

Photogrammetrische Erfassung der Verformungs- und Rissentwicklung bei baumechanischen Untersuchungen

Application of photogrammetry for measuring deformations and cracks during load tests in civil engineering material testing

Von der Fakultät Bauingenieurwesen
der Technischen Universität Dresden
zur Erlangung der Würde eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte

Dissertation

vorgelegt von
Dipl.-Ing. Uwe Hampel
geb. am 02. November 1967 in Zittau

Gutachter:

Prof. i. R. Dr.-Ing. habil. H. Opitz
Prof. Dr. habil. H.-G. Maas
Prof. Dr.-Ing. W. Schwarz

Tag der Verteidigung: 21. Februar 2008



Die Fragen sind es,
aus denen das, was bleibt, entsteht.

Erich Kästner

Vorwort

Die vorliegende Arbeit behandelt fachübergreifende Problemstellungen im *Bautechnischen Mess- und Versuchswesen* hinsichtlich des Einsatzes photogrammetrischer Verfahren zur Erfassung der Verformungs-, Riss- und Schädigungsentwicklung bei baumechanischen Untersuchungen. Diese bildeten den Ausgangspunkt für eine intensive Behandlung von Themenbereichen der *Digitalen Nahbereichsphotogrammetrie*, die eng mit den Fachgebieten der Mathematik, Physik und Informatik verknüpft ist. Dass die interdisziplinäre Thematik diese Arbeit stark geprägt hat, zeigt sich an den inhaltlichen Schwerpunkten wie auch im Aufbau der Arbeit.

Im Verlauf der vielschichtigen Untersuchungen – in den verschiedensten Teildisziplinen des Bauingenieurwesens – erwies sich der Einsatz photogrammetrischer Verfahren oftmals als eine Herausforderung und führte zu Problemstellungen, die Anlass zur Erarbeitung neuer Lösungsansätze gaben. Diese führten in den überwiegenden Fällen zu den gewünschten Ergebnissen und ermöglichten nicht selten erst eine erfolgreiche, effiziente Messung. In diesem Zusammenhang möchte ich mich bei den Experimentatoren in den jeweiligen Fachdisziplinen des Bauingenieurwesens bedanken, die mich durch das entgegengebrachte Verständnis in meiner Arbeit unterstützt haben. Nicht selten kam es durch die parallele Ausführung von anwendungsorientierten Untersuchungen, Grundlagenuntersuchungen und Entwicklungsarbeit zu Verzögerungen, die eine unmittelbare Versuchsauswertung unmöglich machten. Die erzielten Ergebnisse rechtfertigen den begonnenen Weg, dessen konsequente Fortsetzung zu weiteren neuen und optimierten photogrammetrischen Messprozessen im *Bautechnischen Mess- und Versuchswesen* führen kann.

Der Grundstein für diese Arbeit wurde durch meine Förderung als Graduiertenstudent durch das Land Sachsen gelegt, verbunden mit der Unterstützung, die ich im Verlauf der Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Professur für Bautechnisches Mess- und Versuchswesen unter Leitung von Herrn Prof. i. R. Dr.-Ing. habil. H. Opitz und durch die Betreuung von Herrn Prof. i. R. Dr.-Ing. habil. K. Regensburger (Professur Photogrammetrie) an der *Technischen Universität Dresden* erfahren habe.

Die begonnenen Arbeiten wurden durch die *Deutsche Forschungsgesellschaft* (DFG) in Forschungsprojekten gefördert, die eine interdisziplinäre Bearbeitung von Teilproblemen unter Mitwirkung der Professur für Photogrammetrie (Prof. Dr. habil. H.-G. Maas) und der Professur für Erkennende Systeme und Bildverarbeitung (Prof. i. R. Dr.-Ing. habil.

