einsatz bietet sich der disjunkte Aufbau beider Kamerasysteme und eine anschließende Kombination zu einem Dualkamerasystem aufgrund von Vorteilen bei der Integration an. Der somit vorhandene Versatz beider Kamerasysteme führt zu einem Versatz der optischen Achsen und resultiert in einer Parallaxe, bzw. einem Versatz von ein und demselben Objekt in beiden Kamerabildern. Dies bedeutet, dass die Bildinformationen vor der Überlagerung geeignet zueinander ausgerichtet werden müssen. Als Kriterium gilt hierbei, der Versatz zwischen der emittierten und reflektierten Strahlung eines Objektes im fusionierten Bild möglichst gering sein soll.

Für die Ausrichtung und die Betrachtung von Versatzunterschieden wird in diesem Kapitel ein Modell aufgestellt, das den Zusammenhang zwischen den Koordinaten der betrachteten Objekte und deren Bildkoordinaten im fusionierten Bild nach Abbildung und Ausrichtung beschreibt. Mit Hilfe dieses Modell sollen die Auslegungsrichtlinien für ein Dualkamerasystem aufgestellt. Aus diesen Richtlinien kann bei einem gegebenen Einsatzbereich das Gesamtsystem ausgelegt werden oder der Einsatzbereich eines gegebenen Systems ermittelt werden. Bei dieser Bewertung stellt der maximale Versatzfehler, über den die Objekttreue definiert ist, das Bewertungskriterium dar.

Bild 3.1 zeigt den Zusammenhang zwischen den Stufen der Modellierung, die schematisch dem Aufbau dieses Kapitels entsprechen.

Die Koordinaten der betrachteten Objekte werden in das Koordinatensystem des ersten Kamerasystems transformiert, welches als Basis- bzw. Bezugssystem dient. Für das zweite Kamerasystem



**Bild 3.1:** Übersicht der einzelnen Modellteilschritte

werden diese Koordinaten ein weiteres Mal transformiert, um den relativen Versatz, die Abweichungen der Blickwinkel und die Bildrotation beider Kamerasysteme zueinander zu modellieren. Die planare Abbildung der Koordinatenangaben erfolgt mittels des Einzelkameramodells, das durch Parametrisierung an das jeweilige Kamerasystem angepasst wird.

Die sich an die Abbildung durch das erste Kamerasystem anschließende Bildausrichtung transformiert die zweidimensionalen Bildkoordinaten so, dass diese möglichst objekt-treu mit den durch das zweite Kamerasystem projizierten Koordinaten desselben Objektes übereinstimmen. Die für diese Bildtransformation benötigten Parameterwerte werden durch die Optimierung der Bildausrichtung bestimmt. Die abschließende Fehlerbetrachtung analysiert die entstehenden Abbildungsunterschiede zwischen den Projektionen beider Kamerasysteme. Und bezogen auf eine Maximalgrenze für den Abbildungsversatz bestimmt sich so der Parameterraum für den äußeren Versatz beider Kamerasysteme.

Basierend auf dem aufgestellten Dualkameramodell kann die Auslegung eines gewählten Dualkamerasystems erfolgen. Während dieser Auslegung wird die optimale Entfernung ermittelt, auf die das System eingemessen wird, um eine optimale Ausrichtung bezüglich des Ausrichtungsfehlers zu erreichen. Als weiteren Parameter wird bei der Auslegung des Dualkamerasystems der maximale Montageabstand betrachtet, da dieser maßgeblich den entfernungsabhängigen Objektversatz bestimmt.

### **3.1. Modellierung der Objektabbildung eines Dualkamerasystems**

In diesem Abschnitt werden die geometrischen Zusammenhänge zwischen den Objektpunkten und den entsprechenden Bildpunkten nach der Projektion durch beide Kamerasysteme modelliert.

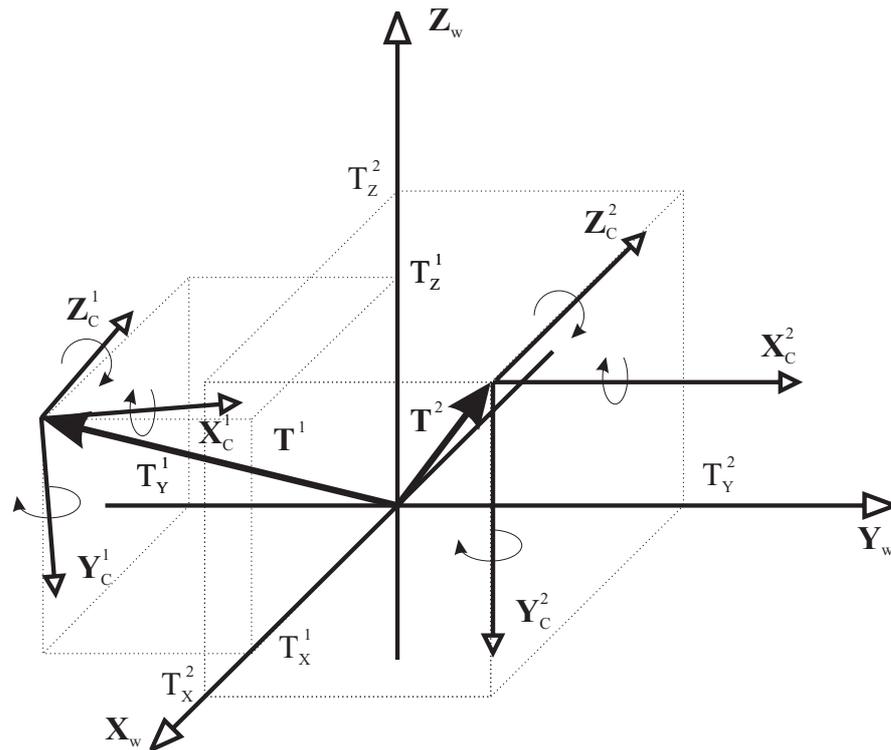
Als Ausgangspunkt der gesamten theoretischen Betrachtungen dient ein mathematisches Modell, das das Abbildungsverhalten eines Dualkamerasystems nachbildet. Die Zielsetzung besteht darin, die Korrespondenz zwischen Objektkoordinaten im Weltkoordinatensystem mit den Koordinaten der Abbildung durch beide Kamerasysteme herzustellen. Dabei besteht das Gesamtmodell aus zwei Einzelkameramodellen, deren Versatz durch eine lineare Transformation modelliert wird.

Der Abbildungsprozess eines Objektpunktes wird in zwei Stufen betrachtet: Ausgehend von der Koordinatentransformation, die die Weltkoordinaten der Objekte in die Koordinaten der Kamerasysteme transformiert, erfolgt anschließend die eigentliche Abbildung auf die zweidimensionale Bildebene.

#### **3.1.1. Koordinatentransformation**

Über die dreidimensionale Koordinatentransformation wird der Zusammenhang zwischen zwei Koordinatensystemen hergestellt, in diesem Fall zwischen dem Weltkoordinatensystem, in dem die Objekte der aktuellen Fahrszene lokalisiert werden, und dem entsprechenden Koordinatensystem

---

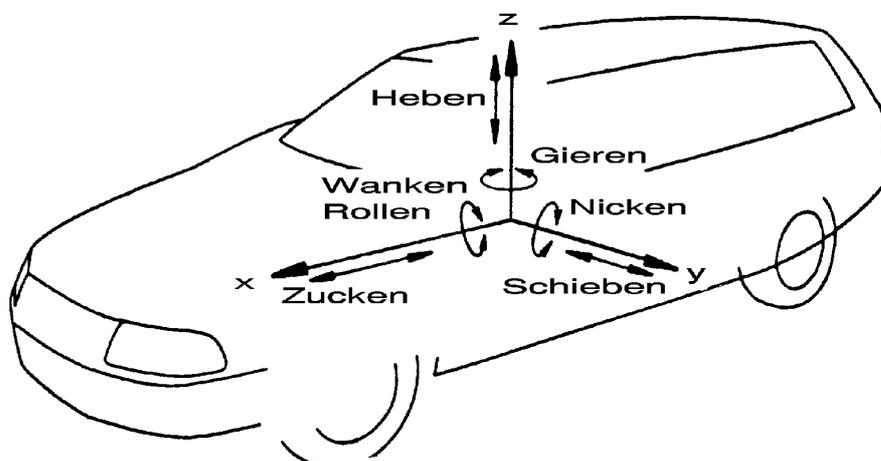


**Bild 3.2:** Zusammenhang zwischen dem Weltkoordinatensystem und den Kamerakoordinatensystemen

des detektierenden Kamerasystems. Bild 3.2 zeigt den Zusammenhang zwischen dem Welt- und den beiden Kamerakoordinatensystemen, wobei das Weltkoordinatensystem frei wählbar ist. Für die Modellierung ist die Beziehung zwischen beiden Kamerasystemen von Interesse.

Nach [Winner 2003] ist in der Fahrzeugtechnik das in Bild 3.3 dargestellte Koordinatensystem üblich, das dem im Rahmen der Arbeit genutzten Weltkoordinatensystem entspricht.

Im Allgemeinen setzt sich eine Transformation zwischen zwei orthogonalen Koordinatensystemen aus einer Rotation, einer Verschiebung (Translation) und einer Skalierung zusammen [Bartsch 1994].



**Bild 3.3:** In der Fahrzeugtechnik übliches Koordinatensystem [Winner 2003]

Da das Ausgangs- und das Zielkoordinatensystem orthogonal und metrisch definiert sind, kann die Skalierung, die im allgemeinen Fall enthalten ist, entfallen.

Für beide Kamerasysteme gilt folgenden Transformationsvorschrift der Koordinatensysteme. Die Objektkoordinaten  $\mathbf{X}_w$  im Weltkoordinatensystem werden durch die linearen Transformationen  $\mathbf{H}_1^3$  und  $\mathbf{H}_2^3$  in die Objektkoordinaten  $\mathbf{X}_1^c$  und  $\mathbf{X}_2^c$  der entsprechenden Kamerakoordinatensysteme transformiert.

$$\mathbf{X}_1^c = \mathbf{H}_1^3 \mathbf{X}_w \quad (3.1)$$

$$\mathbf{X}_2^c = \mathbf{H}_2^3 \mathbf{X}_w \quad (3.2)$$

Die Gleichung (3.1), (3.2) drücken jedoch nicht den relativen Zusammenhang zwischen beiden Kamerasystemen aus, der für die Betrachtung der Abbildungsunterschiede von Interesse ist. Aus diesem Grund wird eines der beiden Kamerasysteme als Basis- bzw. Bezugssystem gewählt und die Transformation der Objektkoordinaten für das zweite Kamerasystem relativ dazu erfolgen. Ohne Beschränkung der Allgemeinheit kann Kamerasystem  $i = 2$  als Basis vereinbart werden, denn eine umkehrbar eindeutige Umrechnung zwischen beiden Systemen ist jederzeit möglich.

$$\mathbf{X}_1^c = \mathbf{H}_1^3 (\mathbf{H}_2^3)^{-1} \mathbf{X}_2^c \quad (3.3)$$

$$= \mathbf{H}^3 \mathbf{X}_2^c \quad (3.4)$$

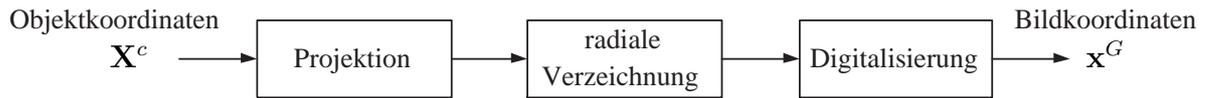
Die Transformationsmatrix  $\mathbf{H}^3$  enthält somit alle notwendigen Transformationen für die Überführung des einen Kamerakoordinatensystem in das andere. Allgemein handelt es sich um eine Rotation  $\mathbf{R}^3$  und eine Translation  $\mathbf{T}^3$  [Gonzalez 1992]. Bei der Transformation ist die Lage des Bezugspunktes zu beachten. Ggf. ist vor der Transformation eine Verschiebung in den Bezugspunkt und nach erfolgter Transformation eine inverse Verschiebung notwendig. In Gleichung (3.5) wird davon ausgegangen, dass sich der Bezugspunkt bei  $(0, 0, 0, 0)^T$  befindet.

$$\mathbf{H}^3 = \mathbf{R}^3 \mathbf{T}^3 \quad (3.5)$$

$$= \mathbf{R}_\alpha^3 \mathbf{R}_\beta^3 \mathbf{R}_\gamma^3 \mathbf{T}^3$$

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

$$\begin{pmatrix} \cos \gamma & \sin \gamma & 0 & 0 \\ -\sin \gamma & \cos \gamma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & -T_x \\ 0 & 1 & 0 & -T_y \\ 0 & 0 & 1 & -T_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$



**Bild 3.4:** Teilschritte des Einzelkameramodells

Die nun in den Kamerakoordinatensystemen vorliegenden Objektkoordinaten können durch das Einzelkameramodell, das im weiteren Verlauf detailliert vorgestellt wird, zweidimensional abgebildet werden.

### 3.1.2. Einzelkamerasystem

Das Modell eines Dualkamerasystems besteht aus zwei Einzelkameramodellen, die durch eine entsprechende Parametrisierung an das jeweils betrachtete, praktisch vorliegende Kamerasystem angepasst werden können. Bei der Betrachtung des Einzelkamerasystems wird davon ausgegangen, dass die Koordinaten der betrachteten Objekte bereits im Koordinatensystem des Kamerasystems vorliegen. Denn die Koordinatentransformation wird explizit nicht als Teil des Einzelkameramodells betrachtet. Das Modell ist somit in 3 Teilschritte gegliedert, die desweiteren näher erläutert werden (vgl. Bild 3.4).

Als Modell wird das nach [Lanser 1995] bekannte Einzelkameramodell genutzt.

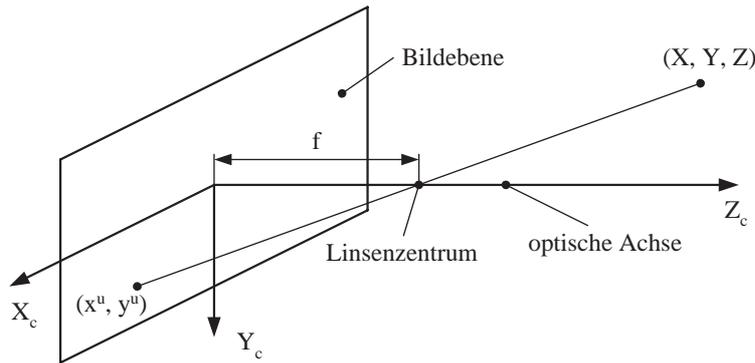
**Projektion:** Im ersten Schritt erfolgt die Abbildung der Objektkoordinaten durch eine perspektivische Projektion auf die Bildebene. Aufgrund der Nichtlinearität dieses Modellschritts aufgrund der Division durch die Objektentfernung kann keine geschlossene Matrixschreibweise zur mathematischen Formulierung herangezogen werden. Für Vereinfachungen findet sich in der Literatur die Formulierung der homogenen Koordinaten [Jähne 2001], jedoch führt auch dieses Vorgehen nicht zu einer vollständigen Matrixform. In den weiteren Betrachtungen wird das in Gleichung (3.6) formulierte mathematische Modell für die Projektion genutzt.

$$\begin{pmatrix} x_i^u \\ y_i^u \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{f_i}{Z_i^c} X_i^c \\ \frac{f_i}{Z_i^c} Y_i^c \\ 1 \end{pmatrix} \quad (3.6)$$

$$\mathbf{x}_i^u = \mathcal{P}_i(X_i^c) \quad (3.7)$$

Bild 3.5 veranschaulicht die Projektion.

**Verzeichnungen:** Zur Modellierung eines realen Kamerasystems werden im zweiten Schritt radiale Verzeichnungen eingeführt. Das Brechungsverhalten realer Optiken ist funktional vom Auftreffpunkt und der Richtung des Sehstrahls abhängig, was entweder zu einer stärkeren oder einer schwächeren Brechung als durch das ideale Modell angenommen führt. Dieses Verhalten



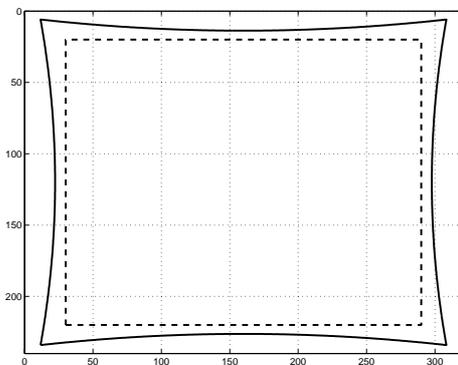
**Bild 3.5:** Projektion eines Weltpunkts im Kamerakoordinatensystem auf die Bildebene

lässt sich am besten durch die Abbildung einer rechteckförmigen Figur veranschaulichen: Eine stärkere Brechung verzeichnet das resultierende Abbild tonnenförmig, während eine schwächere Brechung eine kissenförmige Verzeichnung hervorruft.

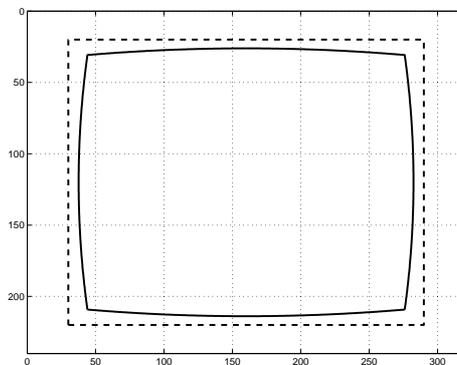
Nach [Tsai 1987] kann der Einfluss tangentialer Verzeichnungen vernachlässigt werden. Weiterhin wird eine Modellierung der radialen Verzeichnungen durch einen quadratischen Term als ausreichend beschrieben. Eine Erweiterung des Modells durch Terme höherer Ordnung und die Berücksichtigung tangentialer Verzeichnungen würde nach [Tsai 1987] nicht die Korrektur der Verzeichnungen verbessern, sondern eher zu numerischen Instabilitäten der Algorithmen zur Kalibrierung und Korrektur führen.

Als mathematische Formulierung der radialen Verzeichnungen wird der Ansatz nach [Lenz 1987] genutzt. Über den Verzeichnungsparameter  $\kappa$  wird die Verzeichnung berücksichtigt; positive Werte bilden eine kissenförmige und negative Werte eine tonnenförmige Verzeichnung nach. In Bild 3.6 sind eine kissen- und eine tonnenförmige Verzeichnung qualitativ dargestellt.

Gleichung (3.8) zeigt das genutzte Modell der radialen Verzeichnung, das den Zusammenhang zwischen den verzeichnungsfreien Koordinaten  $x_i^u$  und den verzeichnungsbehafteten Koordinaten

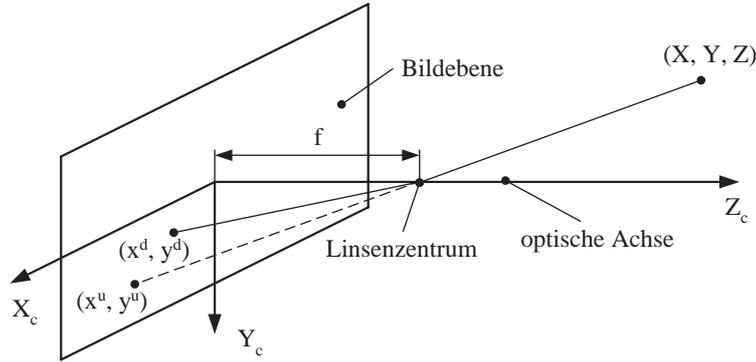


(a) kissenförmige Verzeichnung für  $\kappa > 0$



(b) tonnenförmige Verzeichnung für  $\kappa < 0$

**Bild 3.6:** Gegenüberstellung der radialen Verzeichnungen (durchgezogen - verzeichnungsbehaftete Projektion, gestrichelt - verzeichnungsfreie Projektion)



**Bild 3.7:** Gegenüberstellung einer idealen und einer verzeichnungsbefahenen Projektion eines Weltpunkts im Kamerakoordinatensystem auf die Bildebene

$\mathbf{x}_i^d$  herstellt.

$$\begin{pmatrix} x_i^d \\ y_i^d \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{2x_i^u}{1 + \sqrt{1 - 4\kappa_i [(x_i^u)^2 + (y_i^u)^2]}} \\ \frac{2y_i^u}{1 + \sqrt{1 - 4\kappa_i [(x_i^u)^2 + (y_i^u)^2]}} \\ 1 \end{pmatrix} \quad (3.8)$$

$$\mathbf{x}_i^d = \mathcal{V}_i(\mathbf{x}_i^u) \quad (3.9)$$

In Bild 3.7 ist die ideale und die verzeichnungsbefahene Projektion auf die Bildebene dargestellt.

Der Vorteil dieses Modells liegt darin, dass eine eindeutige Umkehrfunktion existiert, die aus den verzeichneten Koordinaten die verzeichnungsfreien bestimmt, die einer idealen Projektion genügen. Gleichung (3.10) zeigt die Formulierung der Umkehrfunktion. Durch Einsetzen von Gleichung (3.10) in Gleichung (3.8) kann die Umkehrbarkeit gezeigt werden.

$$\begin{pmatrix} x_i^u \\ y_i^u \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{x_i^d}{1 + \kappa_i [(x_i^d)^2 + (y_i^d)^2]} \\ \frac{y_i^d}{1 + \kappa_i [(x_i^d)^2 + (y_i^d)^2]} \\ 1 \end{pmatrix} \quad (3.10)$$

$$\mathbf{x}_i^u = \mathcal{V}_i^{-1}(\mathbf{x}_i^d) \quad (3.11)$$

Dieser Umkehrprozess wird auch als Normalisierung bezeichnet, und bestimmt mithilfe der während der Kalibrierung ermittelten Kameraparameter aus den mit Verzeichnungen behafteten Aufnahmen die entsprechenden verzeichnungsfreien Koordinaten. Alternativ können auch die Korrespondenzen zwischen verzeichneten und verzeichnungsfreien Koordinaten bestimmt werden.

**Digitalisierung:** Im dritten und abschließenden Teilschritt werden die Koordinaten auf die Pixelabmessungen des entsprechenden Sensors skaliert und die Nachkommastellen der Koordinaten verworfen, um so die Koordinatenangaben auf ganzzahlige Werte zu bringen. Durch eine anschließende Verschiebung wird beachtet, dass der Aufpunkt der optischen Achse auf dem Sensor nicht mit dem Koordinatenursprung der Bildkoordinaten identisch ist. Somit setzt sich der Koordinatenvektor eines durch das Kamerasystem  $i$  projizierten Objektpunktes wie folgt zusammen.

$$\begin{pmatrix} x_i^G \\ y_i^G \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \left\lfloor \frac{x_i^d}{D_i^x} \right\rfloor + C_i^x \\ \left\lfloor \frac{y_i^d}{D_i^y} \right\rfloor + C_i^y \\ 1 \end{pmatrix} \quad (3.12)$$

$$\mathbf{x}_i^G = \mathcal{D}_i(\mathbf{x}_i^d) \quad (3.13)$$

Der Schritt des Abrundens auf ganzzahlige Koordinaten stellt eine nichtlineare und nicht eindeutig umkehrbare Funktion dar. Bei den weiteren Betrachtungen wird diese Fehlerquelle außer Acht gelassen. Hier treten bei der Betrachtung von Einzelbildern maximalen Abweichungen von 0,5 Pixel auf. Eine Fortpflanzung des Fehlers kann ausgeschlossen werden. Ebenfalls ist dieser Fehler, wie im weiteren Verlauf zu sehen ist, gegenüber den anderen Einflüssen tolerierbar. Um dennoch den Einfluss so gering wie möglich zu halten, wird bei der Kalibrierung des Systems auf eine subpixelgenaue Bestimmung der Lage der Kalibriermarken, die als Objektreferenz genutzt werden, geachtet. Desweiteren kommt eine Multibildkalibrierung zum Einsatz.

**Zusammenfassung:** Durch das, bis hierher beschriebene Modell wird die Relation zwischen einem Objektpunkt und dessen Bildkoordinaten durchgängig mathematisch beschrieben. Zusammenfassend ist es wie folgt mathematische formuliert.

$$\mathbf{x}_i^G = \mathcal{D}_i(\mathcal{V}_i(\mathcal{P}_i(\mathbf{H}_i^3 \mathbf{X}_w))) \quad (3.14)$$

$$= \mathcal{K}_i(\mathbf{X}_w) \quad (3.15)$$

Eine Anpassung an das Abbildungsverhalten der real vorliegenden Kamerasysteme erfolgt durch die 6 inneren und 6 äußeren Modellparameter, die in Tabelle 3.1 zusammengefasst sind.

Durch die Funktion  $\mathcal{K}_i(\cdot)$  wird somit der Zusammenhang zwischen den Objektkoordinaten  $\mathbf{X}_w$  und die Koordinaten im Bild  $\mathbf{x}_i^G$  des Kamerasystems  $i$  hergestellt.

**Definition des Gesichtsfelds:** Neben diesen Betrachtungen, die sich ausschließlich der räumlichen Bildgebung widmen, ist weiterhin zu betrachten, aus welchem Raumelement überhaupt Punkte durch das Kamerasystem abgebildet bzw. erfasst werden. Dieses Raumelement nennt man, in bezug auf dessen horizontale und vertikale Ausdehnung, Gesichtsfeld  $\Omega_i$  des Kamerasystems  $i$ ,

**Tabelle 3.1:** Übersicht der genutzten Kameramodellparameter

Parameter	Bedeutung	Parameter	Bedeutung
$f_i$	Abstand des Linsen-zentrums von der Bildebene (Brennweite)	$T_x$	Verschiebung in x-Richtung
$C_i^x$	Verschiebung in Zeilenrichtung (horizontal)	$T_y$	Verschiebung in y-Richtung
$C_i^y$	Verschiebung in Spaltenrichtung (vertikal)	$T_z$	Verschiebung in z-Richtung
$D_i^x$	Breite eines Pixels	$\alpha_i$	Rotationswinkel um x-Achse
$D_i^y$	Höhe eines Pixels	$\beta_i$	Rotationswinkel um y-Achse
$\kappa_i$	Verzeichnungskoeffizient	$\gamma_i$	Rotationswinkel um z-Achse
<b>innere Parameter</b>		<b>äußere Parameter</b>	

das durch die horizontalen und vertikalen Öffnungswinkel  $\theta_i^h$  und  $\theta_i^v$  bestimmt wird. Das Gesichtsfeld  $\Omega_i$  entspricht der folgenden Menge an Punkten.

$$\Omega_i = \left\{ \left( X_i^c \ Y_i^c \ Z_i^c \ 1 \right)^T : (|X_i^c| \leq Z_i^c \tan \theta_i^h) \wedge (|Y_i^c| \leq Z_i^c \tan \theta_i^v), Z_i^c \geq 0 \right\} \quad (3.16)$$

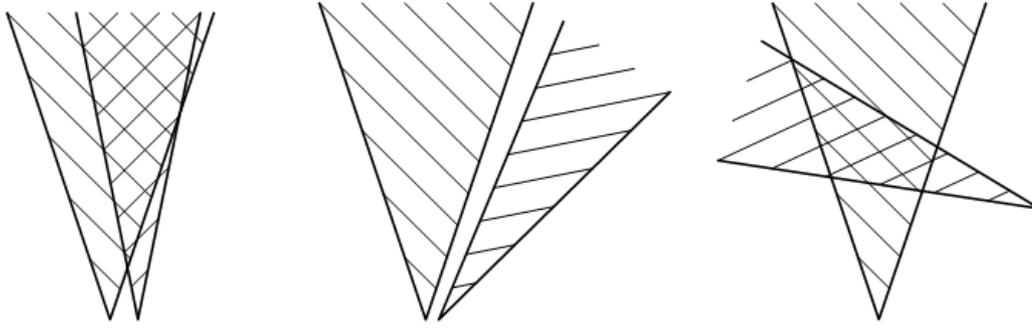
Mit diesen Betrachtungen ist die Modellierung eines Einzelkamerasystems abgeschlossen. Basierend auf diesen Überlegungen erfolgen die Betrachtungen zum Abbildungsverhalten zweier, versetzt montierter Kamerasysteme mit überlappenden Gesichtsfeld.

### 3.1.3. Bestimmung des gemeinsamen Gesichtsfelds

Im vorherigen Teilabschnitt wurde ein Einzelkameramodell formuliert, dass die Koordinaten der Objekte in der Fahrumgebung mit deren Abbildung in Beziehung setzt. Für die Überlagerung der beiden Kamerabilder muss weiterhin die Bedingung erfüllt sein, dass die Schnittmenge beider Gesichtsfelder, die das gemeinsame Gesichtsfeld  $\Omega_c$  bildet, nicht leer ist.

$$\Omega_c = \Omega_1 \cap \Omega_2 \neq \emptyset \quad (3.17)$$

Dies schließt aber den Fall nicht aus, dass sich beide Gesichtsfelder kreuzen und ab einer bestimmten Entfernung keine gemeinsame Punktmenge besitzen. Daher muss weiterhin gelten, dass ab einer bestimmten Mindestentfernung  $Z_{min}^c$  mindestens ein Punkt  $X^c$  für jede Entfernung  $Z^c$



(a) Überdeckende Gesichtsfelder (b) Komplettdisjunktes Gesichtsfeld (c) Teilweise, aber abgeschlossen überdeckende Gesichtsfelder

**Bild 3.8:** Möglichkeiten für die Ausprägung des gemeinsamen Gesichtsfelds.

existiert, der Element beider Gesichtsfelder ist.

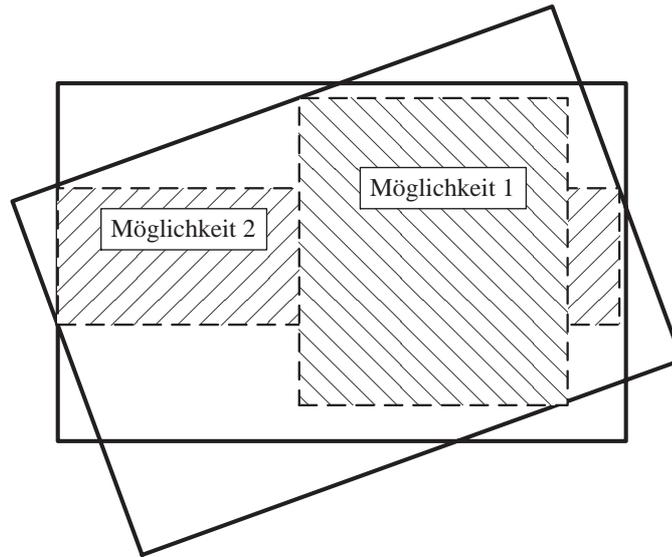
$$\Omega_c = \left\{ \begin{pmatrix} X^c \\ Y^c \\ Z^c \\ 1 \end{pmatrix} : \forall Z^c > Z_{min}^c \exists \mathbf{X}^c = \begin{pmatrix} X^c \\ Y^c \\ Z^c \\ 1 \end{pmatrix}, \text{ mit } \mathbf{X}^c \in \Omega_1 \wedge \mathbf{X}^c \in \Omega_2 \right\} \quad (3.18)$$

Die minimale Entfernung  $Z_{min}^c$ , für die Gleichung (3.18) gelten soll, bestimmt sich aus der Entfernung, in der sich sowohl die horizontalen oder vertikalen Begrenzungsflächen des Gesichtsfelds schneiden.

$$Z_{min}^c = \max \left( \frac{T_x + T_z \tan \left( \frac{\theta_2^h}{2} - \beta \right)}{\tan \frac{\theta_1^h}{2} + \tan \left( \frac{\theta_2^h}{2} - \beta \right)}, \frac{T_y + T_z \tan \left( \frac{\theta_2^v}{2} - \alpha \right)}{\tan \frac{\theta_1^v}{2} + \tan \left( \frac{\theta_2^v}{2} - \alpha \right)} \right) \quad (3.19)$$

Für Entfernungen  $Z^c < Z_{min}^c$  ist dabei aufgrund der Anordnung der Kamerasysteme keine Überdeckung beider Gesichtsfelder möglich. Es gilt daher, dieses Gebiet zu minimieren. Durch  $Z_{min}^c$  ist desweiteren die untere Grenze des Geltungsbereiches der Auslegungsrichtlinien gegeben. In dem Bereich unterhalb von  $Z_{min}^c$  existieren keine reellen Lösung für den im folgenden vorgestellten Parameterraum.

Desweiteren können aus Gleichung (3.19) die Maximalwerte der beiden Winkel ( $\alpha$ ,  $\beta$ ) bestimmt werden, die die relative Rotation in horizontaler und vertikaler Richtung parametrisieren. Graphisch kann dies durch den Vergleich von Bild 3.8(a) und Bild 3.8(b) veranschaulicht werden: Durch die Vergrößerung der Minimalentfernung  $Z_{min}^c$  nähert sich das Aussehen des gemeinsamen Gesichtsfelds dem des Bildes 3.8(b) an. Für den Grenzfall  $Z_{min}^c \rightarrow \infty$  sind beide Gesichtsfelder disjunkt. Diese Grenzwertbetrachtung liefert als Maximalwerte für den relativen Kippwinkel



**Bild 3.9:** Darstellung des gemeinsamen Gesichtsfelds beider Kamerasysteme ( gestrichelt - mögliche horizontale und vertikale Begrenzungen)

$\alpha = \alpha_1 - \alpha_2$  und den relativen Rotationswinkel  $\beta = \beta_1 - \beta_2$  die folgenden Zusammenhänge.

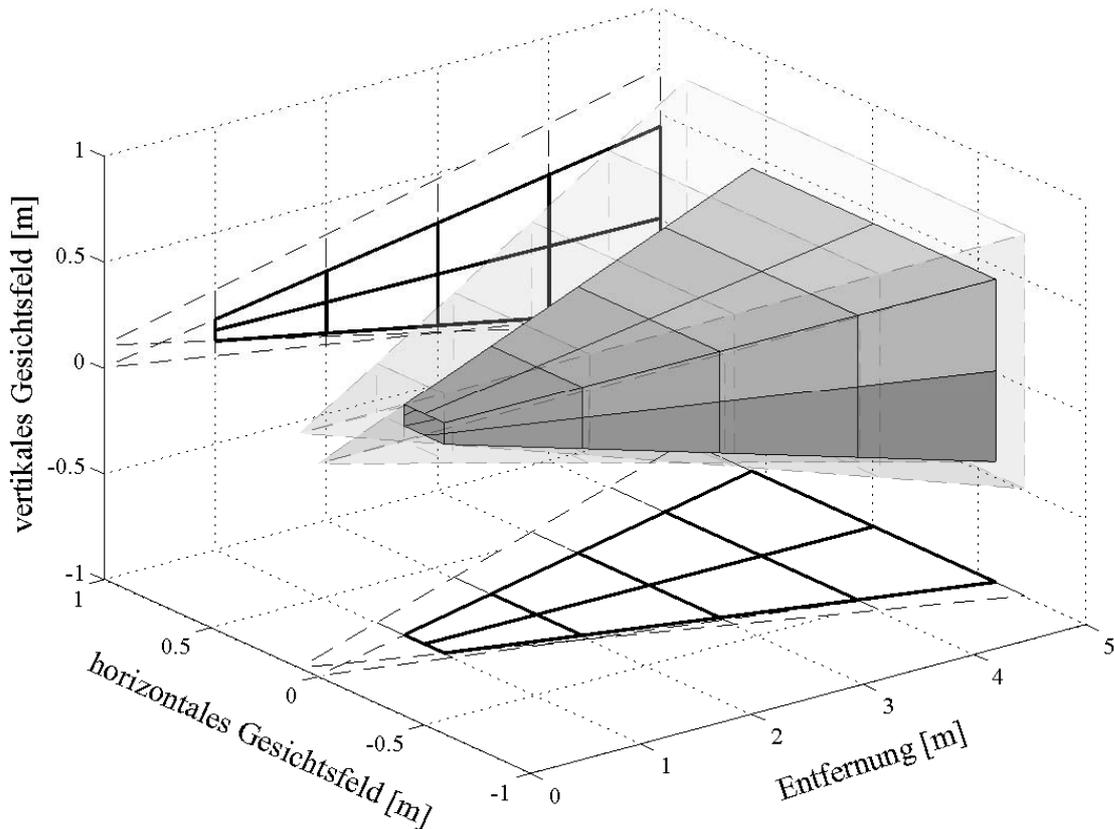
$$|\alpha| \leq \frac{\theta_1^v}{2} + \frac{\theta_2^v}{2} \quad (3.20)$$

$$|\beta| \leq \frac{\theta_1^h}{2} + \frac{\theta_2^h}{2} \quad (3.21)$$

Werden diese Randwerte bezogen auf die einzelnen Gesichtsfelder eingehalten, so existiert ein gemeinsames Gesichtsfeld nach Gleichung (3.18). Objekte, die in diesem Raum lokalisiert sind, werden somit von beiden Kamerasystemen erfasst. Eine Angabe einer linken und rechten sowie einer oberen und unteren Grenze für das gemeinsame Gesichtsfeld ist in der Form, wie es für die Einzelkamarasysteme erfolgte, nicht möglich. Denn dieses gemeinsame Gesichtsfeld ist sowohl von den Öffnungswinkeln der beiden Kamerasysteme als auch der Rotation der Kamerasysteme um die optische Achse abhängig. In Bild 3.9 ist dargestellt, wie sich aus den beiden Bildern der gemeinsame Bereich bildet und welche Möglichkeiten bestehen, die horizontalen und vertikalen Begrenzungen des gemeinsamen Gesichtsfelds festzulegen.

Bei der Darstellung des überlagerten Bildes wird ein Kamerasystem als Basis genutzt und die Bereiche des anderen Kamerasystems, in denen es zu Überdeckungen kommt, eingeblendet. Schlussendlich legt das Basiskamerasystem das erfasste Gesichtsfeld fest; die Informationen des anderen Systems außerhalb dieses Raumes werden nicht angezeigt oder zeigen nur die Bildinformation eines Kamerasystems.

Die Gleichungen (3.20) und (3.21) liefern die Randwerte, die bezüglich der Relativwinkel zu berücksichtigen sind. Die Kamerasysteme werden bei einer funktionalen Anwendung der Bilddatenfusion so ausgerichtet sein, dass der Überdeckungsbereich beider Kamerasysteme so groß wie möglich gewählt wird. Dies wird für kleine Kipp- und Rotationswinkel erreicht. Für die weiteren



**Bild 3.10:** Schematische Darstellung der beiden Gesichtsfelder  $\Omega_1, \Omega_2$  sowie des approximierten Pyramidenstumpfes  $\Omega_P$  für ein exemplarisch angenommenes Dualkameranystem (gestrichelt - Gesichtsfelder der Einzelkameranysteme)

Betrachtungen wird daher angenommen, dass  $\alpha \approx 0$  und  $\beta \approx 0$  gilt.

In diesem Fall kann in das gemeinsames Gesichtsfeld ein nichtschiefer Pyramidenstumpf  $\Omega_P$  mit rechteckförmiger Grundfläche so eingepasst werden, dass dessen Höhe parallel zur  $Z^c$ -Achse verläuft und dass der Aufpunkt der Höhe auf der Deckfläche fällt mit dem Punkt  $(X_0, Y_0, Z_0)$  zusammen (siehe Bild 3.10).

Der Pyramidenstumpf muss eine echte Teilmenge des gemeinsamen Gesichtsfeld sein.

$$\Omega_P \subseteq \Omega_c \quad (3.22)$$

Es ist nicht gestattet, dass Punkte, die zur Menge des Pyramidenstumpfes gehören, nicht Element des gemeinsamen Gesichtsfelds sind. Umgekehrt ist nicht nötig, dass alle Punkte des gemeinsamen Gesichtsfelds auch zur Menge des Pyramidenstumpfes gehören. Da sich der Pyramidenstumpf aufgrund seiner Eigenschaft leicht mathematisch modellieren lässt, werden die Punkte dieses Raums desweiteren genutzt, um das Abbildungsverhalten zwischen beiden Kameranystemen zu optimieren.

## 3.2. Optimierung der Bildausrichtung zur Versatzminimierung

Im vorangegangenen Abschnitt wurde die Abbildungsrelation zwischen Objektpunkten und den entsprechenden Bildkoordinaten beider Kamerasysteme formuliert. Ebenfalls wurde der Punkte- $\Omega_P$  definiert, der für die Untersuchung den Gültigkeitsbereich des Modells bildet. Inhalt dieses Abschnittes ist die mathematische Modellierung der optimierten objekt-treuen Ausrichtung zwischen den beiden Kamerabildern.

### 3.2.1. Bestimmung der optimalen Transformationsmatrix

Die Überlagerung der Strahlungsinformation beider Spektralbereiche soll zur Verbesserung der Interpretierbarkeit von Nachtsichtbildern beitragen. Seitens der wahrnehmungspsychologischen Betrachtung bedeutet dies, dass die Bildqualität des dargestellten Bildes durch die Fusion nicht verschlechtert werden sollte. Kriterien für die Bildqualität sind unter anderem der Anteil weißen Rauschens, Verzerrungen und, hauptsächlich betrachtet, der Versatz zwischen den Abbildungen von ein und demselben Objekt, hervorgerufen durch die Disparität. Dieser Versatz soll bei der Überlagerung so gering wie möglich ausfallen. Gleichung (3.23) zeigt die mathematische Formulierung des zu optimierenden Problems.

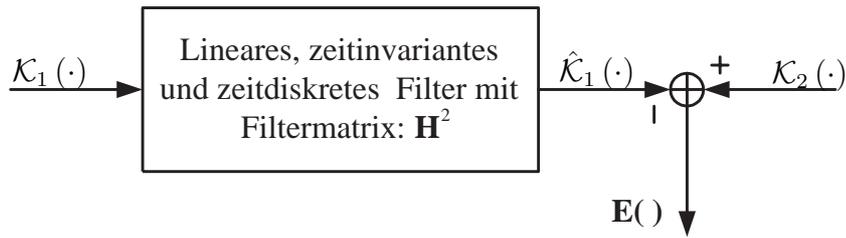
$$E_{REG}^2 = \operatorname{argmin}_{\mathbf{H}^2} \sum_{\mathbf{X}_w \in \Omega_P} \|\mathbf{H}^2 \mathcal{K}_1(\mathbf{X}_w) - \mathcal{K}_2(\mathbf{X}_w)\|^2 \quad (3.23)$$

Der Vorgang, der durch Optimierung der affinen Transformationsmatrix  $\mathbf{H}^2$ , im weiteren auch Ausrichtungsmatrix genannt, den Fehler  $E_{REG}$  minimiert, heißt Registrierung. Die Matrix  $\mathbf{H}^2$  heißt daher auch Registriermatrix.

$$\mathbf{H}_R^2 = \mathbf{H}^2, \text{ für } E_{REG} \text{ minimal} \quad (3.24)$$

In der Literatur finden sich verschiedene Ansätze, die dieses Problem der Registrierung mit unterschiedlichen Ansätzen lösen [Viola 1995, Thevenaz 1998, Unser 1993]. Diese Verfahren gehen jeweils davon aus, dass der Zusammenhang zwischen den zu registrierenden Bildern in der Gestalt und Form liegt. Unterschiede ergeben sich in der Art und Weise, wie die Registrierung erfolgt: direkt auf den Ausgangsbildern oder anhand einer multiresolutionalen Pyramidendarstellung. Die Kenntnisse über explizite Objektkorrespondenzen wird in beiden Artikeln nicht vorausgesetzt, wodurch sich der Vorgang der Bestimmung der Transformation verlängert und die Genauigkeit der Schätzung verschlechtert.

In der vorliegenden Arbeit können explizite Objektkorrespondenzen durch die Auswahl eines geeigneten Kalibrierziels hergestellt werden, womit der Registrierungsprozess entscheidend vereinfacht und bezüglich der Genauigkeit verbessert werden kann. Diese Objekte müssen in ihrer konkreten Lage nicht bekannt sein; nur muss sichergestellt werden, dass die Koordinaten der emittierten visuellen und infraroten Strahlungsenergie ein und demselben Welt-punkt entsprechen. Ausge-



**Bild 3.11:** Filterdarstellung des Optimierungsproblems

hend von dieser Voraussetzung kann die Abbildung der Objektpunkte durch die beiden Kamerasysteme errechnet und die optimale Transformationsmatrix bestimmt werden.

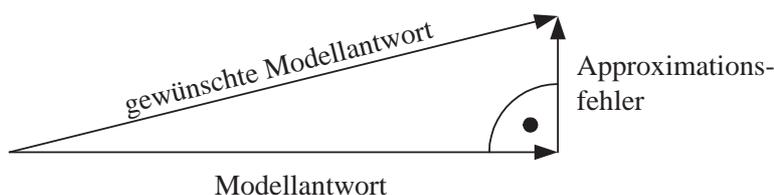
Das so gestellte Optimierungsproblem kann als Optimierung der Filterkoeffizienten eines linearen, zeitdiskreten Filters gedeutet werden. Durch eine entsprechende Anpassung der Filterkoeffizienten wird erreicht, dass die quadratische Differenz zwischen dem Ausgangsprozess des Filters und den gewünschten Daten minimiert wird. Ein solches Filter wird als Wiener-Filter bezeichnet; eine allgemein gültige Lösung wird in [Haykin 1996] vorgestellt. Bild 3.11 veranschaulicht das hier genutzte Modell.

Durch dieses Vorgehen wird sichergestellt, dass das Potenzial des Modells hinsichtlich der Approximation voll ausgeschöpft wird. Denn das quadratische Fehlerkriterium bedeutet, dass der Fehlervektor zwischen dem gewünschten und dem Ausgabesignal des Approximationsfilters senkrecht auf dem Vektor des Ausgabesignal des Filters steht. Dies ist gleich bedeutend mit der Aussage, dass durch das gewählte Filtermodell keine weitere Verbesserung der Approximation erreicht werden kann, da im Modell keine weiteren Komponenten in Richtung des Fehlervektors zur Anpassung vorhanden sind [Haykin 1996] (vgl. Bild 3.12).

Mathematisch wird der Ausrichtungsfehler für alle bekannten Objektkorrespondenzen durch Gleichung (3.25) formuliert.

$$\mathbf{E} = \mathbf{H}^2 \mathcal{K}_1(\mathbf{X}_w) - \mathcal{K}_2(\mathbf{X}_w) \tag{3.25}$$

Somit kann die Darstellung aus Bild 3.12 mathematisch in Gleichung (3.26) übertragen werden. Zu



**Bild 3.12:** Darstellung des Optimierungskriteriums nach [Haykin 1996]

beachten ist, dass diese Formulierung allgemein nur für den Erwartungswert für das äußere Produkt aus Filterausgabe und Fehlervektor gültig ist. Für eine genügend große Stichprobe an Objektkorrespondenzen ist die Substitution des Erwartungswertes durch den empirischen Erwartungswert jedoch zulässig [Beyer 1995]. Gleichung (3.26) zeigt die Formulierung über den empirischen Erwartungswert [Haykin 1996, Jähne 2001]. Diese Formulierung führt zu derselben Lösung wie das in Gleichung (3.23) gestellte Optimierungsproblem.

$$\sum_{\mathbf{X}_w \in \Omega_P} (\mathbf{H}^2 \mathcal{K}_1(\mathbf{X}_w)) (\mathbf{H}^2 \mathcal{K}_1(\mathbf{X}_w) - \mathcal{K}_2(\mathbf{X}_w))^T = \mathbf{0} \quad (3.26)$$

Übertragen auf den vorliegenden Fall bedeutet dies, dass ein entsprechendes Filter die Bildkoordinaten eines Objektes im ersten Kamerabild an die Koordinaten desselben Objektes im zweiten Bild angepasst werden. Die elementweise Optimierung der in Gleichung (3.23) gestellten Aufgabe, führt zu folgender Lösung für die Transformationsmatrix (vgl. auch [Haykin 1996, Jähne 2001]).

$$\mathbf{H}_R^2 = \left( \sum_{\mathbf{X}_w \in \Omega_P} \mathcal{K}_2(\mathbf{X}_w) (\mathcal{K}_1(\mathbf{X}_w))^T \right) \left( \sum_{\mathbf{X}_w \in \Omega_P} \mathcal{K}_1(\mathbf{X}_w) (\mathcal{K}_1(\mathbf{X}_w))^T \right)^{-1} \quad (3.27)$$

$$= \mathbf{C}(\mathbf{A})^{-1} \quad (3.28)$$

Gleichung (3.27) stellt somit einen direkten Zusammenhang zwischen der unterschiedlichen Projektion von Objektpunkten und der optimalen Ausrichtungsmatrix her. Da das Modell, das die einzelnen Kamerasysteme nachbildet, bekannt ist, kann weiterführend der Zusammenhang spezialisiert werden.

Als Annäherung des gemeinsamen Gesichtsfelds wird, wie bereits in Abschnitt 3.1.3 erwähnt, ein gerader Pyramidenstumpf mit einer rechteckförmigen Grundfläche genutzt. Jede Gesichtsebene in der Entfernung  $Z_{OBJ}$  kann aufgrund ihrer Rechteckform vollständig in  $2N_x + 1$  Teilabschnitte der Länge  $\Delta X$  und  $2N_y + 1$  Teilabschnitte der Länge  $\Delta Y$  eingeteilt werden. Die Betrachtung der Grenzwerte  $\lim_{N_x \rightarrow \infty} \Delta X = 0$  und  $\lim_{N_y \rightarrow \infty} \Delta Y = 0$  zeigt, dass durch die Summe in Gleichung (3.27) das Integral über die Objektpunkte approximiert werden kann. Die Objektpunkte  $\mathbf{X}_w$ , die zur Optimierung nach Gleichung (3.27) genutzt werden, entstammen der Menge  $\Omega_c(Z_{OBJ})$ .

$$\mathbf{X}_w \in \Omega_P(Z_{OBJ}), \text{ mit} \quad (3.29)$$

$$\Omega_P(Z_{OBJ}) = \left\{ \left( \begin{array}{c} X_0 + n_x \Delta X \\ Y_0 + n_y \Delta Y \\ Z_{OBJ} \end{array} \right), -N_x \leq n_x \leq N_x, -N_y \leq n_y \leq N_y \right\} \quad (3.30)$$

Das Einsetzen der Modelldefinition in Gleichung (3.27), die Addition über die im Definitionsbe-

reich befindlichen Punkte  $\mathbf{X}_w$  und das anschließende Vereinfachen führen zu einer geschlossenen Darstellung für die Korrespondenz zwischen den Systemparametern der verwendeten Kamerasysteme, den relativen äußeren Anordnungen und der entsprechenden optimalen Ausrichtungsmatrix  $\mathbf{H}_R^2$ . Diesen analytischen Zusammenhang zeigt Gleichung (3.31), wobei bei dieser Darstellung die Relativwinkel als sehr klein angenommen werden, so dass gilt  $\sin \alpha \approx \alpha$  und  $\cos \alpha \approx 1$ .<sup>9</sup> Weiterhin ist es nicht notwendig, die Einflüsse der Verzeichnungen bei der Bildausrichtung zu berücksichtigen, da diese durch die Normalisierung korrigiert sind.

$$\mathbf{H}_R^2 = \begin{pmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \text{ mit} \quad (3.31)$$

$$\begin{aligned} h_{11} &= \frac{D_1^x f_2 Z_{OBJ}}{D_2^x f_1 (Z_{OBJ} - T_z)} \\ h_{12} &= -\frac{D_1^y f_2 Z_{OBJ}}{D_2^x f_1 (Z_{OBJ} - T_z)} \gamma \\ h_{13} &= C_2^x + \frac{f_2 (Y_0 \gamma + Z_{OBJ} \beta - T_x)}{D_2^x (Z_{OBJ} - T_z)} - \frac{f_2 Z_{OBJ} (C_1^x D_1^x - C_1^y D_1^y \gamma)}{D_2^x f_1 (Z_{OBJ} - T_z)} \\ h_{21} &= \frac{D_1^x f_2 Z_{OBJ} (\alpha \beta + \gamma)}{D_2^y f_1 (Z_{OBJ} - T_z)} \\ h_{22} &= \frac{D_1^y f_2 Z_{OBJ} (1 - \alpha \beta \gamma)}{D_2^y f_1 (Z_{OBJ} - T_z)} \\ h_{23} &= C_2^y + \frac{f_2 (Y_0 - T_y - Z_{OBJ} \alpha)}{D_2^y (Z_{OBJ} - T_z)} - \frac{f_2 (\alpha \beta + \gamma) (f_1 X_0 + C_1^x D_1^x Z_{OBJ})}{D_2^y f_1 (Z_{OBJ} - T_z)} - \\ &\quad \frac{f_2 (1 - \alpha \beta \gamma) (f_1 Y_0 + C_1^y D_1^y Z_{OBJ})}{D_2^y f_1 (Z_{OBJ} - T_z)} \end{aligned}$$

Die so bestimmte Matrix optimiert die Ausrichtung beider Kamerabilder zueinander für Objekte in der Entfernung  $Z_{OBJ}$ , die sogenannte Registrierentfernung  $Z_{REG}$ .

Die vorgestellten Betrachtungen setzen den idealen Fall voraus, dass die Positionen der Kalibriermarken nicht rauschbehaftet sind. Die ermittelten Positionen können durch die Abbildungseigenschaften und durch Fehler bei der Detektion der Marken mit Unsicherheiten belegt sein. Werden für die Bestimmung der Position der Kalibriermarken mehrere Aufnahmen genutzt, so kann die Positionsabweichung aufgrund des zentralen Grenzwertsatzes durch eine normalverteilte, mittelwertfreie Superposition modelliert werden [Beyer 1995]. Hierzu darf die Verteilungsfunktion  $f_x(x)$  für alle  $x > 0$  nicht monoton wachsend sein. Somit ergibt sich im schlimmsten Fall eine Gleichverteilung der Positionsmarken über alle 8 Nachbarpixel<sup>10</sup>. Dann kann nach [Beyer 1995] bereits für mehr als 11 Messungen eine Normalverteilung angenommen werden<sup>11</sup>.

Daher können die Positionsangaben aus einem wahren Teil  $\mathcal{K}_1(\mathbf{X}_w)$  bzw.  $\mathcal{K}_2(\mathbf{X}_w)$  und einem

<sup>9</sup>Die Darstellung der vollständigen Lösung befindet sich in Anhang A.

<sup>10</sup>Bei größeren Abweichungen treten grobe Messfehler auf

<sup>11</sup>sogenannte 12-er Regel

normalverteilten, mittelwertfreien Rauschanteil  $\mathcal{N}_1$  bzw.  $\mathcal{N}_2$  zusammengesetzt werden.

$$\widetilde{\mathcal{K}}_1(\mathbf{X}_w) = \mathcal{K}_1(\mathbf{X}_w) + \mathcal{N}_1 \quad (3.32)$$

$$\widetilde{\mathcal{K}}_2(\mathbf{X}_w) = \mathcal{K}_2(\mathbf{X}_w) + \mathcal{N}_2 \quad (3.33)$$

Werden die Gleichungen (3.32) und (3.33) in Gleichung (3.26) eingesetzt und ebenfalls nach  $\mathbf{H}^2$  aufgelöst, so resultiert dies in folgendem Ergebnis (vgl. Gleichung (3.34)).

$$\widetilde{\mathbf{H}}_R^2 = \left( \sum_{\mathbf{X}_w \in \Omega_P} \mathcal{K}_2(\mathbf{X}_w) (\mathcal{K}_1(\mathbf{X}_w))^T \right) \left( \sum_{\mathbf{X}_w \in \Omega_P} \mathcal{K}_1(\mathbf{X}_w) (\mathcal{K}_1(\mathbf{X}_w))^T + \sum_{\mathbf{X}_w \in \Omega_P} \mathcal{N}_1 (\mathcal{N}_1)^T \right)^{-1} \quad (3.34)$$

Es zeigt sich, dass die Präzision, mit der die Ausrichtungsmatrix bestimmt werden kann, nur durch den Rauschanteil der Positionen der Kalibriermarken des anzupassenden Kamerasystem bestimmt wird. Von diesem Standpunkt aus gesehen bietet es sich somit an, das System mit dem kleinsten Rauschanteil zur Anpassung auszuwählen.

### 3.2.2. Bedeutung und Abhängigkeit der Matrixelemente

Die Elemente  $h_{11}, h_{12}, h_{21}, h_{22}$  parametrisieren die Skalierung und die Rotation des zu transformierenden Kamerabildes. Die beiden verbleibenden Elemente  $h_{13}, h_{23}$  bestimmen, wie die Bilder zueinander verschoben werden.

Um das dargestellte Ergebnis zu veranschaulichen, sind in Tabelle 3.2 die Bedeutung der einzelnen Matrixelemente sowie deren Abhängigkeit von den äußeren Parametern zusammengefasst.

Da die Entfernung, in der sich das betrachtete Objekt befindet, die Bestimmung der Ausrichtungsmatrix beeinflusst, existiert keine Matrix, die alle Objekte in dem Entfernungsbereich  $Z_{MIN} \leq Z_{OBJ} \leq Z_{MAX}$  versatzfrei zueinander ausrichtet. Ausschließlich für die Registrierentfernung  $Z_{REG}$  erfolgt eine optimale, da versatzfreie und objekttreue Ausrichtung. Die Betrachtung der Ausrichtungsfehler, die bei Abbildung von unterschiedlich entfernten Objekten entstehen, wird Gegenstand des nächsten Abschnitts sein.

Die Sensitivität der betrachteten Parameter gegenüber der einfließenden Modellparameter erfolgt durch partielle Ableitung der entsprechenden Matrixelemente nach den gewünschten Modellparameter. Auf die Wiedergabe der allgemeinen Darstellung wird an dieser Stelle verzichtet. An den gegebenen Stellen wird auf die Relevanz der Fehlerabhängigkeit von äußeren und inneren Modellparametern eingegangen.

**Tabelle 3.2:** Interpretation der einzelnen Matrixelemente und verbale Abschätzung der Empfindlichkeit gegenüber der Veränderung der äußeren Parameter

Element	Bedeutung	Abhängigkeiten
$h_{11}$	- Anpassung der Skalierung - Ausgleich der Bildrotation	- Verhältnis der Pixelabmessungen - Verhältnis der Brennweiten
$h_{12}$	- Anpassung der Skalierung - Ausgleich der Bildrotation	- Verhältnis der Pixelabmessungen - Verhältnis der Brennweiten
$h_{13}$	- Ausgleich der horizontalen Parallaxe	- horizontaler Montageversatz - Objektabstand
$h_{21}$	- Anpassung der Skalierung - Ausgleich der Bildrotation	- Verhältnis der Pixelabmessungen - Verhältnis der Brennweiten
$h_{22}$	- Anpassung der Skalierung - Ausgleich der Bildrotation	- Verhältnis der Pixelabmessungen - Verhältnis der Brennweiten
$h_{23}$	- Ausgleich der vertikalen Parallaxe	- vertikaler Montageversatz - Objektabstand

### 3.2.3. Übertragung der Matrixelemente in die Ausrichtungparameter

Vor der Bestimmung des Ausrichtungsfehlers soll noch geklärt werden, wie aus den Elementen der Ausrichtungsmatrix die aussagekräftigen Parameter Skalierung, Verschiebung und Rotation berechnet werden können. Nach [Bartsch 1994] können diese linearen Transformationen zu einer affinen Transformation zusammengefasst werden, wobei die linke obere Ecke des Bildes als Rotationszentrum genutzt wird.

$$\mathbf{H}^2 = \underbrace{\begin{pmatrix} 1 & 0 & -t_x \\ 0 & 1 & -t_y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}}_{\text{Verschiebung}} \underbrace{\begin{pmatrix} \cos \phi & -\sin \phi & 0 \\ \sin \phi & \cos \phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}}_{\text{Rotation}} \underbrace{\begin{pmatrix} s_x & 0 & 0 \\ 0 & s_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}}_{\text{Skalierung}} \quad (3.35)$$

$$= \begin{pmatrix} s_x \cos \phi & -s_y \sin \phi & -t_x \\ s_x \sin \phi & s_y \cos \phi & -t_y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3.36)$$

$$= \begin{pmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3.37)$$

Bei quadratischen Bildelementen sind die Skalierungsfaktoren identisch,  $s_x = s_y = s$ .

Durch elementweisen Vergleich können aus dieser Matrix die einzelnen Parameter bestimmt werden. Bei der Bestimmung der Skalierungsfaktoren kann angenommen werden, dass die Bilder nur gering zueinander rotiert sind. Soll der relative Fehler<sup>12</sup> durch diese Annahme geringer als 1 Pro-

<sup>12</sup>relativer Fehler:  $E = \Delta x/x = (x - x_w)/x$ , mit  $x$ - gemessener Wert,  $x_w$ - wahrer Wert [Kuchling 1995]

zent sein, kann ab einem Winkel von  $8^\circ$  die Vereinfachung  $\cos x \approx 1$  nicht mehr genutzt werden.

$$\phi = -\arctan \frac{h_{12}}{h_{11}} \quad (3.38)$$

$$s_x = \frac{h_{11}}{\cos \phi} \approx h_{11} \quad (3.39)$$

$$s_y = \frac{h_{22}}{\cos \phi} \approx h_{22} \quad (3.40)$$

$$t_x = -h_{13} \quad (3.41)$$

$$t_y = -h_{23} \quad (3.42)$$

Diese Kenngrößen, die sowohl für das Modell als auch für experimentell ermittelte Ausrichtungsmatrizen bestimmbar sind, können neben dem im nächsten Abschnitt beschriebene Ausrichtungsfehler zum Vergleich verschiedener Anordnungen herangezogen werden.

### 3.2.4. Einfluss der Registrierentfernung auf die Ausrichtungsmatrix

Im allgemeinen Fall wird das System auf eine Entfernung kalibriert, die im Rahmen der Montage der Kamerasysteme praktikabel ist. Der Zusammenhang zwischen den Ausrichtungsmatrizen, die für unterschiedliche Entfernung zu einer optimalen Ausrichtung bezüglich des Ausrichtungsfehler führen, wird dazu genutzt, ein auf eine Entfernung eingemessenes System auf eine andere Kalibrierentfernung anzupassen.

Diese Fragestellung ist weiterhin fertigungs- bzw. produktionsrelevant. Besonders große Entfernungen zwischen dem Kamerasystem und der Kalibrierplatte stellen bei der Kalibrierung während der Fertigung ein grosses Problem dar, da im praktischen Fall oftmals nur wenige Meter für die Kalibrierung zur Verfügung stehen. Aus diesen Gründen ist es wünschenswert, die Ausrichtungsparameter, die für eine Entfernung bestimmt wurden, auf die gewünschte Registrierentfernung zu übertragen.

Das im Rahmen dieses Abschnitts entwickelte Formelwerk ermöglicht unter Anwendung des vorgestellten Modells die Verschiebung dieser charakteristischen Entfernung. Jedoch wird bei der Herleitung angenommen, dass der Versatz in der Tiefe beider Kamerasysteme vernachlässigt werden kann ( $T_z \approx 0$ ). Diese Abschätzung ist für einen bestimmten, vorgegebenen relativen Fehler  $\epsilon$  bezüglich des Versatzfehlers ohne Vernachlässigung der Versatzes in der Tiefe und der gegebenen minimalen Objektentfernung  $Z_{MIN}$  gültig, wenn Ungleichung (3.43) gilt.

$$|T_z| \leq \frac{\epsilon}{4} Z_{MIN} \quad (3.43)$$

Danach ist beispielsweise für eine Minimalentfernung  $Z_{MIN} = 10m$  und einen vorgegebenen Fehler von  $\epsilon = 5\%$  ein Versatz in der Tiefe von bis zu  $T_z = \pm 12,5cm$  zulässig, um die oben angeführte Vereinfachung  $T_z \approx 0$  anzunehmen.

Sollten die beiden verbleibenden Elemente  $T_x, T_y$  des Verschiebungsvektors  $\mathbf{T}$  bekannt sein, so bestimmt sich die Veränderungsmatrix  $\Delta\mathbf{H}_R^2$ , die zur Anpassung der Registriermatrix  $\mathbf{H}_R^2$  an die Verschiebung der Registrierentfernung um  $\Delta Z_{REG}$  führt, wie in Gleichung (3.44) dargestellt.

$$\Delta\mathbf{H}_R^2(\Delta Z_{REG}) = \begin{pmatrix} 0 & 0 & \frac{f_2 T_x \Delta Z_{REG}}{D_2^x Z_{REG}(Z_{REG} + \Delta Z_{REG})} \\ 0 & 0 & \frac{f_2 T_y \Delta Z_{REG}}{D_2^y Z_{REG}(Z_{REG} + \Delta Z_{REG})} \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (3.44)$$

Dieser Fall liegt beispielsweise vor, wenn das gesamte Dualkamerasystem in einem gemeinsamen Gehäuse verbaut ist. Somit kann für ein Dualkamerasystem der Zusammenhang zwischen den Ausrichtungsmatrizen in unterschiedlichen Entfernungen hergestellt werden.

### 3.3. Betrachtung des Ausrichtungsfehlers

Die Optimierung der Bildausrichtung ist ein zentrales Thema dieser Arbeit. In diesem Abschnitt wird der Ausrichtungsfehler detailliert betrachtet, um daraus Aussagen über den Einsatzbereich eines Dualkamerasystems abzuleiten.

Obwohl die versatzfreie Ausrichtung beider Kamerabilder zueinander möglich ist, gilt diese Transformationsvorschrift nur für die Registrierentfernung  $Z_{REG}$ . Die Ausrichtung der Aufnahmen von Objekten außerhalb dieser Entfernung kann nur versatzbehaftet erfolgen. Gegenstand dieses Abschnitts sind die Fehler, die bei der Ausrichtung von Objekten in einer beliebigen Entfernung  $Z_{OBJ}$  entstehen, wobei das System auf die Entfernung  $Z_{REG}$  kalibriert wurde. Somit sind bei den nachfolgenden Betrachtungen diese beiden Entfernungen  $Z_{OBJ}$  und  $Z_{REG}$  als Parameter interessant.

#### 3.3.1. Allgemeine Bestimmung des Ausrichtungsfehlers

Analog zur Optimierung des Ausrichtungsfehlers, der bei der Registrierung minimiert wird, ist der mittlere Ausrichtungsfehler über den mittleren Abstand gleicher Objektpunkte im Bild definiert. Hierbei ist zu beachten, dass für die Definition des Ausrichtungsfehlers Objektpunkte in identischen Entfernungen genutzt werden. Der Ausrichtungsfehler ist somit direkt von den beiden Entfernungen  $Z_{OBJ}$  und  $Z_{REG}$  abhängig. Die mathematische Formulierung des Ausrichtungsfehlers zeigt Gleichung (3.45).

$$E(Z_{OBJ}, Z_{REG}) = \overline{\|\mathbf{H}_R^2(Z_{REG}) \mathcal{K}_1(\mathbf{X}_w) - \mathcal{K}_2(\mathbf{X}_w)\|} \Big|_{\mathbf{X}_w \in \Omega_P(Z_{OBJ})} \quad (3.45)$$

Die Varianz des Ausrichtungsfehlers in einer Entfernung ist von geringerem Interesse, da dieses Maß etwas über die systematischen Fehler der Betrachtungskette Bildaufnahme und Positionsbestimmung aussagt und nicht die mittlere Abweichung identischer Objektpunkte wiedergibt.

Das Einsetzen der allgemeinen Lösung für die Ausrichtungsmatrix aus Gleichung (3.27) in die Definition des Ausrichtungsfehlers nach Gleichung (3.45), die anschließende Summation über die Testpunkte in der Sichtpyramide  $\Omega_P$  und eine abschließende Vereinfachung resultieren in Gleichung (3.46). Diese Gleichung stellt explizit den Zusammenhang zwischen den äußeren Parametern und dem mindestens zu erwartenden Versatzfehler auf.

$$E(Z_{OBJ}, Z_{REG}) = K_{Error} \left| \frac{Z_{OBJ} - Z_{REG}}{(T_z - Z_{OBJ})(T_z - Z_{REG})} \right|, \text{ mit} \quad (3.46)$$

$$K_{Error} = f_2 \sqrt{\left( \frac{T_x - T_z \sin \beta}{D_2^x} \right)^2 + \left( \frac{T_y + T_z \sin \alpha \cos \beta}{D_2^y} \right)^2}$$

Die Größe  $K_{Error}$  enthält die geometrischen Parameter des eingesetzten Kamerasystems und wird daher als Geometrie Kennzahl bezogen auf den Versatzfehler bezeichnet. Dieser Skalierungsfaktor des Versatzfehlers  $E$  ist weder von der aktuellen Objektentfernung  $Z_{OBJ}$  noch von der gewählten Registrierentfernung  $Z_{REG}$  abhängig und stellt somit den entfernungsunabhängigen Anteil dar.

Für die Betrachtung des qualitativen Verlaufes wird angenommen, dass die Relativwinkel zwischen den beiden optischen Achsen verschwinden. Desweiteren wird angenommen, dass  $T_z \ll Z_{OBJ}$  und  $T_z \ll Z_{REG}$  ist. Unter diesen Annahmen vereinfacht sich Gleichung (3.46) zu folgendem Ausdruck.

$$E(Z_{OBJ}, Z_{REG}) = K_{Error} \left| \frac{1}{Z_{OBJ}} - \frac{1}{Z_{REG}} \right| \quad (3.47)$$

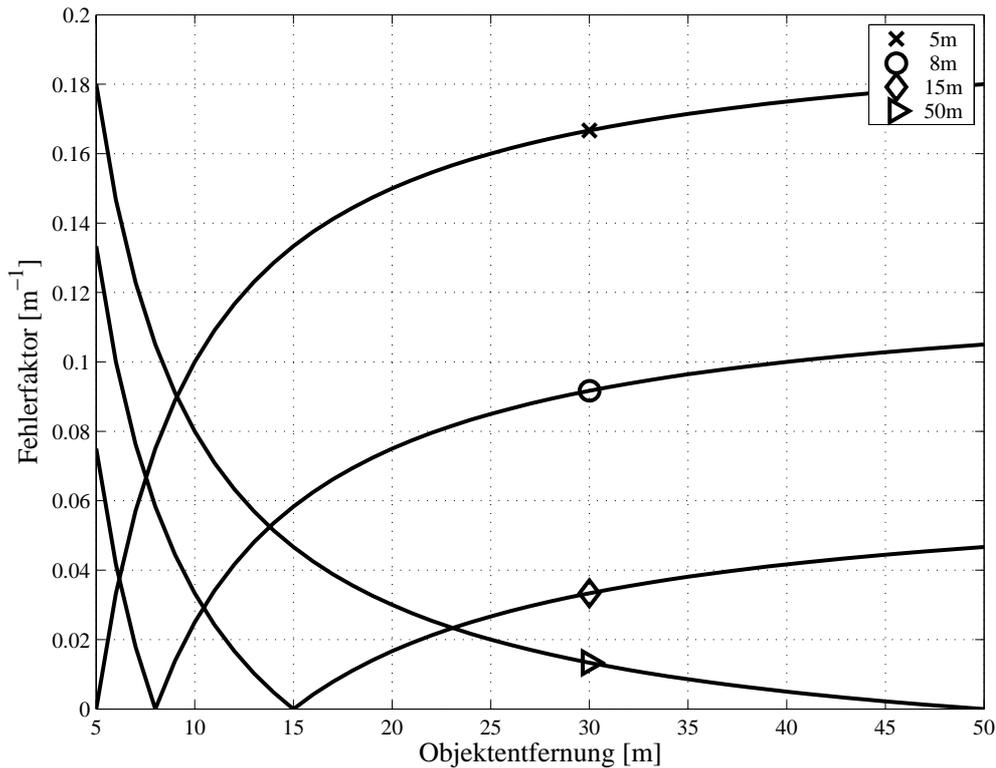
Qualitativ ist der Verlauf dieser Fehlerfunktion in Bild 3.13 dargestellt.

Sowohl die Gleichung (3.47) als auch Bild 3.13 zeigen anschaulich, dass einer versatzfreie Überlagerung ausschließlich in der Registrierentfernung möglich ist. Jenseits dieser Entfernung nimmt der Ausrichtungsfehler zu. Jedoch zeigen die Kennlinien des Versatzfehlers für unterschiedliche Registrierentfernungen unterschiedliches Verhalten, was Möglichkeiten für eine Optimierung des Ausrichtungsfehlers über einen bestimmten Teilbereich erlaubt.

Im folgenden Abschnitt wird die Empfindlichkeit des Versatzfehlers gegenüber weiteren Parametereinflüssen untersucht, die durch die Ausrichtung nicht beeinflusst werden, wie beispielsweise die Korrektur der Verzeichnungen.

### 3.3.2. Fehlersensitivität des Versatzfehlers

Bei der vorangegangenen Betrachtung wurde davon ausgegangen, dass die Verzeichnungen, die durch die realen Optiken in die Aufnahmen eingeführt werden, durch den Schritt der Normalisierung vollständig korrigiert werden können. Ist dies aufgrund einer fehlerbehafteten Bestimmung



**Bild 3.13:** Qualitativer Verlauf des Ausrichtungsfehlers für die 4 Registrierungsentfernungen  $Z_{REG} = (5m, 8m, 15m, 50m)$

der Verzeichnungskoeffizienten nicht erfolgt, so teilt sich der Versatzfehler in zwei Fehleranteile auf: *i)* Der erste Fehleranteil betrachtet den Versatzfehler hervorgerufen durch die Parallaxe, *ii)* der zweite Fehleranteil enthält den Fehler, der durch eine unvollständige und fehlerbehaftete Normalisierung entsteht (vgl. Gleichung (3.48)). Dieser zweite Fehlerterm kann aufgrund seiner höheren Ordnung bezüglich der Bildkoordinaten nicht durch das genutzte lineare Modell bei der Bildausrichtung nachgebildet werden. Dieser Fehler enthält auch die Fehler, die durch eine falsche Modellierung der Verzeichnungen entstehen.

Gleichung zeigt die Definition des Ausrichtungsfehlers, wobei sich die Ordnung des Fehlers auf die Abhängigkeit des Fehlers von der Bildkoordinate bezieht. Dies bedeutet, dass der lineare Fehler linear mit der Bildkoordinate in Beziehung steht. Bei Fehlern höherer Ordnung, wie beispielsweise der Verzeichnung, werden auch quadratische und höhere Ordnungen der Bildkoordinate mit berücksichtigt.

$$E = \underbrace{E^1}_{\text{Fehler erster Ordnung}} + \underbrace{E^h}_{\text{Fehler höherer Ordnung}} \quad (3.48)$$

Aus den Betrachtungen dieser beiden Fehleranteile können unterschiedliche Aussagen abgeleitet werden: Der Fehler erster Ordnung bestimmt die Anforderungen an die Parameter des Dualkameranersystems, wie beispielsweise den Montageabstand. Aus der Betrachtung des Fehlers höherer Ordnung können Aussagen über die Anforderungen bei der Kalibrierung der Kamerasysteme abgeleitet werden.

Der erste Teil dieses Abschnittes beschäftigt sich mit der Sensitivitätsbetrachtung des ersten Fehlerterms  $E^1$ , während der zweite Teil den Einfluss der Modellparameter auf den zweiten Fehlerterm  $E^h$  betrachtet.

**Fehler erster Ordnung:** Wie Gleichung (3.46) zeigt, ist der Versatzfehler neben der aktuellen Objektentfernung und der gewählten Registrierentfernung ausschließlich von den äußeren Parametern und den inneren Parametern des Bezugssystems abhängig. Somit ist zu betrachten, wie sich ein Fehler bei der Bestimmung der äußeren Parameter einer speziellen Kameraanordnung auf den Fehler erster Ordnung auswirkt.

Wird die Ausrichtungsmatrix  $\mathbf{H}_R^2$  aus Gleichung (3.25), die den Ausrichtungsfehler erster Ordnung definiert, um eine additive Matrix  $\Delta\mathbf{H}^2$  ergänzt, die die Fehler der Parameterbestimmung enthält, so bestimmt sich der Ausrichtungsfehler wie in Gleichung (3.49) dargestellt.

$$\mathbf{E}^1 = (\mathbf{H}^2 + \Delta\mathbf{H}^2) \mathcal{K}_1(\mathbf{X}_w) - \mathcal{K}_2(\mathbf{X}_w) \quad (3.49)$$

Gleichungen (3.50) und (3.51) stellen dabei den Bezug zum betrachteten Versatzfehler her. Diese Abschätzung erfolgt anhand der Dreiecksungleichung [Bartsch 1994].

$$E^1 = \|\mathbf{H}^2\mathcal{K}_1(\mathbf{X}_w) - \mathcal{K}_2(\mathbf{X}_w) + \Delta\mathbf{H}^2\mathcal{K}_1(\mathbf{X}_w)\| \quad (3.50)$$

$$\leq \|\mathbf{H}^2\mathcal{K}_1(\mathbf{X}_w) - \mathcal{K}_2(\mathbf{X}_w)\| + \|\Delta\mathbf{H}^2\mathcal{K}_1(\mathbf{X}_w)\| \quad (3.51)$$

Somit zeigt sich, dass sich Fehler bei der Bestimmung der inneren und äußeren Parameter additiv auf den Ausrichtungsfehler fortpflanzen und dass dieser Einfluss begrenzt ist. Analog kann mittels Gleichung (3.51) die Auswirkung einer zeitlichen Änderung der äußeren Parameter auf den Ausrichtungsfehler betrachtet werden, wenn  $\Delta\mathbf{H}^2/\Delta t$  bekannt ist.

**Fehler höherer Ordnung:** Der zweite Fehleranteil resultiert aus der Überlagerung der Fehler, die durch eine fehlerbehaftete Bestimmung der Verzeichnungskoeffizienten hervorgerufen werden. Der Gesamtfehler höherer Ordnung kann, wie in (3.52) gezeigt, abgeschätzt werden.

$$E^h = |E_1^h + E_2^h| \leq |E_1^h| + |E_2^h| \leq E_{max}^h \quad (3.52)$$

Die Genauigkeit, mit der der jeweilige Verzeichnungskoeffizient bestimmt werden muss, kann somit aus der Betrachtung der Differenz zwischen fehlerbehafteter und idealer Normalisierung bestimmt werden (vgl. Gleichungen (3.53) und (3.54)).  $\Delta\kappa_i$  gibt hierbei die Differenz zwischen

dem bestimmten und dem wahren Verzeichnungskoeffizienten an.

$$\Delta x_i^u = \frac{x_i^d}{1 + [\kappa_i + \Delta\kappa_i] \left[ (x_i^d)^2 + (y_i^d)^2 \right]} - \frac{x_i^d}{1 + \kappa_i \left[ (x_i^d)^2 + (y_i^d)^2 \right]} \quad (3.53)$$

$$\Delta y_i^u = \frac{y_i^d}{1 + [\kappa_i + \Delta\kappa_i] \left[ (x_i^d)^2 + (y_i^d)^2 \right]} - \frac{y_i^d}{1 + \kappa_i \left[ (x_i^d)^2 + (y_i^d)^2 \right]} \quad (3.54)$$

Der Ausdruck des Gesamtfehlers bestimmt sich durch quadratische Überlagerung von  $\Delta x^u$  und  $\Delta y^u$ . Dieser Fehler muss kleiner oder maximal gleich der gegebenen Obergrenze  $E_i^h$  für das entsprechende Kamerasystem  $i$  sein.

$$(\Delta x_i^u)^2 + (\Delta y_i^u)^2 \leq (E_i^h)^2 \quad (3.55)$$

Die notwendige Genauigkeit bei der Bestimmung des Verzeichnungskoeffizienten wird durch Auflösen des entstehenden Gleichungssystems nach  $\Delta\kappa_i$  bestimmt.

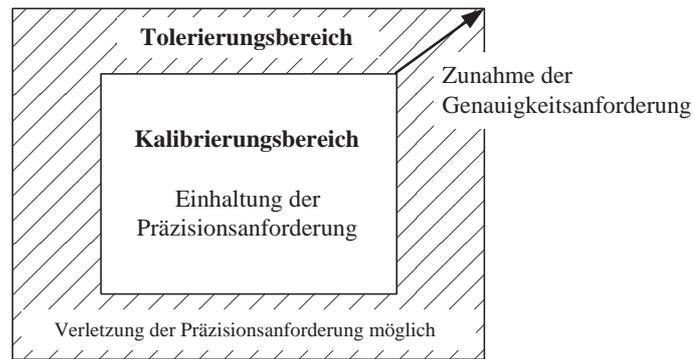
$$|\Delta\kappa_i| \leq \frac{E_i^h D_i^x D_i^y \left[ 1 + \left( (x_i^d)^2 + (y_i^d)^2 \right) \kappa_i \right]^2}{\left( (x_i^d)^2 + (y_i^d)^2 \right) \left[ \sqrt{(D_i^y x_i^d)^2 + (D_i^x y_i^d)^2} + E_i^h D_i^x D_i^y \left[ 1 + \left( (x_i^d)^2 + (y_i^d)^2 \right) \kappa_i \right] \right]} \quad (3.56)$$

Die notwendige Genauigkeit  $\Delta\kappa_i$ , mit der der Verzeichnungskoeffizient  $\kappa_i$  zu bestimmen ist, ist somit von der Bildposition abhängig, für die diese Genauigkeit erreicht werden soll. Für alle Bereiche, die einen kleineren Abstand vom Zentrum des Sensors haben als die Position der Auslegung, erfüllt auch eine geringere Genauigkeit die Anforderung. Für größere Abstände ist eine höhere Genauigkeit, somit ein kleinerer Fehler notwendig. Somit stellt die Auslegung bezogen auf den maximalen Abstand zum Sensorzentrum, somit den gesamten Bildbereich, die höchsten Anforderungen an die Kamerakalibrierung.

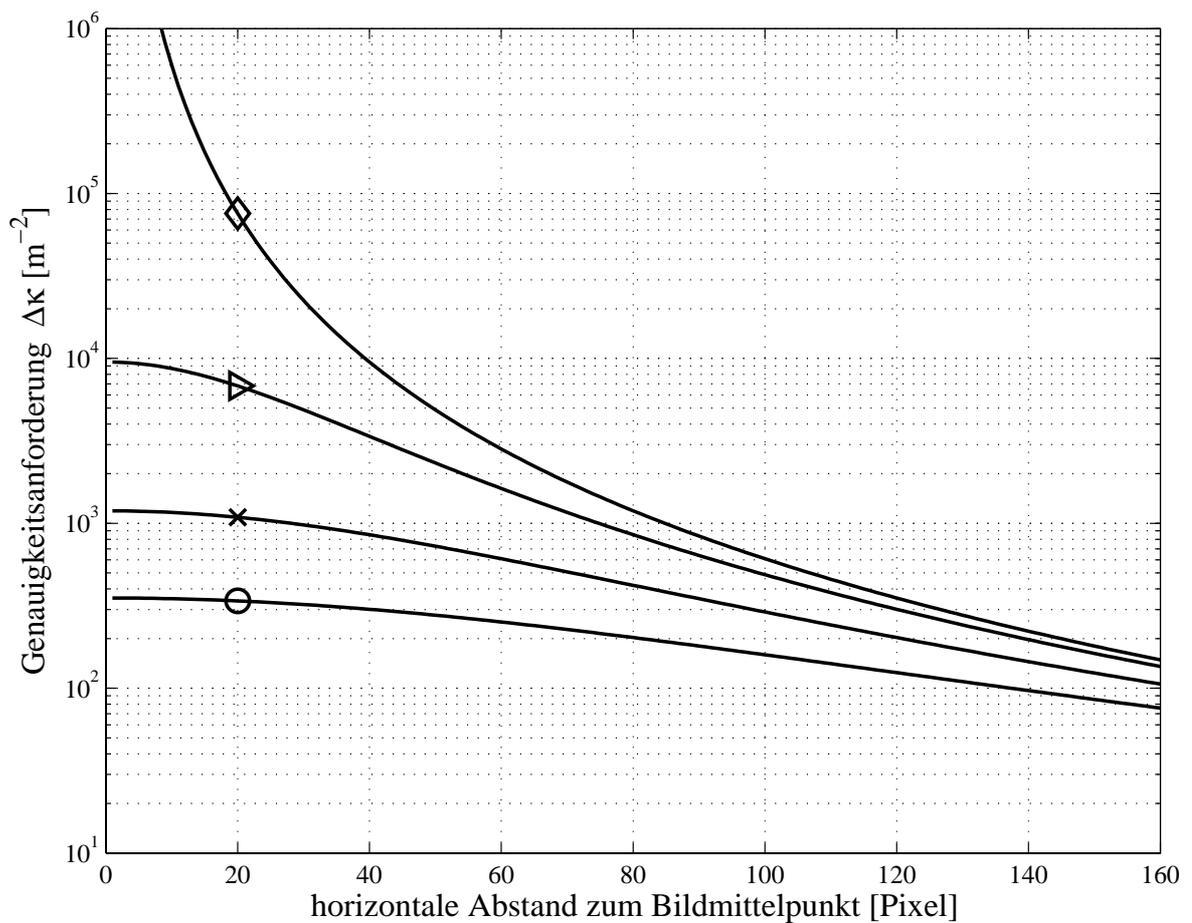
Bild 3.14 zeigt eine mögliche Definition des Kalibrierungsbereiches an dessen Randpunkten ein bestimmtes Fehlermaß  $E_{max}^h$  nicht überschritten werden soll.

In Bild 3.15 ist die Genauigkeitsanforderung exemplarisch für das visuelle Kamerasystem bei einer Obergrenze von 0,25 Pixel dargestellt. Es zeigt sich, dass mit zunehmendem Abstand vom Sensorzentrum, ein immer geringerer Fehler, somit eine höhere Genauigkeit gefordert ist (vgl. Kurve  $y^d = 120\text{Pixel}$ ).

Da der Gesamtfehler  $E$  aus der Überlagerung der beiden Einzelfehler entsteht, kann entsprechend des Aufwandes bei der Kamerakalibrierung bezüglich der beiden Kamerasysteme weiter optimiert



**Bild 3.14:** Mögliche Definition des Kalibrierungsbereiches mit der notwendigen Genauigkeitsanforderung



**Bild 3.15:** Anforderung an den Maximalfehler für die Bestimmung des Verzeichnungskoeffizienten für das visuelle Kamerasystem als Funktion der horizontalen Koordinate in Abhängigkeit des vertikalen Abstandes vom Bildmittelpunkt für eine Obergrenze von 0,25 Pixel;  $\diamond$  :  $y^d = 0$ ,  $\triangleright$  :  $y^d = 40$  Pixel,  $\times$  :  $y^d = 80$  Pixel,  $\circ$  :  $y^d = 120$  Pixel

werden. Desweiteren ist dieser Fehleranteil  $E^h$  nicht von der aktuellen Objektentfernung abhängig, er macht sich somit als Konstante in der Fehlerbetrachtung bemerkbar. Eine messtechnische Bestimmung kann somit vorzugsweise bei der Registrierentfernung erfolgen, da hier der Fehler erster Ordnung verschwindet.

### 3.4. Messtechnische Validierung des Modells

In diesem Abschnitt wird die Übertragbarkeit des Modells auf die real vorliegenden Ausbildungsbedingungen überprüft. Nur wenn sichergestellt ist, dass das Modell den Zusammenhang zwischen den äußeren Parametern und der Ausrichtungsmatrix sowie dem Ausrichtungsfehler richtig nachbildet, kann es für weitergehende Betrachtungen herangezogen werden.

Dabei werden primär der Ausrichtungsfehler und die Ausrichtungsmatrix für die Validierung ausgewählt. Durch die Betrachtung des Ausrichtungsfehlers wird die Validierung auf den Vergleich zweier eindimensionale Größen zurückgeführt, in denen alle Parameter berücksichtigt sind. Desweiteren ist dies die Größe, die bei der Betrachtung des fusionierten Bildes wahrgenommen und zur Bewertung der Ausrichtung durch den Betrachter herangezogen wird. Über die Größe des Versatzfehlers definiert sich das Kriterium der Objekttreue. Weiterhin berücksichtigt der Ausrichtungsfehler auch die Anteile, die durch eine fehlerhafte Kalibrierung der Kamerasysteme oder fehlerhafte Normalisierung der Kamerabilder entstehen.

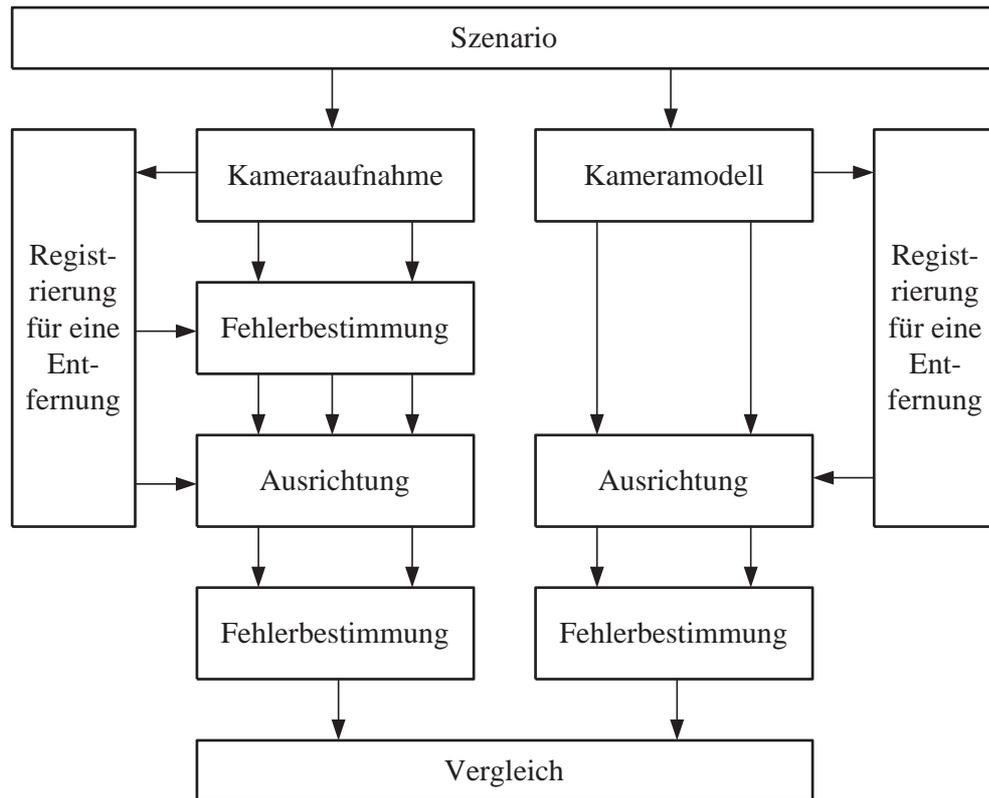
Über die Parameter der Ausrichtungsmatrix können die Einflüsse der äußeren Parameter auf den Ausrichtungsfehler getrennt und daraus die Messfehler abgeleitet werden. Da die Ausrichtungparameter, die aus der Ausrichtungsmatrix bestimmt werden, nicht vom Betrachter wahrgenommen werden, kommt ihnen eine dem Ausrichtungsfehler untergeordnete Rolle zu.

#### 3.4.1. Ableitung des Validierungskriteriums

Durch die Validierung ist zu zeigen, dass das aufgestellte Modell dem Zweck der Nachbildung einer objekttrauen, somit einer versatzminimalen Ausrichtung genügt. Durch das Modell sollen die Beziehungen zwischen inneren und äußeren Systemparametern und Ausrichtungsfehler nachgebildet werden, wobei, wenn Fehler auftreten, diese durch das Modell bestimmbar sind und auf Modellparameter zurückgeführt werden können.

**Vorüberlegungen:** Um das Modell und die zur Validierung des Modells durchgeführte Messung mit dem Ziel zu vergleichen, das aufgestellte Modell zu validieren, scheint im ersten Ansatz das in Gleichung (3.57) formulierte Vorgehen geeignet, das den Ausrichtungsfehler zum Vergleich nutzt. Dieses vergleicht Modell und Messung auf direktem Wege.

$$\forall E_{Modell} \exists E_{Messung} : |E_{Modell} - E_{Messung}| \leq S \quad (3.57)$$

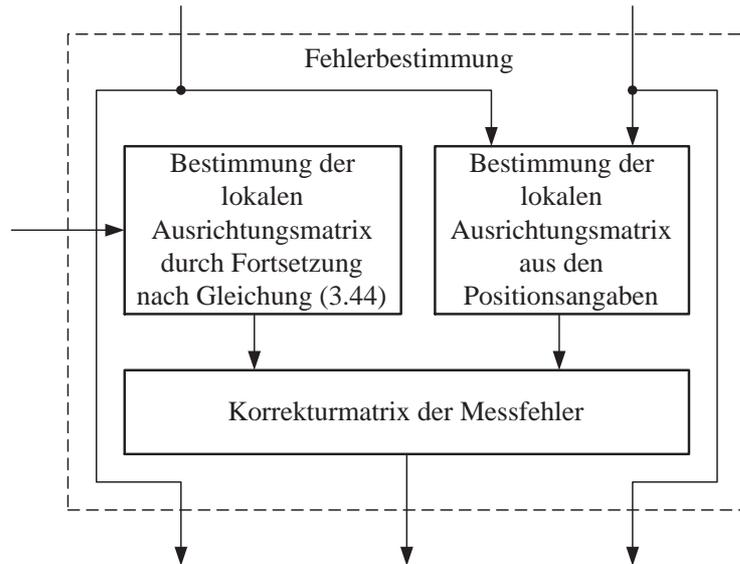


**Bild 3.16:** Verfahren zur Modellvalidierung

Gleichung (3.57) sagt aus, dass zu jedem Ausrichtungsfehler, der über die Anwendung des Modells bestimmt wurde, genau ein Wert für den Ausrichtungsfehler existiert, der durch die Messung ermittelt wurde, wobei die Differenz zwischen beiden Werten unterhalb eine definierten Fehlergrenze  $S$  liegt. Beide Werten werden bei identischen Voraussetzungen bestimmt, die sich aus den inneren Kameraparametern und den äußeren Ausrichtungsparametern zusammensetzen. Die Schwierigkeit bei diesem Vorgehen liegt in der Definition der Fehlergrenze, da diese durch die Messunsicherheit bestimmt wird, die dem Aufbau und der Messung zugrunde liegt. Gerade die Parameter des vertikalen und horizontalen Relativwinkels, deren wahre Größen nicht direkt bestimmt werden können, haben einen sehr großen Einfluss auf den Ausrichtungsfehler, wie die nachfolgende Sensitivitätsanalyse zeigen wird.

Daher wird ein anderes Vorgehen zur Validierung des Modells gewählt, um die möglichen Messfehler zu bestimmen und bei der Ausrichtung zu berücksichtigen.

**Vorgehen:** Das um die Berücksichtigung der Messfehler veränderte Vorgehen zur Validierung zeigt Bild 3.16. Ausgehend von einem Szenario, das aus den äußeren Parametern, den inneren Kameraparametern und den geometrischen Abmessungen des zur Validierung genutzten Kalibrierziels besteht, werden die Koordinaten der Markierungen auf dem Kalibrierziel (vgl. Abschnitt 5.2.1) einmal durch die Kameraaufnahmen gemessen und einmal durch das Modell berechnet. Aus den Koordinaten einer Entfernung wird jeweils die Ausrichtungsmatrix bestimmt, die die Aufnahmen in dieser Entfernung mit dem geringsten Ausrichtungsfehler zueinander ausrichtet. Für

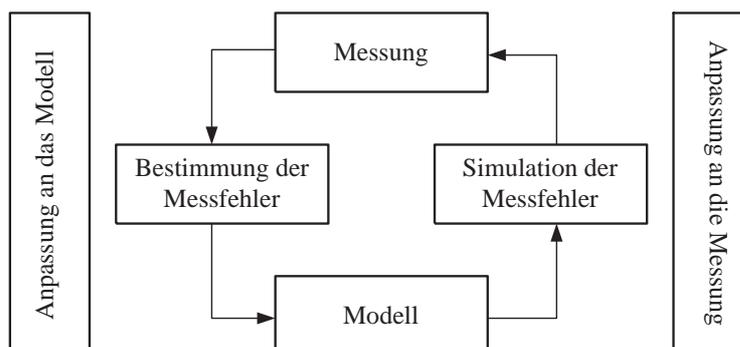


**Bild 3.17:** Fehlerbestimmung der Messfehler während der Modellvalidierung

den messtechnischen Prozess schließt sich an die Kameraaufnahme die Fehlerbestimmung an, um die Messfehler zu bestimmen und der sich anschließenden Bildausrichtung eine Korrekturmatrix zur Verfügung zu stellen. Durch die auf beiden Seiten vorhandenen Schritte der Ausrichtung und Fehlerbestimmung werden am Ende Wertepaare aus modellbestimmten und gemessenen Ausrichtungsfehler gebildet, die jeweils vom aktuellen Szenario abhängig sind und deren Lage analysiert werden kann.

Das Verfahren der während der Messung durchgeführten Fehlerbestimmung zeigt Bild 3.17. Ausgehend von der Ausrichtungsmatrix  $\mathbf{H}^2$  für die Entfernung  $Z_{REG}$  wird nach Gleichung (3.44) die Ausrichtungsmatrix bestimmt, die an der aktuell betrachteten Entfernung  $Z_{OBJ} \neq Z_{REG}$  zu einer versatzminimalen Ausrichtung führen würde. Aus den Positionen der Kalibriermarken wird nach Gleichung (3.27) die für die Kalibriermarken versatzminimale Ausrichtung bestimmt. Aus der Differenz zwischen diesen beiden Matrizen errechnet sich der Messfehler, der in der Korrekturmatrix  $\mathbf{H}_{Korrekt}^2$  enthalten ist und bei der anschließenden Ausrichtung beachtet wird.

Der gesamte Prozess der Validierung zeigt Bild 3.18. Die durch die Anpassung der Messung an



**Bild 3.18:** Ablauf des Validierungsprozesses

das Modell bestimmten Messfehler werden im nächsten Schritt dazu genutzt, das Modell an die Messung anzupassen. Sollten bei beiden Schritten eine hohe Anpassungsgüte, ausgedrückt durch den Korrelationskoeffizienten und die Parameter der Ausrichtungsmatrix, erreicht werden, kann das Modell als validiert angesehen werden. Denn damit wäre der Kreis von der Bestimmung der Messfehler über die Simulation der Messfehler geschlossen.

Obwohl Gleichung (3.44) dem zu validierenden Modell entstammt, kann sie an dieser Stelle eingesetzt werden, da ein relativer Zusammenhang zwischen den Ausrichtungsmatrizen der betrachteten Entfernungen ausgenutzt wird und keine Information aus der Modellbetrachtung in die Bestimmung der Messfehler einfließt. Sollte das Modell nicht gültig sein, so gilt auch Gleichung (3.44) nicht. Die würde zu einer falschen Bestimmung der Messfehler und einer fehlerhaften Ausrichtung führen. Aus der ermittelten Korrekturmatri $x$   $\mathbf{H}_{Korrekt}^2$  können anschließend die Messfehler der äußeren Parameter berechnet werden.

Zu beachten ist, dass durch die Messfehlerbestimmung eine Approximation der Messfehler der äußeren Parameter erfolgt. Da diese Analyse ebenfalls auf den aus den Kamerabildern gewonnenen Koordinaten der Markierungen basiert, können daher keine räumliche Fehler, die während der Bildaufnahme und der Positionsbestimmung der Marken entstehen, kompensiert werden. Diese Fehler beeinflussen die Präzision der Ausrichtungsmatrix nach Gleichung (3.34). Wie sich zeigen wird, beeinflusst dieser Rauschanteil bzw. diese Unsicherheit besonders den Skalierungsfaktor.

**Sensitivitätsanalyse:** Durch die Sensitivitätsanalyse wird die Auswirkung von Änderungen der äußeren Parameter auf den Versatzfehler betrachtet. Hierzu wird untersucht, um welchen Betrag sich einer äußeren Parameter ändern kann, um eine vorgegebene Veränderung des Versatzfehlers hervorzurufen. Exemplarisch wurden Änderungen um  $\pm 1$ ,  $\pm 2$ ,  $\pm 5$  und  $\pm 10$  Pixel betrachtet. Die Ergebnisse dieser Analyse für die eingesetzten Kamerasysteme sind in Tabelle 3.3 zusammengefasst. Aus den Ergebnisse in Tabelle 3.3 kann entnommen werden, dass sich die 6 äußeren Parameter in ihrer Wirkung auf den Versatzfehler überlagern. Aus der Änderung des Versatzfehlers kann aber nicht eindeutig auf die veränderten Parameter geschlossen werden. Dies ist durch die Definition des Versatzfehlers als Abstandbetrag gegeben (vgl. Gleichung (3.46)). Aber der Einfluss einer Parameteränderung auf die Änderung des Versatzfehlers kann durch die Analyse abgeschätzt werden.