S. Fuchs) der *Technischen Universität Dresden* ermöglichten. Die Integration des DFG-Forschungsprojektes in den Sonderforschungsbereich 528 bewirkte eine kontinuierliche Fortsetzung der begonnenen Arbeiten an der Fakultät Bauingenieurwesen der *Technischen Universität Dresden*. Diese werden seit Beginn mit großem Interesse verfolgt und durch den Sonderforschungsbereich 528 – unter Leitung von Herrn Prof. Dr.-Ing. M. Curbach – aktiv unterstützt. Während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter im Sonderforschungsbereich 528 wechselte ich an die Professur für Photogrammetrie der *Technischen Universität Dresden*. Hier konnten die Forschungsarbeiten zur photogrammetrischen Erfassung der Verformungs-, Riss- und Schädigungsentwicklung bei baumechanischen Untersuchungen textilverstärkter Baukonstruktionen unter Leitung von Herrn Prof. Dr. habil. H.-G. Maas fortgesetzt werden.

Angesichts des starken Interesses, das photogrammetrische Verfahren seitens verschiedener Teildisziplinen des Bauingenieurwesens erfahren, bietet die vorliegende Arbeit gegebenenfalls auch einen Ausgangspunkt für die selbständige Planung photogrammetrischer Messungen, die bei einer ausreichenden Sensibilität für relevante bauspezifische und photogrammetrische Aspekte zur systematischen Lösung von wissenschaftlichen Fragestellungen beitragen kann.

Uwe Hampel

Dank

Die Bearbeitung und Fertigstellung der vorliegenden Arbeit wurde durch zahlreiche Personen in direkter bzw. indirekter Weise unterstützt, denen ich hiermit auf das Herzlichste danken möchte.

Mein besonderer Dank gilt den Hochschullehrern der *Technischen Universität Dresden*

Herrn Prof. i. R. Dr.-Ing. habil. H. Opitz,

Herrn Prof. i. R. Dr.-Ing. habil. K. Regensburger,

Herrn Prof. i. R. Dr.-Ing. habil. S. Fuchs,

Herrn Prof. Dr. habil. H.-G. Maas und

Herrn Prof. Dr.-Ing. M. Curbach,

die mich während meiner wissenschaftlichen Tätigkeit unmittelbar unterstützt und die vorliegende Arbeit maßgeblich geprägt haben.

Für die Bereitstellung des Graduiertenstipendiums danke ich den Verantwortlichen und den maßgebenden Institutionen des Landes Sachsen und der *Technischen Universität Dresden* ganz herzlich.

Meinen Dank möchte ich auch an die *Deutsche Forschungsgesellschaft* (DFG) richten, durch deren langjährige Unterstützung viele der durchgeführten wissenschaftlichen Untersuchungen erst möglich wurden.

Ein besonderer Dank gebührt meiner Frau Anita, die mir in selbstloser Haltung über einen langen Zeitraum hin den oftmals nicht ganz einfachen Spagat zwischen unserem Familienleben und meiner Arbeit ermöglichte und mich in beschwerten Stunden immer wieder ermutigt hat, an dem begonnenen Weg festzuhalten.

Mein Dank gilt auch Herrn Pfannenschmidt für die Unterstützung beim Korrekturlesen der vorliegenden Arbeit.

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Erkenntnisstand	2
1.3	Ausgangsfragestellung und Zielsetzung	3
1.3.1	Bautechnisches Versuchswesen	4
1.3.2	Digitale Nahbereichsphotogrammetrie	4
1.3.3	Bauspezifischer Auswerteprozess	6
1.3.4	Konzeption für die Durchführung bauspezifischer photogrammetrischer Messprozesse	6
1.4	Aufbau der Arbeit	7
2	Versuchsplanung	9
2.1	Charakterisierung von Versuchsprozessen	9
2.2	Versuchsanalyse	11
2.3	Zielgrößen	11
2.4	Einflussgrößen	11
2.4.1	Objektparameter	12
2.4.2	Prozessparameter	12
2.4.3	Steuergrößen	12
2.4.4	Störgrößen	13
2.5	Faktoren	14
2.6	Versuchsplan	14
3	Bautechnisches Mess- und Versuchswesen	15
3.1	Aufgaben und Besonderheiten	15
3.2	Versuchsobjekt	16
3.2.1	Versuchsobjektarten	16
3.2.2	Materialeigenschaften	16
3.2.3	Oberflächenstruktur	18
3.2.3.1	Mikrostrukturelle Oberflächengeometrie	19
3.2.3.2	Strahlungsphysikalische und lichttechnische Materialeigenschaften	19
3.2.4	Oberflächentextur	21