**Tabelle 3.3:** Sensitivitätsanalyse des Versatzfehlers in Abhängigkeit der äußeren Parameter

$ \Delta E $	$\leq 1Pixel$	$\leq 2Pixel$	$\leq 5Pixel$	$\leq 10Pixel$
$ \Delta T_x $	$\leq 3,00cm$	$\leq 6,50cm$	$\leq 16,50cm$	$\leq 33,60cm$
$ \Delta T_y $	$\leq 3,00cm$	$\leq 6,50cm$	$\leq 16,50cm$	$\leq 33,60cm$
$ \Delta T_z $	$\leq 0,47m$	$\leq 0,93m$	$\leq 2,18m$	$\leq 3,95m$
$ \Delta \alpha $	$\leq 0,09^\circ$	$\leq 0,18^\circ$	$\leq 0,45^\circ$	$\leq 0,91^\circ$
$ \Delta \beta $	$\leq 0,09^\circ$	$\leq 0,18^\circ$	$\leq 0,45^\circ$	$\leq 0,91^\circ$
$ \Delta \gamma $	$\leq 1,33^\circ$	$\leq 2,66^\circ$	$\leq 6,67^\circ$	$\leq 13,00^\circ$
$ \Delta Z_{OBJ} $	$\leq 0,48m$	$\leq 0,95m$	$\leq 2,23m$	$\leq 4,00m$

Die Vorbetrachtungen zeigen, wie aus dem Zusammenhang zwischen den Ausrichtungsmatrizen unterschiedlicher Entfernungen die Messfehler bestimmt werden können. Somit ist durch dieses Vorgehen mit einer guten Übereinstimmung zwischen Modell und Messung zu rechnen, da durch die Korrekturmatrix alle möglichen äußeren Fehlerquellen berücksichtigt werden. Jedoch ist zu berücksichtigen, dass die Korrekturmatrix unter der Annahme berechnet wird, dass der Montageabstand in der Tiefe vernachlässigbar ist. Daher ist bei Anordnungen, in denen ein Montageabstand in der Tiefe realisiert ist, mit Abweichungen vom Modell zu rechnen, da dieses diesen Versatz mit berücksichtigt. Darüberhinaus noch vorhandenen Abweichungen lassen sich durch die Ungenauigkeiten der Positionsbestimmung erklären, da die inneren Kameraparameter als konstant angenommen und die Verzeichnungsparameter nach Abschnitt 6.1 vernachlässigt werden können.

Desweiteren wurde untersucht, wie sich eine Änderung eines äußeren Parameters auf eine Veränderung des Ausrichtungsfehlers auswirkt. Dieser weist besonders gegenüber den Relativwinkeln  $\alpha$  und  $\beta$  eine sehr hohe Empfindlichkeit auf. Dieser Tatsache wurde beim Versuchsaufbau Rechnung getragen.

### 3.4.2. Versuchsaufbau und Versuchsablauf

Durch den Versuchsaufbau ist zu gewährleisten, dass der Abstand zwischen beiden Kamerasystemen so verändert werden können, dass mehrere, von einander unabhängige Anordnungen realisierbar sind. Die Ausrichtung der Kamerasysteme sollte dabei unveränderlich sein, um Beeinflussungen durch Änderungen der Relativwinkel auszuschließen. Neben den unterschiedlichen Anordnungen sind verschiedene Entfernungen zwischen den Kamerasystemen und einem festen Bezugsziel, dem zu definierenden Kalibrierziel, herzustellen. Bei der Realisierung unterschiedlicher Objektentfernungen wurde darauf geachtet, dass die Relativanordnung der beiden Kamerasysteme nahezu unverändert blieb.

Für diese Untersuchung werden die beiden Kamerasysteme genutzt, die auch im Testsystem eingesetzt werden (siehe Kapitel 5). Die Parameter der Kamerasysteme sind in Tabelle 3.4 zusammengefasst.

**Tabelle 3.4:** Innere Parameter der genutzten Kamerasysteme [Raytheon 2002, Jai 2001]

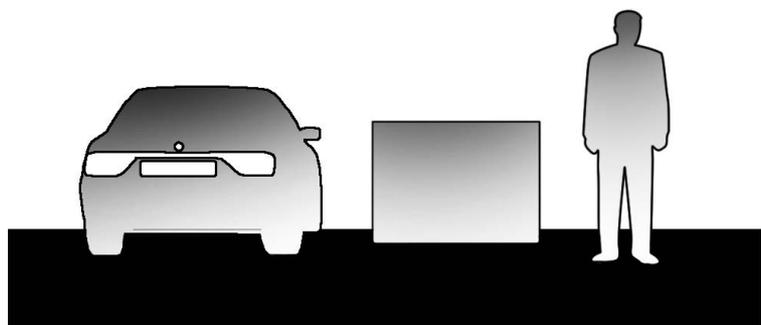
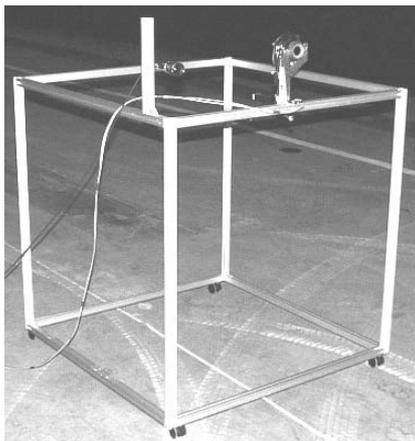
	Kamerasystem 1	Kamerasystem 2
empfindlicher Spektralbereich	fernes Infrarot	visuell
physikalische Auflösung	$320(h) \times 240(v)$ Pixel	$768(h) \times 494(v)$ Pixel
logische Auflösung <sup>13</sup>	$320(h) \times 240(v)$ Pixel	$320(h) \times 240(v)$ Pixel
Brennweite $f_i$	$24.6\text{mm}$	$12.5\text{mm}$
Blickwinkel (Öffnungswinkel)	$36^\circ(h) \times 27^\circ(v)$	$29^\circ(h) \times 22^\circ(v)$
physikalische Pixelgröße	$(50\mu\text{m}, 50\mu\text{m})$	$(8.4\mu\text{m}, 9.8\mu\text{m})$
logische Pixelgröße $(D_i^x, D_i^y)$ <sup>13</sup>	$(50\mu\text{m}, 50\mu\text{m})$	$(20.2\mu\text{m}, 20.2\mu\text{m})$
Verzeichnungsparameter $\kappa_i$	0 (für Simulation angen.) <sup>14</sup>	0 (für Simulation angen.)
	angepasstes System	Bezugssystem

**Tabelle 3.5:** Kamerapositionen, die für die Aufnahmen zur Modellvalidierung aufgebaut wurden

Block	x [cm]	y [cm]	z [cm]
1	89.5	0.0	0.0
2	50.0	0.0	0.0
3	9.5	0.0	0.0
4	50.0	0.0	50.0
5	103.0	0.0	50.0
6	103.0	0.0	95.0
7	5.0	-23.5	95.0
8	5.0	-64.0	95.0
9	5.0	-104.0	95.0

Das Modell stellt die relativen Unterschiede in der Montage beider Kamerasysteme mit der optimalen Ausrichtungsmatrix und den entsprechenden Ausrichtungsfehlern in Beziehung. Um unterschiedliche Anordnungen der Kamerasysteme nachzubilden, wurde ein Würfel mit einer Kantenlänge von ca. 110cm aufgebaut, auf dessen Kanten die Kamerasysteme frei zueinander in allen drei Dimensionen platziert werden konnten (vgl. Bild 3.19(a)). Es wurde darauf geachtet, dass die Extremwerte, maximaler und minimaler Abstand in der Menge der Aufbauten vorhanden ist. Tabelle 3.5 stellt die untersuchten Anordnungen zusammen.

Diese Würfelaufbauten wurden dann jeweils in den drei Entfernungen 15m, 20m und 25m zur in Bild 3.19(b) dargestellten Szene positioniert und diese durch beide Kamerasysteme zeitgleich aufgezeichnet. Diese Szene enthält drei Objekte: ein Fahrzeug, eine Person und eine Kalibrierplatte. Die Person und das Fahrzeug dienen dazu, die Aufnahmen auch für weitere ergonomische Untersuchungen nutzen zu können (siehe Abschnitt 4). Über die Markierungen der Kalibrierplatte kann der Versatz in beiden Kamerabildern eindeutig bestimmt werden.



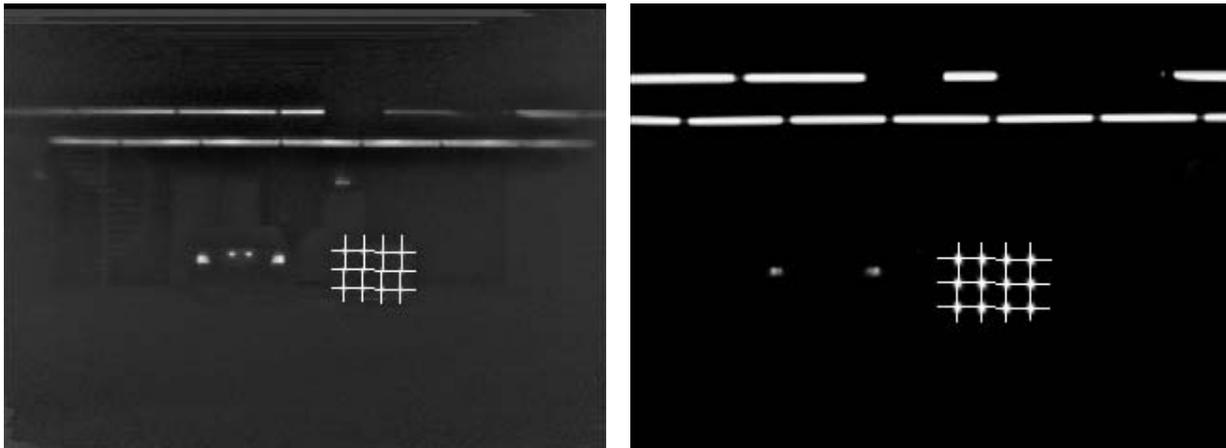
(a) Würfelaufbau zur Relativpositionierung der Kamerasysteme

(b) Szenenaufbau bestehend aus Fahrzeug, Kalibrierplatte und Person

**Bild 3.19:** Würfel- und Szenenaufbau des Validierungsexperimentes

<sup>13</sup>Auflösung, bzw. Pixelgröße nach erfolgter Digitalisierung im PC

<sup>14</sup>Gültigkeit dieser Annahmen zeigt sich in Abschnitt 6.1



(a) Markenpositionen im Infrarotbild

(b) Markenpositionen im visuellen Bild

**Bild 3.20:** Markenpositionen der Kalibrierplatte bei einer Entfernung von 15m

Beim Aufbau der Kalibrierplatte wurde darauf geachtet, dass diese für die Kalibrierung eines FIR- und eines visuellen Kamerasystems geeignet ist. Somit mussten die aufgebrachten Markierungen der Platte sowohl visuelle als auch thermische Strahlung emittieren. Glühlampen stellten sich dabei als dafür geeignete Markierungen heraus.

### 3.4.3. Messergebnisse

In den aufgenommenen Sequenzen wurde dann im Labor durch ein Korrelationsfilter nach den Kalibriermarken gesucht und deren Positionen protokolliert. In Bild 3.20 sind exemplarisch für eine Entfernung von 15m die gefundenen Markenpositionen dargestellt.

Nach dem in Abschnitt 3.1 vorgestellten Kameramodell sind die Aufnahmen beider Kamerasystem mit radialen Verzeichnungen belegt, die sich besonders in den Randbereichen der Kamerabilder auswirken. Dies bedeutet, dass die Verzeichnungen für die gesamte Messung zu berücksichtigen sind. Da aber im vorliegenden Fall die Koordinaten der Kalibriermarken nahe des Bildzentrums lokalisiert sind, können die radialen Verzeichnungen, deren Einfluss besonders in den Bildrandbereichen auftritt, vernachlässigt werden (siehe Abschnitt 3.3.2).

Weiterhin führen Fehler, die bei der Bestimmung des Kameraversatzes und bei der Bestimmung der Objektentfernung systematisch auftreten, ebenfalls zu größeren Einflüssen als die Vernachlässigung der Verzeichnung, wie die Sensitivitätsanalyse in Abschnitt 3.4.1 gezeigt hat.

Somit werden für die beiden vorliegenden Kamerasysteme die ursprünglichen Koordinaten der Kalibriermarken im Bild für die weiteren Verarbeitungsschritte herangezogen. Für andere Kamerasysteme, besonders mit größeren Öffnungswinkeln, die andere Verzeichnungskoeffizienten aufweisen, ist diese Annahme zu prüfen.

### 3.4.4. Auswertung und Schlussfolgerungen

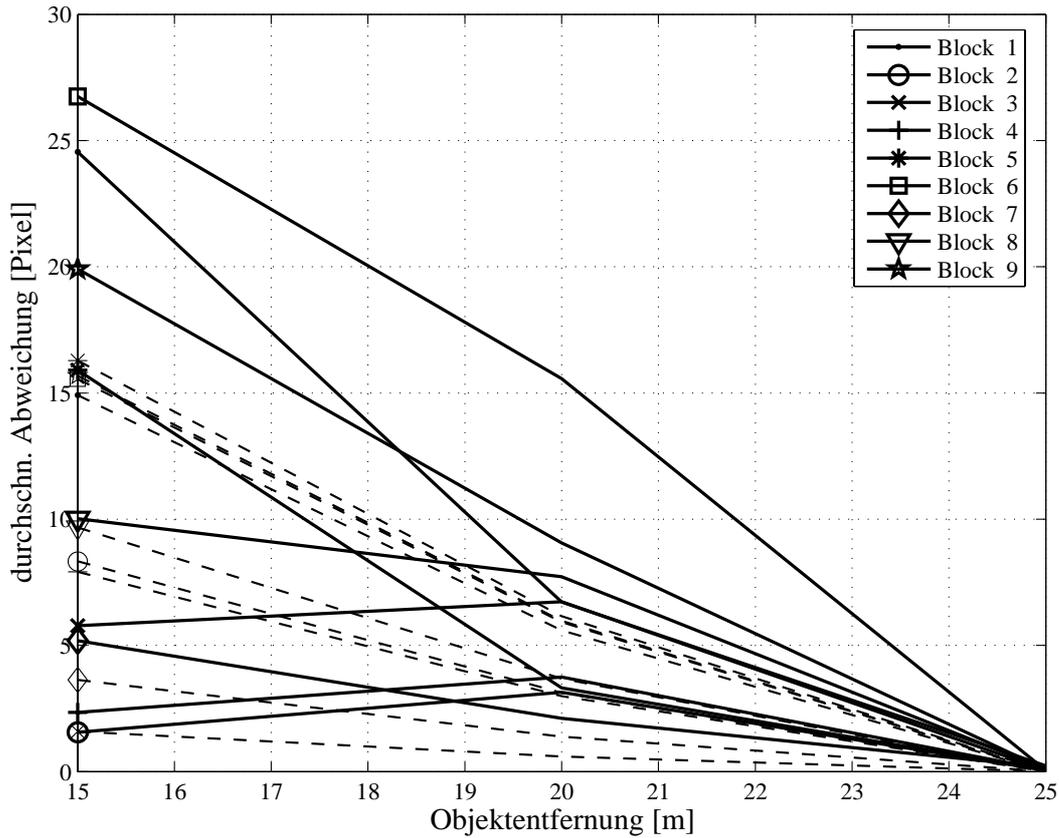
Aus den ermittelten Positionen der Kalibrierpunkte wurde nach Gleichung (3.27) die optimale Ausrichtungsmatrix für den entsprechenden Block und die jeweilige Entfernung bestimmt. Analog zu dem in Abschnitt 3.2.3 vorgestellten Verfahren können die Ausrichtungsparameter bestimmt werden. Anschließend erfolge die Bestimmung des Versatzfehler für die beiden verbleibenden Entfernungen. Hierbei wurde einmal der Messfehler bei der Bestimmung der Versatzfehler berücksichtigt und einmal nicht. Die Messfehler wurden dabei mittels des in Abschnitt 3.4.1 vorgestellten Verfahrens bestimmt.

Die Auswertung betrachtet zuerst die Ergebnisse der Gegenüberstellung der Ausrichtungsfehler, da dieser die Objekttreue quantifiziert. Anschließend wird die Gegenüberstellung der Parameter der Ausrichtungsmatrix diskutiert. Für den Vergleich der Modell- und Messergebnisse werden zur Quantifizierung der Anpassungsgüte der Regressionskoeffizient und zur Beschreibung der absoluten Lage der zu vergleichenden Punkte die Ausgleichsgerade herangezogen [Schmidt 2003]. Abschließend wird die Bestimmung der Änderung der Relativwinkel aus der Messfehlerkompensation demonstriert.

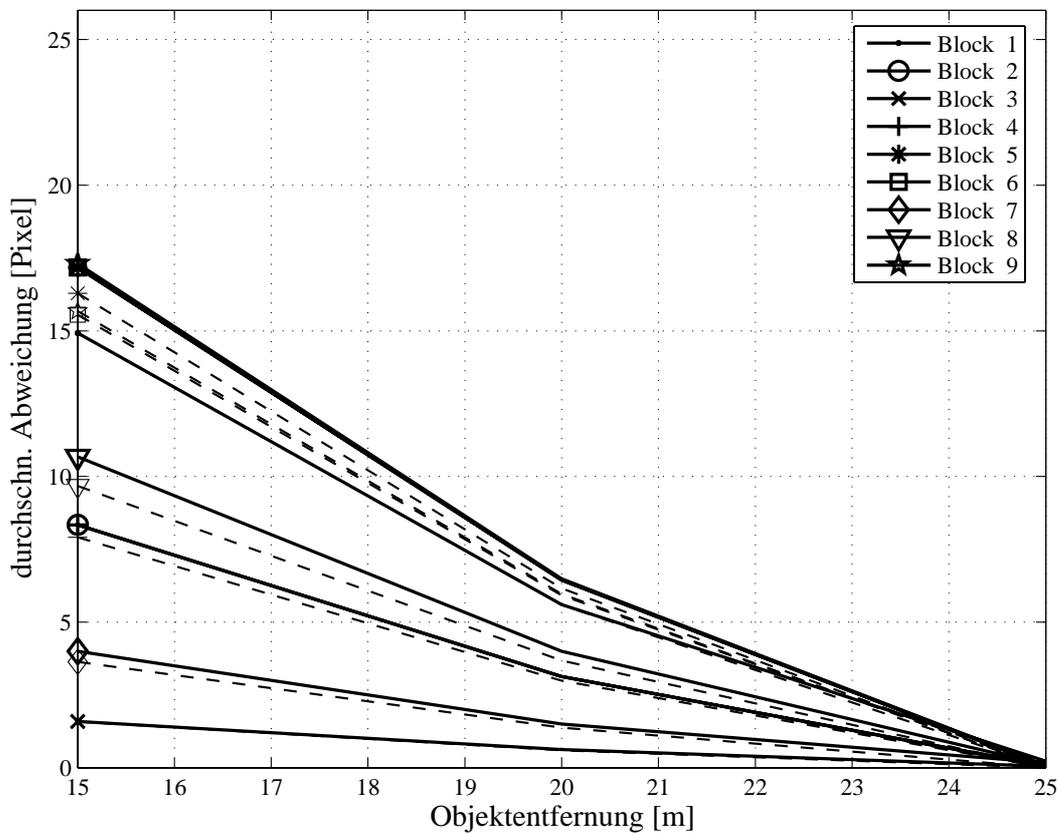
**Ausrichtungsfehler:** In den Bildern 3.21(a) und 3.21(b) sind die Verläufe des Ausrichtungsfehlers für die Registrierentfernung  $Z_{REG} = 25m$  dargestellt. Bild 3.21(a) zeigt dabei den Verlauf des gemessenen Versatzfehler ohne Messfehlerkompensation im Vergleich zum Verlauf des Ausrichtungsfehler, der durch das Modell bestimmt wurde. Es zeigen sich deutliche Abweichungen zwischen beiden Verläufen, die hauptsächlich aus einer Änderung der Relativwinkel resultieren, wie die Sensitivitätsanalyse aus Abschnitt 3.3.2 zeigt.

Vergleichend dazu sind in Bild 3.21(b) die Verläufe nach erfolgter Messfehlerkompensation des gemessenen Ausrichtungsfehlers und des Modells dargestellt. In dieser Darstellung zeigt sich eine geringere Abweichung zwischen den beiden Verläufen. Die noch bestehenden Unterschiede können auf die Ungenauigkeit bei der Bestimmung der Markenpositionen und auf die Vernachlässigung des Versatzes in der Tiefe bei der Bestimmung der Korrekturmatrix zurückgeführt werden (vgl. Abschnitt 3.2.4). Die Vernachlässigung wird besonders bei den Blöcken mit Montageabständen in der Tiefe deutlich. Tabelle 3.6 fasst die Punkte der in den Bildern 3.21(a) und 3.21(b) dargestellten Verläufe des Ausrichtungsfehlers zusammen.

Für eine bessere Übersicht sind in Bild 3.22 die durch die Messung ermittelten Ausrichtungsfehler über die durch das Modell ermittelten Werte aufgetragen. Um auch hier den Vergleich zwischen dem messfehlerkorrigierten und dem unkorrigierten Verlauf zu ermöglichen, sind beide Punktemengen eingetragen. Durch die Korrektur der Messfehler kann eine Verringerung Streuung der Fehlerpunkte um die Ausgleichsgerade erreicht werden. Ebenfalls verringert sich deren Anstieg. Somit wurden die Messfehler modellbasiert bestimmt und damit die Ausrichtung der Kamerabilder so angepasst, dass eine nahezu ideale Ausrichtung entstanden ist, die durch das Modell vorgegeben wird.



(a) Gegenüberstellung ohne Messfehlerkompensation

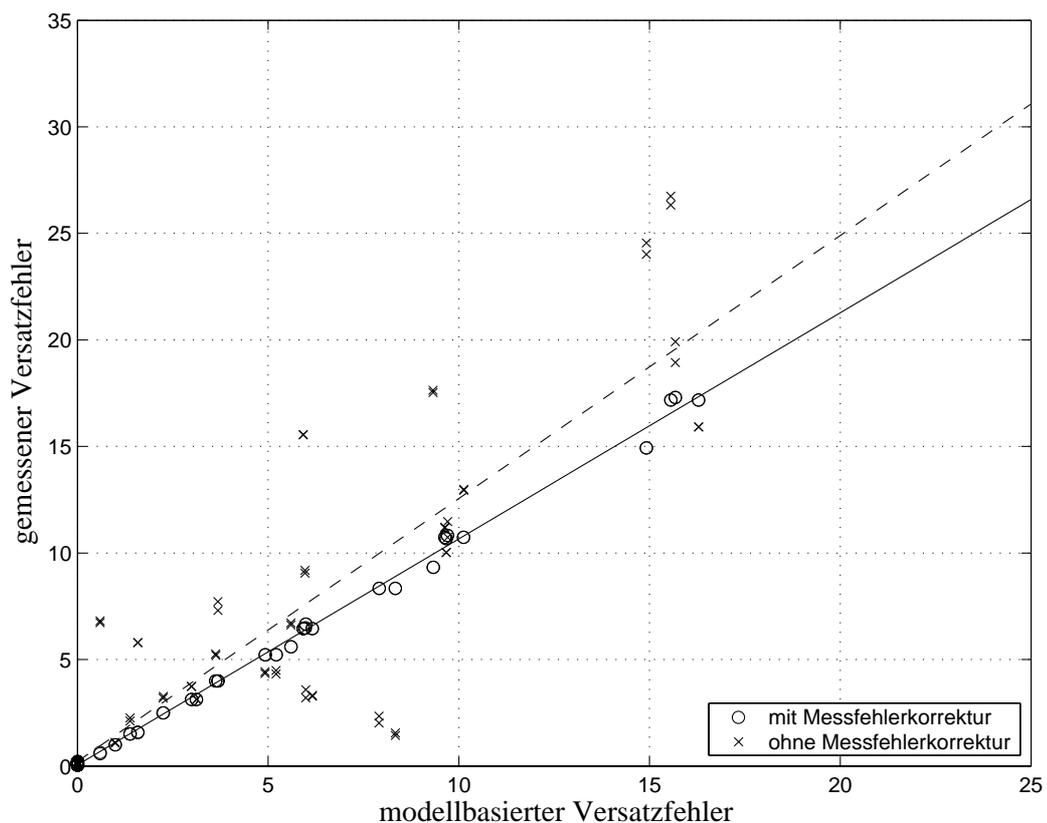


(b) Gegenüberstellung ohne Messfehlerkompensation

**Bild 3.21:** Gegenüberstellung der Verläufe der Ausrichtungsfehler für eine Registrierentfernung  $Z_{REG} = 25m$  (durchgezogen - gemessener Verlauf, gestrichelt - modellierter Verlauf)

**Tabelle 3.6:** Gemessener und modellierter Ausrichtungsfehler in Gegenüberstellung zum gemessenen Ausrichtungsfehler nach Fehlerkorrektur

Block	gemessener Fehler			modellierter Fehler			korrigierter Fehler		
	15m	20m	25m	15m	20m	25m	15m	20m	25m
1	24,55	6,72	0,23	14,92	5,59	0,00	14,92	5,60	0,23
2	1,56	3,14	0,05	8,34	3,13	0,00	8,34	3,13	0,05
3	5,78	6,73	0,05	1,58	0,59	0,00	1,59	0,62	0,05
4	2,34	3,75	0,06	7,91	2,99	0,00	8,34	3,13	0,06
5	15,91	3,32	0,06	16,29	6,16	0,00	17,17	6,44	0,06
6	26,75	15,57	0,05	15,55	5,92	0,00	17,17	6,44	0,05
7	5,19	2,11	0,17	3,63	1,38	0,00	3,99	1,50	0,17
8	10,02	7,72	0,09	9,67	3,68	0,00	10,67	4,00	0,09
9	19,91	9,06	0,08	15,68	5,97	0,00	17,31	6,49	0,08

**Bild 3.22:** Gegenüberstellung der bestimmten Ausrichtungsfehler aller Blöcke und aller Entfernungen, mit und ohne Messfehlerkompensation (durchgezogen - Ausgleichsgerade mit Fehlerkorrektur, gestrichelt - Ausgleichsgerade ohne Fehlerkorrektur)

**Tabelle 3.7:** Koeffizienten der Ausgleichsgeraden und Korrelationskoeffizient zwischen theoretischem und praktischem Ausrichtungsfehler

ohne Messfehlerkorrektur			mit Messfehlerkorrektur		
Anstieg	Offset	Korrelation	Anstieg	Offset	Korrelation
1.23	0.21	0.88	1.06	0.05	1.00

In Tabelle 3.7 sind sowohl die Koeffizienten der Ausgleichsgeraden als auch die Korrelationskoeffizienten beider Messreihen zusammengefasst.

Tabelle 3.7 zeigt, dass durch die Kompensation der Messfehler nahezu eine Annäherung an den Idealanstieg von 1 gelingt. Dies bedeutet, dass die Modellierung des Zusammenhangs zwischen äußeren Parametern und Ausrichtungsfehler mit der Messung validiert für diese Kameraanordnung in dem untersuchten Entfernungsbereich werden konnte. Aufgrund des über die Objektentfernung konstanten Verhalten der Kamerasysteme und des Modells kann davon ausgegangen werden, dass das Modell auch für Entfernungen jenseits der 25m gültig ist.

**Messfehler:** Ein weiteres Kriterium für die Modellvalidierung neben der Ableitung der Ausrichtungsmatrix und des Ausrichtungsfehlers ist die Bestimmbarkeit von bestehenden Messfehlern. Aus den bestimmten Kompensationsmatrizen wurden exemplarisch die Änderungen der Relativwinkel bestimmt. Diese sind in den Tabelle 3.8 bis 3.10 zusammengefasst. Dabei wurde jeweils der Relativwinkel der Kalibrierentfernung  $Z_{REG}$  als Bezug genutzt. Die Angaben sind somit als Relativwerte zu interpretieren.

Tabelle 3.8 zeigt dabei die Änderungen des Relativwinkels  $\alpha$ . Die maximale Änderung des Relativwinkels beträgt ca.  $\pm 0.5^\circ$ . Tabelle 3.9 zeigt dabei die Änderungen des Relativwinkels  $\beta$ . Die maximale Änderung des Relativwinkels beträgt ca.  $\pm 1, 0^\circ$ . Tabelle 3.10 zeigt dabei die Änderungen des Relativwinkels  $\gamma$ . Die maximale Änderung des Relativwinkels beträgt ca.  $\pm 1, 0^\circ$ , wobei zu beachten ist, dass der Einfluss dieses Relativwinkel auf den Ausrichtungsfehler geringer ausfällt und dass dieser durch die Ausrichtungsmatrix kompensiert werden kann (vgl. Gleichung 3.31).

Alle Tabelle zeigen sehr geringe Werte für die Messfehler. Dies korrespondiert zu den Ergebnissen der Sensitivitätsanalyse, die bereits bei kleinen Winkeländerungen deutliche Veränderungen des Ausrichtungsfehlers ausweist. Der Vergleich der Maximalwerte zeigt, dass die größten Fehler, offensichtlich bei Umsetzen des Würfels, beim Relativwinkel  $\beta$  entstanden sind.

Diese Messfehler können nun dazu genutzt werden, dass Modell an die Messung anzupassen, somit eine Simulation der bestimmten Messfehler durchzuführen. Da nur ein Teil der gesamt möglichen Messfehler betrachtet wurde, ist mit einer geringeren Anpassungsgüte zu rechnen, als es bei der Anpassung der Messung an das Modell der Fall ist.

**Messfehlersimulation:** In der Messfehlersimulation werden während der Messfehlerkorrektur bestimmten Änderungen der Relativwinkel bei der Berechnung des Ausrichtungsfehlers durch

**Tabelle 3.8:** Messfehler des Relativwinkels  $\alpha$  über die Objektentfernung (Angaben in  $^\circ$ )

Block	$Z_{REG} = 15m$			$Z_{REG} = 20m$			$Z_{REG} = 25m$		
	$Z_{OBJ}$	15m	20m	25m	15m	20m	25m	15m	20m
1	0.00	0.40	0.50	-0.40	0.00	0.11	-0.50	-0.11	0.00
2	0.00	-0.20	-0.31	0.20	0.00	-0.11	0.31	0.11	0.00
3	0.00	-0.20	0.08	0.20	0.00	0.28	-0.08	-0.28	0.00
4	0.00	0.07	-0.17	-0.07	0.00	-0.24	0.17	0.24	0.00
5	0.00	-0.25	0.26	0.25	0.00	0.52	-0.26	-0.52	0.00
6	0.00	-0.29	0.07	0.29	0.00	0.36	-0.07	-0.36	0.00
7	0.00	0.31	0.00	-0.31	0.00	-0.30	-0.00	0.30	0.00
8	0.00	0.18	0.03	-0.18	0.00	-0.15	-0.03	0.15	0.00
9	0.00	-0.06	0.26	0.06	0.00	0.31	-0.26	-0.31	0.00

**Tabelle 3.9:** Messfehler des Relativwinkels  $\beta$  über die Objektentfernung (Angaben in  $^\circ$ )

Block	$Z_{REG} = 15m$			$Z_{REG} = 20m$			$Z_{REG} = 25m$		
	$Z_{OBJ}$	15m	20m	25m	15m	20m	25m	15m	20m
1	0.00	0.64	0.67	-0.64	0.00	0.03	-0.67	-0.03	0.00
2	0.00	-0.66	-0.50	0.66	0.00	0.17	0.50	-0.17	0.00
3	0.00	0.11	-0.78	-0.11	0.00	-0.89	0.78	0.89	0.00
4	0.00	-0.98	-0.92	0.98	0.00	0.06	0.92	-0.06	0.00
5	0.00	0.21	-0.22	-0.21	0.00	-0.44	0.22	0.44	0.00
6	0.00	-0.27	0.54	0.27	0.00	0.82	-0.54	-0.82	0.00
7	0.00	-0.06	-0.55	0.06	0.00	-0.49	0.55	0.49	0.00
8	0.00	-0.19	0.11	0.19	0.00	0.29	-0.11	-0.29	0.00
9	0.00	-0.13	0.20	0.13	0.00	0.33	-0.20	-0.33	0.00

**Tabelle 3.10:** Messfehler des Relativwinkels  $\gamma$  über die Objektentfernung (Angaben in  $^\circ$ )

Block	$Z_{REG} = 15m$			$Z_{REG} = 20m$			$Z_{REG} = 25m$		
	$Z_{OBJ}$	15m	20m	25m	15m	20m	25m	15m	20m
1	0.00	-0.04	0.64	0.04	0.00	0.68	-0.64	-0.68	0.00
2	0.00	-0.27	0.33	0.27	0.00	0.60	-0.33	-0.60	0.00
3	0.00	-0.14	-0.34	0.14	0.00	-0.21	0.34	0.21	0.00
4	0.00	0.04	0.14	-0.04	0.00	0.10	-0.14	-0.10	0.00
5	0.00	-0.20	-0.41	0.20	0.00	-0.21	0.41	0.21	0.00
6	0.00	0.07	0.03	-0.07	0.00	-0.04	-0.03	0.04	0.00
7	0.00	0.11	-0.33	-0.11	0.00	-0.44	0.33	0.44	0.00
8	0.00	-0.16	-0.37	0.16	0.00	-0.21	0.37	0.21	0.00
9	0.00	-0.18	-1.03	0.18	0.00	-0.85	1.03	0.85	0.00

das Modells berücksichtigt. Somit ist mit einer Anpassung der simulierten Werte an die gemessenen zu rechnen.

In Bild 3.23 sind die Verläufe des Anpassungsfehlers vor und nach der Messfehlersimulation für die Registrierentfernung  $Z_{REG} = 25m$  dargestellt. Durch die Berücksichtigung der Messfehler konnte eine Anpassung des modellierten Ausrichtungsfehlers an den gemessenen Verlauf erreicht werden. Auch hier ist wieder zu erkennen, dass durch die Vernachlässigung des Versatzes in der Tiefe keine exakte Anpassung des Verlaufes des Ausrichtungsfehlers mit Fehlersimulation an den gemessenen Ausrichtungsfehler erreicht wird. Tabelle 3.11 fasst die Punkte der in den Bildern 3.22 und 3.23 dargestellten Verläufe des Ausrichtungsfehlers zusammen.

In Bild 3.24 sind die Ausrichtungsfehler wieder als Punkte dargestellt, wobei der modellierte Ausrichtungsfehler auf der horizontalen und der gemessene Ausrichtungsfehler auf der vertikalen Achse abgetragen ist. Zur Veranschaulichung der Abhängigkeit sind sowohl für die Modellierung mit Messfehlersimulation als auch ohne Fehlersimulation die Ausgleichsgeraden eingezeichnet.

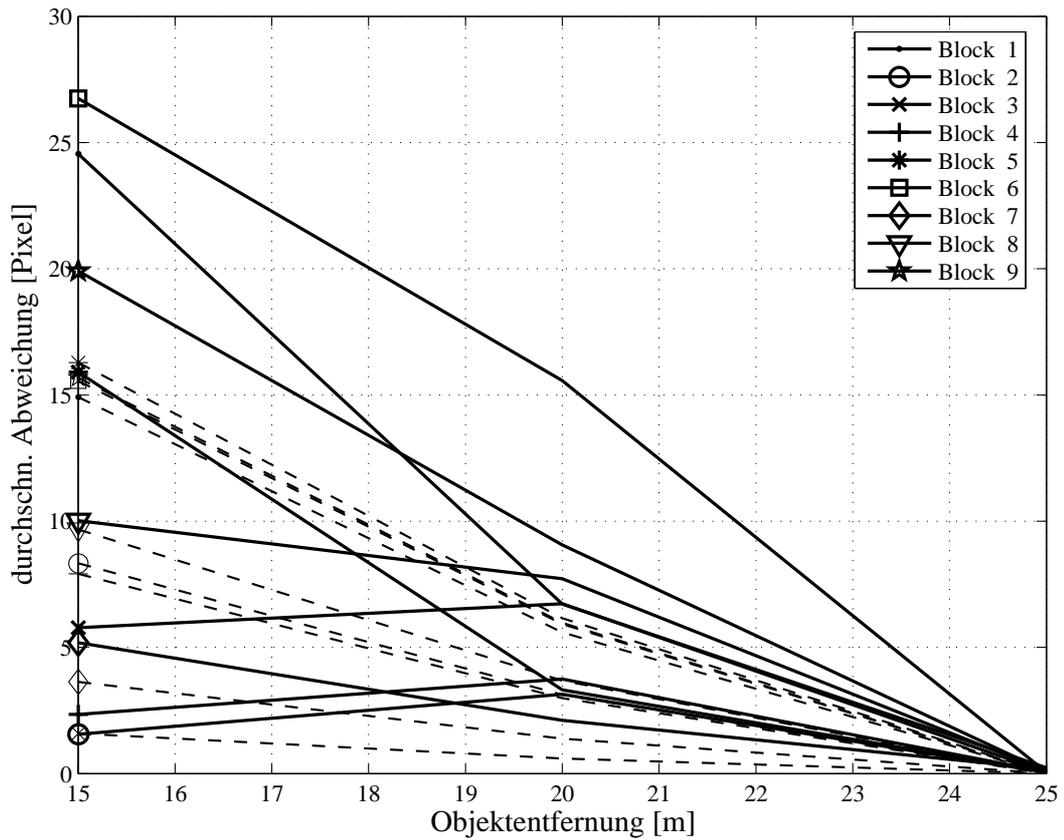
Tabelle 3.12 enthält die Gütekriterien der Anpassung. Durch die Simulation der Messfehler kann eine deutliche Absenkung der Ausgleichsgeraden, nah an den idealen Einheitsanstieg erreicht werden. Ebenfalls erhöht sich durch die Messfehlersimulation die Korrelation zwischen modellierten und gemessenen Ausrichtungsfehler.

Da bei der Messfehlersimulation nur die Änderungen der Relativwinkel und andere mögliche Fehlerquellen nicht betrachtet wurden, wird durch diese Anpassung nicht die Güte erreicht, die es bei der Anpassung der Messung an das Modell der Fall war. Diese Vermutung wurde bereits eingangs aufgestellt und kann durch den Vergleich der in den Tabellen 3.7 und 3.12 wiedergegebenen Werte bestätigt werden.

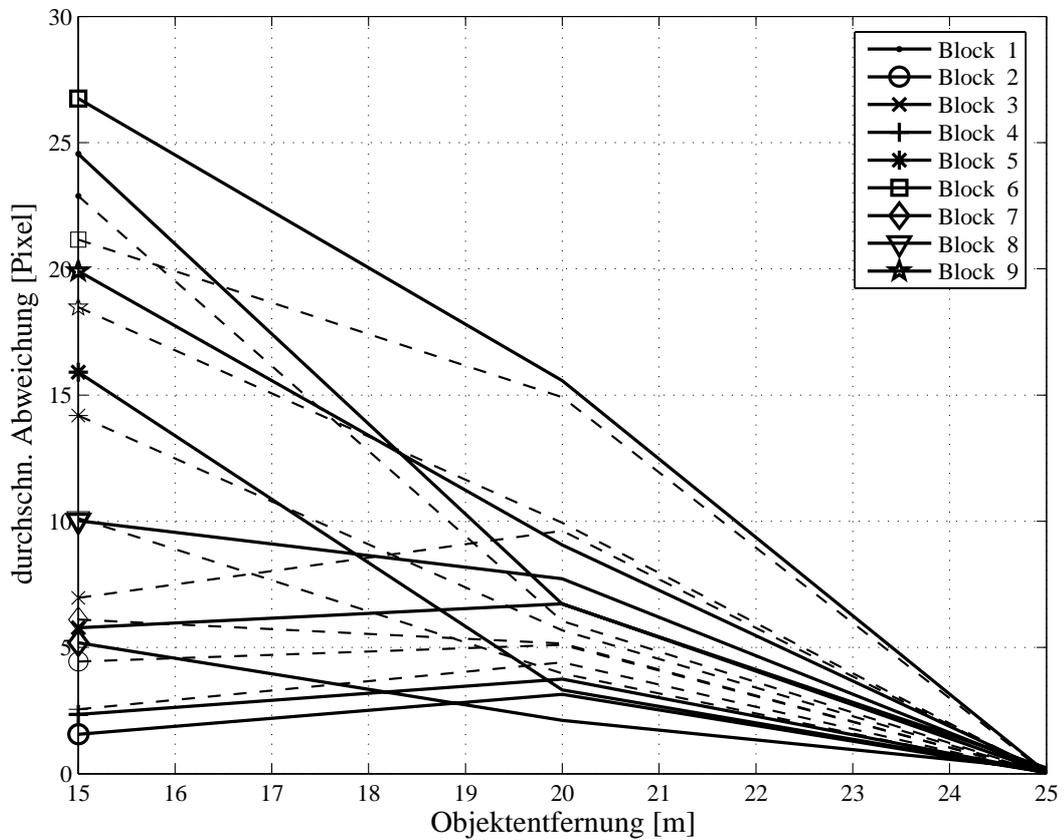
Zum Abschluss der Validierung werden die Ausrichtungsparameter gegenübergestellt, die aus den modellierten und den gemessenen Markenpositionen bestimmt wurden.

**Ausrichtungsparameter:** Aus den ermittelten Ausrichtungsmatrizen, die für den jeweiligen Block und die jeweilige Entfernung eine versatzoptimale Ausrichtung der Kamerabilder zueinander ermöglichen, werden nach dem in Abschnitt 3.2.3 beschriebenen Verfahren die Ausrichtungsparameter bestimmt. Im Bild 3.25 sind die Ergebnisse der Modellierung den Messergebnissen gegenübergestellt. Die Ergebnisse, die der Modellierung entstammen, werden dabei als theoretische Werte bezeichnet, die Werte der Messung stellen die praktischen Werte dar. Die Bilder 3.25(a) bis 3.25(d) zeigen dabei die praktischen Werte, die aus der nicht messfehlerkorrigierten Messung berechnet werden. In Bild 3.25(a) zeigen sich die Abweichung zwischen der theoretischen und praktisch realisierten horizontalen Verschiebung, die hauptsächlich auf die Änderungen des Relativwinkels  $\beta$  zurückzuführen sind. Genauso sind die Abweichung zwischen der theoretischen und der praktischen vertikalen Verschiebung durch eine Änderung des Relativwinkels  $\alpha$  erklärbar (vgl. Bild 3.25(b)). Abweichung zwischen den Skalierungsfaktoren in Bild 3.25(c) können auf Fehler bei der Detektion der Kalibriermarken und auf Messfehler bei der Bestimmung von Objekt- und

---



(a) Gegenüberstellung ohne Messfehlersimulation

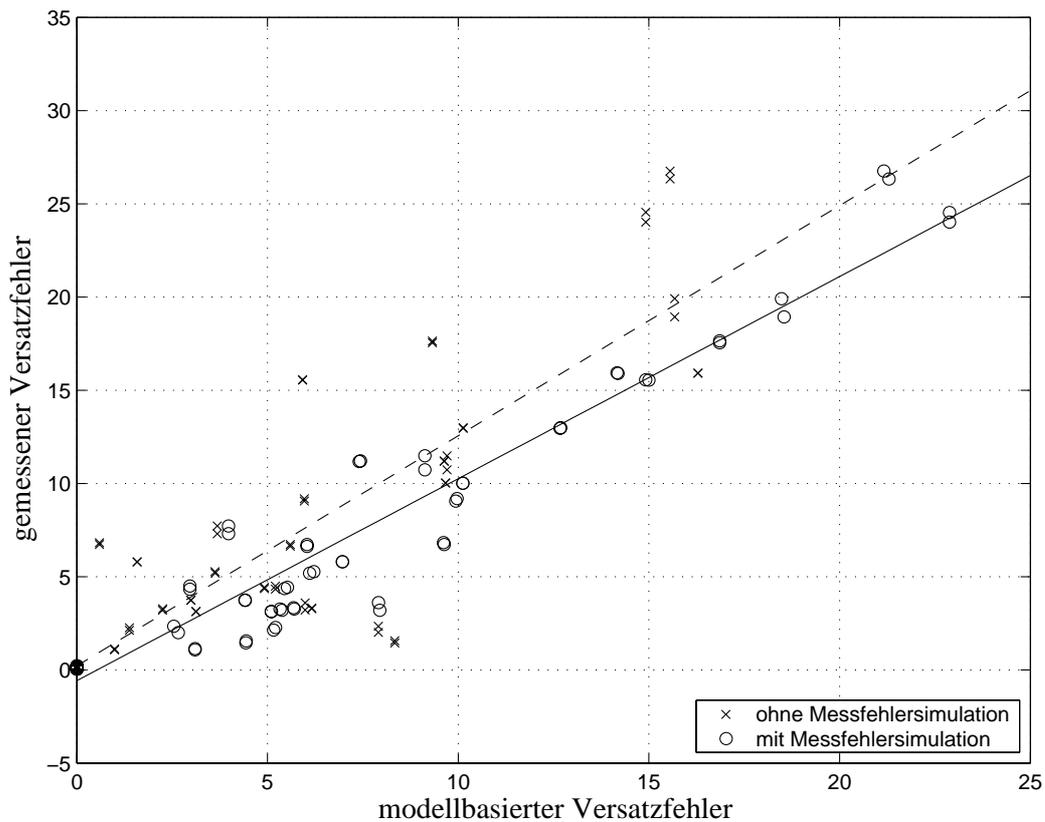


(b) Gegenüberstellung mit Messfehlersimulation

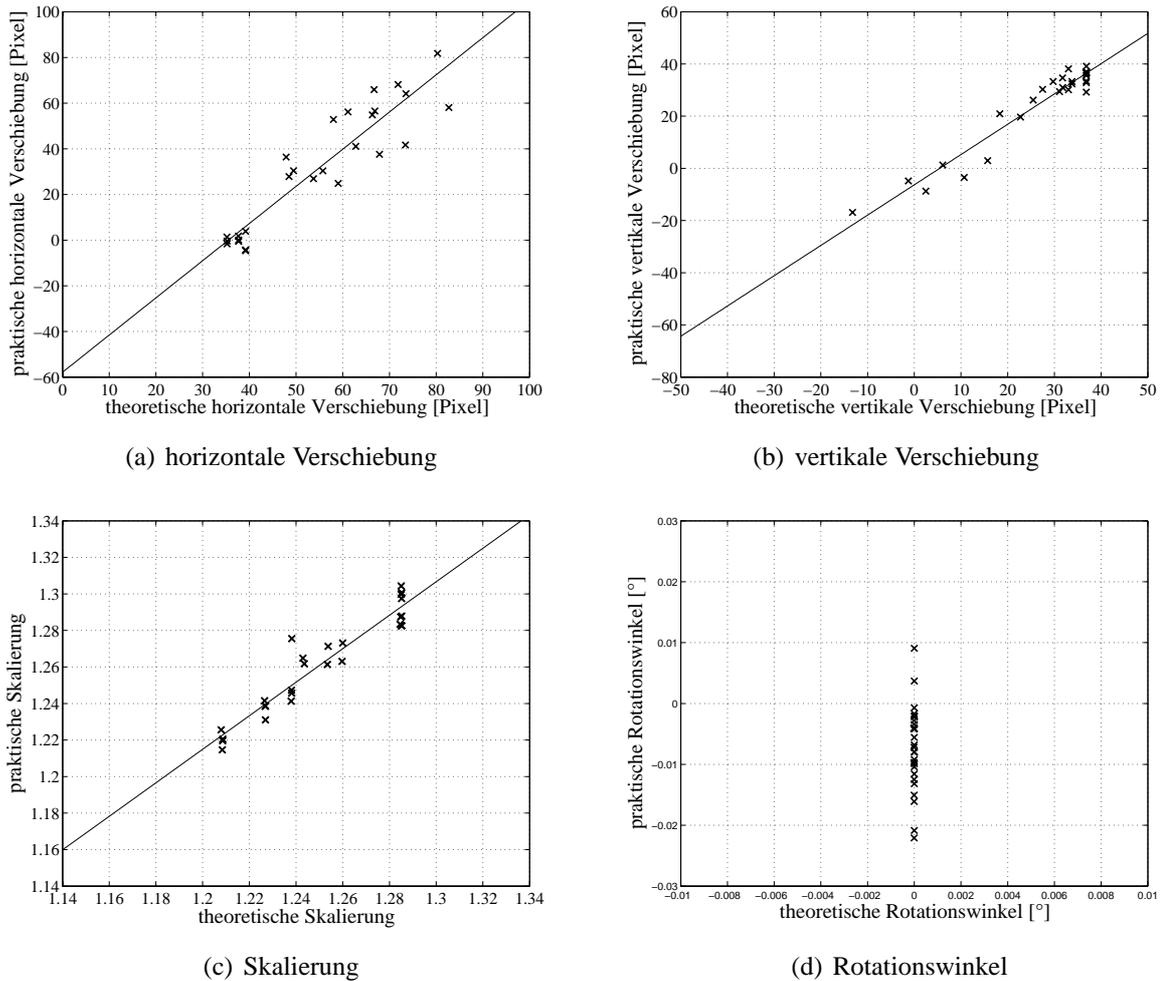
**Bild 3.23:** Gegenüberstellung der Verläufe der Ausrichtungsfehler für eine Registrierentfernung  $Z_{REG} = 25m$  (durchgezogen - gemessener Verlauf, gestrichelt - modellierter Verlauf)

**Tabelle 3.11:** Gemessener und modellierter Ausrichtungsfehler in Gegenüberstellung zum Ausrichtungsfehler mit Fehlersimulation

Block	gemessener Fehler			modellierter Fehler			simulierter Fehler		
	15m	20m	25m	15m	20m	25m	15m	20m	25m
1	24,55	6,72	0,23	14,92	5,59	0,00	22,89	6,04	0,00
2	1,56	3,14	0,05	8,34	3,13	0,00	4,44	5,10	0,00
3	5,78	6,73	0,05	1,58	0,59	0,00	6,96	9,62	0,00
4	2,34	3,75	0,06	7,91	2,99	0,00	2,55	4,41	0,00
5	15,91	3,32	0,06	16,29	6,16	0,00	14,19	5,68	0,00
6	26,75	15,57	0,05	15,55	5,92	0,00	21,15	14,92	0,00
7	5,19	2,11	0,17	3,63	1,38	0,00	6,10	5,16	0,00
8	10,02	7,72	0,09	9,67	3,68	0,00	10,12	3,97	0,00
9	19,91	9,06	0,08	15,68	5,97	0,00	18,48	9,94	0,00



**Bild 3.24:** Gegenüberstellung der bestimmten Ausrichtungsfehler aller Blöcke und aller Entfernungen, mit und ohne Messfehlersimulation (durchgezogen - Ausgleichsgerade mit Fehlerkorrektur, gestrichelt - Ausgleichsgerade ohne Fehlerkorrektur)



**Bild 3.25:** Gegenüberstellung der theoretischen und experimentell ermittelten Verläufe der Ausrichtungparameter.

Registrierentfernung zurückgeführt werden. Änderungen des praktischen Rotationswinkel  $\gamma$  sind in Bild 3.25(d) erkennbar.

Es wäre zu vermuten, dass die Gegenüberstellung der theoretischen Werte und der messfehlerkorrigierten Werte eine ähnlich gute Übereinstimmung aufweisen, wie dies beim Ausrichtungsfehler der Fall ist. Jedoch ist hier zu beachten, dass sich die Auswirkungen der Änderungen der Relativwinkel und die der versetzt montierten Kamerasysteme überlagert, was zu einem Verlust des absoluten Bezugspunkts führt.

Eine relative Darstellung zwischen dem theoretischen und dem messfehlerkorrigierten Wert, die

**Tabelle 3.12:** Koeffizienten der Ausgleichsgeraden und Korrelationskoeffizient zwischen theoretischem und praktischem Fehler mit Simulation der Messfehler

ohne Messfehlerkorrektur			mit Messfehlerkorrektur		
Anstieg	Offset	Korrelation	Anstieg	Offset	Korrelation
1.23	0.21	0.88	1.08	-0.58	0.97

jeweils auf die entsprechende versatzminimierende Ausrichtungsmatrix bezogen sind, würde zu einer Bestätigung des Modells mit sich selber führen, und wird daher nicht durchgeführt.

Aus diesen Gründen wird an dieser Stelle auf eine Diskussion der Ausgleichsgeraden und des Korrelationskoeffizienten verzichtet. Die Darstellung der Ausgleichsgeraden in den Bildern 3.25(a) bis 3.25(c) dient der Veranschaulichung.

**Schlussfolgerungen:** Ziel dieses Abschnittes war es, das Modell zu validieren. Als Validierungskriterium wurde der Vergleich zwischen den Ausrichtungsfehlern und die Bestimmbarkeit von Messfehlern festgelegt. Aus den Messung sollten unter Zuhilfenahme des Modells die Messfehler bestimmt werden.

Die auch nach der Messfehlerkorrektur enthaltenden Unterschiede können auf Einflüsse zurückgeführt werden, die durch das Modell nicht abgedeckt werden, wie beispielsweise die Genauigkeit der Markendetektion oder der Aufbau der Kalibrierplatte. Dies ist auch nicht Aufgabe und Anspruch des Modells. Es ist somit hinreichend für die Betrachtung der geometrischen Zusammenhänge zwischen den Objektkoordinaten in beiden Kamerabildern geeignet und kann als validiert im Sinne der Definition angesehen werden.

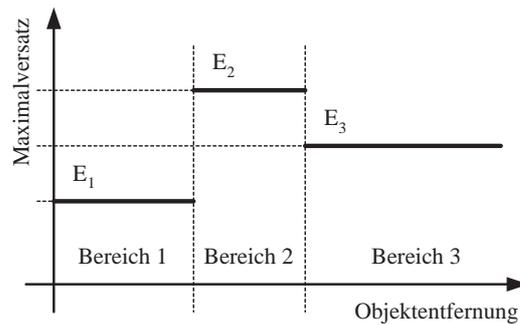
Zur qualitativen Bewertung der Anpassung von Modell und Messung empfiehlt es sich, den Versatzfehler und nicht die Ausrichtungparameter heranzuziehen. Dies hat drei Gründe: *i)* Der Versatzfehler beeinflusst die qualitative Einschätzung durch die Versuchspersonen. Diese haben von den Ausrichtungsparametern keine Kenntnis und können daher diese Relation zwischen theoretischen und praktischen Werten nicht bewerten. In Kapitel 4 wird ein Versuch zur Bestimmung des maximal zulässigen Ausrichtungsfehlers vorgestellt. *ii)* Durch die Korrektur der Messfehler kann eine nahezu fehlerfreie Rekonstruktion des Versatzfehlers erfolgen, wenn die Abstände zwischen den beiden Kamerasystemen bekannt sind. *iii)* Der Versatzfehler beinhaltet alle Versatzfehler, die sich aus Fehlern erster Ordnung, den Ausrichtungsfehlern, und den Fehlern höherer Ordnung, die auf eine fehlerhafte Kalibrierung zurückzuführen sind, zusammensetzt (vgl. Abschnitt 3.3.2).

### 3.5. Anwendung des Modells

Das aufgestellte und validierte Modell kann nun dazu genutzt werden, verschiedene Fragestellungen an die Anordnung und Parametrisierung eines Dualkamerasystems zu beantworten. In diesem Abschnitt wird zuerst der Parameterraum in dem die Kamerasysteme zueinander angeordnet werden können, in allgemein gültiger Form hergeleitet. Desweiteren wird die Fragestellung nach der Auslegung eines Dualkamerasystems untersucht.

Bei den folgenden Betrachtungen wird angenommen, dass lediglich Fehler erster Ordnung zu betrachten sind und durch die Normalisierung der Kamerabilder keine Fehler höherer Ordnung auftreten.

---



**Bild 3.26:** Stückweise entfernungsunabhängige Versatzobergrenze

### 3.5.1. Bestimmung des Parameterraums für den Kameraversatz

Bis zu diesem Abschnitt wurde der Zusammenhang zwischen einer bestimmten Kameraanordnung, der optimalen Ausrichtungsmatrix und dem zu erwartenden Ausrichtungsfehler für ein bestimmtes Intervall aufgestellt. Besonders die Betrachtung des Fehlerverlaufes erfolgte wertungsfrei. Doch kann beispielsweise die Definition einer Obergrenze für den Versatzfehler sinnvoll sein, um eine bestimmte Qualität der dargestellten Information zu gewährleisten. Qualität ist hierbei, wenn es um die Bewertung durch den Menschen geht, als subjektive Größe zu sehen.

Ist die funktionale Beschreibung der Obergrenze für den Pixelversatz in Abhängigkeit der Entfernung bekannt, so kann der Betrachtungsprozess umgekehrt werden: Ausgehend von der Obergrenze für den maximalen Versatz wird auf den Parameterraum und die möglichen Objektentfernungen gefolgert, für die ein Dualkamerasystem das vorgegebene Kriterium erfüllt. Im folgenden wird ausgehend von der Annahme einer stückweise entfernungsunabhängigen Obergrenze für den Versatzfehler eine allgemeine Formulierung aufgestellt (vgl. Bild 3.26).

Die mathematische Formulierung dieser Aufgabe für eine Entfernung zeigt Gleichung (3.58). Dazu wurde die Formulierung des Versatzfehlers noch um den Verschiebungsvektor  $\mathbf{T}$ , der aus den äußeren Parametern  $T_x$ ,  $T_y$  und  $T_z$  besteht, erweitert. Der maximal zugelassene Abbildungsversatz wird durch  $E_{MAX}$  parametrisiert.

$$E(Z_{OBJ}, Z_{REG}, \mathbf{T}) \leq E_{MAX}(Z_{OBJ}) \quad (3.58)$$

Somit wird der Parameterraum, in dem die Kamerasysteme relativ zueinander versetzt montiert werden können, als Funktion von Maximalfehler, Registrierentfernung und Entfernungsbereich, in dem Objekte vorkommen können, parametrisiert.

$$\mathbf{T} = \begin{pmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{pmatrix} = f(E_{MAX}(Z_{OBJ}), Z_{REG}, Z_{OBJ}) \quad (3.59)$$

Durch das Tupel aus Gleichung (3.59) wird die Oberfläche des möglichen Parameterraums be-

schrieben. Aufgrund der Definition des Relationszeichens in Bedingung (3.58) liegen alle gültigen Anordnungen innerhalb des durch die Oberfläche begrenzten Raumes und auf der Oberfläche selber.

Für die nachfolgende Betrachtung werden zuerst der Einfluss des horizontalen und vertikalen Relativwinkels  $\alpha$ ,  $\beta$  vernachlässigt. Durch dieses Vorgehen kann die Gestalt des Parameterraums ermittelt werden. Wie desweiteren gezeigt wird, bestimmen die Relativwinkel die Ausrichtung des Parameterraums.

Gleichung (3.58) wird sowohl nach  $T_x$  und  $T_y$  aufgelöst, wobei  $T_z$  jeweils als Parameter dient.

$$T_x = \pm D_2^x \sqrt{E_{MAX}^2(Z_{OBJ}) \frac{(T_z - Z_{OBJ})^2 (T_z - Z_{REG})^2}{f_2^2 (Z_{OBJ} - Z_{REG})^2} - \frac{T_y^2}{(D_2^y)^2}} \quad (3.60)$$

$$T_y = \pm D_2^y \sqrt{E_{MAX}^2(Z_{OBJ}) \frac{(T_z - Z_{OBJ})^2 (T_z - Z_{REG})^2}{f_2^2 (Z_{OBJ} - Z_{REG})^2} - \frac{T_x^2}{(D_2^x)^2}} \quad (3.61)$$

Durch Umformen dieser beiden Gleichungen kann gezeigt werden, dass beide Zusammenhänge einer Ellipsendarstellung genügen.

Der Parameterraum soll alle reellen Anordnungsmöglichkeiten der beiden Kamerasysteme enthalten. Somit sind für die Gleichungen (3.60) und (3.61) keine imaginären Lösungen zulässig, was bedingt, dass die Diskriminante in beiden Gleichungen nicht negative Werte annehmen darf. Über die Annahme, dass die Diskriminanten in beiden Gleichungen verschwinden, können die Extrema des Parameterraums bestimmt werden.

Aus Gleichung (3.61) folgt somit.

$$T_x^{max}(T_z, Z_{OBJ}) = \left| E_{MAX}(Z_{OBJ}) \frac{D_2^x (T_z - Z_{OBJ}) (T_z - Z_{REG})}{f_2 (Z_{OBJ} - Z_{REG})} \right| \quad (3.62)$$

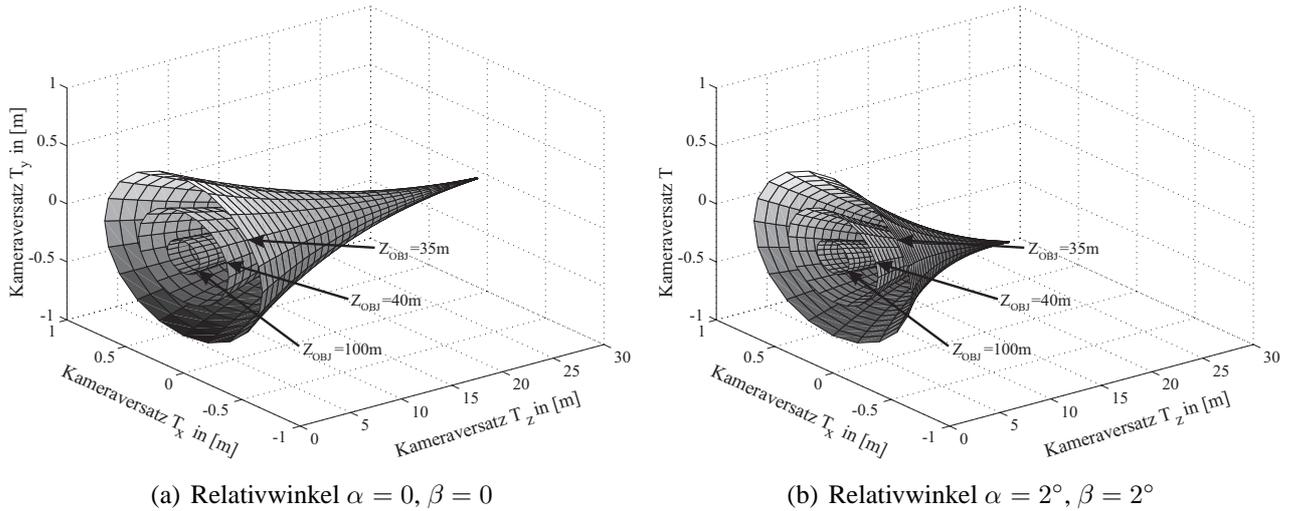
Analog folgt aus Gleichung (3.60) der Extremwert für den horizontalen Versatz.

$$T_y^{max}(T_z, Z_{OBJ}) = \left| E_{MAX}(Z_{OBJ}) \frac{D_2^y (T_z - Z_{OBJ}) (T_z - Z_{REG})}{f_2 (Z_{OBJ} - Z_{REG})} \right| \quad (3.63)$$

Die Funktion, die die Begrenzungsfläche bestimmt, ist zweiten Grade in  $T_z$ .

Aus den Gleichungen (3.63) und (3.62) wiederum kann der Extremwert für den Versatz in der Tiefe  $T_z$  ermittelt werden. Dieser ist erreicht, sobald  $T_x^{max}$  oder  $T_y^{max}$  erstmalig identisch Null sind.

$$T_z^{max} = \min(Z_{OBJ}, Z_{REG}) \quad (3.64)$$



**Bild 3.27:** Parameterräume für folgende Parameter:  $Z_{REG} = 30m$ ,  $Z_{OBJ} = 35m, 40m, 100m$ ,  $E_{MAX} = 2Pixel$ ,  $D_2^x = 20, 2\mu m$ ,  $D_2^y = 20, 2\mu m$ ,  $f_2 = 12, 5mm$

Aus diesem Grund spielt die minimale Objektentfernung bei der Bestimmung des möglichen Parameterraums eine entscheidende Bedeutung, da diese eine untere Grenze für den maximalen Montageabstand in der Tiefe darstellt. Somit in der Montageabstand in der Tiefe theoretisch nur durch die minimale Objektentfernung oder die Registrierentfernung begrenzt.

Mit diesen Randwerten kann die Begrenzungsfläche des Parameterraum folgendermaßen als parametrisierbare Funktion dargestellt werden. Die bis zu diesem Punkt vernachlässigten Relativwinkel werden wieder in die Bestimmungsgleichung integriert.

$$\begin{pmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T_x^{max}(T_z, Z_{OBJ}) \cos \phi \\ T_y^{max}(T_z, Z_{OBJ}) \sin \phi \\ T_z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} T_z \sin \beta \\ T_z \sin \alpha \cos \beta \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \begin{matrix} 0 \leq \phi < 2\pi \\ 0 \leq T_z \leq T_z^{max} \end{matrix} \quad (3.65)$$

Die Integration der Relativwinkel resultieren in einer Veränderung der Ausrichtung der zentralen Achse des Parameterraums. Aufgrund der nichtlinearen Hüllkurve der Mantelfläche „verbiegt“ sich die Gestalt des Trichters.

Zur Veranschaulichung sind in Bild 3.27(a) und Bild 3.27(b) für eine Kombination aus den in Rahmen dieser Arbeit genutzten Kamerasysteme die Parameterräume für eine Registrierentfernung  $Z_{REG} = 30m$  und eine entfernungsunabhängige Versatzobergrenze  $E_{MAX} = 2Pixel$  dargestellt. Um die Abhängigkeit von der aktuellen Objektentfernung zu demonstrieren, enthält jedes Diagramm den zulässigen Parameterraum für die drei Objektentfernungen  $Z_{OBJ} = 35m, 40m, 100m$ .

Der Parameterraum hat eine trichterförmige Gestalt, wobei der Radius der Grundfläche indirekt proportional zur Differenz zwischen Objekt- und Kalibrierentfernung ist. Ebenfalls sagen beide Abbildungen aus, dass der Einsatzbereich des Dualkamerasystems maßgeblich vom horizontalen und vom vertikalen Versatz bestimmt wird. Die Abhängigkeit vom Versatz in der Tiefe ist weniger ausschlaggebend für den Einsatzbereich; es sei darauf hingewiesen, dass zwischen den Maximal-

wert des horizontalen Versatzes und dem Maximum des Tiefenversatzes zwei Größenordnungen liegen.

Um diese spezielle Herleitung für eine konstante Obergrenze auf eine entfernungsabhängige Obergrenze zu übertragen, wird die Mengendarstellung des gültigen Parameterraums nach Gleichung (3.66) gewählt. Für alle gegebenen Objektentfernungen muss die entsprechende Obergrenze eingehalten werden. Daraus bestimmt sich der aktuell mögliche Parameterraum  $\bar{\Pi}(Z_{OBJ})$ . Durch Kombination der resultierenden Parameterräume  $\bar{\Pi}(Z_{OBJ})$  bestimmt sich der durch die Obergrenze definierte Parameterraum  $\bar{\Pi}$ .

$$\bar{\Pi}(Z_{OBJ}) = \left\{ \forall \begin{pmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{pmatrix} : \left\| \begin{pmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} T_z \sin \beta \\ T_z \sin \alpha \cos \beta \\ 0 \end{pmatrix} \right\| \leq \left\| \begin{pmatrix} T_x^{max}(T_z, Z_{OBJ}) \cos \phi \\ T_y^{max}(T_z, Z_{OBJ}) \sin \phi \\ T_z \end{pmatrix} \right\|, \begin{matrix} 0 \leq \phi < 2\pi \\ 0 \leq T_z \leq T_z^{max} \end{matrix} \right\} \quad (3.66)$$

Ausgehend von dieser Definition und der Überlegung, dass der resultierende Parameterraum für alle Objektentfernungen Gültigkeit haben muss, bedingt dies, dass die Ellipse der Schnittfläche des Parameterraums an jeder Objektentfernung  $Z_{OBJ}$  durch die Minimaellipse<sup>15</sup> bestimmt ist.

$$\bar{\Pi} = \left\{ \forall \begin{pmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{pmatrix} : \left\| \begin{pmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} T_z \sin \beta \\ T_z \sin \alpha \cos \beta \\ 0 \end{pmatrix} \right\| \leq \left\| \begin{pmatrix} \min(T_x^{max}(T_z, Z_{OBJ})) \cos \phi \\ \min(T_y^{max}(T_z, Z_{OBJ})) \sin \phi \\ T_z \end{pmatrix} \right\|, \begin{matrix} 0 \leq \phi < 2\pi \\ 0 \leq T_z \leq T_z^{max} \\ Z_{MIN} \leq Z_{OBJ} \leq Z_{MAX} \end{matrix} \right\} \quad (3.67)$$

Somit bestimmt sich der Parameterraum für die entfernungsabhängige Obergrenze ganz allgemein als Schnittmenge aus den einzelnen Parameterräumen für die entsprechenden Objektentfernungen  $Z_{OBJ}$  und die gewählte Registrierentfernung  $Z_{REG}$ .

$$\bar{\Pi} = \bigcap_{Z_{MIN}}^{Z_{MAX}} \bar{\Pi}(Z_{OBJ}) \quad (3.68)$$

<sup>15</sup>Als Kriterium für die Minimaellipse werden die Längen der beiden Halbachsen genutzt. Dies bedeutet, dass die Minimaellipse der Objektentfernung  $Z_{OBJ}$  die minimalen Halbachsen aller für diese Objektentfernung möglichen Ellipsen aufweist.

Basierend auf den Gleichungen (3.67) und (3.68) können Geltungsbereich und Montagepositionen eines gegebenen Dualkamerasystems unter Beachtung der ermittelten Obergrenze bestimmt werden.

Der so ermittelte Parameterraum für die Montage der Kamerasysteme erfüllt das ermittelte Qualitätskriterium. Jedoch ist in dieser Darstellung noch nicht berücksichtigt, dass keines der beiden Kamerasysteme im Blickfeld des entsprechend anderen Kamerasystems positioniert sein darf, damit das Ausblenden bestimmter Bereiche durch Verdeckung verhindert wird. Dies schränkt den insgesamt nutzbaren Parameterraum weiter ein.

Gleichung (3.69) zeigt die mathematische Formulierung der Menge  $\Pi_D$ , die den nutzbaren Parameterraum einschränkt.

$$\Pi_D = \left\{ \mathbf{X}_2^3 = \mathbf{H}^3 \cdot \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}^T : \mathbf{X}_2^3 \in \Omega_1 \right\} \quad (3.69)$$

Der nutzbare Parameterraum  $\Pi$  bestimmt sich somit aus der Differenz der Menge des Parameter-raums, der durch die Obergrenze gegeben ist und der Menge, die die Positionen der gegenseitigen Verdeckungen der beiden Kamerasysteme enthält (vgl. Gleichung (3.70)).

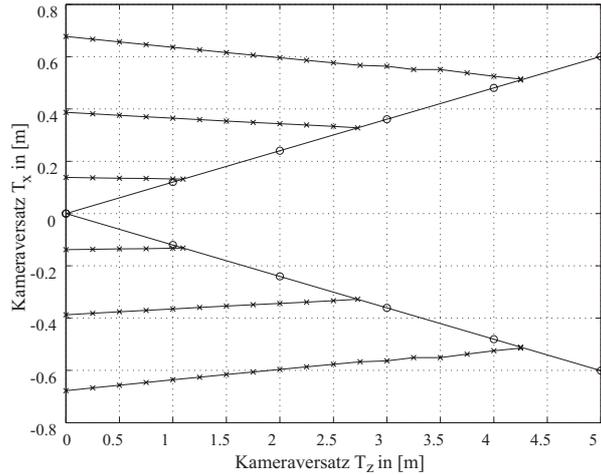
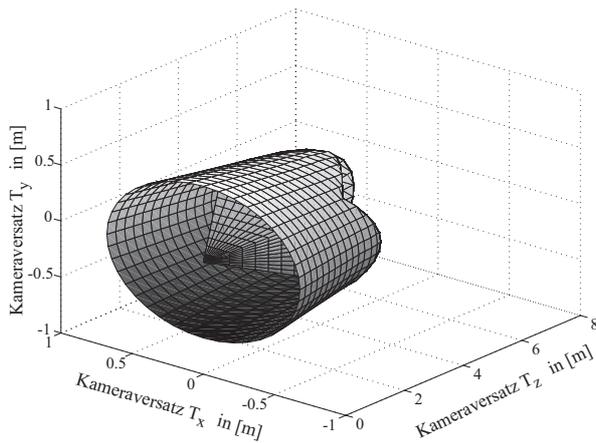
$$\Pi = \bar{\Pi} \setminus \Pi_D \quad (3.70)$$

In Bild 3.28 ist exemplarisch ein nutzbarer Parameterraum für die im Rahmen dieser Arbeit genutzten Kamerasysteme dargestellt. Aus Gründen der Anschaulichkeit sind neben der dreidimensionalen Darstellung zusätzlich die untere und obere Hüllkurve für die vertikale Schnittebene dargestellt. Analog zu Bild 3.27 kommen die gleichen Parameter bezüglich der Registrierentfernung und der Objektentfernungen zur Anwendung. Ebenfalls wird wiederum eine entfernungsunabhängige Obergrenze für den Versatz angenommen.

Anhand der in diesem Abschnitt vorgestellten Überlegungen kann für jede beliebige Kombination aus Kamerasystemen der Parameterraum bestimmt werden, in dem die Kamerasysteme zueinander versetzt werden können.

### 3.5.2. Auslegung eines Dualkamerasystems

Im vorhergehenden Abschnitt wurden die Montagemöglichkeiten von zwei gegebenen Kamerasystemen allgemein in Abhängigkeit der Objekt- und der Registrierentfernung abgeleitet. Werden für eine bestimmte Kombination von zwei Kamerasystemen der Einsatzbereich bestehend aus minimaler und maximaler Objektentfernung  $Z_{MIN}$ ,  $Z_{MAX}$  und die Versatzobergrenzen  $E_{MAX}$  ( $Z_{OBJ}$ ) gegeben, so kann das Gesamtsystem nach Montageabstand und Registrierentfernung ausgelegt werden.



(a) Räumliche Darstellung des Parameterraums für  $Z_{REG} = 30m$ ,  $Z_{OBJ} = 35m$  (b) Obere und untere vertikale Hüllkurven der Parameterräume aus Bild 3.27

**Bild 3.28:** Real nutzbarer Parameterraum für das im Rahmen dieser Arbeit genutzte Dualkammersystem ( $\alpha = 0$ ,  $\beta = 0$ , weitere Parameter siehe Bild 3.27)

Als Relation zwischen den drei betrachteten Entfernungen  $Z_{MIN}$ ,  $Z_{MAX}$  und  $Z_{REG}$  wird dabei folgender Zusammenhang angenommen, der die Gültigkeit der nachfolgenden Betrachtungen auf einen sinnvollen Einsatzbereich beschränkt. Denn unterhalb von  $Z_{min}^c$  ist keine Bildfusion möglich, da Objekte unterhalb dieser Entfernung bestenfalls nur durch ein Kamerasystem erfasst werden. Desweiteren sollte die Registrierentfernung  $Z_{REG}$  zwischen der Minimal- und der Maximalentfernung liegen, um einen möglichst geringen Versatzfehler für den gewünschten Einsatzbereich zu erreichen.

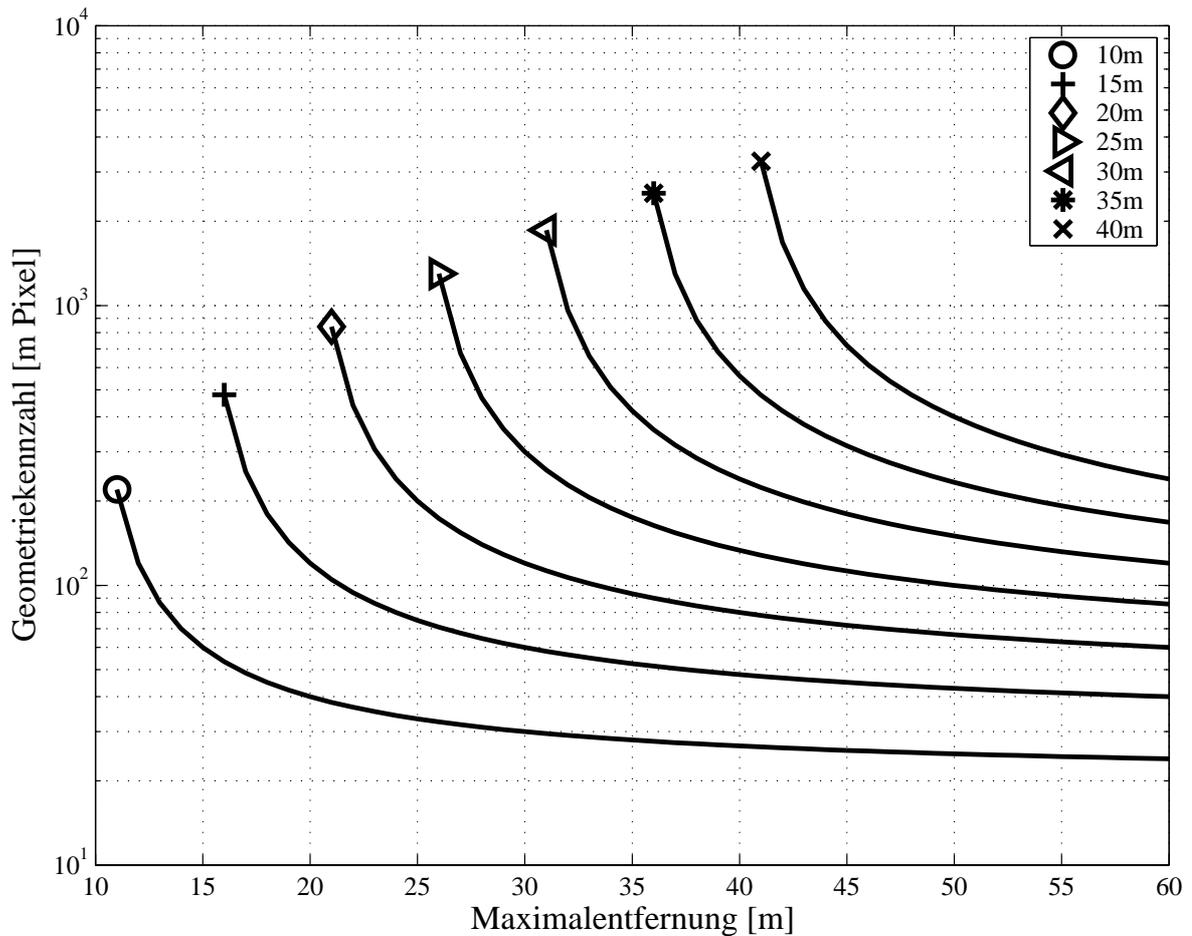
$$0 < Z_{min}^c \leq Z_{MIN} < Z_{REG} < Z_{MAX} \quad (3.71)$$

Mithilfe dieser Vereinbarung können die weiteren Betrachtungen erfolgen.

**Montageabstand:** Bedingung (3.58) aus Abschnitt 3.5.1 dient, wie bereits im vorherigen Abschnitt angewendet, als Grundlage für die nachfolgenden Betrachtungen, wobei diesmal angenommen wird, dass an den Grenzen des Einsatzbereiches der maximal zulässige Versatzfehler bekannt ist. Bei der Bestimmung des maximal möglichen Montageabstandes zwischen beiden Kamerasystemen wird der geforderte Einsatzbereich in  $n$  Teilbereiche eingeteilt, für die, wenn notwendig, jeweils andere Versatzobergrenzen gelten.

$$E_{MAX,j}(Z_{MIN}^j) = E_{MAX,j}(Z_{MAX}^j), \text{ mit } j \in \mathbb{N}, 1 \leq j \leq n \quad (3.72)$$

Eine zentrale Rolle bei der Betrachtung des Montageabstandes spielt die in Abschnitt 3.3.1 eingeführte Geometrie Kennzahl  $K_{Error}$ , dessen Bestimmung in diesem Teil erfolgt. Ausgehend von Bedingung (3.58) bestimmt sich die Obergrenze für die Geometrie Kennzahl des jeweiligen Teilbe-



**Bild 3.29:** Charakteristische Kennzahl bei einem Maximalversatz von 1 Pixel, Minimalentfernung  $Z_{MIN}$  als Parameter

reiches, wie in Gleichung (3.73) dargestellt.

$$K_{Error}^j \leq 2E_{MAX,j} \frac{Z_{MIN}^j Z_{MAX}^j}{Z_{MAX}^j - Z_{MIN}^j}, \text{ für } 1 \leq j \leq n \quad (3.73)$$

Die für das Gesamtsystem geltende Geometrie Kennzahl bestimmt sich dabei aus dem Minimum der Geometrie Kennzahlen der Teilbereiche.

$$K_{Error} = \min (K_{Error}^1, \dots, K_{Error}^n), \quad (3.74)$$

Der in Bedingung (3.73) genutzte Zusammenhang zwischen minimaler und maximaler Objektentfernung zeigt ein charakteristisches und von den inneren Parametern der eingesetzten Kamerasysteme unabhängiges Verhalten. Bild 3.29 zeigt dieses Verhalten als Funktion der Maximalentfernung  $Z_{MAX}$  in Abhängigkeit der Minimalentfernung  $Z_{MIN}$  für einen Maximalversatz von 1 Pixel. Die notwendige Geometrie Kennzahl der entsprechenden Teilbereiche bestimmt sich dabei durch die Skalierung des aus Bild 3.29 ermittelten Wertes mit dem jeweilige zulässigen Maximalversatz  $E_{MAX,j}$ . Mithilfe des in Bild 3.29 dargestellten Entfernungszusammenhangs kann jedes Dualkamerasystem hinsichtlich des Montageabstandes ausgelegt werden.

**Tabelle 3.13:** Beispielanforderungen an ein Dualkamerasystem

	<b>Bereich 1</b>	<b>Bereich 2</b>	<b>Bereich 3</b>	
<b>Entfernungsbereich</b>	20m-25m	25m-40m	40m-60m	über 60m
<b>Maximalfehler</b>	3 Pixel	2 Pixel	1 Pixel	keine Vorgabe

Ausgehend von der ermittelten Geometrie Kennzahl des Gesamtsystems können dann in Abhängigkeit der inneren Parameter  $D_2^x$ ,  $D_2^y$  und  $f_2$  des Bezugssystems die äußeren Parameter bestimmt werden.

**Beispiel:** Folgendes Beispiel soll das Vorgehen zur Ermittlung der Geometrie Kennzahl veranschaulichen. Hierzu wird exemplarisch der in Tabelle 3.13 dargestellte Fehlerverlauf vorgegeben.

Aus diesen Angaben resultieren die in Tabelle 3.14 zusammengefassten Geometrie Kennzahlen für die drei vorgegebenen Bereiche und die ermittelte Geometrie Kennzahl für das Gesamtsystem. Dies bedeutet, dass ein Dualkamerasystem, das die in Tabelle 3.13 dargestellten Anforderungen erfüllen soll, maximal eine Geometrie Kennzahl von  $K_{Error} = 250mPixel$  aufweisen darf, denn nur dann werden die Anforderungen in den Teilbereichen erfüllt. Da diese Anforderungen aus der Betrachtung der Teilbereiche abgeleitet wurde, ist nach der Festlegung der Registrierentfernung, eine Überprüfung der Geometrie Kennzahl für das Gesamtsystem notwendig. Danach kann das entsprechende Systemdesign abgeleitet werden.

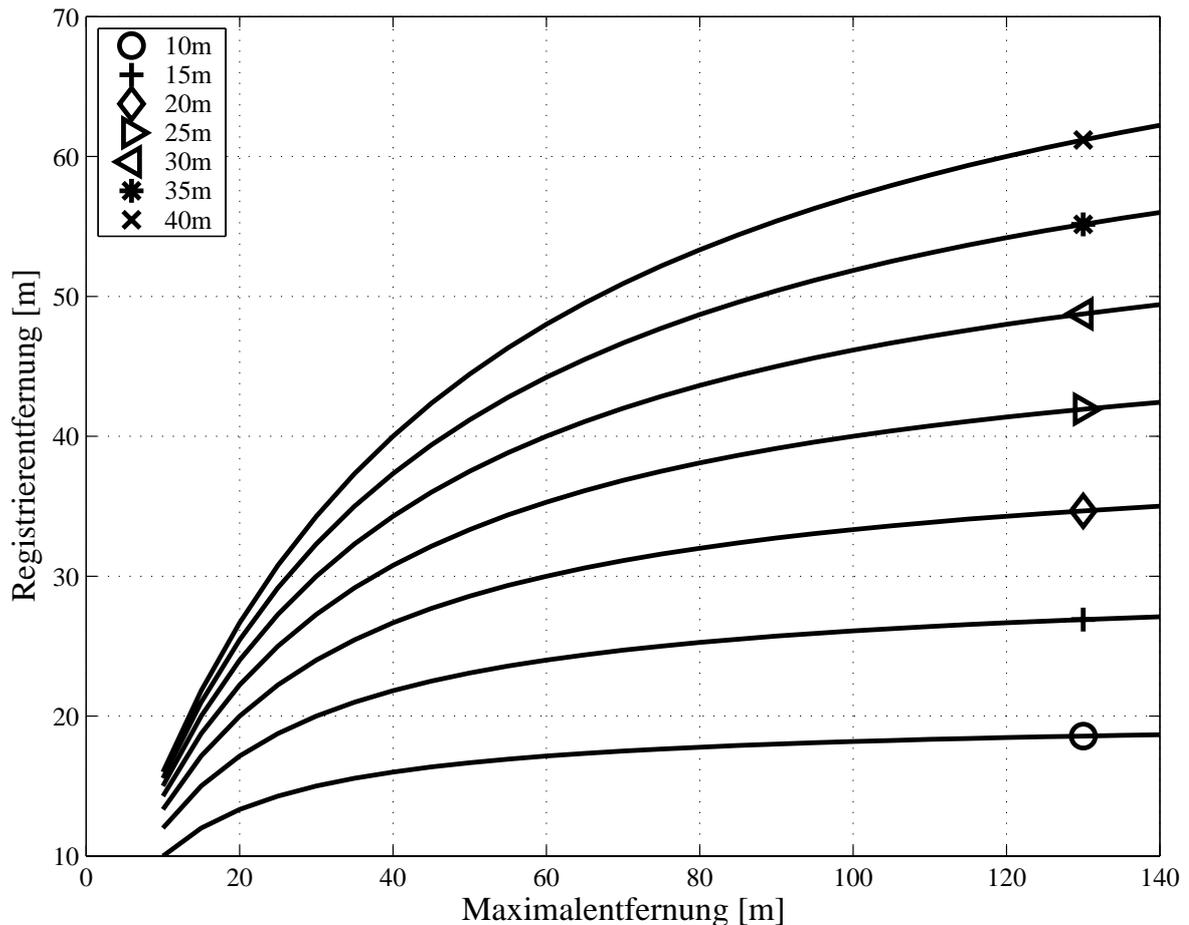
Den zweiten Auslegungsparameter, der für ein Dualkamerasystem zu bestimmen ist, stellt die Registrierentfernung  $Z_{REG}$  dar.

**Registrierentfernung:** Neben dem Montageabstand muss ein Dualkamerasystem auch bezüglich der Registrierentfernung ausgelegt werden. Neben den bereits erwähnten Annahmen wird desweiteren angenommen, dass zwischen der Versatzobergrenze an den beiden Bereichsgrenzen des gesamten Einsatzbereiches folgende Beziehung besteht, die die Allgemeinheit nicht einschränkt.

$$E_{MAX}(Z_{MAX}) = m E_{MAX}(Z_{MIN}), \text{ mit } m \in \mathbb{R}, m > 0 \quad (3.75)$$

**Tabelle 3.14:** Beispiel zur Bestimmung der Geometrie Kennzahl

<b>Bereich</b>	<b>minimale Entfernung</b>	<b>maximale Entfernung</b>	<b>maximaler Versatz</b>	<b>abgelesene Kennzahl</b>	<b>resultierende Kennzahl</b>
$j$	$Z_{MIN}$ [m]	$Z_{MAX}$ [m]	$E_{MAX}$ [Pixel]	$K_1$ [m Pixel]	$K_{Error}^j$ [m Pixel]
1	20	25	3	200	600
2	25	40	2	250	500
3	40	60	1	250	250
<b>Maximale Geometrie Kennzahl des Gesamtsystems <math>K_{Error}</math> [m Pixel]:</b>					<b>250</b>



**Bild 3.30:** Auslegungsvorschrift für die Registrierentfernung bei gegebenem Einsatzbereich, Minimalentfernung  $Z_{MIN}$  als Parameter

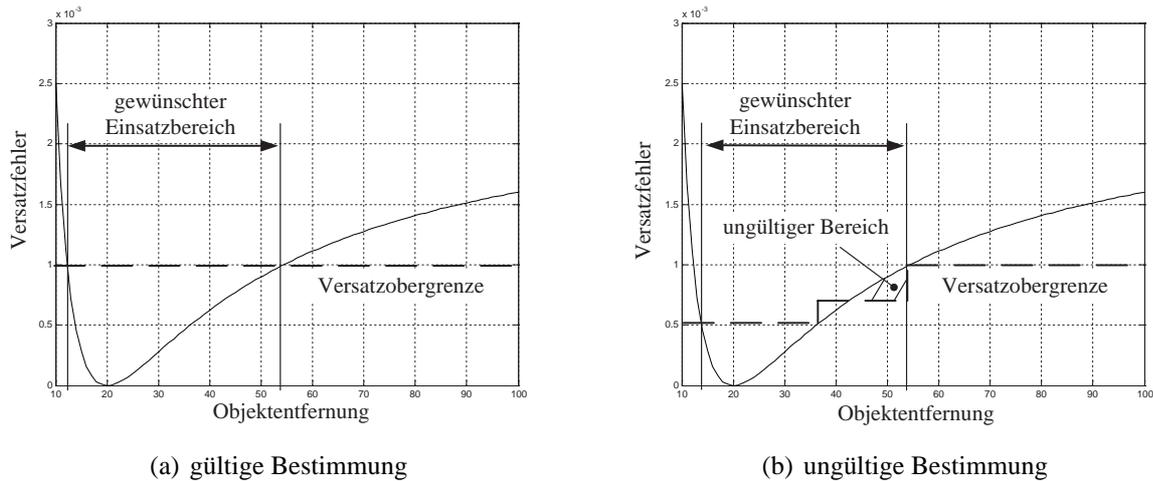
Für die Bestimmung der geeigneten Registrierentfernung  $Z_{REG}$  wird durch geeignetes Umformen und Beachten der Vereinbarung in (3.71) folgender Ausdruck gefunden.

$$Z_{REG} = \frac{(m + 1) Z_{MIN} Z_{MAX}}{Z_{MIN} + m Z_{MAX}} \quad (3.76)$$

In Bild 3.30 ist der Verlauf dieser Auslegungsvorschrift für  $m = 1$  in Abhängigkeit der Minimalentfernung als Funktion der Maximalentfernung dargestellt. Für  $m \rightarrow 0$  nähert sich die Bestimmungskurve für die Registrierentfernung der Maximalentfernung an, da an diesem Punkt der geringste Ausrichtungsfehler auftreten soll. Analog erfolgt die Grenzwertbetrachtung für  $m \rightarrow \infty$ ; in diesem Fall fallen Registrier- und Mindestentfernung zusammen.

Sollte die Versatzobergrenze im Bereich von  $Z_{MIN}$  bis  $Z_{MAX}$  nicht konstant sein, so ist die Gültigkeit von Bedingung (3.58) zu überprüfen und die gewählten Parameter geeignet anzupassen. In Bild 3.31(a) ist eine gültige Bestimmung der Registrierentfernung dargestellt; während in Bild 3.31(b) die Gültigkeit von Bedingung (3.58) an den Bereichsgrenzen erfüllt ist, wird sie innerhalb des Bereiches verletzt.

Unter Beachtung der jeweiligen Gültigkeitsbedingungen kann ein Dualkamerasystem anhand von



(a) gültige Bestimmung

(b) ungültige Bestimmung

**Bild 3.31:** Bestimmung der Registrierentfernung bei jeweils beispielhaft gegebenem Einsatzbereich und gegebener Versatzobergrenze (qualitative Darstellung)

Bedingung (3.73) und Gleichung (3.76) hinsichtlich dessen Geometrie und dessen Registrierentfernung bezogen auf einen gegebenen Einsatzbereich ausgelegt werden.

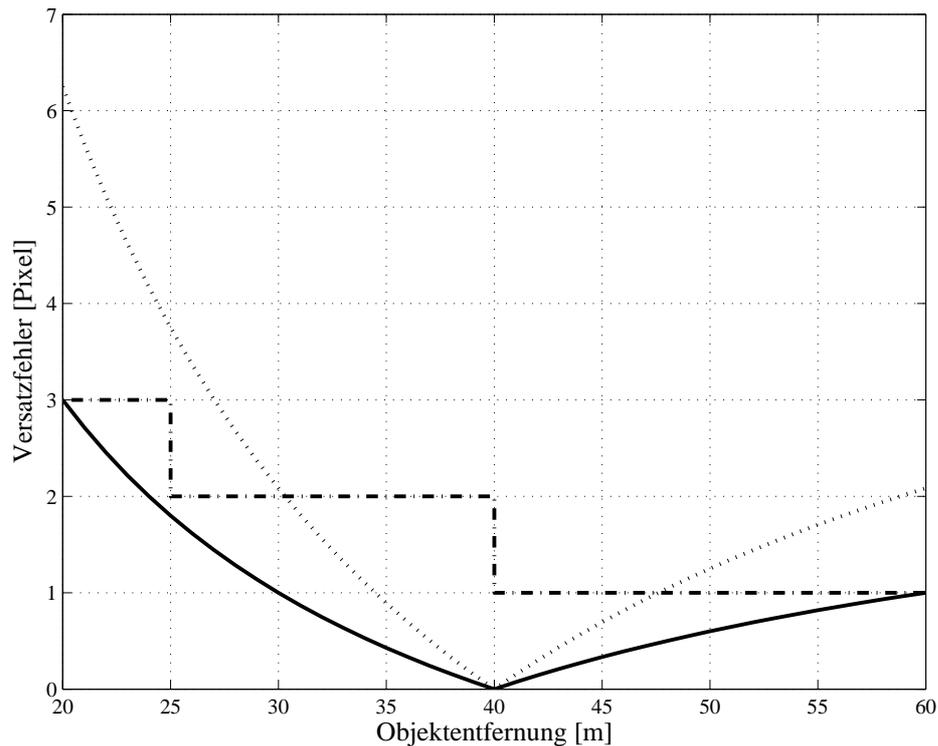
**Weiterführung des Beispiels:** An dieser Stelle soll das zur Veranschaulichung der Auslegung angeführte Beispiel weitergeführt werden. Aus dem Verhältnis von  $E_{MAX}(Z_{MAX})$  und  $E_{MAX}(Z_{MIN})$  wird ein Faktor von  $m = 1/3$  bestimmt. Aus diesen Werten errechnet sich nach Gleichung (3.76) eine Registrierentfernung von  $Z_{REG} = 40m$ .

Bild 3.32 auf Seite 89 zeigt den Verlauf des Versatzfehlers des ausgelegten Dualkamerasystems und die geforderten Fehlergrenzen. Da durch die Geometriekennzahl  $K_{Error} = 250mPixel$  die geforderten Fehlergrenzen verletzt wurden, erfolgte eine Anpassung der Geometriekennzahl auf  $K_{Error} = 120mPixel$ . Durch diese Auslegung werden alle Anforderungen erfüllt, wie Bild 3.32 zeigt.

Anhand dieser beiden Beispiele, Ableitung des Parameterraums sowie Auslegung nach Geometriekennzahl und Registrierentfernung, wurde demonstriert, für welche praktische Betrachtungen das aufgestellte Modell genutzt werden kann.

### 3.6. Räumliche Digitalisierung der Bildinformation

Bis zu diesem Punkt wurde davon ausgegangen, dass die durch die Kamerasysteme detektierte Strahlungsinformation sowohl bezüglich der räumlichen als auch hinsichtlich der radiometrischen Auflösung auf einer kontinuierlichen und keiner diskreten Skala vorliegt. Doch zur digitalen Weiterverarbeitung wird die gesammelte Strahlungsinformation abgetastet, diskretisiert und digitalisiert.



**Bild 3.32:** Ergebnisse des als Beispiel ausgelegten Dualkamarasystems (durchgezogen - Endergebnis, gestrichelt - nach Bestimmung Geometriekennzahl, strichpunkt - vorgegebene Fehlergrenze)

Ziel dieses Abschnittes ist daher, die Transformationen, die der Bildausrichtung zugrunde liegen, hinsichtlich ihres Einflusses auf die räumliche Digitalisierung zu untersuchen. Diese Untersuchungen haben Einfluss auf die Architektur des Gesamtsystems und die Wahl des Bezugssystems. Dabei wird bei den folgenden Betrachtungen davon ausgegangen, dass die eingesetzten Kamerasysteme Abbildungen liefern, aus denen eine fehlerfreie bzw. aliasingfreie Rekonstruktion der Ursprungsinformation erfolgen kann. Der gesamte Prozess der Bildaufnahme ist in [Jähne 2001] detailliert dargestellt.

Als entscheidende Schritte für die Rekonstruierbarkeit der Ursprungsinformation in diesem Prozess können dabei die räumliche Abtastung und die Beschränkung auf ein endlich ausgedehntes Bild aufgrund der endlichen Sensorfläche gesehen werden. Hierbei bestimmt die Abtastung die maximal auflösbare Ortsfrequenz, und aus der Begrenzung der Bildgröße resultiert das Auflösungsvermögen der Ortsfrequenz [Jähne 2001]. Gerade die maximal auflösbare Ortsfrequenz bestimmt den Gehalt an Details.

Mathematisch kann die Abtastung der Farbvektoren  $F(x)$  durch eine Multiplikation mit dem zweidimensionalen  $\delta$ -Kamm, der sogenannten Nagelbrettfunktion formuliert werden (vgl. Gleichung (3.77)). Im Fourierraum<sup>16</sup> entspricht die Multiplikation einer Faltung mit dem  $\delta$ -Kamm. Somit

<sup>16</sup>Der Fourierraum beschreibt den Raum der Ortsfrequenzen. Er wird durch die Fouriertransformation des Bildsignals gebildet. Eigenschaften des Fourierraums finden sich u.a. in [Jähne 2001]. Die Eigenschaften der Fouriertransformation sind u.a. in [Hoffmann 1998] erläutert. Als Abkürzung der Transformation ist das  $\circ\text{---}\bullet$  Zeichen üblich.

kann aus den Farbvektoren  $\mathbf{F}_S(\mathbf{x})$  an den Abtastpunkten das Ortsfrequenzspektrum  $\hat{\mathbf{F}}_S(\mathbf{k})$  abgeleitet werden.

$$\mathbf{F}_S(\mathbf{x}) = \mathbf{F}(\mathbf{x}) \sum_{m,n} \delta(\mathbf{x} - \mathbf{r}_{m,n}) \quad \circ \longrightarrow \bullet \quad \hat{\mathbf{F}}_S(\mathbf{k}) = \hat{\mathbf{F}}(\mathbf{k}) \sum_{p,q} \delta(\mathbf{k} - \mathbf{r}_{p,q}), \quad (3.77)$$

wobei

$$\mathbf{r}_{m,n} = \begin{pmatrix} m \\ n \\ 1 \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} D^x & 0 & 0 \\ 0 & D^y & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad \text{und} \quad \mathbf{r}_{p,q} = \begin{pmatrix} p \\ q \\ 1 \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} 1/D^x & 0 & 0 \\ 0 & 1/D^y & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Die Formulierung der Abtastung im Fourierraum zeigt anschaulich, dass das Spektrum des Ursprungssignals periodisch wiederholt auftritt. Diese Periode bestimmt sich aus den jeweiligen Pixelgrößen. Eine Rekonstruktion der Ursprungsinformation ist somit durch eine ideale Tiefpassfilterung möglich. Diese Rekonstruktion ist jedoch nur dann möglich, wenn die Ursprungsinformation nicht mit den Kopien in der Nachbarschaft interferiert, kein so genanntes Aliasing<sup>17</sup> auftritt. Aus dieser notwendigen Bedingung leitet sich das Abtasttheorem in Gleichung (3.78) her.