3.2.5	Objektgeometrie	21
3.2.5.1	Allgemeine Objektgeometrie	22
3.2.5.2	Oberflächentopologie	23
3.3	Versuchsprozess	23
3.3.1	Versuchsarten	23
3.3.2	Versuchstechnologien	24
3.3.3	Versuchsbedingungen	24
4	Grundlagen bauspezifischer photogrammetrischer Messprozesse	25
4.1	Vorbetrachtungen	25
4.2	Objektbeleuchtung	27
4.2.1	Grundlagen	27
4.2.2	Natürliche Objektbeleuchtung	28
4.2.3	Künstliche Objektbeleuchtung	30
4.3	Objektsignalisierung	32
4.3.1	Aufgabenspezifische Texturanalyse	32
4.3.2	Flächenbasierte Objektsignalisierung	34
4.3.3	Diskrete Objektsignalisierung	35
4.3.3.1	Merkmalsbasierte Messmarken	36
4.3.3.2	Intensitätsbasierte Messmarken	37
4.3.3.3	Sonderformen diskreter Objektsignalisierungen	38
4.3.3.4	Messmarkencodierung	38
4.3.3.5	Aufgabenspezifischer Messmarkenentwurf	39
4.3.3.6	Messmarkenanbringung	40
4.4	Photogrammetrischer Aufnahmeprozess	41
4.4.1	Begriffsdefinitionen	41
4.4.2	Zielgrößenorientierte Kategorisierung von Aufnahmekonfigurationen	43
4.4.2.1	2D-Objekterfassung	43
4.4.2.2	2.5D-Objekterfassung	43
4.4.2.3	2D/2.5D-Objekterfassung mittels Spiegelphotogrammetrie	45
4.4.2.4	3D-Objekterfassung	47
4.4.3	Messkamerakonfiguration	49
4.4.4	Messbilderfassung	49
4.4.4.1	Photogrammetrische Messkameras und Messbilder	49
4.4.4.2	Kalibrierprozess – Bilderfassung	50
4.4.4.3	Synchronisierung zeitabhängiger Steuergrößen	50
4.5	Photogrammetrische Auswerteprozesse	51
4.5.1	Digitale Bildverarbeitung	51

4.5.2	Bildanalyse- und Bildauswerteverfahren	51
4.5.2.1	Diskrete Bildpunktmessungen	51
4.5.2.2	Flächenbasierte Bildzuordnung	52
4.5.2.3	Bestimmung optimaler Verfahren und Parameter	55
4.5.2.4	Zeitbedarf	57
4.5.3	Kalibrierprozess – Auswertung	59
4.5.4	Objektkoordinatenberechnung	61
4.5.4.1	2D-Objektkoordinatenberechnung	61
4.5.4.2	2.5D-Objektkoordinatenberechnung	61
4.5.4.3	3D-Objektkoordinatenberechnung	62
4.6	Bauspezifische Auswerteprozesse	63
4.7	Zusammenführung bauspezifischer und photogrammetrischer Teilprozesse	64
4.7.1	Grundlagen	64
4.7.2	Prinzipielle Vorgehensweise	64
4.7.3	Kopplungsprozess	65
4.7.3.1	Zeitbasierte Kopplungsprozesse	65
4.7.3.2	Ortsbasierte Kopplungsprozesse	67

5 Photogrammetrische Messprozesse im bautechnischen Mess- und Versuchswesen 69

5.1	Konzeption für die Umsetzung bauspezifischer photogrammetrischer Messprozesse	69
5.1.1	Planungsphase	69
5.1.2	Vorbereitungsphase	70
5.1.3	Ausführungsphase	70
5.1.4	Nachbereitungsphase	70
5.2	Modulares Mess- und Auswertesystem	71
5.2.1	Steuer- und Datensynchronisierungsmodul	71
5.2.2	Beleuchtungsmodule	71
5.2.3	Bilderfassungsmodul	71
5.2.4	Auswertemodule	71
5.3	Anwendungsbeispiele	73
5.3.1	Photogrammetrische Verformungsmessungen bei Untersuchungen zum Verhalten von Pflasterdecken unter horizontaler Belastung	73
5.3.2	Photogrammetrische Verformungsmessungen an Brettstapelelementen	78
5.3.3	Erfassung von flächenhaften Verformungen bei Druckversuchen an Holzversatzkonstruktionen	82
5.3.4	Photogrammetrische Verformungsmessungen bei baumechanischen Untersuchungen von textilverstärkten Holzproben	84

5.3.5	Verifikation von FEM-Berechnungen mittels photogrammetrischer Messungen bei baumechanischen Untersuchungen textilverstärkter Holzkonstruktionen	86
5.3.6	Photogrammetrische Dehnungsmessung zur Kalibrierung von FBG-Sensoren	87
5.3.7	Verformungs- und Rissmessungen bei Zug- und Schubversuchen an textilverstärkten Betonproben	90
6	Zusammenfassung	105
	Anhang	107
	A1 – Symbole für Flussdiagramme	107
	A2 – Rissanalyse	107
	A3 – Kalibrierprozesse	112
	Literaturverzeichnis	115
	Bauwesen, Versuchswesen	115
	Photogrammetrie	116
	Versuchsplanung	118
	Vorschriften und Normen	118
	Veröffentlichungen des Autors	121

Abbildungsverzeichnis

2.1	Charakterisierung von Versuchsprozessen	9
2.2	Versuchsplanung	10
2.3	Prozessabhängige Steuergrößen	13
3.1	Natürliche Oberflächentexturen bauspezifischer Materialien	21
4.1	Informationsfluss photogrammetrischer Messprozesse bei experimentellen Untersuchungen im <i>Bautechnischen Mess- und Versuchswesen</i>	26
4.2	Einteilung künstlicher Lichtquellen (Lampen) nach DIN 5039 [66]	30
4.3	Ablaufschema zur Festlegung der Objektsignalisierung	33
4.4	Künstliche flächenbasierte Objektsignalisierung in Form einer direkten Objektmarkierung (a) und mittels Einsatz kohärenter Beleuchtungsquellen (Laser) zur Erzeugung von Speckle-Mustern (b)	35
4.5	Klassische Formen merkmalsbasierter Messmarken	36
4.6	Spezialform einer merkmalsbasierter Messmarke [96]	36
4.7	Intensitätsbasierte Messmarken (n-ten Grades)	37
4.8	Testfeld mit Varianten intensitätsbasierter Messmarken zur Verifizierung der Einmessgenauigkeit intensitätsbasierter Messmarken [81]	38
4.9	Auswahl von Messmarkenbeschriftungen und -codierungen [20, 24]	39
4.10	Modifikation von Messmarken durch einen zusätzlichen Einmesspunkt im Markenzentrum für eine optimale Einmessung im Objektraum	40
4.11	Messmarkenanbringung am Versuchsobjekt (z. B. für Holzversuche).	41
4.12	Aufnahmekonfigurationen für die 2D-Objekterfassung	44
4.13	Zusammenhang zwischen Lagefehler ΔR und Höhenunterschied ΔY	45
4.14	Einsatz der 2.5D-Objekterfassung (<i>Dynamische Projektive Transformation</i>) bei einem Zugversuch an einer textilbewehrten Betonprobe	46
4.15	Einsatz der Spiegelphotogrammetrie.	47
4.16	Aufnahmekonfiguration für die 3D-Objekterfassung (Stereoaufnahme, normal)	48
4.17	Bildzuordnung homologer Bildbereiche am Beispiel von zwei konvergenten Stereoaufnahmen (Lastbild 0 [A,B], Lastbild 1 [C,D])	53
4.18	Unabhängige Bildzuordnung mit relativem (a) und absolutem (b) Bezug	54
4.19	Abhängige Bildzuordnung mit relativem (a) und absolutem (b) Bezug	54