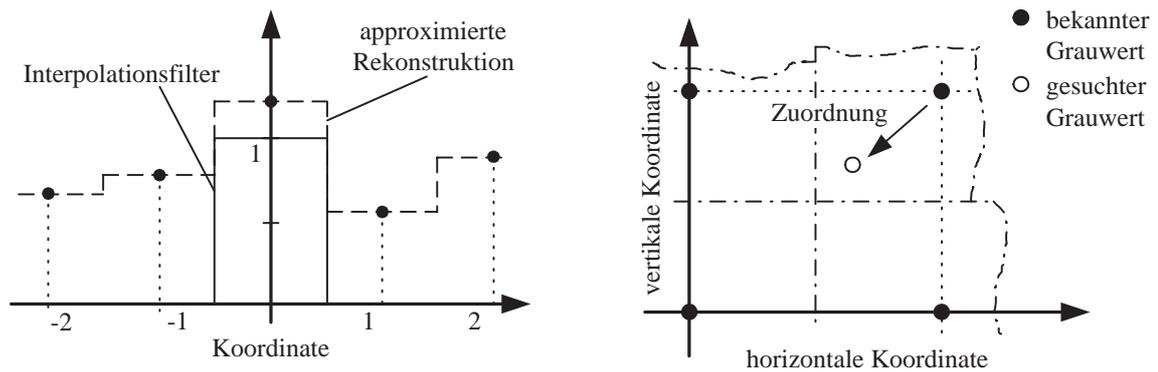
$$|k_x| < \frac{1}{2D^x}, \quad |k_y| < \frac{1}{2D^y} \quad (3.78)$$

Die während der Bildausrichtung notwendigen Transformationen kommen einer Veränderung des Abtastgitters in Lage und in der Dichte der Abtastpunkte gleich. Doch bevor die Bildinformation erneut abgetastet werden kann, muss die ursprüngliche, kontinuierliche Information aus dem vorliegenden Bild mittels Tiefpassfilterung rekonstruiert werden. Im Idealfall kommt ein idealer Tiefpassfilter zum Einsatz.

Dieser Filtertyp besitzt eine unendlich ausgedehnte und nichtkausale Impulsantwort, die sogenannte Sinc-Funktion<sup>18</sup>. Somit setzt sich die exakte Rekonstruktion eines beliebigen Zwischengitterpunkts aus einer gewichteten Summe über alle Pixel des Bildes zusammen. Da diese Operation für ein digitales System zu aufwendig ist, erfolgt die Filterung durch approximierete Tiefpassfilter, die weniger Rechenaufwand benötigen. Zwei praktisch sehr einfach umzusetzende Tiefpassfilter sind *i*) die Substitution durch den nächsten Nachbarn und *ii*) das bilineare Interpolationsfilter. Bei der Substitutionsmethode wird angenommen, dass die Farbinformation des Pixel in der unmittelbaren Nähe der Farbinformation des gesuchten Pixel entspricht. Das Interpolationsfilter interpoliert die gesuchte Information linear zwischen den vier direkten Nachbarpunkten.

<sup>17</sup>In der Bildbearbeitung und Bildverarbeitung wird das zweidimensionale Pendant auch als Moiré-Effekt bezeichnet.

<sup>18</sup> $\text{sinc}(x) = \frac{\sin(x)}{x}$ , auch Spaltfunktion genannt



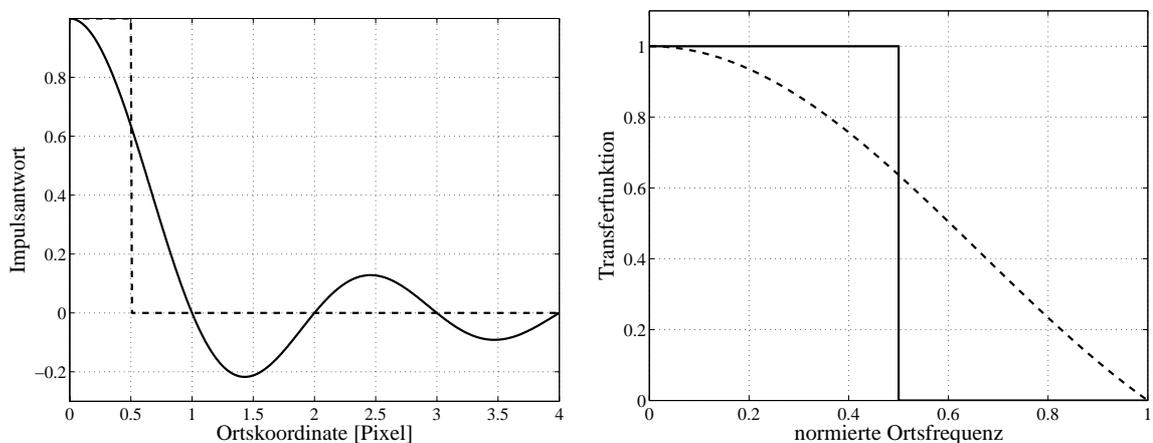
(a) Eindimensionales Darstellung des Interpolationsfilters (b) Beziehung zwischen den direkten Nachbarpunkten und dem zu bestimmenden Punkt

### Bild 3.33: Substitutionsfilter

**Substitution durch den nächsten Nachbarn (Substitutionsfilter):** Ein sehr einfacher Filteransatz zur der Rekonstruktion der Ursprungsinformation liegt in der Substitution des Farbvektors an der gesuchten Position durch dessen nächsten Nachbarn. Aufgrund der Filterform im Ortskoordinatenraum wird dieser Filter auch als Box-Filter bezeichnet. In Bild 3.33 ist schematisch die Impulsantwort und die Wirkungsweise des Rekonstruktionsfilters dargestellt.

In Bild 3.34 sind die positiven Anteile der axialsymmetrischen Impulsantwort und der axialsymmetrischen Übertragungsfunktion des idealen Tiefpassfilters und des Substitutionsfilters dargestellt. Anhand des Verlaufes der Kennlinie jenseits der halben Abtastfrequenz kann analysiert werden, wie stark durch den Rekonstruktionsfilter Aliasing-Effekte hervorgerufen werden.

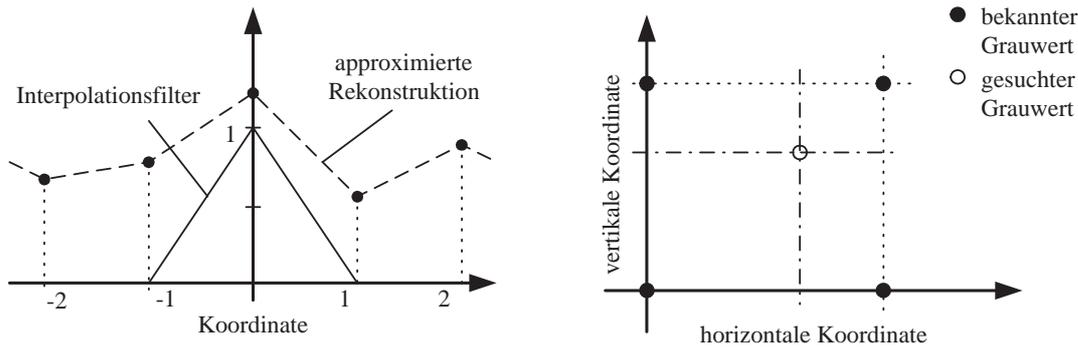
Es zeigt sich, dass die Übertragungsfunktion des Substitutionsfilters bei der Hälfte der Abtastfrequenz erst auf 63% des Maximalwertes abgeklungen ist. Somit können höhere Frequenzen, die im Ursprungsbild nicht vorhanden waren, aus den Kopien des Originalspektrums bei eine Rekon-



(a) Impulsantwort der Rekonstruktionsfilter

(b) Übertragungsfunktion der Rekonstruktionsfilter

**Bild 3.34:** Gegenüberstellung der positiven Anteile des idealen und des approxmierten Tiefpassfilters (durchgezogen - idealer Tiefpassfilter, gestrichelt - Substitutionsfilter)



(a) eindimensionales Darstellung des Interpolations- (b) Beziehung zwischen den direkten Nachbarpunkten  
filters und dem zu bestimmenden Punkt

**Bild 3.35:** Lineares Interpolationsfilter

struktion des Ursprungsbildes entstehen. Eine bessere Approximation des idealen Tiefpassfilters wird im Ortskoordinatenraum und im Ortsfrequenzraum durch das Interpolationsfilter erreicht.

**Bilineare Interpolation:** Bild 3.35 zeigt schematisch die Wirkungsweise des Interpolationsfilters sowie die Abhängigkeiten zwischen den vier Nachbarpunkten. Da es sich bei dem linearen Interpolationsfilter um ein separierbares Filter<sup>19</sup> handelt, zeigt Bild 3.35(a) die Wirkungsweise für eine der beiden Ortskoordinaten. In Bild 3.35(b) ist die Nachbarschaftsrelation des Interpolationsfilters dargestellt.

Gleichung (3.79) zeigt die mathematische Formulierung des zweidimensionalen Interpolationsfilters. Dabei wird der Einfluss der entsprechenden Nachbarpixel proportional zum Produkt aus den Längen gewichtet, die aus der Projektionen des Abstand zum gesuchten Pixel auf die Koordinatenachsen besteht.

$$\mathbf{F}(\mathbf{x}) = (1 - s)(1 - t)\mathbf{F}(\lfloor \mathbf{x} \rfloor) + s(1 - t)\mathbf{F}(\lceil \mathbf{x} \rceil) + (1 - s)t\mathbf{F}(\lfloor \mathbf{x} \rfloor) + st\mathbf{F}(\lceil \mathbf{x} \rceil), \quad (3.79)$$

wobei:

$$\lfloor \mathbf{x} \rfloor = \begin{pmatrix} \lfloor x \rfloor & \lfloor y \rfloor & 1 \end{pmatrix}^T$$

$$\lceil \mathbf{x} \rceil = \begin{pmatrix} \lceil x \rceil & \lceil y \rceil & 1 \end{pmatrix}^T$$

$$\lfloor \mathbf{x} \rceil = \begin{pmatrix} \lfloor x \rfloor & \lceil y \rceil & 1 \end{pmatrix}^T$$

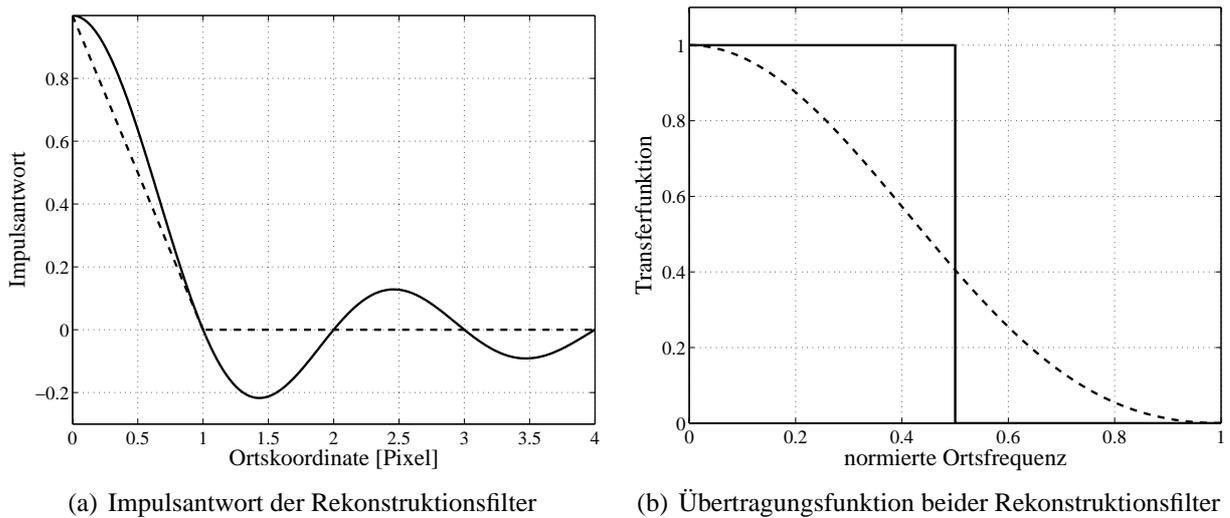
$$\lceil \mathbf{x} \rfloor = \begin{pmatrix} \lceil x \rceil & \lfloor y \rfloor & 1 \end{pmatrix}^T$$

$$s = x - \lfloor x \rfloor$$

$$t = y - \lfloor y \rfloor$$

In Abbildung 3.36 sind die Impulsantwort und die Übertragungsfunktion des idealen Tiefpassfilters und des Interpolationsfilters vergleichend dargestellt. Es zeigt sich, dass für kleine Ortsfrequenzen durch das Interpolationsfilter eine recht gute Approximation erreicht wird, größere Ortsfrequenzen

<sup>19</sup>Für ein separierbares Filter gilt:  $h(x, y) = h(x)h(y)$ .



**Bild 3.36:** Gegenüberstellung des idealen und approximierten Tiefpassfilters (durchgezogen - idealer Tiefpassfilter, gestrichelt - Interpolationsfilter)

werden in ihrer Amplitude jedoch gedämpft, was zu einer Glättung der Bildinformation führt. Weiterhin können durch das Interpolationsfilter einige falsche Ortsfrequenzen erzeugt werden, da  $H_I(0.5) > 0$ . Dies kann bei einer erneuten Abtastung zu leichten Aliasing-Effekten führen [Jähne 2001].

In Tabelle 3.15 sind die Eigenschaften der beiden Rekonstruktionsfilter und die des idealen Tiefpassfilters gegenübergestellt. Die Anzahl der zu betrachtenden Stützstellen bestimmt die während der Berechnung auszuführenden Operationen. Die Kennzahlen der Verteilung der Filterleistung im Spektrum sowie die Leistung bei halber Abtastfrequenz geben Auskunft über das Aliasing-Verhalten der Filter. Der Leistungsanteil jenseits der halben Abtastfrequenz kann Aliasing hervorrufen. Somit ist ein möglichst steiler Abfall der Filtercharakteristik bei der halben Abtastfrequenz gewünscht. Durch den Einsatz von Interpolationsfiltern mit Polynomen höherer Ordnung kann eine bessere Approximation des idealen Tiefpassfilters erreicht werden, allerdings konvergieren diese Approximationen sehr langsam [Jähne 2001]. Ebenfalls steigt der Berechnungsaufwand mit der Ordnung des Polynoms aufgrund der größeren Anzahl an benötigten Stützstellen.

An die Rekonstruktion der Ursprungsinformation schließt sich die erneute Abtastung an. Hierbei sind vor allem der Fall der Vergrößerung oder der Reduzierung der Dichte der Abtastpunkte interessant. Eine Verkleinerung des Abstandes zwischen zwei Abtastpunkten, was der Vergrößerung des Bildes bei gleicher Sensorgröße entspricht, resultiert in der Vergrößerung der maximal detektierbaren Grenzfrequenz. Somit ruft die Vergrößerung eines korrekt abgetasteten Bildes kei-

**Tabelle 3.15:** Vergleich der Eigenschaften der Interpolationsfilter

	Stützstellen	Leistungsanteil $\leq 0,5$	Leistung bei $0,5 + 0$
Substitutionsfilter	1	78,2%	0,63
Bilineare Interpolation	4	95,2%	0,40
Idealer Tiefpass	$\infty$	100%	0

ne Aliasing-Effekte hervor.

Im Gegensatz dazu kann die Vergrößerung des Abstandes der Abtastpunkte, was einer Verkleinerung des Bildes entspricht, zu Aliasing führen, da dies zu einer Verringerung der Abtastfrequenz korrespondiert. Aus diesem Grund muss vor der erneuten Abtastung ein angepasster Tiefpassfilter vorgeschaltet sein, um Aliasing zu verhindern.

Im folgenden werden diese allgemeinen Betrachtungen für das vorliegende System spezialisiert. Sollten beide Kamerasysteme, wie in diesem Fall, unterschiedlich große Öffnungswinkel besitzen, so empfiehlt es sich, das Kamerasystem mit dem kleinsten Öffnungswinkel als Bezugssystem auszuwählen. Bei der so gewählten Anordnung entfällt der Rand um das „eingepasste“ Bild, in dem nur die Information eines Spektralbereichs vorliegt. Bei diesem Vorgehen wird ein Teilbereich des einen Kamerabildes „herausgeschnitten“ und auf die Größe des anderen Bildes vergrößert, womit Aliasing-Effekte ausgeschlossen sind. Jedoch kann Glättung der Bildinformation zu einer Verminderung der Qualität führen. Ein anderes Vorgehen setzt immer die Beachtung des Abtasttheorems aus Gleichung (3.78) voraus.

### 3.7. Fazit

In diesem Kapitel wurden die Aspekte betrachtet, die den Zusammenhang zwischen den Objektkoordinaten und den Bildkoordinaten der abgebildeten Objekte darstellen. Aus dieser Betrachtung wurden Aussagen über die Ausrichtungsmatrix, den Verlauf des Versatzfehlers abgeleitet und Auslegungsrichtlinien aufgestellt. Ausgehend von einer für diesen Fall ausreichenden Modellierung der beiden Einzelkamarasysteme wurde das Modell für ein Dualkamerasystem aufgestellt. Im Mittelpunkt dieser Betrachtungen standen zum einen die Ausrichtungsmatrix, die zu einer versatzminimierenden Ausrichtung der Bilder zueinander führt sowie der Fehlerverlauf für die Abbildungsunterschiede von ein und demselben Objekt durch beide Kamerasysteme.

Es wurde gezeigt, dass die entsprechende, versatzminimierende Ausrichtungsmatrix von der gewählten Registrierentfernung abhängig ist. Der entsprechende Ausrichtungsfehler ist desweiteren von der aktuellen Objektentfernung und der gewählten Registrierentfernung abhängig.

Das aufgestellte Modell wurde durch ein geeignetes Experiment validiert. Dabei wurde untersucht, ob durch das Modell der Zusammenhang zwischen Objektkoordinaten und Bildkoordinaten nachgebildet werden kann, und ob anhand des Modells die Bestimmung von Messfehlern erfolgen kann. Durch die Bestätigung des Zusammenhangs zwischen den modellierten und den realen Eigenschaften des Dualkamerasystems, kann das Modell für die weiteren Betrachtungen herangezogen werden. Beispielhaft wurden zwei Anwendungsfälle vorgestellt, *i*) die Bestimmung des Montageraums und *ii*) die Entwicklung von Auslegungsrichtlinien für die Kalibrierentfernung und den radialen Montageabstand.

---

Bei der Auslegung eines Dualkamerasystems mit der Zielsetzung der Bildfusion sind zwei freie Parameter zu betrachten, die den Einsatzbereich bestimmen. Dies stellen *i)* der maximal tolerierbare Objektversatz und *ii)* die Registrierentfernung dar.

Ausgehend von der Vorgabe eines geforderten Einsatzbereiches und der Versatzobergrenze kann die optimale Registrierentfernung und der maximale radiale Montageabstand bestimmt werden. Für beide Größen wurden Kennlinien aufgestellt, die durch Skalierung an das vorliegende System angepasst werden können. Diese Vorschriften ermöglichen eine einfache, determinierte Auslegung des Dualkamerasystems.

Aus den Betrachtungen des Rauschenanteils der Kamerasysteme und der Digitalisierungseffekte können zwei weitere Auslegungsvorschriften abgeleitet werden. *(I)* Das System mit der geringsten Rauschleistung sollte als angepasstes System dienen, um eine bestmögliche Kalibrierung zu erreichen. *(II)* Beide Kamerasysteme sollten möglichst gleich große Gesichtsfelder aufweisen. Das Kamerasystem mit dem kleinsten Gesichtsfeld sollte als Bezugssystem genutzt werden, um Aliasing-Effekte zu verhindern. Sollte in Bedingung *(I)* und Bedingung *(II)* jeweils ein anderes Kamerasystem ausgewählt werden, so gilt zu erst die Auslegungsvorschrift *(I)*. Um die Auslegungsvorschrift *(II)* zu beachten, ist die ermittelte Ausrichtungsmatrix zu invertieren.

## 4. Bestimmung des maximalen Abbildungsversatzes

### 4.1. Motivation der Betrachtungen

Die in Kapitel 2 vorgestellten Untersuchungen von [Essock 1999, Krebs 2002] zum Nutzen und zur Nutzung der Bildfusion im Rahmen sichtverbessernder Anwendungen sind bei der Bewertung von optimal zueinander ausgerichteten Bildpaaren ausgegangen. Somit werden Einflüsse, die durch die Parallaxe und den daraus resultierenden Objektversatz hervorgerufen werden und einen Einfluss auf die Wahrnehmbarkeit der Bildinformation haben könnten, vernachlässigt. Bereits in [Krebs 1998] wird darauf hingewiesen, dass der räumliche Zusammenhang der dargestellten Objekte die Wahrnehmung und Interpretation des dargestellten Bildes beeinflusst.

Der maximal zulässige Versatz zwischen ein und demselben Objekt kann über technische oder ergonomische Randwerte bestimmt werden. Als technische Kriterien sind zum Beispiel die minimal mögliche Auflösung des genutzten Bildschirms denkbar. Weiterhin ist die Bestimmung über ein Bewertungsexperiment denkbar, um die Obergrenze über ergonomische Kriterien zu bestimmen. Ziel dieses Kapitels ist die Bestimmung des maximal zulässigen Objektversatzes über das subjektive Bewertungskriterium „Bildqualität“ für die im Rahmen dieser Arbeit genutzten Kamerasysteme (vgl. Tabelle 3.4). Hierzu wird ein Experiment durchgeführt, dessen Aufbau, Ablauf und Auswertung beschrieben wird. Aus dem ermittelten Ergebnis können mithilfe des in Kapitel 3 vorgestellten Modells mögliche Montagepositionen für die Kamerasysteme bestimmt werden.

In [Caelli 1985] wurde untersucht, wie zwei überlagerte Bilder durch Probanden wahrgenommen werden, wobei drei Wahrnehmungsergebnisse bei der Betrachtung möglich sind: *i*) die Bilder werden als separiert und unabhängig voneinander wahrgenommen, *ii*) die Bilder werden als verschmolzen wahrgenommen oder *iii*) eines der beiden Bilder dominiert und maskiert das andere. Während der Untersuchung wurden sowohl Abhängigkeiten von den Ortskoordinaten als auch von den Ortsfrequenzen betrachtet. Im vorliegenden Fall ist eine Verschmelzung der beiden überlagerten Bilder zu einem Bild gewünscht, was nach [Caelli 1985] eine hohe räumliche Korrelation bedeutet. Denn im Ergebnis der Studie zeigt sich, dass überlagerte Bilder in Abhängigkeit der räumlicher Verschiebung und weniger in der Abhängigkeit in den Ortsfrequenz als eigenständig wahrgenommen werden. Eine quantitative Aussage, ab welcher räumlichen Differenz die überlagerten Bilder als separat wahrgenommen werden, liefert diese Studie jedoch nicht, um für den vorliegenden Fall den maximal zulässigen Versatz zu bestimmen.

In [Schumann 2003] wird ein Pilotversuch zur Bestimmung der maximal möglichen Obergrenze für eine Systemkonfiguration beschrieben. Für die Aufnahme der während des Versuches genutzten Bilder wurden die Kamerasysteme eingesetzt, die sich auch in dem in Kapitel 5 vorgestellten Versuchsträgers befinden. Aufgrund der Pilotcharakteristik des Versuches wurde die Anzahl der Versuchsvariablen beschränkt. Der vorgestellte Versuchsaufbau und Versuchsablauf kann auch für die Dimensionierung andere Systemkonfiguration eingesetzt und für eine größere Anzahl an Versuchsvariablen genutzt werden.

---



**Bild 4.1:** Versuchsaufbau zur Bestimmung des maximalen Versatzes

Im weiteren Verlauf werden der Aufbau und Ablauf sowie die Ergebnisse des Versuches dargestellt. Abschließend erfolgt eine Diskussion, wie die Ergebnisse auf den vorliegenden Fall und darüberhinaus übertragen werden können.

## 4.2. Aufbau und Ablauf des Experimentes

Das Experiment wurde mit 10 Versuchspersonen im Alter von 23 bis 31 Jahren durchgeführt. Alle Versuchspersonen wiesen normale Sehschärfe auf und trugen gegebenenfalls die Sehhilfe, die sie auch beim Autofahren tragen. Alle Versuchspersonen hatten vor dem Experiment keine Kenntnis über den Inhalt oder den Verlauf des Versuches.

Die Versuchspersonen saßen in einem abgedunkelten Raum vor dem Versuchsaufbau bestehend aus einem Rechner mit der Versuchssoftware, einem Bildschirm mit Blickführung und einer Tastatur als Eingabemedium. Bild 4.1 zeigt den Versuchsaufbau. Sie saßen, ähnlich wie im Fahrzeug, leicht nach links versetzt in einer Entfernung von ca. 70 cm und unter einem Winkel von ca. 30° zum Display.

Da im Vorfeld des Experimentes die Obergrenze für den maximal zu testenden Versatz nicht bekannt war, wurde der Versuch in ein Pilotexperiment und ein Hauptexperiment aufgeteilt. Das Pilotexperiment wurde mit einem Kollektiv von 5 Versuchspersonen und mit einer adaptiven Methode durchgeführt. Dies bedeutet, dass die aktuelle Bewertung den Versatz des nächsten Bildes der gleichen Kategorie, die sich aus dem zu bewertenden Objekt, der Objektentfernung, dem Bewertungskriterium und der Versatzrichtung zusammensetzt, beeinflusst. Die maximal erreichbare

**Tabelle 4.1:** Zuordnung zwischen Bewertung und Änderung des Versatzes

Bewertung	1	2	3	4	5
Bedeutung	sehr gut	gut	durchschnittlich	schlecht	sehr schlecht
Änderung des Versatzes	+2 Pixel	+1 Pixel	unverändert	-1 Pixel	-2 Pixel

Obergrenze wurde nicht beschränkt. Tabelle 4.1 zeigt die Zuordnung zwischen Bewertung und der Änderung des Versatzes.

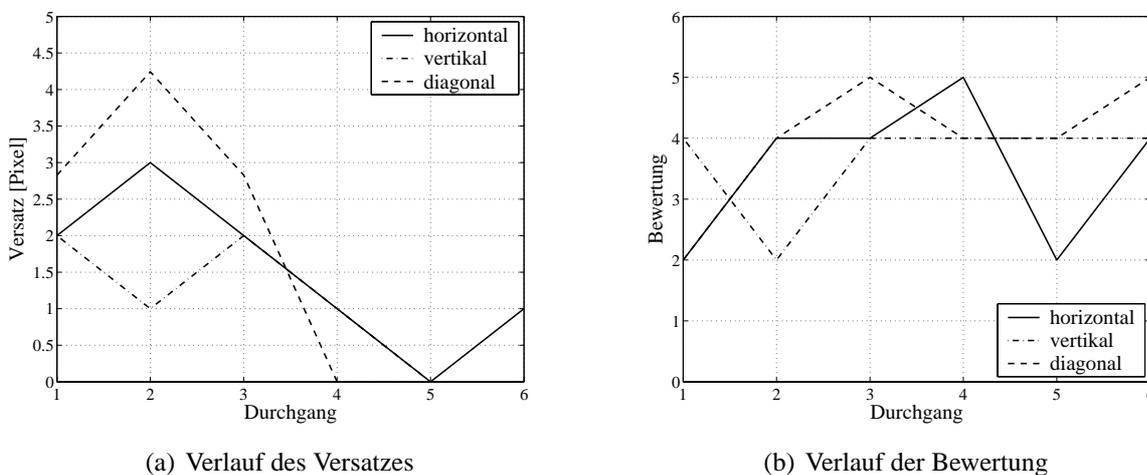
In Bild 4.2 ist die Entwicklung des Versatzes und der Verlauf der Bewertung von Versuchsperson 1 für die Kategorie Objekt: Person, Entfernung: 15m, Versatzrichtungen: horizontal, vertikal und diagonal, Bewertungskriterium: Bildqualität dargestellt.

Aus der Betrachtung aller Versuchspersonen konnte als Obergrenze durch das Pilotexperiment ein Versatz von 4 Pixel ermittelt werden. Diese Grenze wurde nur in ca. 21% der insgesamt ausgeführten Durchgänge überschritten.

Desweiteren wurde das Versuchsdesign für das Hauptexperiment angepasst. Denn die Versuchspersonen berichteten während des Experimentes, dass für sie der Bezug, auf den sich die Bewertung bezieht, unsicher erschien. Dies zeigt sich auch in Bild 4.2, da in der Bewertung kein „sehr gut“ auftritt. Daher wurde für das Hauptexperiment in jeden Block die Präsentation des Referenzbildes eingefügt, um den Versuchspersonen das bestmögliche fusionierte Bild als Bezug zu präsentieren.

Das Hauptexperiment wurde, um eine gleichbleibende Anzahl an Testdurchläufen pro Testbild zu erreichen, als determinierte Methode durchgeführt. Bild 4.3 zeigt schematisch den Ablauf eines Bewertungsdurchgangs.

Am Anfang jeden Blocks wurde das Referenzbild präsentiert. Anschließend wurde der Versuchsperson durch die Bewertungsfrage das hinsichtlich der Bildqualität zu bewertende Objekt benannt. Durch den Fixationspunkt wurde die Aufmerksamkeit der Versuchsperson auf den Bildmittelpunkt

**Bild 4.2:** Entwicklung des Versatzes und der Bewertung für Versuchsperson 1



**Bild 4.3:** Schema eines Versuchsdurchganges

gelenkt. Anschließend wurde das zu bewertende fusionierte Bild für maximal 4 Sekunden dargestellt. Durch eine abschließende Maskierung wird eine Beeinflussung der weiteren Durchgänge verhindert.

Die Faktoren des Experimentes setzten sich aus zwei Objekten, zwei Entfernungen, zwei Versatzarten und aus den Versatzgrößen 1 bis 4 Pixel zusammen. In Tabelle 4.2 sind die durchgeführten Variationen und die Anzahl der Darbietungen zusammengefasst. Die 160 Versuchsdurchgänge wurden in 8 Blöcke, á 20 Durchgängen präsentiert, der gesamte Versuch nahm ca. 30 Minuten in Anspruch.

Für die Versuchspersonen bestand die Aufgabe darin, das im fusionierten Bild dargestellte Objekt „Person“ oder „Fahrzeug“ hinsichtlich der Bildqualität zu bewerten. Dabei sollte sich die Bewertungen auf das versatzfreie Referenzbild beziehen, das der Versuchsperson vor jedem Durchgang präsentiert wurde.

In Bild 4.4 auf Seite 100 sind exemplarisch die Ausgangsbilder für eine Objektentfernung von 15m sowie 2 Paare fusionierter Bilder mit dem maximalen horizontalen und vertikalen Versatz dargestellt. Die Versuchspersonen waren angehalten, möglichst spontan auf das präsentierte Bild zu reagieren, jedoch wurde nach spätestens 4 Sekunden das Bild ausgeblendet.

### 4.3. Ergebnisse

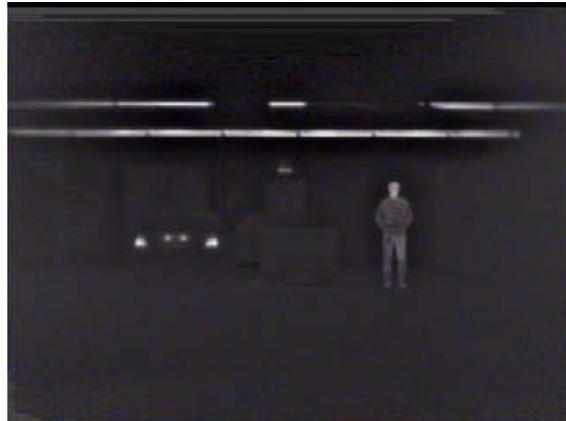
Das Pilotexperiment diente dazu, den Umfang des Hauptexperimentes zu minimieren. Die Ergebnisse sind zur Optimierung des Designs des Hauptexperimentes genutzt worden und fließen nicht in das finale Ergebnis ein. Basierend auf dem Ergebnis des Pilotexperimentes wurde das in Bild 4.3 dargestellte Versuchsdesign entworfen.

**Tabelle 4.2:** Faktoren des Bewertungsversuches

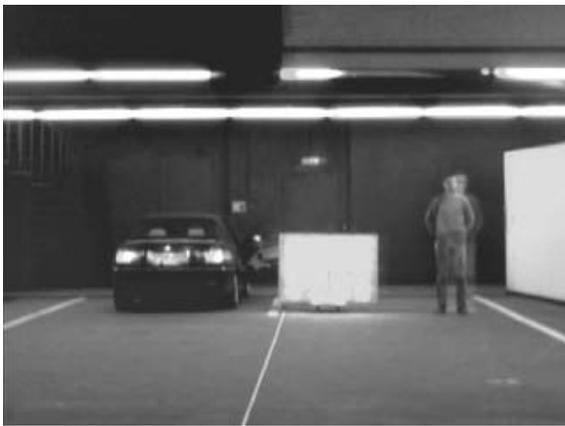
	Variablen	Anzahl
Objekt	Person, Fahrzeug	2
Entfernungen	15m, 30m	2
Versatzarten	horizontal, vertikal	2
Versatzgrößen	1 . . . 4 Pixel	4
Wiederholungen		5
Anzahl an Versuchsdurchgängen:		160



(a) Visuelles Originalbild für 15m



(b) Ferninfrarotes Originalbild für 15m



(c) Fusioniertes Bild für 15m und 5 Pixel horizontalen Versatz



(d) Fusioniertes Bild für 15m und 5 Pixel vertikalen Versatz

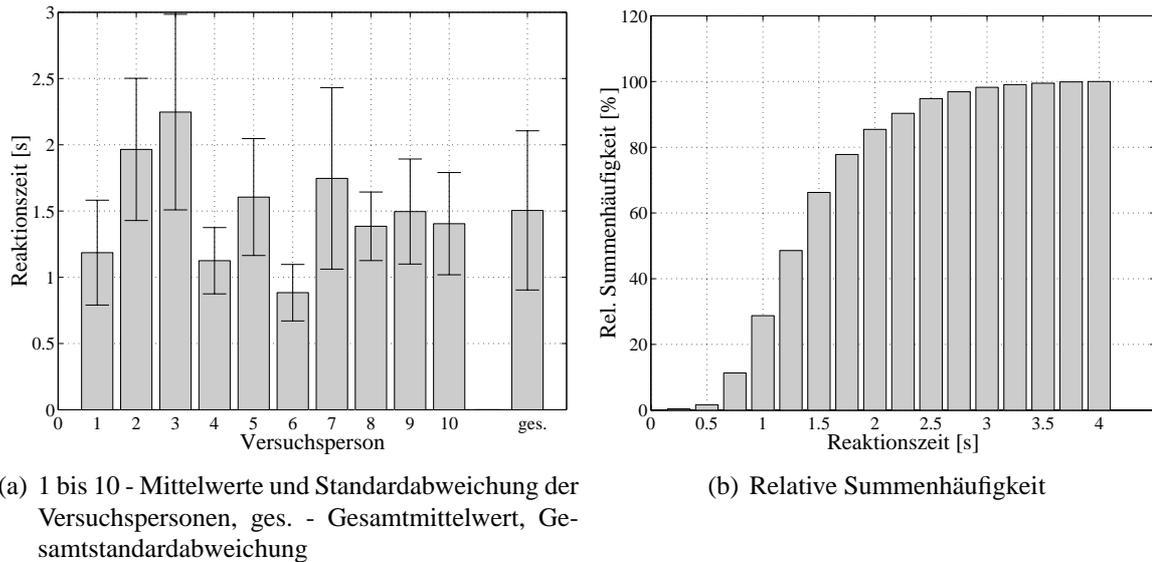


(e) Fusioniertes Bild für 30m und 5 Pixel horizontalen Versatz



(f) Fusioniertes Bild für 30m und 5 Pixel vertikalen Versatz

**Bild 4.4:** Original- und Testbilder mit einem Versatz von 5 Pixeln für die Bestimmung des maximalen Abbildungsversatzes



**Bild 4.5:** Reaktionszeiten der Versuchspersonen

Durch das Hauptexperimentes wurde als Obergrenze für den Versatz, der noch zu einer durchschnittlichen Bewertung führt, ein Versatz von 2 Pixel ermittelt. Diese empirisch bestimmte Obergrenze resultiert aus der Bewertung der in den Testbildern positionierten Person. Bei der Bewertung des Fahrzeugs wurden auch größere Versatzgrößen durchschnittlich bewertet.

Über die aufgezeichneten Reaktionszeiten der Versuchspersonen wird bewertet, wie lange die Versuchspersonen die dargestellten Bilder betrachteten um das fusionierte Bild zu bewerten. Über einen Vergleich dieser Reaktionszeiten mit typischen Blickzuwendungszeiten auf einen im Automobil genutzten Zusatzmonitor kann das Ergebnis dieses Experimentes annähernd auf einen Versuch im Automobil übertragen werden. Zumal festzuhalten ist, dass bei der Bewertung innerhalb dieses Experimentes keine weiteren Tätigkeiten auszuführen waren, was vermutlich zu einer etwas längeren und daher kritischeren Bewertung des dargestellten Bildes führt.

In Bild 4.5 sind die Reaktionszeiten einmal nach Mittelwert und Standardabweichung sowie ein weiteres Mal nach der relativen Summenhäufigkeit dargestellt.

Der Mittelwert über alle Versuchspersonen liegt bei 1,5s, somit weit unter der Maximalgrenze von 4s. Nur bei 6 der insgesamt 1600 Durchgänge wurde keine Bewertung abgegeben und somit die Maximalgrenze erreicht.

Die Betrachtung der Verteilung der Summenhäufigkeit zeigt, dass das 95. Perzentil bei 2,5s liegt. Dieses Ergebnis steht nicht im Widerspruch zu der in [Schweigert 2002] festgestellten Blickzuwendungszeit von 2s (95. Perzentil) auf Zusatzdisplays. Es kann somit sowohl von einer spontanen Beantwortung der Bewertungsfrage als auch von einer realistischen Betrachtungszeit des Bildes ausgegangen werden.

Während des Experimentes wurden die Versuchspersonen befragt, welches Merkmal des Objektes hauptsächlich zur Bewertung genutzt wurde. Bei der Person wurde hauptsächlich die Kopfreion für die Bewertung genutzt, die eine geringe Fläche aber einen großen Kontrast sowohl im Visuellen

als auch im Infraroten aufweist. Beim Fahrzeug nutzten die Versuchspersonen hauptsächlich die weniger kontrastreichen Rückleuchten zur Bewertung. Da diese Fläche größer und diffuser als die Kopfregion der Person ausfällt, fallen bei der Darstellung des Fahrzeuges die unterschiedlichen Versatzgrößen nicht so auf.

#### 4.4. Auswertung und Diskussion

Der Versuch nutzte Objekte, die sich in Entfernungen von 15m und 30m zum Kamerasystem befanden. Obwohl diese Entfernungen nicht den typischen Einsatzbereich eines Nachtsichtsystems begrenzen, da diese typischerweise in einem Entfernungsbereich von bis zu 250m genutzt werden können, kann dieses Ergebnis auch als Abschätzung für Objekte in größeren Entfernungen genutzt werden. Für Objekte die entweder visuelle Strahlung reflektieren oder ferninfrarote Strahlung emittieren, muss die Versatzobergrenze nicht beachtet werden, da keine Parallaxe auftritt.

Für die Übertragung des Ergebnisses auf einen anderen Entfernungsbereich ist die Unterscheidung der beiden getesteten Objektgruppen „Person“ und „Fahrzeug“ notwendig. Im Versuch war die gesamte Person durch das Umgebungslicht beleuchtet, es tat somit für die gesamte Silhouette ein visueller Kontrast auf. Im Normalfall wird bei Personen in 30m Entfernung nur ca. 45cm der Körpersilhouette, somit der untere Beinbereich, durch das eigene Abblendlicht erfasst. Für die Kopfregion, die nach Aussage der Versuchspersonen hauptsächlich für die Bewertung herangezogen wird, tritt somit im visuellen Bild kein Kontrast auf, der für die Bewertung genutzt werden kann. Für größere Entfernung nimmt der Einfluss der visuellen Information für nicht selbstleuchtende Objekte bis zum Verschwinden ab. Sobald keine visuellen Kontraste mehr im Bild vorhanden sind, treten auch keine Parallaxenfehler zum ferninfraroten Bild auf.

Bei der Untersuchung der zweiten Objektgruppe stellte sich heraus, dass für das Fahrzeug auch größere Pixelunterschiede noch mit „gut“ bewertet wurden, sodass für diese Objekttypen auch mehr als zwei Pixel Versatz zulässig sind. Desweiteren ändert sich der Versatzfehler bei Systemen, deren Registrierentfernung in einer großen Entfernungen liegt, für den Fernbereich<sup>20</sup> langsamer, als dies für den Nahbereich<sup>21</sup> der Fall ist. Gegenläufig dazu ist das Vermögen der Kamerasysteme, Details auch in größeren Entfernungen aufzulösen, womit visuelle und thermische Signaturen, wie beispielsweise die der Rückleuchten, in großer Entfernung nicht mehr aufgelöst werden.

Im Rahmen des Experimentes wurden die vertikale und die horizontale Versatzrichtung untersucht, wobei die ermittelte Obergrenze von 2 Pixel unabhängig von der Richtung gilt. Da für beliebige Anordnung von Kamerasystemen ebenfalls andere als die betrachteten Versatzrichtungen auftreten können, ist die Übertragbarkeit dieses Ergebnisses zu betrachten. Die Bewertung der Versuchspersonen erfolgte anhand der Silhouette des zu betrachtenden Objektes.

Somit kann der Zusammenhang zu anderen Versatzrichtungen in einem Gedankenexperiment hergestellt werden. Werden die Kamerasysteme gegenüber der waagerechten Ausrichtung um einen

---

<sup>20</sup>Jenseits der Registrierentfernung

<sup>21</sup>Unterhalb der Registrierentfernung

beliebigen Winkel rotiert und die horizontale sowie vertikale Translation der Objekte während der Ausrichtung durch geeignete Verfahren beibehalten, so sind die vorgestellten Ergebnisse vermutlich auch auf andere Anordnungen und Ausrichtungen übertragbar. Dies bedeutet desweiteren, dass die Grenze für den Pixelversatz nicht als lineare Überlagerung interpretiert werden kann, sondern radial anzuwenden ist. Im Rahmen dieses Experimentes wurden keine unterschiedlichen Ausrichtungen untersucht; aus den Ergebnissen des Pilotexperimentes konnten keine signifikanten Aussagen hinsichtlich der diagonalen Versatzrichtung ermittelt werden.

Die mit dem in [Schumann 2003] vorgestellten Versuch ermittelte Obergrenze dient dazu, einen Richtwert für die Obergrenze des Pixelversatzes für das genutzte Experimentalsystem zu erhalten. Für eine Verallgemeinerung sind weitere Untersuchungen, die ein größeres Entfernungsintervall, verschiedene Kontrastkombinationen, unterschiedliche Systemkonfigurationen betrachten und unterschiedliche Fahrscenarien zur Bewertung präsentieren, notwendig. In diesen Untersuchungen können auch Abhängigkeiten vom Alter der Versuchspersonen eingehender untersucht werden.

## 4.5. Fazit

In diesem Kapitel wurden die Grundlagen für die Dimensionierung eines Dualkamerasystems, das als Nachtsichtsystem Anwendung findet, über den Ansatz eines Bewertungsexperimentes erarbeitet. Als Obergrenze für den tolerierbaren Objektversatz wurde für das vorliegende Testsystem eine radiale Abweichung von 2 Pixel ermittelt. Für andere Systemkonfigurationen, beispielsweise aufgrund anderer Kamera- oder Displaysysteme sowie für andere Displayentfernungen muss die zulässige Obergrenze neu bestimmt werden.

## 5. Testsystem zur Darstellung der Bildfusion

Im Rahmen der Arbeit wird neben den Auslegungsrichtlinien auch eine Systemarchitektur für ein Dualkamerasystem entwickelt. Diese Architektur soll prototypisch in einem Versuchsträger realisiert werden, um damit die Verfahren zur Auslegung exemplarisch durchzuführen und die technische Machbarkeit der Bildfusion im Rahmen einer Nachtsichtanwendung für einen automobilen Einsatz zu demonstrieren.

Dieser Versuchsträger kann weiterhin auch zur Überprüfung der vorgestellten theoretischen Überlegung zur Auslegung genutzt werden. Dabei wird im Rahmen der Validierung überprüft, ob das Testsystem in einem exemplarisch gegebenen Einsatzbereich eingesetzt werden kann. Hierzu wird in diesem Kapitel die entsprechende Untersuchungsmethodik entwickelt.

Ebenfalls wird vorgestellt, wie die Überprüfung der durch das Versuchssystem realisierten Bildwiederholrate erfolgt. Dieses Kriterium hat einen Einfluss auf die Informationsdarstellung.

Im ersten Teil dieses Kapitels wird das Versuchssystem nach Hard- und Softwarearchitektur vorgestellt. Dabei wird besonders auch den Aufbau und die Optimierung der Systemarchitektur hinsichtlich der Ausführungsgeschwindigkeit eingegangen.

Die Beschreibung des Ablaufs der in Kapitel 3 vorgestellten Verfahren zur Kalibrierung und zur Überprüfung des Einsatzbereiches wird Gegenstand des zweiten Teils dieses Kapitels sein. Weiterhin wird die Methodik zur Bestimmung der Bildwiederholrate vorgestellt.

### 5.1. Aufbau des Testsystems im Versuchsfahrzeug

Der Aufbau des Testsystems richtet sich hinsichtlich seiner Implementierung nach den zeitlichen Abläufen im Testsystem. Auf Basis dieser Analyse wird die gewählte Hardwarearchitektur und der praktische Aufbau vorgestellt. Die Vorstellung der Softwarearchitektur beschließt diesen Abschnitt.

#### 5.1.1. Zeitliche Randbedingungen

Vor der Integration und Implementierung des Testsystems wurden die zeitlichen Abläufe im Gesamtsystem analysiert. Die Software- und die Hardwarearchitektur wurde dann nach dem kritischsten Zeitpfad ausgelegt, um eine möglichst optimale Funktionsweise zu erreichen. Dabei sind die in Tabelle 5.1 zusammengefassten zeitlichen Parameter zu betrachten.

Tabelle 5.1 zeigt anschaulich, dass die Periode der beiden Kamerasysteme das zeitliche Verhalten des Gesamtsystems vorgibt. Die anderen Parameter können als nahezu zeitlich konstant angenommen werden. Das System wurde daher hinsichtlich der Periode der Kamerasysteme ausgelegt und bezüglich der Darstellungsgeschwindigkeit des fusionierten Bildes optimiert.

---

**Tabelle 5.1:** Zusammenfassung der zeitlichen Abläufe

Periode der Kamerabilder	$t_1, t_2 = 33ms, 40ms$ (NTSC, PAL)
Veränderung der Kameraparameter	$t_K \rightarrow \infty$
Veränderung der Ausrichtungsparameter	$t_A \rightarrow \infty$
Veränderung äußere Parameter	$t_P \approx 1s - 2s$

Bei der Wiedergabe der fusionierten Bilder ist darauf zu achten, dass die Wiederholfrequenz einen Mindestwert nicht unterschreitet, um dem Betrachter den Eindruck eines flüssigen Ablaufens zu vermitteln. Die Anforderung, die dabei an die zeitlichen Abläufe gestellt werden, sollen nur am Rande erwähnt werden, da die minimal notwendige Bildwiederfrequenz von einer Vielzahl von Faktoren, wie z.B. der Umfeldhelligkeit und der Luminanz des Bildschirms, abhängig ist [Norwich 2003, Greenberg 1997]. Die notwendige minimale Bildwiederholfrequenz ist daher für die spezielle Anordnung und die speziellen Einsatzbedingungen genauer zu bestimmen.

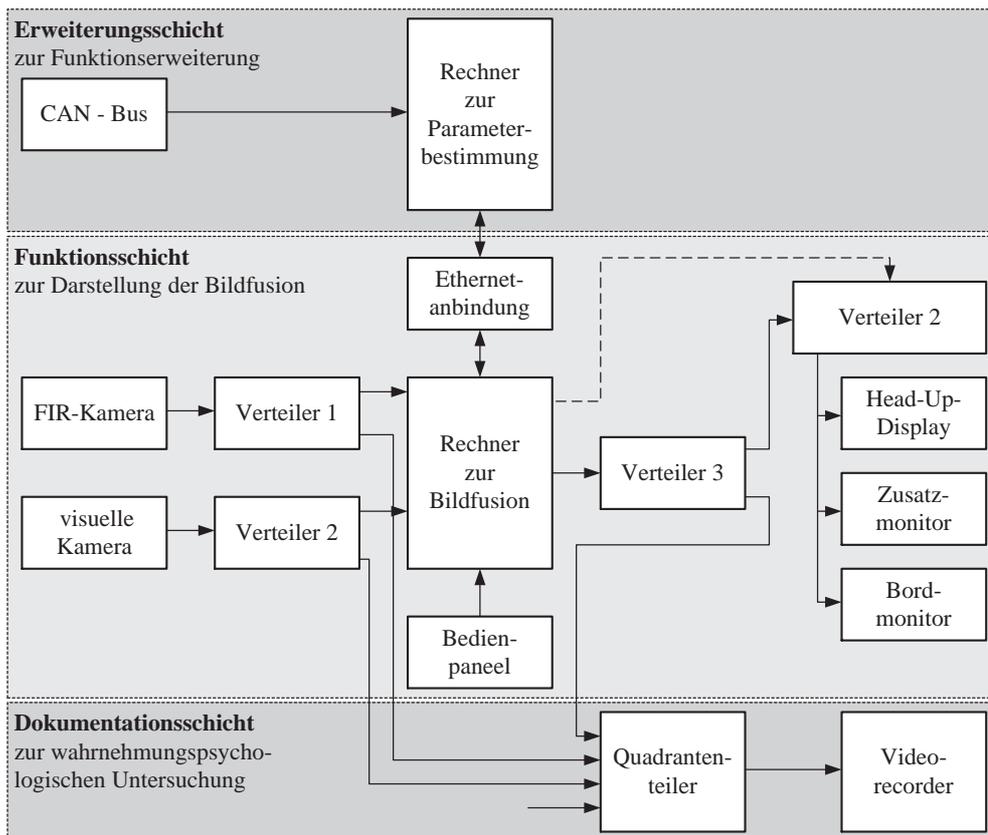
Im Rahmen dieser Arbeit wird daher eine Abschätzung der notwendigen Bildwiederholfrequenz eingesetzt. In [Yadavalli 2003] wurden für Multimedia-Anwendungen drei unterschiedliche Bildwiederholfrequenzen 10, 15 und 30 Hz hinsichtlich subjektiver Qualitätskriterien untersucht. Die während des Experimentes präsentierten Sequenzen hatten eine Größe von  $352 \times 240$  Pixel und waren in Farbe aufgenommen worden. Die Versuchspersonen bevorzugten eine Bildwiederholrate von 15 bzw. 30 Bildern pro Sekunde, was eine Periode von 16,6ms bzw. 33ms entspricht.

Durch diese beiden Grenzen ist somit ein Richtwert für das Interval der Bildwiederholfrequenz gegeben, in dem die Wiedergabe der fusionierten Bilder erfolgen sollte. Da die Bildwiederholrate nicht nur einen Einfluss auf die subjektive Bewertung und die Informationsdarstellung hat, sondern ebenfalls die Komplexität des Gesamtsystems beeinflusst, ist sie ein Kriterium für den Aufbau und die Architektur des Gesamtsystems (siehe Abschnitt 2.4.3).

### 5.1.2. Hardwarearchitektur und Fahrzeugaufbau

**Hardwareaufbau:** In Bild 5.1 ist die Hardwarearchitektur des Versuchsfahrzeugs schematisch dargestellt. Funktional wurde der Aufbau in die Schichten *i*) Funktionsschicht, *ii*) Dokumentationsschicht und *iii*) Erweiterungsschicht eingeteilt.

*i*) Die Funktionsschicht beinhaltet die für die Bildfusion notwendigen Funktionen: die beiden Kamerasysteme, den Rechner zur Bildfusion und die Displays. *ii*) Die Dokumentationsschicht stellt die für ergonomische Untersuchungen notwendigen Grundfunktionen, wie beispielsweise die Videoaufzeichnung der Ursprungsbilder und des fusionierten Bildes bereit. *iii*) Die Erweiterungsschicht dient dazu, externe Funktionalität über eine offene Schnittstelle an das Fusionssystem anzubinden. Exemplarisch hierfür zeigt Bild 5.1 einen Rechner zur Parameterbestimmung basierend auf den aktuellen Fahrdynamikdaten.



**Bild 5.1:** Schematische Darstellung des funktionalen Aufbau des Versuchsfahrzeugs

**Auslegung der Kameraanordnung:** Exemplarisch soll das im Versuchsfahrzeug umgesetzte Testsystem in den in Tabelle 5.2 dargestellten Einsatzbereichen nutzbar sein. Neben den Grenzen der Einsatzbereiche enthält Tabelle 5.2 auch die notwendige Geometrie Kennzahl und die optimale Registrierentfernung (vgl. Gleichungen (3.73), (3.76)). Aufgrund der quadratischen Pixelgröße (siehe Tabelle 5.3) des Bezugskamerasystems kann aus der Geometrie Kennzahl direkt der maximale Montageradius bestimmt werden (vgl. Gleichung (3.46)).

Diese Anforderungen sind mit den strukturellen Möglichkeiten der Montage abzugleichen. Die Anordnung der Kamerasysteme zeigt Bild 5.2. Der horizontale Versatz zwischen beiden Kamerasystemen beträgt  $T_x = 8,5\text{cm}$  und der vertikale Versatz beträgt  $T_y = 10,5\text{cm}$ ; der daraus resultierende radiale Abstand beträgt  $13,5\text{cm}$ . Der Versatz in der Tiefe beträgt  $T_z = 2\text{cm}$ . Durch die Ausrichtung der Kamerasysteme wird erreicht, dass die Relativwinkel verschwinden. Die Parameter der genutzten Kameraparameter zeigt Tabelle 5.3.

**Tabelle 5.2:** Auslegungsvorschriften für das Testsystem bei 2 Pixel Maximalversatz

$Z_{MIN}[m]$	$Z_{MAX}[m]$	$K_{Error}[mPixel]$	Montageradius $[m]$	$Z_{REG}[m]$
15	40	96	0,154	21,8
20	60	120	0,192	30,0
25	100	134	0,213	40,0

**Tabelle 5.3:** Innere Parameter der genutzten Kamerasysteme, identisch zu Tabelle 3.4, [Raytheon 2002, Jai 2001]

	<b>Kamerasystem 1</b>	<b>Kamerasystem 2</b>
empfindlicher Spektralbereich	fernes Infrarot	visuell
physikalische Auflösung	320( <i>h</i> ) × 240( <i>v</i> ) Pixel	768( <i>h</i> ) × 494( <i>v</i> ) Pixel
logische Auflösung	320( <i>h</i> ) × 240( <i>v</i> ) Pixel	320( <i>h</i> ) × 240( <i>v</i> ) Pixel
Brennweite $f_i$	24.6mm	12.5mm
Blickwinkel (Öffnungswinkel)	36°( <i>h</i> ) × 27°( <i>v</i> )	29°( <i>h</i> ) × 22°( <i>v</i> )
physikalische Pixelgröße	(50μm, 50μm)	(8.4μm, 9.8μm)
logische Pixelgröße ( $D_i^x, D_i^y$ )	(50μm, 50μm)	(20.2μm, 20.2μm)
Verzeichnungsparameter $\kappa_i$	zu bestimmen	zu bestimmen
	angepasstes System	Bezugssystem

Die gegebene Anordnung der beiden Kamerasysteme weist eine Geometrie Kennzahl von  $K_{Error} = 84,5mPixel$  auf und erfüllt somit theoretisch die in Tabelle 5.2 vorgegebenen Einsatzbereiche.

**Integration der Hardware:** Im Kofferraum wurde die weitere notwendige Technik integriert. In Bild 5.2 ist der praktische Aufbau dargestellt. Im Innenraum wurde für die Bedienung des Systems ein Tastenfeld integriert. Desweiteren wurde für die Untersuchung unterschiedlicher Displayanordnungen, die aber nicht Gegenstand dieser Arbeit ist, drei Displayplatzierungen in das Fahrzeug integriert (siehe Bild 5.2).

Zur Darstellung der für die Bildfusion notwendigen Funktionen kam ein PC mit den in Tabelle 5.4 zusammengefassten technischen Daten zum Einsatz.

Die in diesem Abschnitt beschriebene Hardware stellt die Basisfunktionen zur Verfügung und kommt bei der Realisierung des Testsystems zum Einsatz. Die Ableitung der geeigneten Systemarchitektur und die Beschreibung der daraus entwickelten Struktur der Software erfolgt in den beiden folgenden Abschnitten.

### 5.1.3. Ableitung und Optimierung der Systemarchitektur

Vor der Entwicklung der Softwarearchitektur, die die konkrete Realisierung im Testsystem darstellt, wird in diesem Abschnitt eine Systemarchitektur entwickelt, die hinsichtlich der Berechnungszeit des fusionierten Bildes optimiert wurde.

**Tabelle 5.4:** Technische Daten des eingesetzten PC zur Bildfusion

Prozessor	Pentium III, bei 1,2 GHz
Hauptspeicher	1 GB RAM
Grabber	Eagle Quattro
Grafikkarte	Matrox G450 mit TV-Ausgang



(a) Anordnungen der Kamerasysteme im Frontbereich des Versuchsfahrzeugs (1 - FIR-Kamerasystem, 2 - visuelles Kamerasystem)

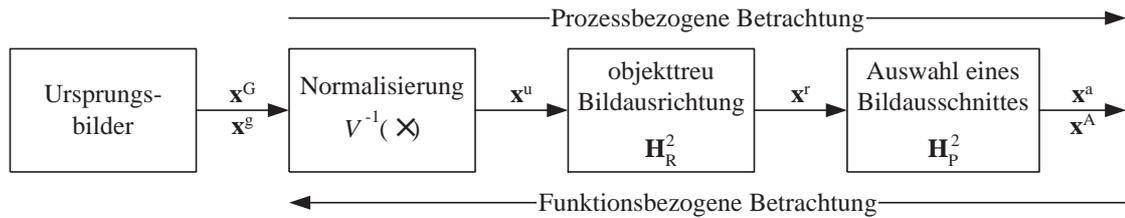


(b) Technischer Aufbau im Kofferraum



(c) Anordnung der Displays

**Bild 5.2:** Hardwareaufbau des Versuchsträgers



**Bild 5.3:** Darstellung des Prozesses der geometrischen Korrektur

Ausgehend von einem ersten schematischen Überblick über die Systemarchitektur erfolgt desweiteren die Optimierung und die Beschreibungen der Eigenschaften. Abschließend wird die gesamte Softwarearchitektur des Testsystems vorgestellt.

**Betrachtung der geometrischen Vorverarbeitung:** In Bild 2.14 wurde bereits eine schematische Systemarchitektur vorgestellt, die aus den drei Bereichen Aufnahme der Bildinformation, geometrische Korrektur und der abschließenden Bildfusion (vgl. Abschnitt 2.4.2) besteht. Für den genutzten Algorithmus zur Bildfusion wurde bereits in Abschnitt 2.4.3 eine Abschätzung der notwendigen Operationen je Bildpunkt vorgestellt. Bei dieser Abschätzung wurden die Verfahren zur geometrischen Korrektur bewusst nicht betrachtet, da diese unabhängig vom umgesetzten Algorithmus zur Bildfusion für jedes Bildpaar auszuführen sind.

Die Formulierung der geometrischen Vorverarbeitung erfolgt für einen der beiden Kamerakanäle, auf den zweiten Kanal können die Ergebnisse übertragen werden. Der Prozess der geometrischen Korrektur gliedert sich in die drei Bereiche Wahl des Bildausschnittes, der objekttreue Bildausrichtung und der Verzeichnungskorrektur. Bevor die Bildinformationen fusioniert werden können, müssen diese objekttreu zueinander ausgerichtet werden. Ebenfalls kann vor der Bildfusion die Auswahl eines bestimmten Bildausschnittes erfolgen, um eine optimierte Informationsdarstellung zu erreichen. Beide Prozessschritte werden als lineare, affine Transformation zusammenfassend als Bildausrichtung modelliert. Vor der Auswahl des interessanten Bildausschnittes und der objekttreuen Ausrichtung sind die Verzeichnungen zu korrigieren. Dieser Prozessschritt enthält nichtlineare Funktionen und wird daher individuell modelliert.

Bild 5.3 zeigt schematisch den funktionalen Zusammenhang zwischen den einzelnen Prozessschritten der geometrischen Korrektur. Der gesamte Prozess der geometrischen Korrektur kann, wie in Gleichung (5.1) dargestellt, durchgängig mathematisch beschrieben werden.

$$\mathbf{x}^a = \mathbf{H}_P^2 \mathbf{H}_R^2 \mathcal{V}^{-1}(\mathbf{x}^G) \quad (5.1)$$

Die funktionsbezogene Darstellung, somit ausgehend von den Koordinaten des fusionierten Bildes zeigt Gleichung (5.2). Zu beachten ist, dass die funktionsbezogene Betrachtung im Allgemeinen in nicht ganzzahligen Koordinatenangaben resultiert.

$$\mathbf{x}^g = \mathcal{V}\left(\left(\mathbf{H}_P^2 \mathbf{H}_R^2\right)^{-1} \mathbf{x}^A\right) \quad (5.2)$$

Alle für die geometrische Vorverarbeitung notwendigen Parameter werden bei der Kalibrierung des Gesamtsystems ermittelt (vgl. Abschnitt 5.2.1).

Der gesamte Prozess der geometrischen Korrektur wird im folgenden durch das Zusammenfassen der Teilprozesse und das Überführen in eine gewichtete System hinsichtlich der Ausführungsgeschwindigkeit optimiert. Solche Algorithmen sind optimal auf aktuellen PC-Prozessoren mit MMX-Operationen umsetzbar, da diese besonders auf die Verarbeitung multimedialer Daten ausgelegt und bezüglich der Verarbeitung mit einer DSP-Architektur vergleichbar sind [Mittal 1997].

**Optimierung der Systemarchitektur:** Bisher wurde der Zusammenhang zwischen den Koordinaten der Ursprungsbilder und des fusionierten Bildes betrachtet. Die geometrische Vorverarbeitung beider Ursprungsbilder soll jedoch in Bildern resultieren, die abschließend fusioniert werden können. Somit besteht das Ziel der geometrischen Vorverarbeitung darin, die Farbinformation des geometrisch vorverarbeiteten Bildes  $\mathbf{F}_i^g$  aus der Farbinformation des entsprechenden Ursprungsbildes  $\mathbf{F}_i$  zu berechnen. Dieser Prozess wird bezüglich der rechentechnischen Umsetzung und der Verarbeitungsgeschwindigkeit optimiert.

Hierzu wird der in Gleichung (5.3) dargestellte Ansatz der gewichteten Summe gewählt.

$$\mathbf{F}_i^g = \sum w^o \mathbf{F}_i \quad (5.3)$$

Bei der Zuordnung der Bildelemente ist zu beachten, dass die in Gleichung (5.2) formulierte Transformation im Allgemeinen in nicht ganzzahligen Koordinaten resultiert. Dies bedeutet, dass Interpolationsfilter einzusetzen sind, um die Farbinformation der Zwischenpunkte zu berechnen. Die Anforderung an diese Filter und zwei Beispiele finden sich in Abschnitt 3.6.

Die Farbinformation  $\mathbf{F}_i^g(\mathbf{x}^A)$  des Bildelementes  $\mathbf{x}^A$  des geometrisch vorverarbeiteten Bildes setzt sich somit aus einer Summe der Farbinformationen der Bildelemente des Ursprungsbildes  $\mathbf{F}_i(\cdot)$  an den Koordinaten  $L_1(\mathbf{x}^A) \dots L_n(\mathbf{x}^A)$  zusammen, die jeweils mit dem entsprechenden Wichtungsfaktor  $w_1^o(\mathbf{x}^A) \dots w_n^o(\mathbf{x}^A)$  multipliziert werden. Über die Anzahl  $n$  zu berücksichtigender Bildelemente wird der entsprechende Interpolationsfilter realisiert. Die geschlossene Darstellung zeigt Gleichung (5.4).

$$\mathbf{F}_i^g(\mathbf{x}^A) = \sum_{j=1}^n w_j^o(\mathbf{x}^A) \mathbf{F}_i(L_j(\mathbf{x}^A)) \quad (5.4)$$

Somit wird die Information, die zur Verzeichnungskorrektur und zur Bildausrichtung notwendig ist, aus den Kamera- und Ausrichtungsparametern in die Wichtungsfaktoren und Adressreferenzen transformiert. Diese Informationen können zum Systemstart berechnet und in Look-Up-Tabellen abgelegt werden, umso permanent für die geometrische Korrektur zur Verfügung zu stehen. Eine wiederholte Berechnung der Korrespondenz zwischen den Koordinaten ist somit nicht notwendig.

Die Transformation der Korrekturinformation aus den Systemparametern in die Look-Up-Tabellen wird durch die Funktion  $\mathcal{G}$  realisiert. Diese Funktion benötigt folgende Parameter:

- Koordinaten des Bildelementes  $\mathbf{x}^A$  des geometrisch korrigierten Bildes,
- Inneren Parameter des betrachteten Kamerasystems  $\mathbf{K}_i$ ,
- Ausrichtungsmatrix zur objekttreuen Ausrichtung  $\mathbf{H}_R^2$ ,<sup>22</sup>
- Ausrichtungsmatrix zur Auswahl des Bildausschnittes  $\mathbf{H}_P^2$

Desweiteren wird durch die Funktion  $\mathcal{G}$  der notwendige Interpolationsfilter realisiert. Die mathematische Formulierung zwischen den Systemparametern und den Look-Up-Tabellen zeigt Gleichung (5.5).

$$[\mathbf{w}_i^o(\mathbf{x}^A), \mathbf{L}_i(\mathbf{x}^A)] = \mathcal{G}(\mathbf{x}^A, \mathbf{K}_i, \mathbf{H}_R^2, \mathbf{H}_P^2) \quad (5.5)$$

Diese Funktion berechnet für jedes Kamerasystem und zu jedem Bildelement des geometrisch korrigierten Bildes die entsprechenden Adressreferenzen  $\mathbf{L}_i(\mathbf{x}^A) = \{L_1(\mathbf{x}^A) \dots L_n(\mathbf{x}^A)\}$  und die entsprechenden Wichtungsfaktoren  $\mathbf{w}_i^o(\mathbf{x}^A) = \{w_1^o(\mathbf{x}^A) \dots w_n^o(\mathbf{x}^A)\}$ . Die beiden Vektoren bestehen aus jeweils  $n$  Elementen, das der Anzahl für die Interpolation notwendigen Stützstellen entspricht.

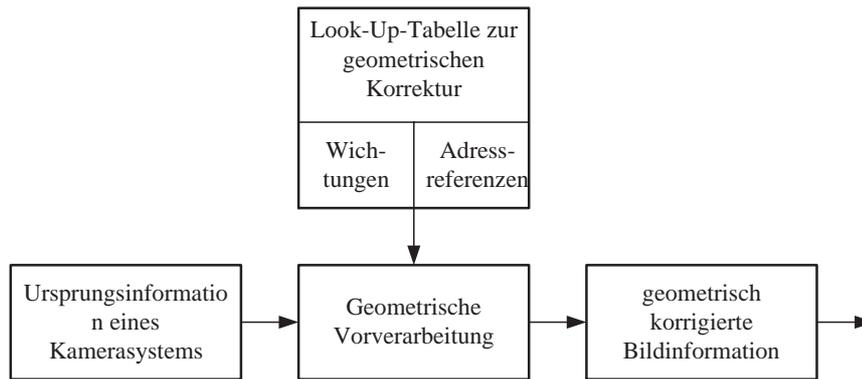
Aus den Gleichungen (5.4) und (5.5) kann somit die endgültige Architektur des Teilsystems zur geometrischen Vorverarbeitung abgeleitet werden. In Gleichung (5.4) ist dabei der periodisch zu berechnende Teilprozess formuliert. Die für die Ausrichtung notwendigen Informationen, die in Gleichung (5.4) zur Anwendung kommen, werden durch den in Gleichung (5.5) formulierten funktionalen Zusammenhang berechnet. Durch eine Optimierung dieses Prozesses kann die Startzeit des Systems optimiert werden, auf das Verhalten zur Laufzeit hat diese Optimierung keine Auswirkungen.

**Eigenschaften:** Bild 5.4 zeigt die optimierte Architektur des periodisch auszuführenden Teilprozesses, um die Ursprungsinformation eines Kamerasystems geometrisch vorzuverarbeiten.

Desweiteren werden die Eigenschaften der vorgestellten Architektur zusammengefasst und mit den Eigenschaften einer Realisierung in Teilprozessen verglichen.

- **Rechenbedarf:** Ein wichtiges Kriterium bei der Implementierung der Algorithmen stellt die notwendige Rechenleistung je zu berechnenden Bildelement dar. Für die gewählte Architektur werden je Bildelement eine gleiche Anzahl  $n$  von Additionen und Multiplikationen ausgeführt. Dies bedeutet, dass sich der Rechenbedarf für ein Substitutionsfilter auf eine Zuordnung reduziert. Bei einer bilinearen Interpolation sind 4 Multiplikationen und 4 Additionen je Bildelement auszuführen (vgl. Abschnitt 3.6). In Abhängigkeit der Implementierung ist noch je Bildelement eine Division auszuführen.

<sup>22</sup>Für das Bezugssystem ist die Matrix identisch der Einheitsmatrix



**Bild 5.4:** Optimierte Architektur zur geometrischen Korrektur eines Kamerakanals

Für die Teilprozesse ist der Rechenbedarf von der entsprechenden Hardware und der Implementation der notwendigen linearen und nichtlinearen Operationen abhängig und kann daher nicht allgemein angegeben werden.

- **Anzahl der Speicherzugriffe:** Je Bildelement sind  $n$  Zugriffe auf die entsprechenden Wichtungen,  $n$  Zugriffe auf die Liste der Adressreferenzen und  $n$  Zugriffe auf die Ursprungsinformation notwendig.

Für die Ausführung in Teilprozessen sind pro Bildelement mindestens  $n$  Zugriffe auf die 5 Kameraparameter, mindestens  $n$  Zugriffe auf die 6 Elemente der Ausrichtungsmatrix und mindestens  $n$  Zugriffe auf die Ursprungsinformation zu kalkulieren.

- **Speicherbedarf:** Die optimierte Architektur benötigt jeweils  $n$  Speicherplätze pro Bildelement, um die Wichtungen und die Adressreferenzen zu speichern.

Die ursprüngliche Architektur benötigt Speichermöglichkeiten für die Kamera- und Ausrichtungsparameter. Beide Größen sind unabhängig von der Größe des fusionierten Bildes. An dieser Stelle zeigt sich deutlich, dass die Optimierung der Architektur zu Gunsten einer optimalen Verarbeitungsgeschwindigkeit zu einer Erhöhung des Speicherbedarfs führt.

- **Regionale Skalierbarkeit:** Die Speicherung der Ausrichtungsinformation in den Look-Up-Tabellen und die Unabhängigkeit der Ausrichtungsinformation von der Bildinformation lässt eine regionale Skalierbarkeit der Berechnungen zu. Dies bedeutet, dass unterschiedliche Bildbereiche unabhängig von einander auf verschiedenen Prozessoren, evtl. unterschiedlichen Typs, gleichzeitig gerechnet werden können. Die Größe des zu berechnenden Bildbereiches richtet sich dabei nach der Rechengeschwindigkeit der eingesetzten Prozessoren, um eine Synchronität<sup>23</sup> zu erreichen.

Eine regionale Skalierbarkeit ist auch für die ursprüngliche Architektur möglich. Jedoch sind die möglichen Auswirkungen von Rechenungenauigkeiten aufgrund der nicht ganzzahligen Koordinaten zu beachten.

<sup>23</sup>Jeder Prozessor schließt mit der zugewiesenen Berechnung zur gleichen Zeit ab, ansonsten würde die Größe der zugewiesenen Bildbereiche nicht optimal bestimmt.

- **Änderung des Interpolationsfilters:** Die Umsetzung unterschiedlicher Interpolationsfilter kann durch die optimierte Architektur einfach realisiert werden. Es genügt, die Funktion zur Berechnung der Look-Up-Tabellen anzupassen. Der periodisch aufgerufene Programmteil bleibt von diesen Änderungen unberührt.

Bei der in Teilprozessen realisierten Architektur ist der gesamte Prozess der geometrischen Vorverarbeitung anzupassen.

- **Änderungen des Bildausschnittes:** Ganzzahlige Änderungen in der horizontalen und vertikalen Verschiebung des gewünschten Bildausschnittes sind durch Addition der Adressreferenzen und einer Konstante, welche die Größe der Verschiebung enthält, zu realisieren. Nicht ganzzahlige Änderungen und Änderungen in der Größe des Bildausschnittes führen zu einer Änderung aller Adressreferenzen und Wichtungen. Wurden die entsprechenden Tabellen ebenfalls vorab berechnet, können diese Änderungen durch das Umschalten zwischen den entsprechenden Tabellen realisiert werden. Jedoch besteht zusätzlicher Speicherbedarf.

Bei der ursprünglichen Architektur sind keine Änderungen notwendig.

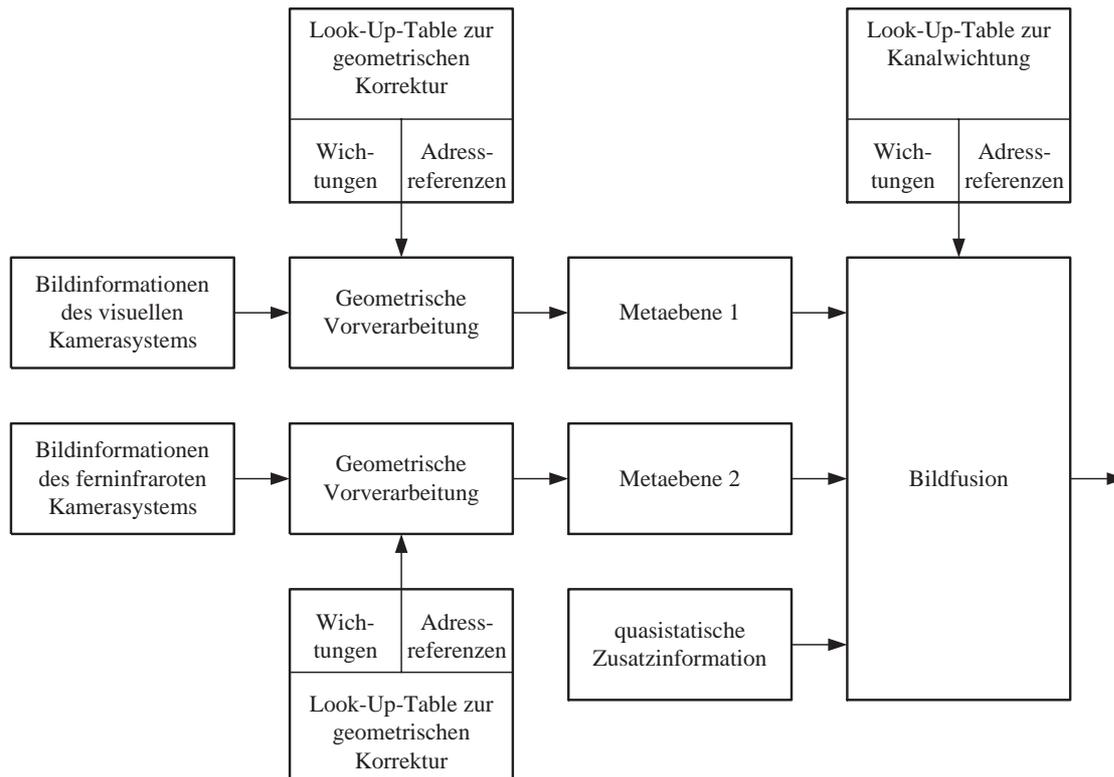
- **Integration des gewichteten Mittelwertansatzes:** Der in Abschnitt 2.4.2 vorgestellte gewichtete Mittelwertansatz kann sehr einfach in die vorgegebene Architektur integriert und zu einem Gesamtsystem umgesetzt werden. Dies kann durch eine multiplikative Verknüpfung der geometrischen Wichtungsfaktoren und der entsprechenden, ortsunabhängigen Kanalwichtung zu einem Wichtungsfaktor und eine Zusammenfassung der Adressreferenzen erreicht werden.

Die Berechnung erfolgt weiterhin als gewichtete Summe, jedoch ist die Zwischeninformation der geometrisch korrigierten Bilder nicht mehr verfügbar. Diese Integration, bzw. die zusammengefasste Berechnung von geometrischer Korrektur und Bildfusion ist für die ursprüngliche Architektur nicht möglich, da dies eine Integration in die Teilprozesse bedingen würde.

Es zeigen sich prinzipbedingte Unterschiede zwischen beiden Architekturen. Der wichtigste Punkt, der aus der vorangegangenen Betrachtung resultiert, ist die Substitution der notwendigen Rechenleistung und Komplexität der auszuführenden Algorithmen durch den zusätzlich notwendig werdenden Speicherplatz, der die vorberechneten Zwischenergebnisse bereithält.

**Gesamtarchitektur:** Die Zusammenfassung beider Kamerakanäle und die Integration weitere, quasistationärer Zusatzinformation, die für Einblendungen in das fusionierte Bild genutzt werden kann, resultiert in der in Bild 5.5 dargestellten Gesamtarchitektur. Basierend auf dieser Architektur erfolgt der Entwurf und die Umsetzung einer geeigneten Softwarearchitektur, die im nächsten Abschnitt vorgestellt wird.

---



**Bild 5.5:** Architektur des Gesamtsystems zur Bildfusion

#### 5.1.4. Softwarearchitektur

Die Funktionalität der Bildfusion wird durch ein Softwaresystem realisiert, das die im vorangegangenen Abschnitt beschriebene Architektur aufweist. Um das System hinreichend flexibel zu gestalten und um die zeitlichen Abläufe im System verfolgen zu können, wurde das Gesamtsystem aus Modulen aufgebaut, die jeweils eine spezielle Funktion zur Verfügung stellen. Die Kommunikation zwischen den Modulen wird durch Nachrichten gesteuert. Die Module und deren Funktionalität zeigt Tabelle 5.5.

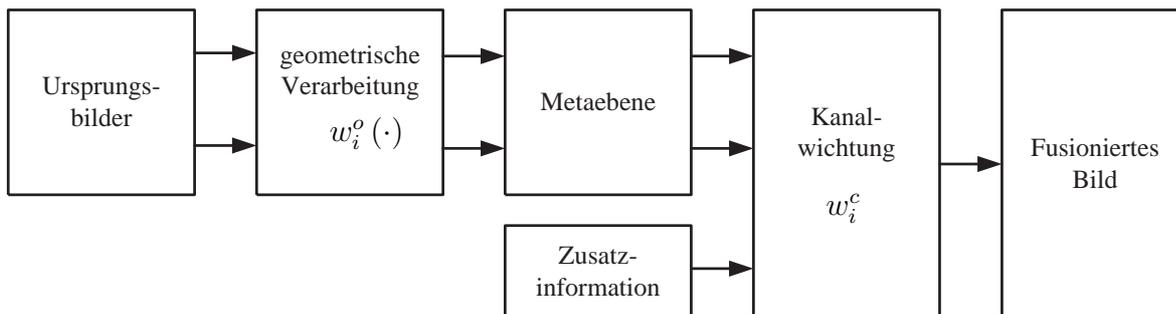
Die von den Kamerasystemen gelieferten Bilder werden im ersten Schritt geometrisch verarbeitet und anschließend fusioniert. Dabei werden beide Prozessschritte durch eine gewichtete Summe realisiert. Der Einfluss des jeweiligen Kanals im fusionierten Bild erfolgt durch die Kanalwichtungsfaktoren  $w_i^c$ , die durch das Tastenfeld manuell angepasst werden kann. Als Resultat steht das fusionierte Bild im Display zur Verfügung. Den funktionale Zusammenhang dieses Verarbeitungsprozess veranschaulicht Bild 5.6.

Da die Kommunikation zwischen den Modulen über Nachrichten erfolgt, ist es möglich, die zeitlichen Abläufe im System zu verfolgen, indem das Auftreten der entsprechenden Nachrichten protokolliert wird. So wird das Leistungsvermögen und die Größe des Gesamtsystems nur sehr gering beeinflusst [Bradford 2001]. Bild 5.7 zeigt den modularen Aufbau des Systems und die Nachrichtenkanäle über die zentrale Einheit „Dialogmanager“.

Das Zusammenspiel zwischen den Modulen „Grabber“, das für die Bildaufnahme zuständig ist,

**Tabelle 5.5:** Funktionen der einzelnen Systemmodule

Name	Funktion
Dialogmanager	Verwaltet und koordiniert die Funktionalität des Gesamtsystems und der einzelnen Module. Die Daten, die für die nachfolgenden Module relevant sind, werden an die verarbeitenden Module weitergeleitet.
Grabber	Steuert die Hardware zur Bilddigitalisierung und stellt die Kamerabilder in digitaler Form in einem systemübergreifenden Speicherbereich für die verarbeitenden Module zur Verfügung.
Anzeige	Bringt einen Speicherbereich als Bitmap in einem Fenster zur Anzeige. Der Speicher kann beispielsweise die Daten der Kamerabilder, der Zwischenbilder oder der des fusionierten Bildes enthalten.
Bedienung	Stellt die Anbindung des Bedienpaneels an das Gesamtsystem zur Verfügung. Die Tastaturkommandos werden auf Systemereignisse übersetzt, so dass eine Manipulation über die offene Schnittstelle ebenfalls möglich ist.
Berechnung Fusion	Stellt die eigentliche Kernfunktionalität des Fusionssystems zur Verfügung. Zuerst werden die Zwischenbilder berechnet, anschließend werden diese mit den statischen Informationen fusioniert.
Berechnung LUTs	Berechnet die Look Up Tabellen, die für die geometrischen Transformationen der Kamerabilder notwendig sind. Die Tabellen enthalten die Informationen zur Normalisierung, zur Ausrichtung und zur Auswahl des Bildfensters.
Protokollierung	Protokolliert das Auftreten von definierten Systemereignissen, wie beispielsweise die Bereitstellung eines neuen fusionierten Bildes.
offene Schnittstelle	Über diese Schnittstelle kann weitere externe Funktionalität an das System angebunden werden. Das Modul übersetzt die eintreffenden Nachrichten in Ereignisse, die im System bekannt sind.
Kalibrierung	Dieses Modul dient dazu, das System zu kalibrieren. Bei diesem Vorgang werden durch die Auswertung von Aufnahmen der Kalibrierplatte die Parameter zur Normalisierung und Ausrichtung bestimmt.



**Bild 5.6:** Funktionsstruktur des Fusionssystems

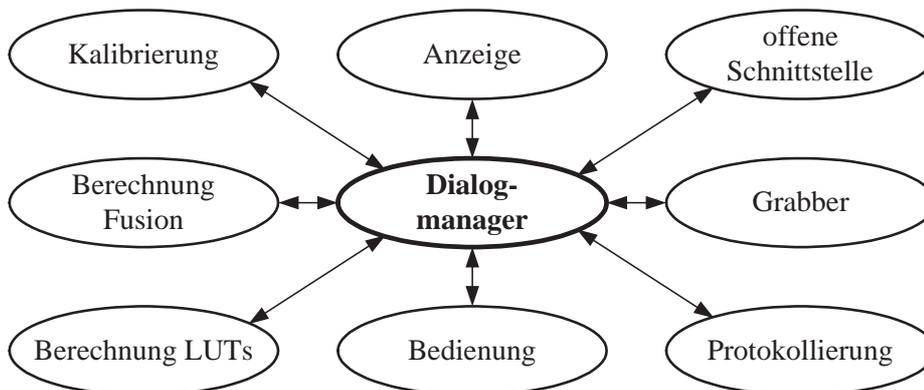
„Berechnung Fusion“, welches die Fusion der beiden Bilder ausführt, und „Anzeige“ ermöglicht die Kernfunktionalität des Systems. Die Module „Kalibrierung“ und „Berechnung LUTs<sup>24</sup>“ bestimmen die für die Fusion notwendigen Parameter.

Das aufgebaute Versuchssystem ermöglicht die Durchführung der im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Untersuchungen und ist auch für Versuche, die beispielsweise den Nutzen und das Nutzungsverhalten des Fahrers gegenüber eines Nachtsichtsystem mit Bildfusion betrachten, einsetzbar. Diese Untersuchungen könnten sich weiterhin mit der Auswirkung der Bildfusion auf die Interpretierbarkeit der dargestellten Nachtsichtbilder beschäftigen. Weiterhin kann durch diesen Aufbau das Wichtungsverhältnis zwischen den genutzten Spektralanteilen im fusionierten Bild untersucht werden. Der Aufbau ist ebenfalls dafür geeignet, die Faktoren, die die Bildqualität bestimmen, weiter zu untersuchen. Hier könnten sich Möglichkeiten für die Anpassung der eingesetzten Interpolationsfilter ergeben.

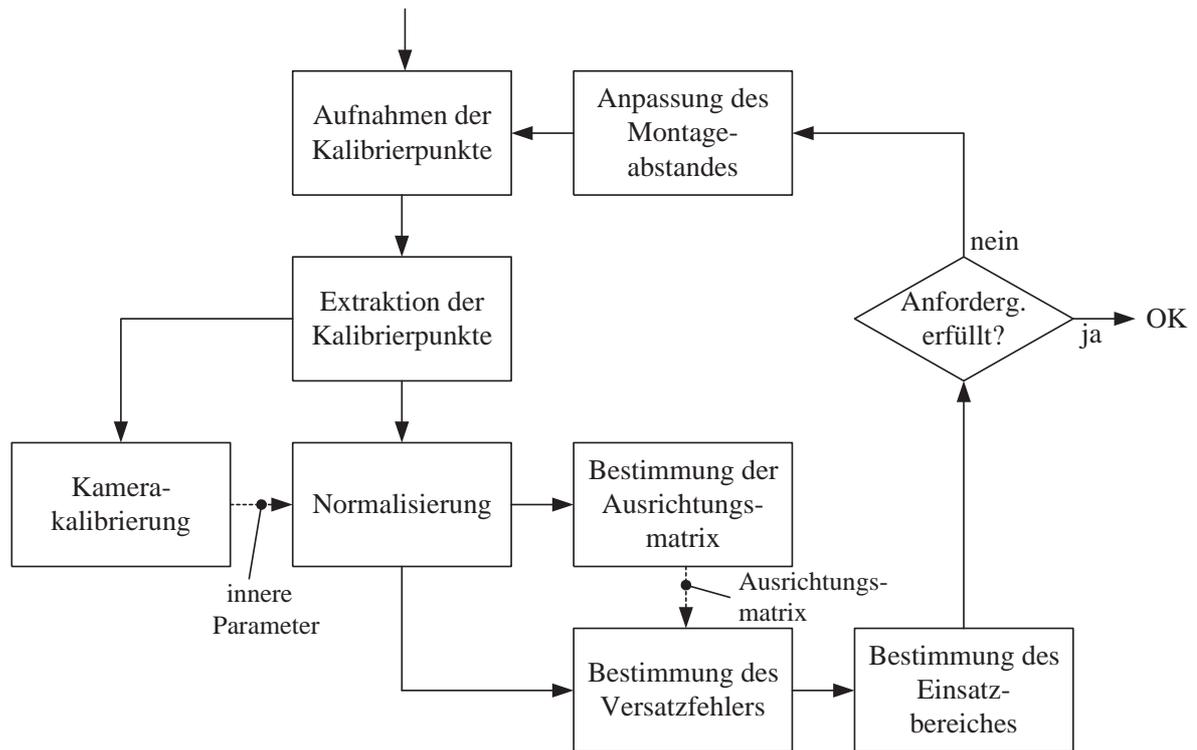
### 5.2. Ablauf der Untersuchung

Bei den Untersuchung, die zur Validierung des Versuchssystems eingesetzt werden, wird sich auf zwei Teilaspekte konzentriert. Erstens wird geklärt, in welchem Entfernungsbereich das System

<sup>24</sup>LUT: Look-Up-Table



**Bild 5.7:** Modulare Softwarearchitektur des Gesamtsystems



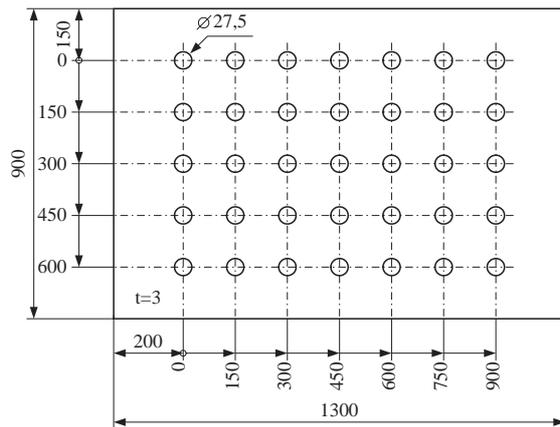
**Bild 5.8:** Prozess der Auslegung des Dualkameranystems: Zusammenhang zwischen Stufen der Untersuchung

eingesetzt werden kann, ohne dass die in Abschnitt 4 vorgestellte Obergrenze überschritten wird. Zweitens wird untersucht, ob durch das aufgebaute Versuchssystem eine Bildwiederholrate erreicht wird, die im Bereich zwischen 15Hz und 30Hz liegt.

Die einzelnen Schritte des Auslegungsprozess eines Dualkameranystems zeigt Bild 5.8 auf Seite 117.

Für diesen Prozess wird ein geeignetes Kalibrierziel benötigt, um definierte Objektpreferenzen aufzunehmen. Dazu wird im nächsten Teilabschnitt ein mögliches Kalibrierziel vorgestellt. Dieses wird durch beide Kamerasysteme aufgenommen. Aus diesen Aufnahmen werden die Positionen der Kalibriermarken bestimmt. Anschließend werden die Kamerasysteme einzeln kalibriert, bzw. die von den Herstellern angegebenen inneren Parameter einer Plausibilitätsanalyse unterzogen. Mithilfe der inneren Parameter können im Prozessschritt der Normalisierung die Markenpositionen bei idealer Projektion bestimmt werden. Ausgehend von diesen Informationen erfolgt die Berechnung der optimalen Ausrichtungsmatrix für die gewählte Entfernung. Diese Matrix wird für die Ausrichtung der Markenpositionen in unterschiedlichen Entfernungen angewendet, die den Einsatzbereich bilden. Sollte der Ausrichtungsfehler die vorgegebene Obergrenze nicht überschreiten, kann das System als korrekt ausgelegt betrachtet werden, andernfalls ist der Montageabstand anzupassen.

Zweitens ist die Bildwiederholrate ein Kriterium für die Wiedergabe als kontinuierlicher Informationsfluss. Sollte die Bildwiederholrate zu gering sein, werden die fusionierten Bilder nicht kontinuierlich, sondern als Einzelbilder wahrgenommen. Hierzu wurde in Abschnitt 5.1.1 ein Intervall



(a) Schematische Darstellung



(b) Realisierter Aufbau

**Bild 5.9:** Genutztes Kalibrierziel

vorgestellt, in dem die Bildwiederholrate liegen sollte. Dieses empfohlene Intervall erstreckt sich von 15 bis 30 Bildern pro Sekunde

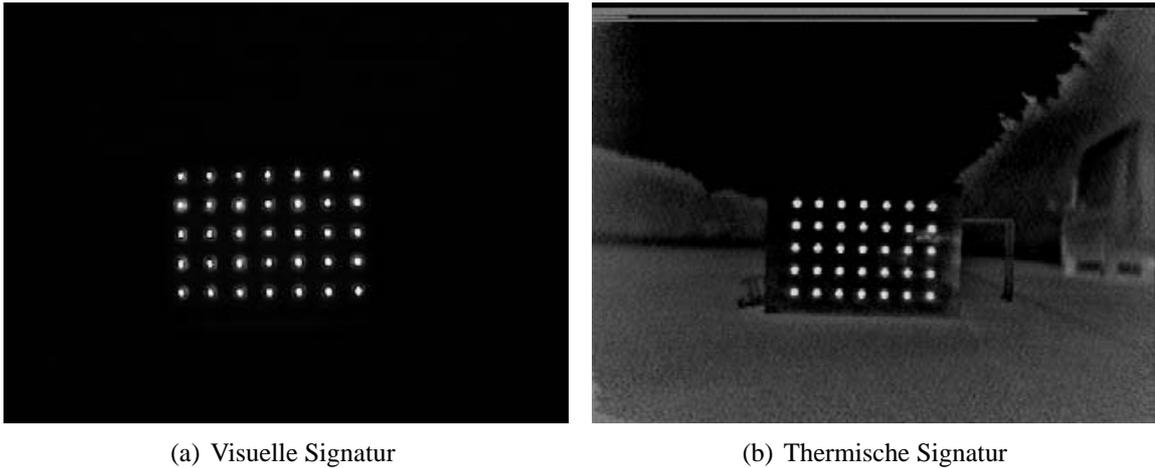
### 5.2.1. Kalibrierung der eingesetzten Kamerasysteme

**Kalibrierziel:** Für die Kalibrierung der Kamerasysteme werden Aufnahmen eines Kalibrierziel benötigt. Aus den geometrischen Beziehungen der aufgebracht Marken können in Verbindung mit der Information über die Positionierung des Kalibrierziel im Blickfeld die inneren Kameraparameter bestimmt werden [Tsai 1987, Lenz 1987].

Nach [Tsai 1987] werden für die aufgebracht Kalibriermarken rechteckige Strukturen empfohlen, wobei die Positionen der Ecken zur Kalibrierung genutzt wurden. Durch die Nutzung von elliptischen und kreisförmigen Marken kann die Bestimmung der Markenpositionen verbessert werden, da kein Grauwertübergang detektiert wird, sondern die Lage des Mittelpunktes über die Bestimmung des Schwerpunktes erfolgt [Lanser 1995]. Die Abstand zwischen den Kalibriermarken muss bekannt sein und geringe Fertigungstoleranzen aufweisen.

Da dieses Kalibrierziel sowohl für die Kalibrierung des visuellen, als auch des FIR-Kamerasystems zum Einsatz kommen soll, müssen die Marken sowohl eine visuelle als auch eine thermische Signatur aufweisen. Glühlampen als Kalibriermarken erfüllen diese Eigenschaften. In Bild 5.9 ist das Kalibrierziel schematisch und im praktischen Aufbau dargestellt.

Das eingesetzte Kalibrierziel wurde mit einer Genauigkeit von  $10\mu\text{m}$  gefertigt und erfüllt daher die Anforderungen an die geforderte Toleranz. Der Einsatz von Glühlampen als Kalibriermarken erzeugt den geforderten visuellen und thermischen Kontrast in den Kamerabildern. Um den Einsatz des Kalibrierziels für einen großen Entfernungsbereich zu ermöglichen, können die Glühlampen reihen- und spaltenweise zugeschaltet werden. Dies sichert auch für größere Entfernungen eine sichere Separierbarkeit der Marken. In Bild 5.10 sind die Aufnahmen des vorgestellten Kalibrierziels mit beiden Kamerasystemen dargestellt, wobei alle Glühlampen aktiviert sind.



**Bild 5.10:** Aufnahmen des Kalibrierziels in beiden Spektralbereichen

Für die Bestimmung des Verzeichnungskoeffizienten werden Aufnahmen benötigt, in denen die Kalibrierplatte möglichst im Randbereich positioniert ist, da hier die radialen Verzeichnungen am größten sind. Ebenfalls empfiehlt sich die Nutzung möglichst aller zur Verfügung stehenden Kalibriermarken.

**Kamerakalibrierung:** Aus diesen Bildern können nun die Positionen der Kalibriermarken extrahiert und die Punkte zur Kalibrierung der Kamerasysteme genutzt werden. Für die Bestimmung der inneren Parameter existieren in der Literatur verschiedene Ansätze [Lenz 1987, Tsai 1987, Faugeras 1992, Devernay 2001]. Da das in [Lenz 1987] vorgestellte Kameramodell in diese Arbeit Anwendung findet, wird dieses Verfahren genutzt, da es weiterhin in der Standardbibliothek HALCON zu Verfügung steht [MVTec 2000].

Die hier vorgestellte Kamerakalibrierung dient hauptsächlich zur Bestimmung des Verzeichnungsparameters der eingesetzten Optiken und weiterhin zur Überprüfung der von den Herstellern zur Verfügung gestellten Kameraparameter. Sind diese Parameter, im Gegensatz zum vorliegenden Fall, nicht oder nur unzureichend genau bekannt, empfiehlt sich eine Kamerakalibrierung im Labor, um atmosphärische Einflüsse oder Reflexionen ausschließen zu können.

### 5.2.2. Bestimmung des Einsatzbereiches des Testsystems

Für die Bestimmung der praktischen Ausrichtungsparameter (vgl. Abschnitt 3.2.4), des Fehlerverlaufes (vgl. Abschnitt 3.3.1) und als Endergebnis des Einsatzbereiches des Testsystems, sind wiederum Aufnahmen notwendig, die eindeutige Objektreferenzen in unterschiedlichen Entfernungen enthalten.

**Objektreferenzen:** Aufgrund der Spezifikation ist die Kalibrierplatte aus dem vorhergehenden Abschnitt in beiden Spektralbereichen detektierbar und in ihrem Aufbau bekannt. Daher kann

diese ebenfalls für die Bestimmung der Objektreferenzen genutzt werden, die zur Bestimmung der Ausrichtungparameter notwendig sind. Die Koordinaten der so bestimmten Punkte sind vor der Bestimmung der Ausrichtungparameter von den Verzeichnungen zu befreien.

Hier besteht jedoch eine andere Zielsetzung als bei der Bestimmung der Kameraparameter. Um eine gute Anpassung des Modells an das real vorliegende System zu ermöglichen, sind Objektreferenzen über einen großen Entfernungsbereich notwendig. Um weiterhin eine sichere Detektierbarkeit und Separierbarkeit der Marken zu gewährleisten, werden in diesem Telexperiment jede zweite Reihe und jede zweite Spalte der Kalibriermarken deaktiviert.

Um mögliche Einflüsse durch eine falsche Bestimmung des Verzeichnungsparameters auszuschließen, wird die Kalibrierplatte im zentralen Bildbereich platziert.

**Bestimmung der Ausrichtungsmatrix:** Aus den ermittelten Positionen wird nach erfolgter Normalisierung nach Gleichung (3.27) die für die entsprechende Entfernung optimale die Ausrichtungsmatrix bestimmt.

**Bestimmung der Versatzfehlers:** Der Ausrichtungsfehler wird dann für alle Kombinationen der gemessenen Entfernungen nach Gleichung (3.45) bestimmt. Hierzu wird die für die jeweilige Entfernung ermittelte optimale Ausrichtungsmatrix auf die Markenpositionen der verbleibenden Entfernungen angewendet.

**Einsatzbereich:** Der Einsatzbereich des Systems kann dann aus den praktischen Messung, beziehungsweise durch die Fortsetzung des Fehlerverlaufes über die Messgrenze hinaus mithilfe des Modells bestimmt werden. Aus den Schnittpunkten von Versatzverlauf und ermittelter Obergrenze bestimmt sich der Einsatzbereich. Da der Verlauf des Versatzfehlers von der jeweiligen Registrierentfernung abhängig ist, ist sowohl die obere als auch die untere Grenze des Einsatzbereiches von der Registrierentfernung abhängig.

### 5.2.3. Analyse der zeitlichen Abläufe im Testsystem

Für die Bestimmung der zeitlichen Abläufe im System wurde eine Protokollfunktion implementiert, die beim Auftreten eines definierten Ereignisses die Identifikationsnummer und die Prozessorzeit des Auftretens des Ereignisses aufzeichnet. Durch dieses Vorgehen werden die Zeitstempel mit einer hohen Genauigkeit aufgezeichnet. Eine vorangegangene zeitliche Kalibrierung sichert die Qualität der Messung.

Sobald das System gestartet wird, erfolgt die Aufzeichnung der zeitlichen Abläufe. Im vorliegenden Fall war die Bildwiederholfrequenz, in der die fusionierten Bilder vom System ausgegeben werden, von Interesse. Über eine möglichst lange Aufnahmezeit konnten zufällige Fehler, wie beispielsweise Verzögerungen durch das Betriebssystem des PCs, ausgeschlossen werden. Fehler, die

---

**Tabelle 5.6:** Zeitlich protokollierbare Ereignisse

Position	Name	Bedeutung
1	VSyn1	Eintreffen eines Halbbildes von Kamerasystem 1
2	VSyn2	Eintreffen eines Halbbildes von Kamerasystem 2
3	FusionEnde	Bereitstellung eines fusionierten Bildes
4	MetaLayer1End	Bild Kamerasystem 1 geometrisch vorverarbeitet
5	MetaLayer2End	Bild Kamerasystem 2 geometrisch vorverarbeitet

durch das System bedingt sind, können durch dieses Vorgehen nicht abgeschätzt werden. In Tabelle 5.6 sind die wichtigsten Ereignisse zusammengefasst, die hinsichtlich des zeitlichen Auftretens aufgezeichnet werden können.

Zur Kalibrierung der Zeitmessung wird als Basis die Periode der beiden Kamerasysteme genutzt, da diese als präzise und bekannt angenommen werden kann. Daher werden zu Beginn der Messung die zeitlichen Abstände zwischen den Halbbildern beider Kamerasysteme bestimmt, um daraus die Beziehung zwischen der Zeitbasis des PCs und der Kamerasysteme zu ermitteln. Die Kalibrierung erfolgt ohne Verarbeitung der Bildinformation, um Beeinflussungen durch diese Berechnungen auszuschließen.

Anschließend kann nach dieser Kalibrierung die Bestimmung des zeitlichen Abstandes zwischen zwei fusionierten Bildern bestimmt werden. Dazu werden die zu protokollierenden Signale auf der Zeitbasis des PCs aufgezeichnet und mithilfe des während der Kalibrierung ermittelten Zusammenhangs in die Zeitbasis der Kamerasysteme übertragen. Die Verteilung dieser Zeiten wird analysiert und mit den geforderten Werten verglichen.

### 5.3. Fazit

In diesem Kapitel wurden der Versuchsträger und der Ablauf der Untersuchungen zur Kalibrierung und Validierung dieses Versuchsaufbaus vorgestellt. Im Rahmen der Validierung werden der Einsatzbereich des Versuchsträgers und die Bildwiederholrate untersucht und mit den theoretischen Werten verglichen. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen enthält das nächste Kapitel.

Im ersten Teil dieses Kapitels wurde die Hard- und Softwarearchitektur des Versuchsträgers vorgestellt (vgl. Abschnitte 5.1.2 und 5.1.4). Die funktionsorientierte Hard- und Softwarearchitektur wurden basierend auf der Betrachtung der zeitlichen Abläufe im System ausgelegt und optimiert. Es zeigte sich, dass sich durch die Bildwiederholrate der eingesetzten Kamerasysteme der zeitkritische Pfad gegeben ist. Um die geforderte Bildwiederholrate von 15 bis 30Hz zu erreichen, wurde die Berechnung des fusionierten Bildes hinsichtlich der Verarbeitungszeit optimiert.

Dazu wurde eine Systemarchitektur vorgestellt, bei der die Prozessschritte der geometrische Vorverarbeitung und der Bildfusion durch eine gewichtete Summe realisiert werden. Die Informationen über die zu verarbeitenden Bildinformationen und deren Wichtung wird dabei in Look-Up-Tabellen abgelegt. Die Eigenschaften dieser Architektur wurde in Abschnitt 5.1.3 diskutiert.

Durch diese skalierbare und offene Systemarchitektur wird die Funktionalität der Bildfusion dargestellt. Durch eine offene Schnittstelle kann das Gesamtsystem durch externe Funktionalität erweitert werden, um beispielsweise die Bildfusion in Abhängigkeit von Fahrdynamikenngrößen zu parametrisieren.

Bezüglich der Untersuchungen wurden der Ablauf des Auslegungsprozess und die Überprüfung der zeitlichen Abläufe vorgestellt. Der Auslegungsprozess wird in die Teilschritte der Aufnahme der Kalibriermarken, der Markenextraktion, der Normalisierung, der Bestimmung der Ausrichtungsmatrix und der Betrachtung des Einsatzbereiches gegliedert.

Für die Untersuchung des Auslegungsprozesses wurde ein spezielles Kalibrierziel entwickelt, dass für die Kalibrierung beider Kamerasysteme genutzt werden kann, da es sowohl visuelle als auch thermische Signaturen erzeugt. Da der Prozessschritt der Normalisierung und die Betrachtung des Einsatzbereiches unterschiedliche Zielsetzungen aufweisen, wurde das Design entsprechend angepasst. Anhand der vorgestellten Untersuchung wird das Vorgehen zur Auslegung beliebiger Kombinationen aus Kamerasystemen demonstriert.

Durch die Betrachtung der zeitlichen Abläufe im System wird untersucht, ob durch die vorgeschlagene Architektur auf PC-Basis die geforderte Bildwiederholrate erreicht werden kann.

---

## 6. Ergebnisse der Untersuchung des Testsystems

### 6.1. Parameter der eingesetzten Kamerasysteme

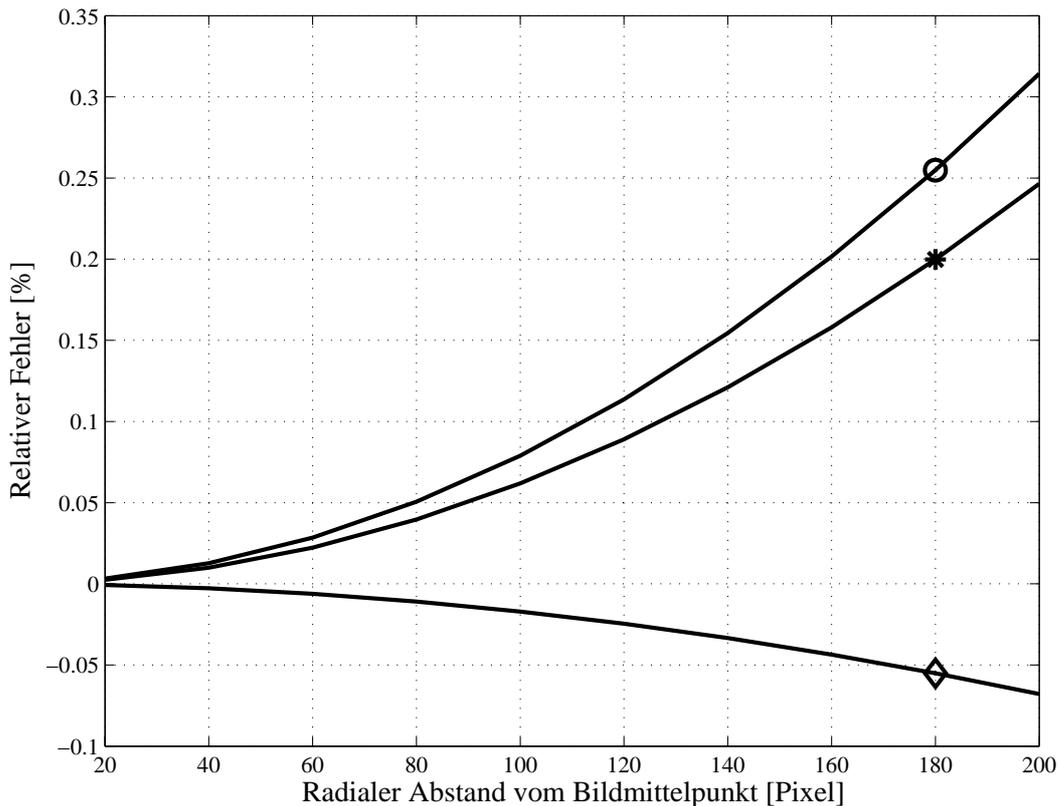
Für die Bestimmung und anschließenden Plausibilisierung der Kameraparameter, die eine zentrale Rolle bei der Fehlerbetrachtung spielen, wurden Aufnahmen der vorgestellten Kalibrierplatte genutzt. Radiale Verzeichnungen, wie sie im Rahmen dieser Arbeit betrachtet werden, haben ihren größten Einfluss am Randbereich bzw. in den Ecken des Kamerabildes. Aus diesem Grund wurde die Kalibrierplatte in den vier Ecken sowie am oberen und unteren Rand mittig positioniert, um die Bereiche mit den größten radialen Verzeichnungen zur Parameterbestimmung zu nutzen. Für diese Messungen kamen alle 35 Kalibrierpunkte zum Einsatz, um die mit dieser Kalibrierplatte maximal erreichbaren Markenpositionen zu erhalten. Bei der Kalibrierung wurde sich hauptsächlich auf die Verzeichnungskoeffizienten konzentriert, da diese Parameter den nichtlinearen Fehleranteil bilden, der durch das lineare Modell nicht approximiert werden kann. Die Bestimmung der weiteren inneren Parameter erfolgte, um die Herstellerangaben zu verifizieren.

Tabelle 6.1 zeigt die durch die Kalibrierung ermittelten inneren Kameraparameter. Der Vergleich mit den Angaben der Hersteller aus Tabelle 3.4 zeigt eine sehr gute Deckung. Für die Verzeichnungskoeffizienten gibt es für beide Kamerasysteme keine Referenzangabe, die zur Bewertung der Anpassungsgüte herangezogen werden kann. Daher wird die Güte der Anpassung des Kameramodells an die gegebenen realen Kamerasysteme durch den mittleren Fehler ausgedrückt [MVTec 2000]. Die Aussage dieses Fehlers ist in [MVTec 2000] nicht genauer angegeben. Daher wird angenommen, dass dieser Wert die mittlere Abweichung zwischen den Koordinaten der gemessenen Punkte und den durch das genutzte Modell berechneten Koordinaten ausdrückt. Insofern sind durchschnittliche Abweichungen von unter 1 Pixel mit Quantisierungsfehlern zu erklären; größere Abweichungen lassen auf Fehler bei der Messung oder der Wahl des Kameramodells schließen.

In Bild 6.1 ist der Verlauf des relativen Fehlers bezogen auf ein verzeichnungsfreies Kamerasystem mit denselben inneren Parametern dargestellt. Beide Graphen zeigen, dass für die genutzten

**Tabelle 6.1:** Ermittelte Parameter der genutzten Kamerasysteme (für die Herstellerangaben vgl. Tabelle 3.4 aus Abschnitt 3.4.2)

	<b>Kamerasystem 1</b>	<b>Kamerasystem 2</b>
empfindlicher Spektralbereich	fernes Infrarot	visuell
physikalische Auflösung	320( <i>h</i> ) × 240( <i>v</i> ) Pixel	768( <i>h</i> ) × 494( <i>v</i> ) Pixel
logische Auflösung	320( <i>h</i> ) × 240( <i>v</i> ) Pixel	320( <i>h</i> ) × 240( <i>v</i> ) Pixel
Brennweite $f_i$	24.1mm	12.5mm
Blickwinkel (Öffnungswinkel)	ca. 36°( <i>h</i> ) × 27°( <i>v</i> )	ca. 29°( <i>h</i> ) × 22°( <i>v</i> )
physikalische Pixelgröße	(50μm, 50μm)	(8.4μm, 9.8μm)
logische Pixelgröße ( $D_i^x, D_i^y$ )	(50μm, 50μm)	(20.2μm, 20.2μm)
Verzeichnungsparameter $\kappa_i$	-38m <sup>-2</sup>	-305m <sup>-2</sup>
mittlerer Anpassungsfehler	(0, 68; 0, 68) Pixel	(0, 64; 0, 64) Pixel



**Bild 6.1:** Verlauf des Relativfehlers zwischen realem und verzeichnungsfreiem Kamerasystem (\* - visuelles Kamerasystem,  $\kappa_2 = -305m^{-2}$ , o - FIR-Kamerasystem  $\kappa_1 = -38m^{-2}$ , ◇ - Differenz)

Kamerasysteme eine Vernachlässigung der Verzeichnungen aufgrund des sehr geringen relativen Fehlers von unter 0,65% im Randbereich durchaus zulässig ist, was die Annahme aus Abschnitt 3.4 stützt.

Desweiteren ist zu beachten, dass für den Versatzfehler die Differenz zwischen beiden Verzeichnungsfehlern von Interesse ist; dieser Abstand beträgt in diesem Fall weniger als 0,1%, und ist damit geringer als der Abstand zur idealen Projektion, der 0,3% für das FIR-Kamerasystem und 0,25% für das visuelle Kamerasystem beträgt. Übertragen auf absolute Fehler bedeutet dies für die Differenz ein Unterschied von 0,2 Pixel. Dies bedeutet, dass sich die beiden Kamerasysteme hinsichtlich der Verzeichnungen nahezu ausgleichen. Die angenommene Vernachlässigung der Verzeichnungen ist für dieses Dualkamerasystem durchaus zulässig, da durch Veränderungen der externen Parameter größere Abweichungen entstehen (vgl. Tabelle 3.3).

Bei anderen Kombinationen von Kamerasystemen, besonders bei Systemen mit sehr großen Öffnungswinkeln, ist der Einfluss der Verzeichnungen zu analysieren und gegebenenfalls zu berücksichtigen.

Mithilfe dieser verifizierten Parameter können aus den Messwerten für die entsprechenden Entfernungsbereiche die Positionen der Marken bei einer verzeichnungsfreien Projektion bestimmt und aus denen im nächsten Schritt die jeweils optimale Ausrichtungsmatrix und der Ausrichtungsfehler berechnet werden. Da für die jeweilige Entfernung mehrere Messungen zur Verfügung stehen,

kann der Messfehler über die Standardabweichung abgeschätzt werden.

## 6.2. Gegenüberstellung von Modell und Messung

Der Einsatzbereich des Testsystems bestimmt sich aus dem Verlauf des Versatzfehlers über der Objektentfernung in Verbindung mit der ermittelten Obergrenze für den Versatz. Bei der Gegenüberstellung von Modell und Messung werden die entsprechenden Ausrichtungparameter und der Verlauf des Versatzfehlers verglichen. Zuerst erfolgt die Diskussion des Vergleiches der Ausrichtungparameter. Dieses Kriterium des Versatzfehlers wird im zweiten Unterabschnitt betrachtet.

Der Versatzfehlers ist für die Bewertung eines Dualkamerasystems das entscheidende Kriterium, da dies die Größe ist, die vom Betrachter wahrgenommen wird. Über die Ausrichtungparameter können detailliert Aussagen über die Anpassung zwischen Modell und Messung erfolgen, da sich im Versatzfehler mehrere Fehlerquellen nicht separierbar überlagern (vgl. Abschnitt 3.4.1).

### 6.2.1. Ausrichtungparameter

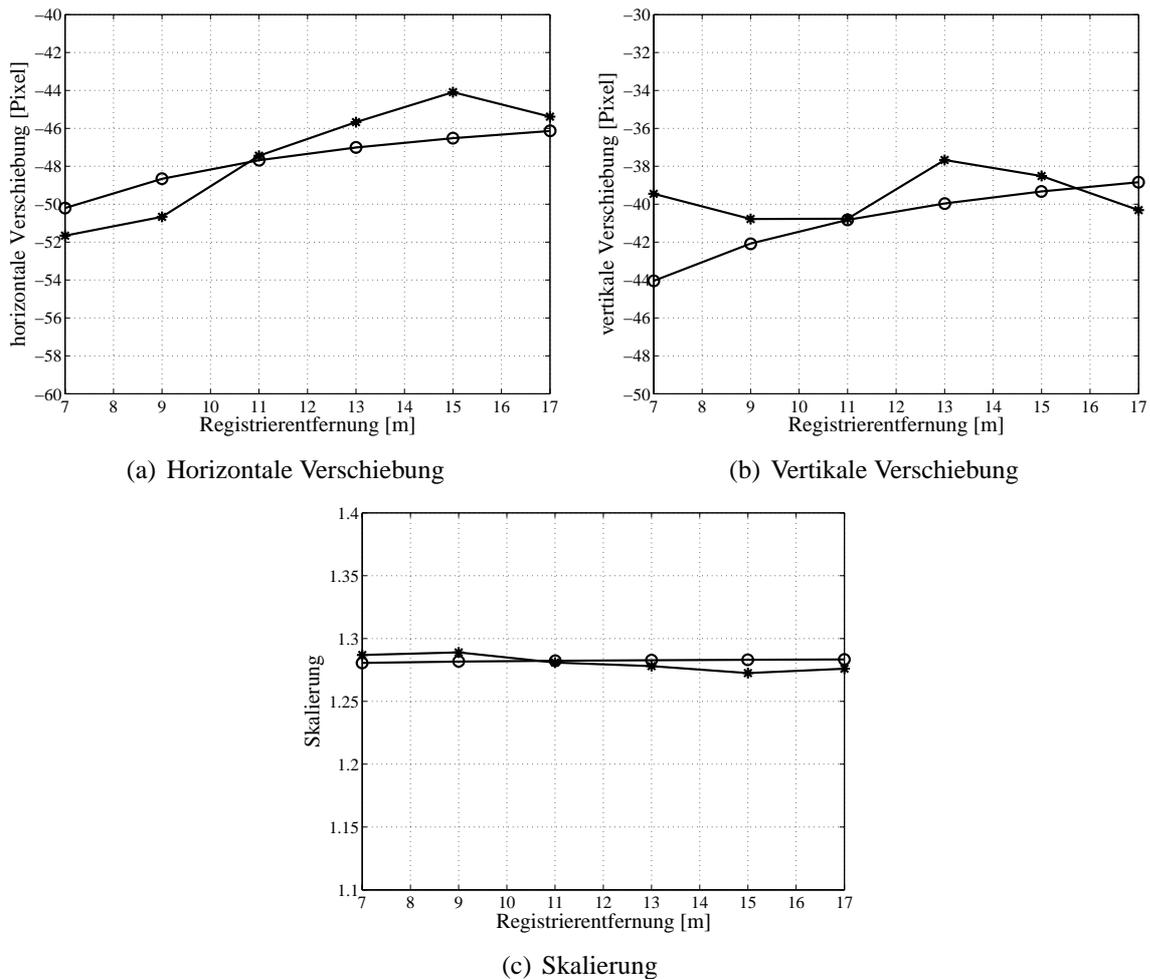
Aus den Positionen der Kalibriermarken werden die Koordinaten bei verzeichnungsfreier Projektion bestimmt. Anschließend können analog zu den Betrachtungen in Kapitel 3 daraus sowohl die optimale Ausrichtungsmatrix für die jeweilige Entfernung als auch der Fehlerverlauf über den gesamten Objektentfernungsbereich bestimmt werden.

Aus der Ausrichtungsmatrix werden die Ausrichtungparameter nach Abschnitt 3.2.3 bestimmt. In Bild 6.2 sind die theoretischen und praktischen Ausrichtungparameter für die gegebene Anordnung gegenübergestellt. Dabei entsprechen die theoretischen Ausrichtungparameter, den durch das Modell bestimmten Parameter. Die Werte der praktischen Ausrichtungparameter wurde aus der Messung bestimmt.

Für die drei betrachteten Parameter zeigt sich das gleiche tendenzielle Verhalten. Eine qualitative und quantitative Diskussion der möglichen Fehlerquellen erfolgt in Abschnitt 6.2.3. An dieser Stelle sein auf die möglichen Fehlerquellen hingewiesen: *i)* Fehler bei der Positionsbestimmung der Kalibriermarken im Bild, *ii)* Fehler bei der Bestimmung des Montageabstandes der Kamerasysteme und *iii)* Fehler bei der Bestimmung der Entfernung zwischen der Kalibrierplatte und den Kamerasystemen.

Bei der Skalierung ist eine maximale absolute Abweichung in der zweiten Nachkommastelle zu verzeichnen. Dies entspricht einem relativen Fehler von unter 2%.

Bei der horizontalen und vertikalen Verschiebung sind ebenfalls Abweichungen zwischen idealem und realem Verlauf zu verzeichnen. Hier ist jedoch zu beachten, dass bei der Aufnahme der Bilder zur Kalibrierung eine Eigenbewegung der Versuchsträgers nicht vollständig auszuschließen



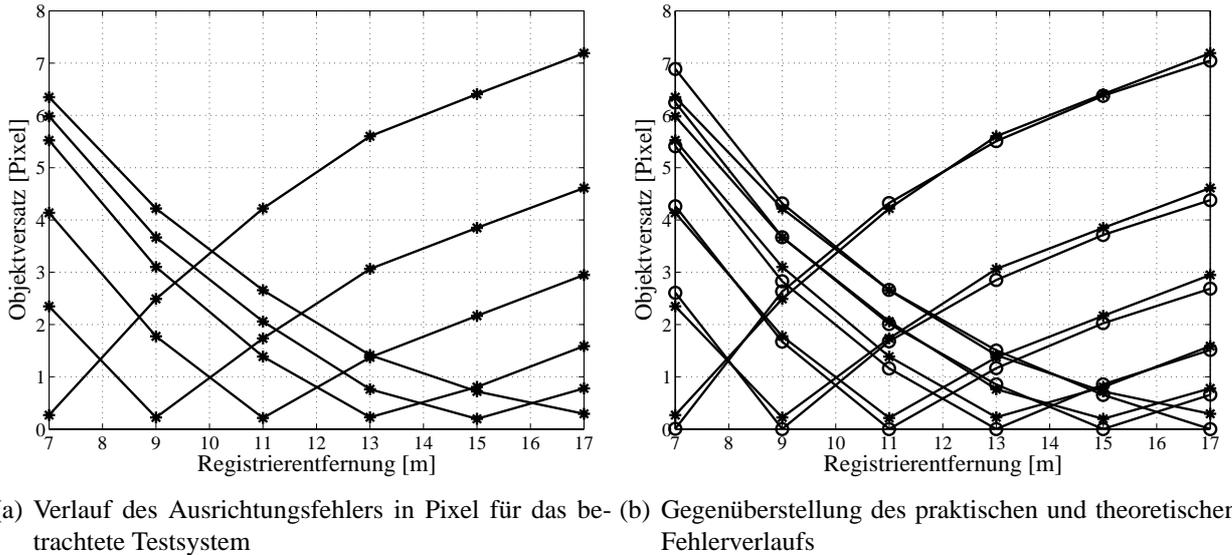
**Bild 6.2:** Gegenüberstellung der theoretischen und der praktischen Ausrichtungsparameter über der Registrierentfernung (○ - theoretischer Verlauf, \* - praktischer Verlauf)

war und dies aufgrund der zeitlich versetzten Aufnahme zu einer Beeinflussung der Ausrichtungsmatrix führen kann. Dieser Einfluss nimmt aufgrund der Winkelabhängigkeit mit der Entfernung zu.

Für die qualitative Beurteilung des Systems ist desweiteren ohnehin der Versatzfehler interessanter, da dieser die Bildqualität bestimmt. Die Diskussion dieses Kriteriums erfolgt im nächsten Abschnitt.

### 6.2.2. Verlauf des Versatzfehlers

Das zweite Vergleichskriterium stellt der Versatzfehler dar. Bild 6.3(a) zeigt den Mittelwert des experimentell ermittelten Verlaufs für den Versatzfehler. Basierend auf den Montagepositionen der beiden Kamerasysteme kann der Verlauf des Versatzfehlers anhand des Modells simuliert werden. Dieser Fehlerverlauf ist in Bild 6.3(b) vergleichend zum praktischen Verlauf (Mittelwert) dargestellt.



**Bild 6.3:** Ausrichtungsfehler für das betrachtete Testsystem ( $\circ$  - theoretischer Verlauf,  $*$  - praktischer Verlauf)

Für die aufgenommenen Bilder kann auch an den Punkten der Registrierentfernung keine versatzfreie Ausrichtung der beiden Kamerabilder zueinander erreicht werden. Dies ist auf Fehler höherer Ordnung, wie beispielsweise Fehler bei der Kalibrierung und der Positionsbestimmung der Marken zurückzuführen. In diesem Beispiel beträgt der maximale Fehler höherer Ordnung 0,25 Pixel.

Zur Überprüfung der Übereinstimmung ist in Tabelle 6.2 der Korrelationskoeffizient zwischen theoretischem und praktischem Fehler für die untersuchten Registrierentfernungen zusammengestellt.

Die Korrelationskoeffizienten zeigen eine sehr große lineare Abhängigkeit zwischen beiden Fehlerverläufen bei den unterschiedlichen Entfernungen. Erweitert auf alle Messpunkte führt dies ebenfalls zu einer großen Korrelation.

Im vorliegenden Fall beträgt der maximale Unterschied zwischen theoretischem und experimentell ermittelten Versatzfehler 0,5 Pixel. Im Mittel besteht ein Unterschied von 0,15 Pixel. Diese Werte zeigen eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Modell und Messung.

Die Gültigkeit des Modells wurde bereits in Abschnitt 3.4 überprüft und bestätigt. Durch das durchgeführte Experiment wurde zusätzlich bestätigt, dass die für die Simulation genutzten Parameter für die Montageposition der Kamerasysteme eine Nachbildung des tatsächlichen Verlaufs des Versatzfehlers erlauben. Somit ist die Annahme gültig, dass das so parametrisierte Dualkammermodell auch für Entfernungen jenseits der maximalen Messentfernung von 15m gültig ist. Damit

**Tabelle 6.2:** Vergleich zwischen dem theoretischem und praktischen Pixelversatz durch die Korrelationskoeffizienten

$Z_{REG}$	7m	9m	11m	13m	15m
$\rho_{t,p}(Z_{REG})$	1.00	0.99	1.00	1.00	1.00

**Tabelle 6.3:** Standardabweichungen der Markenpositionen für beide Kamerasysteme

	<b>Kamerasystem 1</b>	<b>Kamerasystem 2</b>
horizontale Koordinate	0,30 <i>Pixel</i>	0,15 <i>Pixel</i>
vertikale Koordinate	0,29 <i>Pixel</i>	0,33 <i>Pixel</i>

kann zur weiteren Betrachtung auch das Modell herangezogen werden.

### 6.2.3. Fehlerbetrachtung

Im vorangegangenen Abschnitt wurde der Zusammenhang zwischen Modell und Messung anhand idealer Verhältnisse (Modell) und anhand der ermittelten Mittelwerte (Messung) diskutiert. Die Diskussion des Einflusses von Fehlerquellen wird Gegenstand dieses Abschnitts sein.

Bei den angestellten Betrachtungen zur praktischen Bestimmung der Ausrichtungparameter und des Versatzfehlers gibt es hauptsächlich drei Fehlerquellen, die sich auf die Genauigkeit der Ergebnisse niederschlagen: *i)* die Fehler, die bei der Bestimmung der Marken systembedingt und zufällig auftreten, *ii)* Messfehler die bei der Bestimmung der Objektentfernungen entstehen und *iii)* Messfehler bei der Bestimmung der Montageparameter. Die inneren Parameter werden nicht weiter betrachtet, da diese als konstant über die Zeit angesehen werden.

Unterschiede in der Positionsbestimmung der Marken resultieren vorrangig aus dem überlagerten Rauschen während der Bildaufnahme. Da die Lagebestimmung der Marken durch Vergleich mit einem Template<sup>25</sup> erfolgt, das das Markenaussehen nachbildet, können leichte Grauwertverschiebungen zu leichten Positionsverschiebungen führen. Diese Verschiebungen können als normalverteilt angesehen werden.

Zur Abschätzung, wie diese Messfehler die Bestimmung der Ausrichtungparameter und des Fehlerverlaufes beeinflussen, wird zuerst geklärt, wie groß die Messfehler sind. Tabelle 6.3 zeigt die Standardabweichungen der Markenpositionen für beide Kamerasysteme.

Diese Fehler pflanzen sich bei der Bestimmung auf die praktischen Ausrichtungparameter und den praktischen Fehlerverlauf fort.

Desweiteren sind bei der Gegenüberstellung von Modell und Messung die Fehler zu berücksichtigen, die durch eine fehlerhafte Bestimmung der Entfernung zwischen Objekt und Kamerasystem entstehen. Diese wirken sich auf die Genauigkeit der Anpassung des Modells aus; die praktischen Messwerte sind davon unabhängig. Für diese Fehler können im Gegensatz zur Positionsbestimmung der Kalibriermarken Obergrenzen angenommen werden. Diese Annahmen, die plausiblen Schätzungen zugrunde liegen, sind in Tabelle 6.4 zusammengefasst.

Im folgenden wird dargestellt, wie sich diese Fehler auf die Gegenüberstellung auswirken.

<sup>25</sup>Bezeichnung für eine angepasste Filtermaske

**Tabelle 6.4:** Angenommene Messfehler bei der Bestimmung der Objektentfernung und des Montageabstandes

	Arbeitspunkt	Fehlerintervall
horizontaler Montageabstand $T_x$	8,5cm	$\pm 0,5cm$
vertikaler Montageabstand $T_y$	10,5cm	$\pm 0,5cm$
Montageabstand in der Tiefe $T_z$	2cm	$\pm 1,0cm$
Objektentfernung $Z_{OBJ}$	7, 9, ..., 17m	$\pm 10cm$

**Fehlereinfluss auf die Ausrichtungparameter:** Zuerst wird untersucht, wie sich die Messunsicherheit auf die Ausrichtungparameter auswirkt. In Tabelle 6.5 sind die Maximalwerte der theoretischen und Standardabweichung des praktischen Fehlers gegenübergestellt.

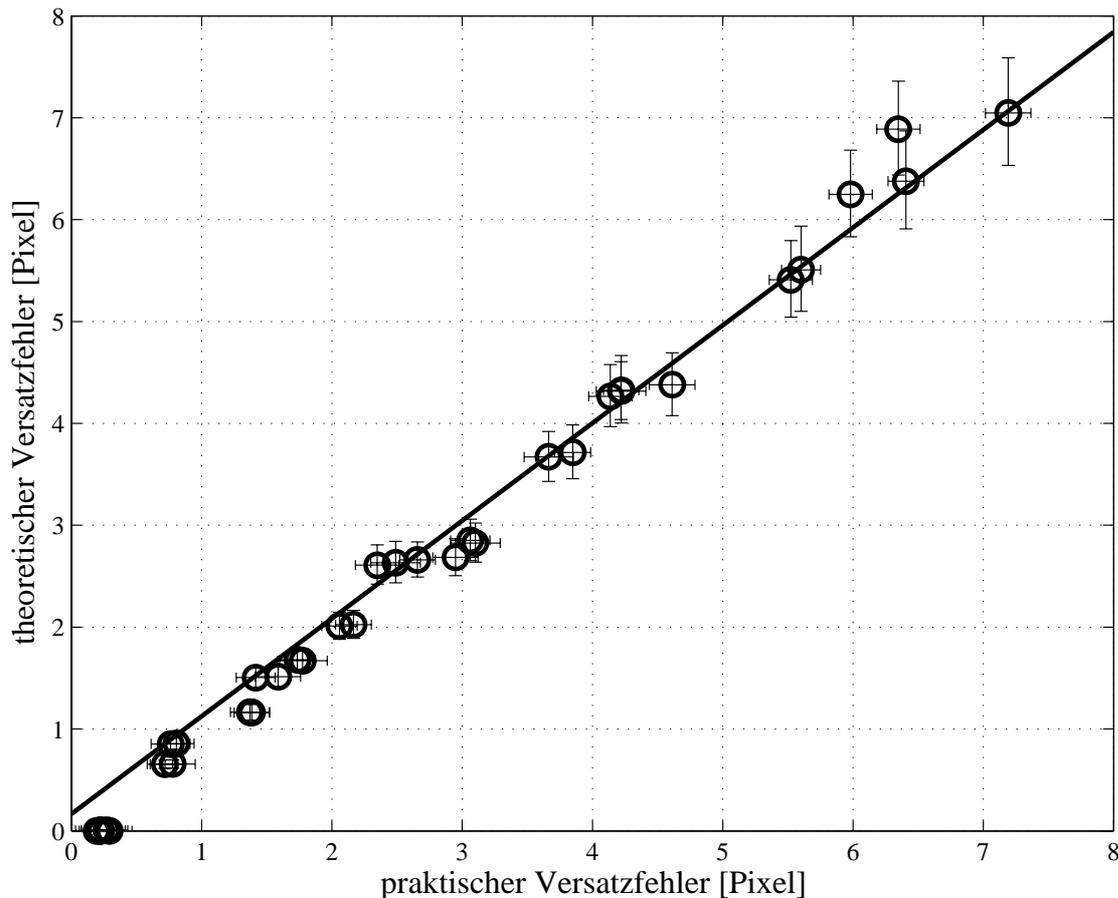
Tabelle 6.5 zeigt bei der Entwicklung des theoretischen Fehlers ein Verhalten, das vom Modell vorgegeben und auch anschaulich erklärbar ist. Der Fehler entwickelt sich reziprok zur Objektentfernung und nimmt daher mit zunehmender Entfernung ab, somit wirken sich Messfehler in größeren Entfernungen weniger stark aus. Die mit der Entfernung ansteigende Entwicklung des praktischen Fehlers ist somit auf Messfehler bei der Bestimmung der Markenpositionen zurückzuführen. Dies begründet auch die Entscheidung, keine Messwerte jenseits der 17m in die Betrachtungen einfließen zu lassen, da die Genauigkeit der Positionsbestimmung mit der Entfernung abnimmt.

**Fehlereinfluss auf den Fehlerverlauf:** Analog erfolgt die Betrachtung des Fehlereinflusses auf den Verlauf des Versatzfehlers. Auch hier werden wieder der modellierte und experimentell ermittelte Ausrichtungsfehler gegenübergestellt.

Zur Gegenüberstellung ist in Bild 6.4 der theoretische Versatz über den praktischen Versatz aufgetragen, wobei zusätzlich die ermittelten Fehlergrenzen eingezeichnet sind. Die Ausgleichsgerade zwischen beiden Ausrichtungsfehlern liegen in den ermittelten Grenzen der Messfehler.

**Tabelle 6.5:** Praktischer Fehler und theoretischer Maximalfehler [Pixel] bei der Bestimmung der Ausrichtungparameter

	Entfernung [m]					
	7	9	11	13	15	17
<b>Skalierung</b>						
praktischer Fehler $\sigma_s \cdot 10^3$	0.72	1.33	1.49	1.60	1.94	2.56
theoretischer Fehler $\Delta s \cdot 10^3$	1.96	1.51	1.22	1.03	0.89	0.78
<b>hor. Verschiebung</b>						
praktischer Fehler $\sigma_{t_x}$	0.25	0.54	0.75	0.77	1.03	0.80
theoretischer Fehler	0.30	0.21	0.16	0.13	0.10	0.09
<b>vert. Verschiebung</b>						
praktischer Fehler $\sigma_{t_y}$	0.24	0.51	0.21	0.24	0.21	0.68
theoretischer Fehler	0.41	0.28	0.22	0.17	0.14	0.12



**Bild 6.4:** Gegenüberstellung von praktischem und theoretischem Versatzfehler (Darstellung der entsprechenden Ausgleichsgerade sowie der Intervalle der praktischen und theoretischen Messfehler)

**Auswertung:** Die Fehlerbetrachtungen liefern folgende grundsätzliche Aussagen: *i)* die gemessenen Modellparameter ermöglichen eine Anpassung des Modells an die real vorliegenden Bedingungen und lassen somit eine Fortsetzung des Modells auf Bereiche jenseits der experimentell betrachteten Grenzen zu und *ii)* für den Vergleich von Modell und Messung ist vorrangig der Fehlerverlauf geeignet, da dies die vom Anwender bewertete Größe ist. Hierbei ist darauf zu achten, bei der Auslegung ein möglichst großes Entfernungsintervall abzudecken, wobei auf die Genauigkeit der Positionsbestimmung der Kalibriermarken zu achten ist.

Denn bei der Auslegung eines solchen Systems sind die relative Beziehungen zwischen in den Kamerabildern dargestellten Objekte von Interesse und weniger die absoluten Größen der Ausrichtungsparameter. Vom Anwender wird der Objektversatz und nicht der Skalierungsfaktor oder der Verschiebungsvektor wahrgenommen.

### 6.3. Nutzungsbereich des Testsystems

Da der direkte Abstand zwischen den optischen Achsen beider Kamerasysteme mit 13,5 cm unterhalb der in Tabelle 5.2 zusammengefassten Grenzen liegt, werden in diesem Abschnitt die mögli-

**Tabelle 6.6:** Einsatzbereiche des Testsystems für ausgewählte Registrierentfernungen bei 2 Pixel Maximalversatz

$Z_{REG}[m]$	gefordert		realisiert	
	$Z_{MIN}^g[m]$	$Z_{MAX}^g[m]$	$Z_{MIN}[m]$	$Z_{MAX}[m]$
22.00	15.00	40.00	15.00	45.00
30.00	20.00	60.00	18.00	103.00
40.00	25.00	100.00	21.00	780.00

chen Nutzungsbereiche in Abhängigkeit der Registrierentfernung zusammengestellt.

Tabelle 6.6 zeigt dabei für ausgewählte Registrierentfernungen die minimale und maximale Entfernungsgrenze. Dabei werden die mit dem Testsystem realisierten Grenzen des Nutzungsbereiches den exemplarisch geforderten Grenzen gegenübergestellt. Diese Grenzen sind so gewählt, dass diese drei Auslegungen drei mögliche Szenarien abdecken. Beispielsweise könnte der erste Nutzungsbereich für einen Einsatz in der Stadt, der zweite Bereich für einen Einsatz auf Landstraßen und der dritte Bereich für einen Einsatz auf einer Autobahn gewählt werden.

Tabelle 6.6 zeigt, dass durch die Auslegungsvorschrift der Einsatzbereich des Testsystems abgedeckt wird. Vielmehr ist aufgrund der günstigen Anordnung der Kamerasysteme ein größerer Einsatzbereich realisierbar, als zuvor gefordert.

In Tabelle 6.7 sind die Versatzfehler an den Einsatzbereichsgrenzen dargestellt. Es zeigt sich, dass die Fehler an der unteren und oberen Entfernung nahezu identisch sind, die Abweichungen resultieren aus der geringen Präzision bei der Bereichsbestimmung.

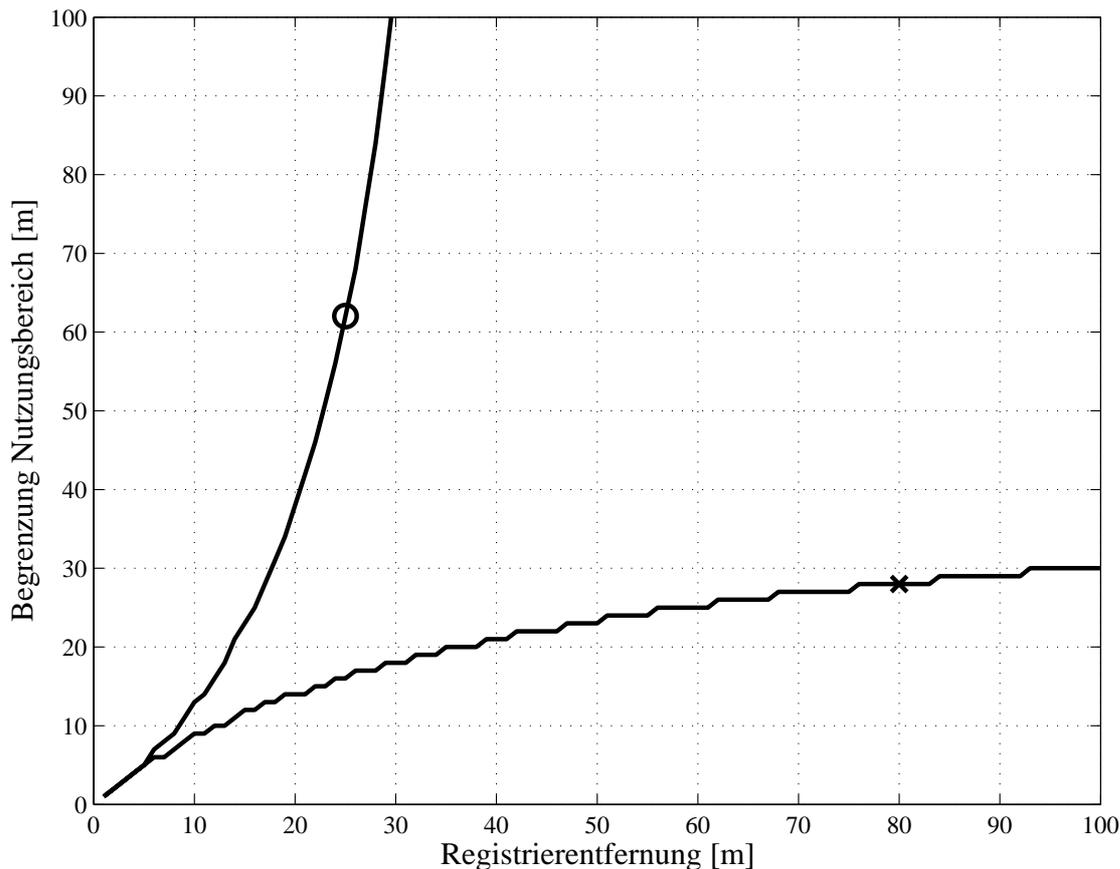
In keinem der drei Einsatzbereiche wird die gegebene Obergrenze des Versatzfehlers erreicht. Da dieser Fehler durch die Geometrie Kennzahl  $K_{Error}$  des Gesamtsystems bestimmt wird, besteht bei dem vorliegenden Versuchssystem noch Potenzial bezüglich eines größeren Einsatzbereiches oder eines größeren radialen Montageabstandes.

In Bild 6.5 sind die obere und die untere Grenze für den Einsatzbereich in Abhängigkeit der Registrierentfernungen  $Z_{REG}$  dargestellt, wobei die in Kapitel 4 bestimmte Obergrenze von 2 Pixel Maximalversatz genutzt wurde.

Wie Bild 6.5 veranschaulicht, ermöglicht das Einmessen des Systems auf die Entfernung von  $Z_{REG} = 25m - 30m$  die besten Einsatzmöglichkeiten bezüglich des Entfernungsbereichs. Eine Vergrößerung der Registrierentfernung würde zu einer Verbesserung im Fernbereich führen,

**Tabelle 6.7:** Fehler an den Grenzen der Einsatzbereiche

$Z_{REG}[m]$	Fehler an den geforderten Grenzen		Fehler an den realisierten Grenzen	
	bei $Z_{MIN}^g[Pixel]$	bei $Z_{MAX}^g[Pixel]$	bei $Z_{MIN}[Pixel]$	bei $Z_{MAX}[Pixel]$
22.00	1.79	1.73	1.79	1.96
30.00	1.40	1.41	1.87	1.99
40.00	1.26	1.27	1.90	1.55



**Bild 6.5:** Einsatzbereich des betrachteten Dualkamerasystems (× - untere Grenze, ○ - obere Grenze des Einsatzbereiches)

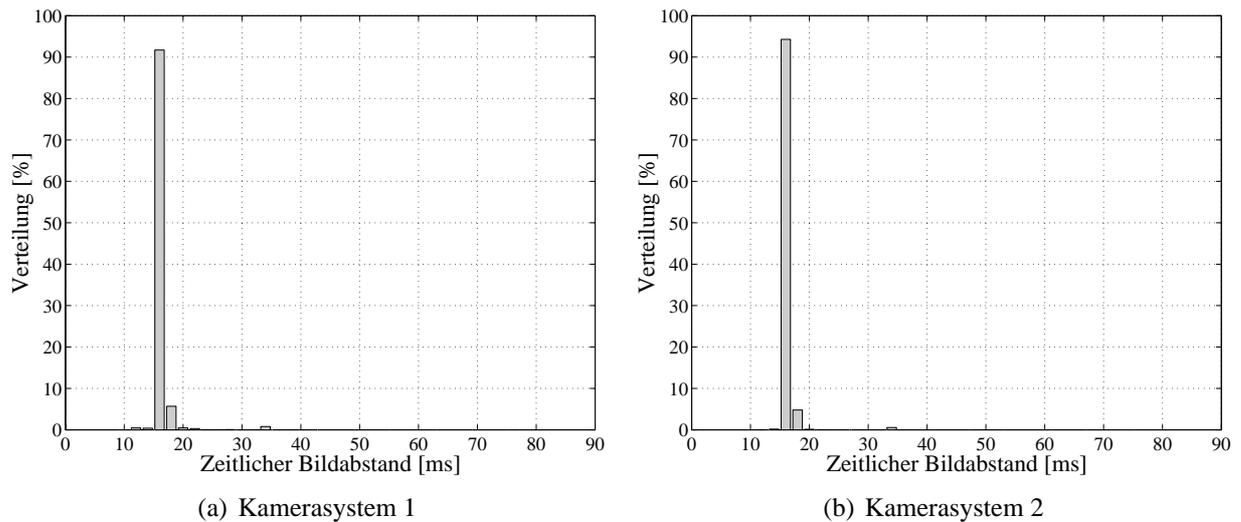
aber mit einer Verschlechterung im Nahbereich einhergehen. Eine Verschiebung der Registrierentfernung auf unter 25m würde die Grenze für den Fernbereich herabsetzen und im Nahbereich nur zu einer geringen Verbesserung führen.

Das Testsystem kann somit für die (exemplarisch) gegebenen Einsatzbereiche als validiert angesehen werden. An keiner Stelle des betrachteten Einsatzbereiches wird die Obergrenze von 2 Pixel überschritten.

#### 6.4. Überprüfung des Zeitkriteriums der Bildwiedergabe

In Abschnitt 5.1.1 wurden die Anforderungen an die Bildwiederholrate der fusionierten Bilder vorgestellt. Zur Messung der zeitlichen Abläufe wurde im aufgebauten Testsystem eine Protokollfunktion vorgesehen (vgl. Abschnitt 5.2.3).

Aus den aufgezeichneten Protokollen wurde die relative Häufigkeit der zeitlichen Verteilung der Zeitdifferenz zwischen zwei Halbbildern der eingesetzten Kamerasysteme ermittelt. Bild 6.6 zeigt die Ergebnisse der Basismessung für beide Kamerasysteme. Die ermittelte Verteilung korrespondiert mit der Spezifikation des NTSC-Videoformates, die eine Bildwiederholrate von  $29,97\text{Hz}$  für ein Vollbild vorsieht [Jack 2001].



**Bild 6.6:** Gemessene Dichteverteilungen der Zeitdifferenz zwischen zwei aufeinander folgenden Halbbildern der beiden genutzten Kamerasysteme (16,6ms entspricht  $2 \times 29,97\text{Hz}$ )

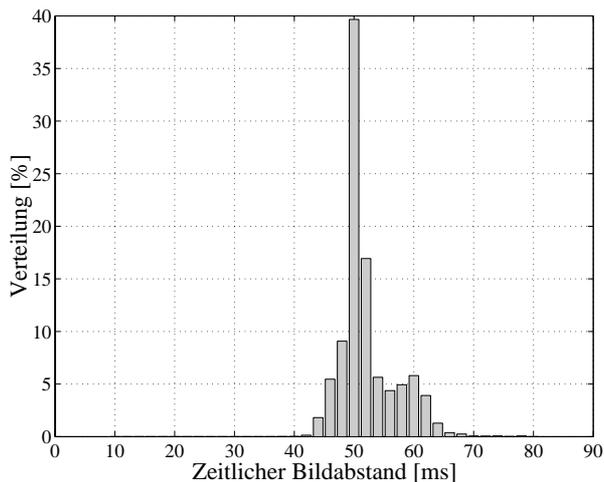
Damit kann das System als zeitlich kalibriert angesehen werden. Der Zusammenhang zwischen der Zeitbasis des PCs und der der Kamerasysteme ist somit ermittelt. Alle weiteren Messungen werden somit auf die richtige Zeitbasis bezogen.

Die Verteilung der Zeiten zwischen zwei aufeinander folgenden fusionierten Bildern wurde berechnet und ist in Bild 6.7 dargestellt. Diese sind für *i*) für eine bilineare Approximation der Zwischengitterpunkte und *ii*) für die Methode der Substitution durch des nächsten Nachbarn nachgestellt.

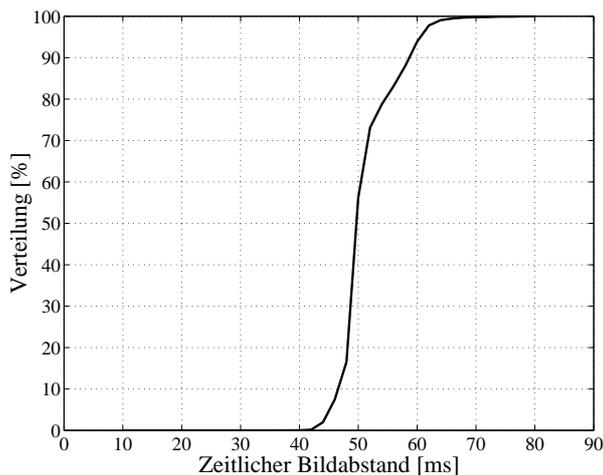
Um zu klären, wie die Anzahl an auszuführenden Rechenschritten die Bildwiederholrate beeinflusst, wurden Messungen mit den beiden in Abschnitt 3.6 vorgestellten Interpolationsfiltern ausgeführt. Da durch die bilineare Interpolation viermal so viele Operationen je Bildpunkt auszuführen sind, wie bei der Nutzung des Substitutionsfilters, wurde eine viermal so lange Berechnungszeit erwartet.

In Bild 6.7 sind die Ergebnisse dieser beiden Messungen zusammengefasst dargestellt. Es zeigt deutlich, dass für beide Messungen mindestens 70% der Messwerte unterhalb einer Zeitdifferenz von  $52\text{ms}$  liegen, was einer Bildwiederholrate von ca.  $20\text{Hz}$  entspricht. Messwerte, die außerhalb dieses Bereiches liegen, sind voraussichtlich auf Interferenzen mit anderen Systemprozessen zurückzuführen. Jedoch zeigt sich auch hier, dass die maximal messbar auftretende Zeitdifferenz  $60\text{ms}$  beträgt. Somit wird eine Bildwiederholrate von mindestens  $15\text{Hz}$  erreicht, was die Untergrenze des in Abschnitt 5.1.1 vorgestellten Intervalls darstellt.

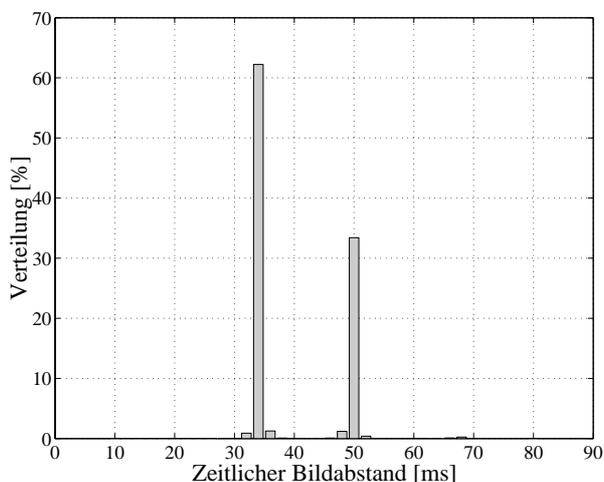
Durch das aufgebaute Testsystem wird für beide Interpolationsfilter eine Bildwiederholrate von 15-30 Hz erreicht. Damit ist das System hinsichtlich dieses Kriteriums validiert. Die in Abschnitt 5.1.3 vorgeschlagene Systemarchitektur erfüllt somit die Anforderungen an ein Echtzeitsystem.



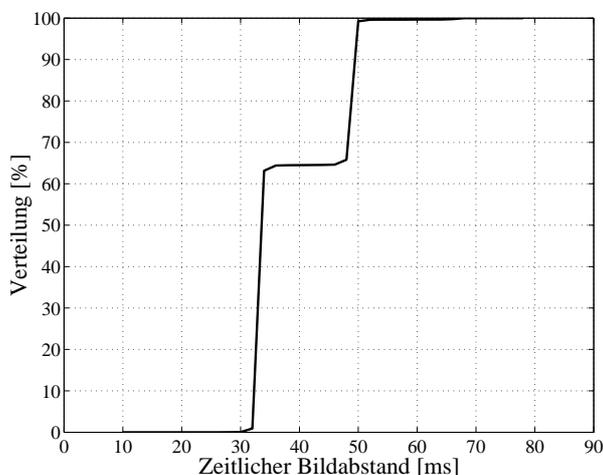
(a) Dichtefunktion für bilineare Approximation



(b) Verteilungsfunktion für bilineare Approximation



(c) Dichtefunktion für Substitution durch nächsten Nachbarn



(d) Verteilungsfunktion für Substitution durch nächsten Nachbarn

**Bild 6.7:** Gemessene Verteilungen der Zeitdifferenz zwischen zwei aufeinander folgenden fusionierten Bildern für *i)* bilineare Approximation Bild (a) und (b) sowie *ii)* Substitution durch den nächsten Nachbarn Bild (c) und (d)

Der in Abschnitt 2.4.3 aufgestellte Zusammenhang zwischen den auszuführenden Rechenschritten und der Bildwiederholrate zeigt sich deutlich im Vergleich der beiden Bilder 6.7(a) und 6.7(b). Die höhere Anzahl an Rechenschritten des bilinearen Interpolationsfilters äußert sich bei gleichen Randbedingungen in einer längeren Verarbeitungszeit. Jedoch benötigt die Berechnung mittels bilinearer Interpolation nur ca. 1,5-mal und nicht, wie erwartet, viermal so lange wie die Berechnung mittels Substitutionsfilter. Die Verteilung der Bildwiederholfrequenz zeigt, dass die Wiedergabe der fusionierten Bilder im Durchschnitt 1,5-mal so viel Zeit beansprucht, wie die Wiedergabe der originalen Kamerabilder.

## 6.5. Übertragbarkeit der Ergebnisse

Die im Rahmen dieser Arbeit vorgestellten Ergebnisse wurden für eine Systemkonfiguration erarbeitet. Durch die Diskussion der Übertragbarkeit wird geklärt, welche der Ergebnisse verallgemeinert werden können und welche ausschließlich für das betrachtete System gültig sind. Unterschieden wird dabei nach der geometrischen Modellierung und der Beachtung des Zeitkriteriums.

**Geometrische Modellierung:** Die präsentierten Ergebnisse bezüglich der Ausrichtungsparemeter und der Entwicklung des Versatzfehlers über die Objektentfernung ist spezifisch für die genutzte Kombination aus den gegebenen Kamerasystemen. Das aufgestellte Modell zur geometrischen Betrachtung eines Dualkamarasystems kann aber auf andere Kombinationen übertragen werden. Die bei der Herleitung und Diskussion aufgestellten Randwerte bezüglich der Verzeichnungen sind bei anderen Kombinationen zu beachten, um die Gültigkeit des Modells nicht zu verletzen.

**Zeitkriterium:** Die im Rahmen dieser Arbeit vorgestellten Ergebnisse bezüglich der Wiedergabefrequenz der berechneten Bildfolge kann nicht verallgemeinert werden, da sie von der gewählten Hardware und von der Softwareumsetzung abhängig ist. Die eingesetzte PC-Hardware ist trotz der gewählten Performance nur bedingt für einen Einsatz in einem Bildfusionssystem geeignet. In der Betrachtung der Verteilung der Wiedergabefrequenz zeigen sich deutliche Einflüsse anderer, parallel ablaufender Systemprozesse. Hier könnten für Systeme auf der Basis digitaler Signalprozessoren bessere Ergebnisse zu erwarten sein.

Aber für die Evaluierung und die Bestimmung von Parametern zur Optimierung der Bildfusion ist dieses System aufgrund der offenen Schnittstelle leichter zu adaptieren, leichter zu erweitern und einfacher in eine Versuchsumgebung zu integrieren.

## 6.6. Fazit

In diesem Kapitel wurde das in Kapitel 5 vorgestellte Versuchssystem kalibriert und hinsichtlich des nutzbaren Einsatzbereiches evaluiert. Abschließend wurde die durch das System realisierte Bildwiederholrate betrachtet. Hinsichtlich beider Kriterien konnte das Testsystem validiert werden.

Bei der Kalibrierung der eingesetzten Kamerasysteme konnten die durch die Hersteller angegebenen Parameter bestätigt und für die Modellanpassung genutzt werden. Desweiteren zeigte sich, dass die durch die Verzeichnung hervorgerufenen Fehler vernachlässigbar sind. Da beide Kamerasysteme eine tonnenförmige Verzeichnung aufweisen, treten bei einer Vernachlässigung nur sehr geringe Relativfehler auf.

---

Bei der Gegenüberstellung der praktisch bestimmten und der modellierten Ausrichtungsparameter zeigten sich die gleichen Entwicklungstendenzen. Dennoch waren geringe Anpassungsfehler durch die fehlerhafte Bestimmung der Markenpositionen und durch Bewegung des Versuchsfahrzeugs zu verzeichnen. Durch die gewählten Parameter konnte das Modell bis auf eine Abweichung von durchschnittlich 0,15 Pixel an das gegebene Dualkamerasystem angepasst werden. Somit standen durch das angepasste Modell auch in Entfernungen Informationen zur Verfügung, die durch die Messung nicht abgedeckt wurden.

Der Vergleich zwischen Modell und Messung zeigte, dass sich der Versatzfehler als Vergleichskriterium besser als die Ausrichtungsparameter eignet, wenn das Verhalten des Gesamtsystems betrachtet wird. Dieses Kriterium eignet sich auch, wenn zwei Dualkamerasysteme miteinander zu vergleichen sind. Für die Lokalisierung von Fehlerquellen bieten sich die Ausrichtungsparameter an.

Es zeigt sich, dass bereits kleine Abweichungen der äußeren Parameter zu großen Änderungen beim Versatzfehler führen. Bei der Bestimmung des praktischen Versatzfehlers weist desweiteren die Positionsbestimmung der Kalibriermarken einen großen Fehlereinfluss auf.

Bei der Betrachtung der Bildwiederholfrequenz wurde gezeigt, dass durch das aufgebaute System eine minimale Bildwiederholrate von 15 Bildern pro Sekunde und eine durchschnittliche Bildwiederholrate von 20 Bildern pro Sekunde erreicht wurde. Dies entspricht im Vergleich zu den Ursprungssignalen der Kamerasysteme etwa einer Halbierung der Bildwiederholfrequenz. Der Vergleich der Bildwiederholraten zeigt den deutlichen Zusammenhang zwischen Komplexität und Verarbeitungsgeschwindigkeit. Jedoch konnte für das untersuchte Testsystem kein linearer Zusammenhang zwischen Rechenaufwand und Rechenzeit nachgewiesen werden.

---

## 7. Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit wurden die technischen Aspekte eines Nachtsichtsystems mit Bildfusion untersucht. Hierzu zählen die Auslegung eines Dualkamerasystems und die Entwicklung einer möglichen Systemarchitektur.

Ausgehend von einem Vergleich der physikalischen Eigenschaften des fernen Infrarot und des visuellen Spektralbereiches motiviert sich die Bildfusion aufgrund der nahezu komplementären physikalischen Eigenschaften der beiden Spektralbereiche. Eine Untersuchung der Defizite, die sich bei der Interpretation eines FIR-Nachtsichtbildes durch den Fahrer ergeben können, motiviert die Bildfusion auch aus wahrnehmungspsychologischer Sicht zur Verbesserung der Interpretierbarkeit.

Ein Nachtsichtsystem mit Bildfusion ist funktional aus den Bereichen der Bildaufnahme, der geometrischen Vorverarbeitung und der Bildfusion aufgeteilt. Die geometrische Vorverarbeitung beinhaltet eine Korrektur der geometrischen Verzeichnungen und eine objekttreue Ausrichtung, die aufgrund der versetzt angeordneten Kamerasysteme notwendig ist. Dies bedeutet, dass die von ein und demselben Objekt in der aktuellen Fahrszene reflektierte und emittierte Strahlung im fusionierten Bild auch diesem Objekt zugeordnet ist.

Für diese objekttreue Ausrichtung wurde im Rahmen dieser Arbeit ein Modell aufgestellt, das aus zwei Einzelkameramodellen sowie den Teilprozessen der Bildausrichtung und der Bestimmung des Ausrichtungsfehlers besteht. Durch das Modell wird der Zusammenhang zwischen den Objektkoordinaten und den entsprechenden Abbildungen durch beide Kamerasysteme hergestellt. Basierend auf diesem Modell können die versatzminimierende Ausrichtungsmatrix für eine gegebene Entfernung und die Ausrichtungsfehler für gegebene Objektentfernungen bestimmt werden.

Aus diesen Betrachtungen wurden in Verbindung mit dem maximal zulässigen Ausrichtungsfehler folgende grundsätzliche Auslegungsrichtlinien abgeleitet:

1. In einem Dualkamerasystem sind vorzugsweise Kamerasysteme mit annähernd gleichem Gesichtsfeld einzusetzen.
  2. Das Kamerasystem mit dem kleinsten Gesichtsfeld ist als Bezugssystem zu nutzen, um Aliasing-Effekte zu unterdrücken.
  3. Das Kamerasystem mit der geringsten Rauschleistung ist als angepasstes System zu nutzen, um die Präzision bei der Kalibrierung zu erhöhen.
  4. Durch die Vorgabe des geforderten Einsatzbereiches und des maximal zulässigen Versatzfehlers wird die optimale Registrierentfernung bestimmt.
  5. Durch Vorgabe des geforderten Einsatzbereiches und des maximal zulässigen Versatzfehlers wird der maximale radiale Montageabstand bestimmt.
-

Für die beiden letzten Punkte wurde ein Auslegungsprozess aufgestellt und Kennlinien zur Auslegung vorgestellt. Anhand dieser Kennlinien kann ein Dualkamerasystem nach Montageabstand und Registrierentfernung ausgelegt werden.

Für die praktische Kalibrierung und die Überprüfung der Auslegung des Dualkamerasystems wurde eine Kalibrierplatte vorgestellt, die sowohl zur Kalibrierung der beiden Kamerasysteme als auch zur Bestimmung der Ausrichtungsmatrix und des Ausrichtungsfehlers geeignet ist. Der Auslegungsprozess und der Prozess zur Überprüfung des Einsatzbereiches wurde mithilfe dieser Kalibrierplatte durchgeführt und bestätigt.

Bei den Experimenten wurden auf eine präzise Bestimmung der inneren Kameraparameter geachtet, da diese die Fehler höhere Ordnung bestimmen. Hierzu wurde die Kalibrierplatte möglichst bildfüllend platziert. Bei der Validierung des Einsatzbereiches erfolgte die praktische Auslegung über einen großen Entfernungsbereich.

Bei der Auslegung ist der maximal zulässige Ausrichtungsfehler als freier Parameter zu beachten. Zur Bestimmung dieses Parameters wurde ein Versuch mit 10 Versuchspersonen durchgeführt. Dabei wurde die Obergrenze für den Ausrichtungsfehler durch eine subjektive Bewertung der Bildqualität des dargestellten fusionierten Bildes ermittelt. Durch dieses Experiment wurde für das vorliegende Testsystem ein Maximalversatz von 2 Pixel bestimmt.

Zur Demonstration der technischen Machbarkeit wurde ein Versuchsträger aufgebaut. Für die Darstellung der Bildfusion wurde eine Systemarchitektur entwickelt, die hinsichtlich der Ausführungsgeschwindigkeit optimiert wurde. Die Optimierung erfolgt durch die Transformation der Berechnungen zur geometrischen Vorverarbeitung in eine gewichtete Summe. Die hierfür notwendigen Informationen wurden in Look-Up-Tabellen abgelegt und mussten daher zur Laufzeit nicht wiederholt berechnet werden.

Durch eine Protokollierung der zeitlichen Abläufe im Versuchssystem konnte die praktische Bildwiederholfrequenz ermittelt werden. Durch die gewählte Architektur wurde eine minimale Bildwiederholfrequenz von 15Hz und eine durchschnittliche Bildwiederholfrequenz von 20Hz realisiert. Die vorgestellte Systemarchitektur ermöglicht aufgrund der Skalierbarkeit und der offenen Schnittstelle die für ein Testsystem notwendigen Optimierungs-, Adaptierungs- und Erweiterungsmöglichkeiten.

Durch die Erkenntnisse dieser Arbeit kann ein Dualkamerasystem hinsichtlich des Montageabstandes der Kamerasysteme und der Registrierentfernung ausgelegt werden. Bestehende Dualkamerasysteme können aufgrund dieser Erkenntnisse hinsichtlich des Einsatzbereiches untersucht und bewertet werden. Durch die Präsentation des Versuches zur Bestimmung des Maximalversatzes ist eine Möglichkeit gegeben, den freien, auslegungsbestimmenden Parameter des Maximalversatzes zu bestimmen. Die vorgestellte und bezüglich der Ausführungsgeschwindigkeit optimierte Systemarchitektur ermöglicht eine Darstellung der Bildfusion in Echtzeit durch ein Testsystem. Die im Rahmen dieser Arbeit aufgestellten Zusammenhänge und Abläufe zur Systemauslegung wurden an einem prototypisch aufgebauten Testsystem demonstriert und validiert.

---

---

Basierend auf den vorgestellten technischen Aspekten zur Auslegung eines Nachtsichtsystems mit Bildfusion sind weitere Untersuchungen zur Optimierung des Gesamtsystems zur Nutzung als Fahrerinformationssystem vorrangig unter ergonomischen Gesichtspunkten notwendig. Neben der Betrachtung des Nutzens und der Nutzung eines solchen Systems könnten sich diese Untersuchungen beispielsweise mit der Anpassung der Kanalwichtung an die aktuelle Fahrsituation unter Einbeziehung von Umfeldparametern beschäftigen, um eine weitere Verbesserung der Informationsdarstellung zu erreichen.

---

## A. Vollständige Lösung der Ausrichtungsmatrix

In Abschnitt 3.2 wurde die vereinfachte Ausrichtungsmatrix vorgestellt. Bei der Vereinfachung wurde angenommen, dass die Relativwinkel sehr kleine Werte annehmen. Gleichung A.1 zeigt die vollständige Darstellung.

$$\mathbf{H}_R^2 = \begin{pmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \text{ mit} \quad (\text{A.1})$$

$$h_{11} = \frac{D_1^x f_2 Z_{OBJ} \cos \beta}{D_2^x f_1 (Z_{OBJ} - T_z)} \cos \gamma$$

$$h_{12} = -\frac{D_1^y f_2 Z_{OBJ} \cos \beta}{D_2^x f_1 (Z_{OBJ} - T_z)} \sin \gamma$$

$$h_{13} = C_2^x + \frac{f_2 (X_0 - T_x + Z_{OBJ} \sin \beta)}{D_2^x (Z_{OBJ} - T_z)} - \frac{f_2 \cos \beta ((f_1 X_0 + C_1^x D_1^x Z_{OBJ}) \cos \gamma - (f_1 Y_0 + C_1^y D_1^y Z_{OBJ}) \sin \gamma)}{D_2^x f_1 (Z_{OBJ} - T_z)}$$

$$h_{21} = \frac{D_1^x f_2 Z_{OBJ} (\cos \alpha \sin \gamma + \sin \alpha \sin \beta \cos \gamma)}{D_2^y f_1 (Z_{OBJ} - T_z)}$$

$$h_{22} = \frac{D_1^y f_2 Z_{OBJ} (\cos \alpha \cos \gamma - \sin \alpha \sin \beta \sin \gamma)}{D_2^y f_1 (Z_{OBJ} - T_z)}$$

$$h_{23} = C_2^y + \frac{f_2 (Y_0 - T_y - Z_{OBJ} \sin \alpha \cos \beta)}{D_2^y (Z_{OBJ} - T_z)} - \frac{f_2 (f_1 Y_0 + C_1^y D_1^y Z_{OBJ}) (\cos \alpha \cos \gamma - \sin \alpha \sin \beta \sin \gamma)}{D_2^y f_1 (Z_{OBJ} - T_z)} - \frac{f_2 (f_1 X_0 + C_1^x D_1^x Z_{OBJ}) (\cos \alpha \sin \gamma + \sin \alpha \sin \beta \cos \gamma)}{D_2^y f_1 (Z_{OBJ} - T_z)}$$

Mit dieser Gleichung kann die Ausrichtungsmatrix für alle Relativwinkel ermittelt werden.

## B. Versuchsanleitung

### VERSUCHSANLEITUNG

Im folgenden kurzen Versuch geht es um die Bewertung von fusionierten Bildern, die in einem Vision Enhancement System (VES) zur Fahrerunterstützung eingesetzt werden sollen.

Durch Nachtsichtsysteme, die in einem anderen als dem visuellen Spektralbereich arbeiten, kann ein Fahrer auch Objekte jenseits der Scheinwerferreichweite erkennen. Diese Bilder geben NICHT die visuelle Information der Szene wieder. Um die Interpretierbarkeit der Szene zu erleichtern, blendet man die verfügbare visuelle Information in das Nachtsichtbild ein. Durch den Versatz der eingesetzten Kamerasysteme am Fahrzeug entsteht ein Ausrichtungsfehler bzw. ein Versatz in den dargestellten Aufnahmen.

Der Versuch, der insgesamt ca. 30 Minuten dauern wird, ist nach einer kurzen Einführung (SIEHE DAZU NÄCHSTE SEITE) in 8 Blöcke mit jeweils 20 Durchgängen geteilt. Zu Anfang jeden Blockes wird Ihnen als Beispiel das bestmögliche Fusionsergebnis dargeboten. Die Pause zwischen den Blöcken, deren Dauer Sie selbst bestimmen können, nutzen Sie bitte zur Entspannung Ihrer Augen. Um mit dem Versuch fortzufahren, drücken Sie bitte die SPACE-Taste.

In jedem Versuchsdurchgang wird Ihnen ein fusioniertes Bild in unterschiedlicher Qualität zur Bewertung dargeboten, auf dem ein Fahrzeug und eine Person dargestellt sind (siehe Abbildung).



Sie sollen entweder die Darstellung der Person oder die Darstellung des Fahrzeuges bewerten. Als Bewertungsgrundlage dienen zwei zwei unterschiedliche Fragen:

- 1) Wie genau ist die Person wiedergegeben?
- 2) Wie genau ist das Fahrzeug wiedergegeben?

Diese Fragen können Sie mit einem Rating von 1 bis 5 beantworten:

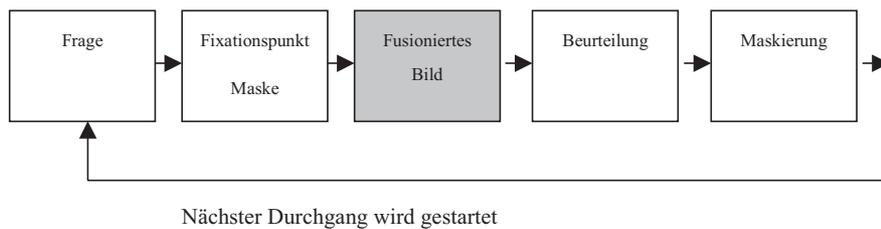
1 = sehr gut	2 = gut	3 = durchschnittlich	4 = schlecht	5 = sehr schlecht
-----------------	------------	-------------------------	-----------------	----------------------

**Die spezifische Frage wird Ihnen jeweils vor der Präsentation des fusionierten Bildes dargeboten!**

Versuchen Sie möglichst schnell und spontan zu antworten. Legen Sie dabei Mittelfinger und Zeigefinger Ihrer linken Hand auf die entsprechenden 1 und 2 Tasten, und Mittelfinger und Zeigefinger Ihrer rechten Hand auf die

### VERSUCHSABLAUF

Im Folgenden wird Ihnen jetzt der genaue Ablauf eines Versuchsdurchgangs vorgeführt. Der Ablauf ist schematisch in der Abbildung dargestellt.



1. Ein Durchgang beginnt mit der Frage nach der Wiedergabe des zu bewertenden Objektes. Sie sollen die Wiedergabe mit 1 bis 5 bewerten. Unter der Frage sind zur Erinnerung die Bewertungsnoten von 1 (sehr gut) bis 5 (sehr schlecht) angegeben.
2. Es erscheint eine Bildschirmmaske mit einem Fixationspunkt, die Ihnen angibt, sich auf den Bildschirm zu konzentrieren.
3. **JETZT erscheint das fusionierte Bild!**
4. Beurteilen Sie möglichst spontan das abgebildete fusionierte Bild je nach vorgegebener Fragestellung. Sollten Sie mit Ihrer Bewertung länger als 4 Sekunden benötigen, wird der Durchgang abgebrochen!
5. Sobald Sie eine Bewertung durch Eingabe einer Zahl von 1 bis 5 abgegeben haben, wird das Bild ausgeblendet und es erscheint eine sogenannte Maskierungsmaske, die gleichzeitig den nächsten Durchgang ankündigt.

Haben Sie noch Fragen zur Versuchsdurchführung? Bitte wenden Sie sich damit an den Versuchsleiter!

Sie werden jetzt in einem kurzen Probedurchgang die Möglichkeit haben, den oben beschriebenen Versuchsablauf zu testen. Nach 2 Durchgängen gibt es eine kurze Pause, den Start des nächsten Durchgangs bestimmen Sie selbst, indem Sie die SPACE-Taste drücken.

*Vielen Dank für Ihre Mitarbeit!*

## Literatur

- [Adelson 1984] ADELSON, E. H. ; ANDERSON, C. H. ; BERGEN, J. R. ; BURT, Peter J. ; OGDEN, J. M.: Pyramid Methods in Image Processing. In: *RCA Engineer* 6 (1984), Nr. 29, S. 33–41 30, 31
- [Bartsch 1994] BARTSCH, Hans-Jochen: *Taschenbuch mathematischer Formeln*. Fachbuchverlag Leipzig-Köln, 1994 39, 54, 59
- [Berham 1999] BERHAM, Philip ; OXLEY, Philip ; THOMPSON, Chris ; FISH, David ; RIO, Alex: *Vision in Vehicles*. Bd. Vol. 7: *Jaguar Cars' Near Infrared Night Vision System - Overview of Human Factors Research to Date*. 1999 14
- [Beyer 1995] BEYER, Otfried ; HACKEL, Horst ; PIEPER, Volkmar ; TIEDGE, Jürgen: *Wahrscheinlichkeitsrechnung und mathematische Statistik*. B. G. Teubner Verlagsgesellschaft, 1995 51, 52
- [Blanc 2001] BLANC, Nicolas: CCD versus CMOS - Has CCD Imaging Come to an End? In: FRITSCH/SPILLER (Hrsg.): *Photogrammetrische Woche*. Stuttgart, Deutschland, 2001, S. 131–137 17
- [Bradford 2001] BRADFORD, Edward: *RunTime: Synchronizing processes and threads*. Okt. 2001 2001. – <http://www-106.ibm.com/developerworks/linux/library/l-rt5/> 114
- [Brickner 1989a] BRICKNER, M. S.: Apparent Limitations of Head-Up-Displays and Thermal Imaging Systems. In: JENSEN, R. S. (Hrsg.): *Fifth International Symposium on Aviation Psychology*. Columbus, OH, USA, 1989a, S. 703–707 33
- [Brickner 1989b] BRICKNER, M. S. ; STAVELAND, L. E.: Comparison of Thermal (FLIR) and Television Images. In: JENSEN, R. S. (Hrsg.): *Fifth International Symposium on Aviation Psychology*. Columbus, OH, USA, 1989b, S. 276–281 33
- [Burt 1988] BURT, Peter J.: Smart Sensing within a Pyramid Vision. In: *Proceedings of the IEEE* 76 (1988), Nr. 8, S. 1006–1015 30
- [Burt 1983] BURT, Peter J. ; ADELSON, Edward H.: The Laplacian Pyramid as a Compact Image Code. In: *IEEE Transactions on Communications* COM-31 (1983), Nr. 4, S. 532–540 30
- [Caelli 1985] CAELLI, Terry ; YUZYK, Jerome: What is perceived when two images are combined? In: *Perception* 14 (1985), S. 41–48 96
- [Castaldo 1996] CASTALDO, Rick ; FRANCK, Charmaine C. ; SMITH, Alex: Evaluation of FLIR/IR Camera Technology for Airport Surface Surveillance. In: *10th Annual International AeroSense Symposium*. Orlando, USA : SPIE, 1996, S. 1–11 19
- [Devernay 2001] DEVERNAY, F. ; FAUGERAS, O.: Straight Lines Have to Be Straight: Automatic Calibration and Removal of Distortion from Scenes of Structured Environments. In: *Machine Vision and Applications* 1 (2001), S. 14–24 119
-

- [Donges 1992] DONGES, E.: Das Mensch-Maschine-System im Verkehr. In: *VDI-Gesellschaft Fahrzeugtechnik*. Berlin : VDI, 1992 (VDI Berichte 948) 1
- [Druid 2002] DRUID, Anna: *Vision Enhancement System - Does the Display Position matter? Evaluation of a Savety System for Night-time driving*, Linköping University, Master, 2002 20
- [Eichhorn 2001] EICHHORN, Karsten ; ABEL, Björn ; BURG, Michael: Verbesserte Nachtsicht mit Infrarot-Scheinwerfern. In: *ATZ* 9 (2001), S. 780–786 2, 14
- [Enders 2003] ENDERS, M.: Intelligent Light Concepts. In: *Optische Technologien in der Fahrzeugtechnik*. Baden-Baden, Deutschland : VDI, 2003, S. 109–115 2
- [Essock 1999] ESSOCK, Edward A. ; SINAI, Michal J. ; MCCARLEY, Jason S. ; KREBS, William K. ; DEFORD, J. K.: Perceptual Ability with Real-World Nighttime Scenes: Image-Intensified, Infrared and Fused-Color Imagery. In: *Human Factors* 41 (1999), S. 438–452 3, 33, 34, 36, 96
- [Faugeras 1992] FAUGERAS, O.D. ; LUONG, Q.T. ; MAYBANK, S.J.: Camera Self-Calibration: Theory And Experiments. In: *European Conference on Computer Vision* 92 (1992), S. 321–334 119
- [Fay 2000] FAY, D. A. ; WAXMANN, A. M. ; AQUILAR, M. ; IRELAND, D. B. ; RACAMATO, J. P. ; ROSS, W. D. ; STREILEIN, William W. ; BRAUN, M. I.: Fusion of Multi-Sensor Imagery for Night Vision Color Visualization, Target Learning and Search. In: *Proceedings of 3rd International Conference on Information Fusion* Bd. 1. Paris, France, 2000, S. TuD3–3 – TuD3–10 25, 29
- [Fleury 2003] FLEURY, Benoist: A High Performance Night Vision System. In: *Progress in Automobile Lighting*. Darmstadt, Deutschland, 2003 12
- [Foyle 1990] FOYLE, D. C. ; BRICKNER, M. S.: Human Object Recognition as a Function of Display Parameters Using Television and Infrared Imagery. In: *SID 90 Digest* (1990), S. 269–272 33
- [Freymann 2003] FREYMANN, Raymond: Auto und Fahrer im 21. Jahrhundert. In: *Der Fahrer im 21. Jahrhundert* Bd. 1768. Braunschweig : VDI Verlag, 2003 1
- [Freymann 2004] FREYMANN, Raymond: Möglichkeiten und Grenzen von Fahrerassistenz- und Aktiven Sicherheitssystemen. In: *Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenzsysteme*. Garching, Deutschland, 2004, S. 1–20 1
- [Gish 1999] GISH, Kenneth W. ; STAPLIN, Loren ; PEREL, Michael: Human Factors Issues Related to the Use of Vision Enhancement Systems / Transport Research Record 1694. 1999 ( Paper No. 99-0737 ) – Forschungsbericht 21, 33
- [Gonzalez 1992] GONZALEZ, Rafael C. ; WOODS, Richard E.: *Digital Image Processing*. 3. Auflage. Addison-Wesley, 1992 40
-

- [Greenberg 1997] GREENBERG, Donald P. ; TORRANCE, Kenneth E. ; SHIRLEY, Peter ; ARVO, James ; FERWERDA, James A. ; PATTANAİK, Sumanta ; LAFORTUNE, Eric ; WALTER, Bruce ; FOO, Sing-Choong ; TRUMBORE, Ben: A Framework for Realistic Image Synthesis. In: *SIGGRAPH 97*. Los Angeles, USA, 1997, S. 474–494 105
- [Hahn 1994] HAHN, Wolfgang: Vision enhancement: concepts for the future? In: *International Technical Conference on Enhanced Safety of Vehicle* Bd. 14, 1994, S. 1490–1496 7, 9
- [Hanson 1994] HANSON, Charles M. ; SWEETSER, Kevin N. ; FRANK, Steven N.: Uncooled Thermal Imaging. In: *Texas Instruments Technical Journal* 11 (1994), Nr. 5, S. 2–10. – Nur als gedruckte Version 18
- [Haykin 1996] HAYKIN, Simon: *Adaptive Filter Theory*. 3. Auflage. Prentice Hall, 1996 (Prentice Hall Information and System Sciences Series) 50, 51
- [Hendrischk 2002] HENDRISCHK, Wolfgang ; GRIMM, Martin ; KALZE, Franz-Josef: Adaptive Scheinwerfer - Kurvenlicht erhöht die Verkehrssicherheit. In: *ATZ* 11 (2002), S. 968–973 12
- [Hoffmann 1998] HOFFMANN, Rüdiger: *Signalanalyse und -erkennung*. Springer Verlag Berlin Heidelberg, 1998 89
- [Hollnagel 2003] HOLLNAGEL, Erik ; KÄLLHAMMER, Jan-Erik: Effects of a Night Vision Enhancement System (NVES) on Driving: Results From a Simulator Study. In: *Second International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training and Vehicle Design*. Park City, Utah, USA, 2003, S. 152–157 15, 21, 22
- [Jack 2001] JACK, Keith: *Video Demystified*. 3. Edition. Elsevier Science and Technology, 2001 11, 132
- [Jai 2001] JAI: CV-M2000 Series, Micro Head Color Camera / jai. 2001. – Manual 66, 107
- [Janesick 2002] JANESICK, James: Dueling Detectors - CMOS or CCD? In: *oe-magazine* Februar 2002 (2002), S. 30–33 16, 17
- [Jähne 2001] JÄHNE, Bernd: *Digitale Bildverarbeitung*. 5. Auflage. Springer Verlag Berlin, Heidelberg, New York, 2001 10, 11, 41, 51, 89, 93
- [Kauschke 2003] KAUSCHKE, R. ; WALLASCHEK, J. ; VÖLKER, Stefan ; EICHHORN, Karsten: Konstruktionssystematische Analyse und lichttechnische Bewertung von Konzepten für aktive Scheinwerfer. In: *Optische Technologien in der Fahrzeugtechnik*. Baden-Baden, Deutschland, 2003, S. 63–72 12
- [Klapper 2003] KLAPPER, S. ; BÜTTNER, Christoph: Einsatz von Nachtsichtsystemen auf Basis Infrarottechnologie in der Fahrzeugtechnik. In: *Optische Technologien* Bd. 1731. Baden-Baden, Deutschland : VDI Verlag Düsseldorf, 2003, S. 315–322 1
-

- [Klapper 2001] KLAPPER, Stuart ; KYLE, Robert ; NICKLING, Robert ; KORMOS, Alex: Night Vision - Changing the Way We Drive. In: *Thermosense XXIII* Bd. 4360. Orlando, USA : SPIE, 2001, S. 5 18
- [Knoll 2001] KNOLL, Peter M. ; APEL, U. ; BEUTNAGEL, U. ; FIESS, R. ; GRIMM, D. ; ANDREONE, L. ; SHELTON, R. ; HEERLEIN, J. ; ABEL, B. ; BURG, M. ; BELLOTTI, F. ; FERRETTI, E. ; DE GLORIA, A.: Technological benchmarking of system components. 2001. – EDEL-Project Report 2, 14
- [Knoll 2003] KNOLL, Peter M. ; ESCHLER, Johannes ; GRIMM, D. ; LOPEZ, E.: Enhancement of Night Vision with Near Infrared - Simulation and Realization. In: *Optische Technologien* Bd. 1731. Baden-Baden, Deutschland : VDI Verlag Düsseldorf, 2003, S. 161–171 15
- [Kokoschka 2000] KOKOSCHKA, S. ; GALL, D.: FASIVAL - Entwicklung und Validierung eines Sichtweitenmodells zur Bestimmung der Fahrersichtweite / Lichttechnisches Institut der Universität Karlsruhe, Fachgebiet Lichttechnik der Technischen Universität Ilmenau. 2000. – Abschlussbericht 12, 13
- [Krebs 1999] KREBS, William K. ; MCCARLEY, Jason S. ; KOZEK, T. ; MILLER, GM. ; SINAI, Michal J. ; WERBLIN, FS: An Evaluation of a Sensor Fusion System to improve Drivers' Nighttime Detection of Road Hazards. In: *Proceedings of the 43rd Annual Meeting Human Factors and Ergonomics Society* 43 (1999), S. 1333–1337 36
- [Krebs 1998] KREBS, William K. ; SCRIBNER, Dean A. ; MILLER, Geoffrey M. ; OGAWA, James S. ; SCHULER, Jonathan: Beyond Third Generation: A sensor fusion targeting FLIR pod for the F/A-18. In: *SPIE-Sensor Fusion: Architectures, Algorithms, and Applications* Bd. 3376, 1998, S. 129–140 24, 96
- [Krebs 2002] KREBS, William K. ; SINAI, Michal J.: Psychophysical assessments of image-sensor fused imagery. In: *Human Factors* 44 (2002), S. 257–271 33, 35, 36, 96
- [Kuchling 1995] KUCHLING, Horst: *Taschenbuch der Physik*. Bd. 15. Auflage. Fachbuchverlag Leipzig-Koeln, 1995 54
- [Lallier 2000] LALLIER, E. ; FAROOQ, M.: A Real Time Pixel-Level Based Image Fusion Via Adaptive Weight Averaging. In: *3rd International Conference on Information Fusion, Fusion 2000* Bd. 2. Paris, France, 2000, S. WeC3 3–WeC3 10 27
- [Langwieder 1997] LANGWIEDER, K. ; BÄUMLER, H.: Charakteristik von Nachtunfällen. In: *Progress in Automotive Lighting*. Darmstadt, 1997, S. 326–339 1
- [Lanser 1995] LANSER, Stefan (Hrsg.) ; ZIERL, Christoph (Hrsg.): *Robuste Kalibrierung von CCD-Sensoren für autonome, mobile Systeme*. Springer-Verlag, 1995 (Autonome Mobile Systeme) 41, 118
-

- [Lau 1999] LAU, Waileung ; KING, Bruce A. ; LI, Zhilin: An Empirical Investigation of the Thematic Accuracy of Land Cover Classification Using Fused Images. In: *Asian Conference on Remote Sensing*. Hong Kong, China, 1999 23
- [Lenk 1989] LENK, Richard: *Fachlexikon ABC Physik*. Verlag Harri Deutsch, Thun und Frankfurt/Main, 1989 8
- [Lenz 1987] LENZ, Reimar: Linsenfehlerkorrigierte Eichung von Halbleiterkameras mit Standardobjektiven für hochgenaue 3D-Messungen in Echtzeit. In: *9. DAGM Symposium für Mustererkennung*, Springer Verlag, 1987 (Informatik Fachberichte), S. 212–216 42, 118, 119
- [Li 1995] LI, Hui ; MANJUNATH, B. S. ; MITRA, Sanjit K.: Multisensor Image Fusion Using the Wavelet Transform. In: *Graphical Models and Image Processing*, 1995, S. 235–245 31
- [Litwiller 2001] LITWILLER, Dave: CCD vs. CMOS: Facts and Fiction. In: *Photonics Spectra* Jan. 2001 (2001), S. 154–158 16, 17
- [Locher 2003] LOCHER, J. ; VÖLKER, Stefan ; BIERLEUTGEB, G. ; KLEINKES, M.: Night Vision: Erhöhung der Verkehrssicherheit durch Infrarot-Nachtsichtsysteme. In: *Optische Technologien* Bd. 1731. Baden-Baden, Deutschland, 2003, S. 173–183 21
- [Marr 1983] MARR, David: *Vision: A computational investigation into the human representation and processing of visual information*. W H Freeman and Co., 1983 7
- [Martinelli 2000] MARTINELLI, Nancy S. ; BOULANGER, Scott A.: Cadillac DeVille Thermal Imaging Night Vision System. In: *SAE 2000 World Congress* 2000-01-0323 (2000) 2, 14, 20, 22
- [Mayer 2003] MAYER, R. ; BLUME, J.: Optik Design von Head-Up-Displays für Kraftfahrzeuge. In: *Optische Technologien in der Fahrzeugtechnik*. Baden-Baden, Deutschland : VDI, 2003, S. 199–212 20
- [McDaniel 1998] MCDANIEL, Robert ; SCRIBNER, Dean ; KREBS, William K. ; WARREN, Penny ; OCKMAN, Norman ; MCCARLEY, Jason S.: Image Fusion for Tactical Applications. In: *SPIE - Infrared Technology and Applications XXIV* Bd. 3436, 1998, S. 685–695 25, 29, 31, 32
- [Meier-Arendt 2003] MEIER-ARENDDT, Guido ; ABEL, Heinz-Bernhard: Zukünftige Fahrerinformationssysteme im Kraftfahrzeug - Ergonomische Optimierung des Human Machine Interfaces (HMI). In: *VDI - Der Fahrer im 21. Jahrhundert, Band 1768*, VDI Verlag, 2003, S. 75–88 20
- [Mittal 1997] MITTAL, Millind ; PELEF, Alex ; WEISER, Uri: MMX Technology Architecture Overview. In: *Intel Technology Journal* at <http://developer.intel.com/technology/itj/> Q3 '97 (1997), S. 1–12. – <http://developer.intel.com/technology/itj/q31997/pdf/archite.pdf> 110
- [MVTec 2000] MVTEC. *Halcon 6.0 C++ Referenzhandbuch*. Nov. 2000 2000 119, 123
-

- [Nilsson 2003] NILSSON, Jenny: *A Comparison Between Opaque and Transparent Displays for Vision Enhancement Systems*, Linköping University, Master, 2003 20
- [Norwich 2003] NORWICH, Kenneth H.: *Information, Sensation and Perception*. On the Internet by Biopsychology.org, 2003 105
- [Opgen-Rhein 2003] OPGEN-RHEIN, P. ; BERTRAM, T. ; SEUSS, J.: Weiterentwicklung einer dynamischen Leuchtweiterregelung unter Verwendung eines Prüfstandes. In: *Optische Technologien in der Fahrzeugtechnik*. Baden-Baden, Deutschland : VDI, 2003, S. 73–95 2, 12
- [Parkes 1995] PARKES, A. M. ; WARD, N. J. ; BOSSI, L. L. M.: The Potential of Vision Enhancement Systems to Improve Driver Safty. In: *Le Travail humain* 58 (1995), S. 151–169 33
- [Plainis 1997] PLAINIS, S. ; CHAUHAN, K. ; MURRAY, I.J. ; CHARMAN, W. N.: Retinal adaptation under night-time driving conditions. In: G. GALE, I.D. Brown C.M. H. (Hrsg.) ; (CO-EDS.), S.P. T. (Hrsg.): *Vision in Vehicles VII*. Marseilles, Frankreich, 1997, S. 61–70 12
- [Pohl 1998] POHL, C. ; VAN GENDEREN, J. L.: Review Article - Multisensor Image Fusion in Remote Sensing: Concepts, Methods and Applications. In: *International Journal on Remote Sensing* 19 (1998), Nr. 5, S. 823–854 11
- [Qu 2001] QU, Guihong ; ZHANG, Dali ; YAN, Pingfan: Medical Image Fusion by Wavelet Transform Modulus Maxima. In: *Optics Express* 9 (2001), Nr. 4, S. 184–190 23
- [Raytheon 2002] RAYTHEON: Spezifikation M2001 / Raytheon. 2002. – Manual 66, 107
- [Recarte 2003] RECARTE, M. A. ; NUNES, L. M.: Mental Workload while Driving: Effects on Visual Search, Discrimination, and Decision Making. In: *Journal of Experimental Psychology: Applied* 9 (2003), S. 119–137 33
- [Rockinger 1997] ROCKINGER, Oliver: Image Sequence Fusion Using a Shift-Invariant Wavelet Transform. In: *International Conference on Image Processing* Bd. 3. Washington, USA, 1997, S. 288–291 31
- [Rockinger 1999] ROCKINGER, Oliver: *Multiresolutions-Verfahren zur Fusion dynamischer Bildfolgen*, Technische Universität Berlin, Dissertation, 1999 31
- [Rogalski 2002] ROGALSKI, A. ; CHRZANOWSKI, K.: Infrared Devices and Techniques. In: *Opto-Electronics Review* 10(2) (2002), S. 111–136 8, 18
- [Rumar 1990] RUMAR, Kare: The basic driver error: late detection. In: *Ergonomics* 33 (1990), S. 1281–1290 2, 33
- [Rumar 2001] RUMAR, Kare: Intensity of High-Beam Headlights. In: *Progress in Automotive Lighting*. Darmstadt, Deutschland, 2001, S. 841–848 12
-

- [Rumar 2002] RUMAR, Kare: Night Vision Enhancement Systems: What Should They Do and What More Do We Need To Know? / University of Michigan. 2002 ( UMTRI-2002-12 ) – Forschungsbericht 33
- [Schmidt 2003] SCHMIDT, Volker: Skriptum zur Vorlesung: Wirtschaftsstatistik / Universität Ulm. 2003. – Vorlesungsskript 69
- [Schumann 2003] SCHUMANN, Josef: Zur wahrnehmungspsychologischen Bewertung von fusionierten Dualkamerabildern / BMW Forschung und Technik. 2003. – unveröffentlicher Bericht 96, 103
- [Schumann 2004] SCHUMANN, Josef: Zur Wahrnehmung von FIR-Kamerabildern: Eine Literaturstudie zu Einflussgrößen von FIR-Kamerabildern auf die Wahrnehmung des Kraftfahrers / MMI Consulting, im Auftrag der BMW Group Forschung und Technik. 2004. – Forschungsbericht 33, 34, 35, 36
- [Schweigert 2002] SCHWEIGERT, Manfred: *Fahrerblickverhalten und Nebenaufgaben*, TU München, Dissertation, 2002 101
- [Scribner 2000] SCRIBNER, Dean ; WARREN, Penny ; SCHULER, Jonathan: Extending color vision methods to bands beyond the visible. In: *Machine Vision and Applications* 11 (2000), S. 306–312 3, 24, 29
- [Sharma 1999] SHARMA, Ravi K.: *Probabilistic Model-based Multisensor Image Fusion*, Dissertation, 1999 27, 31, 32
- [Simard 1999] SIMARD, Philippe: *Fusion of Synthetic and Infrared Imagery*, McGill University, Master Thesis, 1999 27, 31, 32
- [Simard 2000] SIMARD, Philippe ; LINK, Norah K. ; KRUK, Ronald V.: Evaluation of Algorithms for Fusing Infrared and Synthetic Imagery. In: SPIE (Hrsg.): *SPIE Conference on Enhanced and Synthetic Vision* Bd. 4023. Orlando, USA, 2000, S. 127–138 24
- [Sinai 1999] SINAI, Michal J. ; MCCARLEY, Jason S. ; KREBS, William K. ; ESSOCK, Edward A.: Psychophysical Comparisons of Single- and Dual-band Fused Imagery. In: *SPIE Enhanced and Synthetic Vision* Bd. 3691, SPIE, 1999, S. 1–8 36
- [Sivak 1996] SIVAK, Michael: The Information that Drivers use: is it indeed 90% visual? In: *Perception* 25 (1996), S. 1081–1089 2
- [Stark 1987] STARK, E. A.: FLIR: What you don't see is what you get. In: JENSEN, R. S. (Hrsg.): *Forth International Symposium on Aviation Psychology*. Columbus, OH, 1987, S. 554–558 33
- [Sullivan 2001] SULLIVAN, John M. ; FLANNAGAN, Michael J.: Characteristics of Pedestrian Risk in Darkness / UMTRI. 2001 ( UMTRI-2001-33 ) – Forschungsbericht 1, 35
-

- [Tezcan 1999] TEZCAN, D. S. ; KOCER, F. ; AKIN, T.: An Uncooled Microbolometer Infrared Detector in any Standard CMOS Technology. In: *10. International Conference on Solid-State Sensor and Actuators*. Sendai, Japan, 1999, S. 610–613 19
- [Thevenaz 1998] THEVENAZ, Philippe ; RUTTIMANN, Urs E. ; UNSER, Michael: A Pyramid Approach to Subpixel Registration based on Intensity. In: *IEEE Transactions on Image Processing* 7 (1998), Nr. 1, S. 27–41 49
- [Toet 1990] TOET, Alexander: Hierarchical image fusion. In: *Machine Vision and Applications* 3 (1990), S. 1–11 30, 31
- [Toet 1996] TOET, Alexander ; WALRAVEN, Jan: New False Colour Mapping for Image Fusion. In: *Optical Engineering* 35 (1996), Nr. 3, S. 650–658 28
- [Treisman 1993] TREISMAN, A.: The Perception of Features and Objects. In: BADDELEY, A. (Hrsg.) ; WEISKRANTZ, L. (Hrsg.): *Attention: Selection, Awareness, and Control*. Oxford : Clarendon Press, 1993 33
- [Tsai 1987] TSAI, Roger Y.: A Versatile Camera Calibration Technique for High Accuracy 3D Machine Vision Metrology using Off-the-shelf TV Cameras and Lenses. In: *IEEE Journal of Robotics and Automation* RA-3(4) (1987), S. 323–344 42, 118, 119
- [Unser 1993] UNSER, Michael ; ALDROUBI, Akram ; GERFEN, Charles R.: A multiresolution Image Registration Procedure using Spline Pyramids. In: *Proc. of SPIE Wavelet Applications in Signal and Image Processing*, 2034 (1993), S. 160–170 49
- [Viola 1995] VIOLA, Paul A.: Alignment by maximization of mutual information / Massachusetts Institute of Technology, Artificial Intelligence Laboratory. 1995 ( AITR-1548 ) – PhD thesis 49
- [Wang 2000] WANG, Yaonan ; LOHMANN, Boris: Multisensor Image Fusion: Concept, Method and Applications / Universität zu Bremen. 2000. – Forschungsbericht. <http://www.iat.uni-bremen.de/Lohmann/Papers/wang1.pdf> 22
- [Waxmann 1995] WAXMANN, Allen M. ; FAY, David A. ; GOVE, Alan ; SEIBERT, Michael ; RACAMOTO, Joseph P. ; CARRICK, James E. ; SAVOYE, Eugene D.: Color Night Vision: Fusion of Intensified Visible and Thermal IR Imagery. In: *SPIE* 2463 (1995), S. 58–68 3, 28, 29
- [Wickens 2000] WICKENS, C. D. ; HOLLANDS, J. G.: *Engineering Psychology and Human Performance*. 3. Edition. Upper Saddle River, New York, USA : Prentice Hall, 2000 5, 33, 34
- [Winner 2003] WINNER, Hermann: Skriptum zur Vorlesung: Kraftfahrzeuge I / TU Darmstadt. 2003. – Vorlesungsskript 39
- [Wány 2002] WÄNY, Martin: CMOS Sensoren mit hoher Dynamik. In: *GIT Labor-Fachzeitschrift* 01/2002 (2002), S. 26–29 17
-

- 
- [Wördenweber 2003] WÖRDENWEBER, B.: Tomorrows lighting for more safety and mobility. In: *Optische Technologien in der Fahrzeugtechnik*. Baden-Baden, Deutschland : VDI, 2003, S. 147–160 2
- [Yadavalli 2003] YADAVALLI, G. ; MASRY, M. A. ; HEMAMI, S. S.: Frame Rate Preferences in Low Bit Rate Video. In: *IEEE Intl. Conf. on Image Processing 2003*. Barcelona, Spanien, 2003 105
-

## Eigene Publikationen

WEIDNER, Th.; HAHN, W.: Algorithms for Fusion of Far Infrared and visual Night-Time Images with Scope to an Automotive Application, 10. ITS-Weltkongress, Madrid, Spanien, 2003

WEIDNER, Th.; HAHN, W., WINNER, H.: Architektur eines Nachtsichtsystems mit Bildfusion, VDI Kongress Integrierte Sicherheit und Fahrerassistenz, Wolfsburg, Deutschland, 2004

---

## Lebenslauf

### **Persönliches:**

---

Name: Thomas Weidner  
Geburtstag: 22.01.1977  
Geburtsort: Leipzig  
Familienstand: ledig  
Staatsangehörigkeit: deutsch  
Anschrift: Michaeliburgstr. 16, 81671 München

### **Schulbildung:**

---

1982-1991 49. Oberschule Leipzig  
1991-1995 Spezialgymnasium "Wilhelm-Ostwald"  
Abschluss: Abitur

### **Zivildienst:**

---

1996-1997 St. Elisabeth Krankenhaus Leipzig

### **Studium:**

---

1995-2002 Studiengang Elektrotechnik, Studienrichtung Informations-  
technik an der TU Dresden  
1999-2000 Auslandsstudium an der University of Wisconsin, Madison  
Abschluss: Diplom-Ingenieur

### **Promotion:**

---

2002-2004 Industriepromotion bei der BMW Group in München  
Universitäre Betreuung durch Hr. Prof. Dr. rer. nat. H. Win-  
ner, Fachgebiet Fahrzeugtechnik der TU Darmstadt

### **Berufstätigkeit:**

---

seit 2004: BMW AG, München  
Entwicklungsingenieur für Prüftechnik

München, den 01.06.2005

---