4.20	Versuchsanordnungen für Soll-Ist-Vergleiche unter Verwendung eines Verschiebetisches mit einem Messfeld von 30 cm x 30 cm (a) und einem 3D-Modell mit einem Messfeld von 20 cm x 20 cm (b) für Materialproben mit unterschiedlichen Oberflächenstrukturen und -geometrien	56
4.21	Ergebnisse der Bestimmung optimaler Parameter für ausgewählte Verfahren und Materialien (KOR Korrelation, LSM Least Square Matching, SA Sterealgorithmus, K Konvergent- und P Parallelaufnahme)	57
4.22	Zeitanalyse für Bildzuordnung homologer Bildbereiche mittels Least Squares Matching (LSM) und Korrelation (KOR) für ausgewählte natürliche und künstliche Oberflächenstrukturen [92]	58
4.23	Kopplung prozess- und zeitabhängiger Steuergrößen	66
4.24	Kopplung prozess- und ortsabhängiger Steuergrößen	68
5.1	Versuchsaufbau für photogrammetrische Verformungsmessungen bei Untersuchungen zum Verhalten von Pflasterdecken unter horizontaler Belastung	74
5.2	Photogrammetrischer Messbereich bei Untersuchungen zum Verhalten von Pflasterdecken unter horizontaler Belastung	76
5.3	Ausgewählte Detailansichten von Pflasterdecken	76
5.4	Photogrammetrisch bestimmtes Verschiebungsfeld (normiertes Koordinatensystem)	77
5.5	Versuchsstand für Brettstapelelemente	78
5.6	Brettstapelelement E1-ENa-2 (Systemkonfiguration: Bezugssystem, Messmarken, IWA, Krafteinleitungspunkt usw.)	80
5.7	Photogrammetrisch erfasstes Verschiebungsfeld an einem Brettstapelelement bei $F_H = 160, 2 \text{ kN}$, $F_V = 0, 0 \text{ kN}$ (E1-ENa-2, Teil 2)	81
5.8	Vertikalverschiebungen in 3 Profilen bei $F_H = 160, 2 \text{ kN}$, $F_V = 0, 0 \text{ kN}$ (E1-ENa-2, Teil 2)	82
5.9	Diskrete und flächenhafte 2D-Verformungsmessungen bei Belastungsversuchen an Holzversatzkonstruktionen: (a) Referenzzustand, (b) 2D-Verformungen in 1,5-fach überhöhter Vektordarstellung, (c) Bruchzustand und (d) Umrissflächendarstellung der vertikalen Relativverschiebungen	83
5.10	Referenzbilder für einen Zug- und Druckversuch an einem textilbewehrten Holzprobekörper mit künstlich markierten Objektoberflächen	84
5.11	Photogrammetrische Verformungsmessung bei einem Zugversuch unter Verwendung eines FEM-Netzes	85
5.12	Textilverstärkte Holzprobe (Referenzbild Kamera 1).	86
5.13	Trajektorien ausgewählter Objektpunkte	87

5.14	Photogrammetrische Dehnungsmessung zur Kalibrierung von FBG-Sensoren unter Verwendung von Spezialspiegeln	88
5.15	Zwischenergebnisse der photogrammetrischen Dehnungsmessung [77]	89
5.16	Vergleich der mit Faser-Bragg-Gittern und Photogrammetrie ermittelten Dehnungen	89
5.17	Zugversuch an einer textilbewehrten Betonprobe (Sonderforschungsbereich 528 Teilprojekt B1)	90
5.18	Flächige Bestimmung der Risslage für ausgewählte Laststufen und Bildausschnitt mittels Verfahren der digitalen Bildverarbeitung	91
5.19	Ergebnis einer photogrammetrischen 3D-Messung für 1 Profil (ca. 1600 Messpunkte in Zugrichtung) bei einem Zugversuch einer textilbewehrten Betonprobe im Sonderforschungsbereich 528 (Teilprojekt B1)	92
5.20	Ergebnisse der ersten Bearbeitungsschritte (1–3) bei einer Rissanalyse eines synthetisch erzeugten Messprofils (Laststufe $L_i = 80$)	95
5.21	Rissanalyse für alle Laststufen unter Einbeziehung der Daten aus Analyseschritt 3 in 3D-Darstellung (Schritt 4).	96
5.22	Rissanalyse (Rissentstehung und -position) für alle Laststufen unter Einbeziehung der Daten aus Analyseschritt 3.	97
5.23	Flächenhafte Verschiebungsanalyse (ca. 1.8 Mio. Messpunkte)	98
5.24	Photogrammetrische Verformungs- und Rissmessungen bei Schubversuchen textilverstärkter Betonprobekörper (SFB 528, C1)	99
5.25	Messbereich für die photogrammetrische Erfassung der Verformungs-, Riss- und Schädigungsentwicklung bei Schubversuchen im Teilprojekt C1 des Sonderforschungsbereichs 528	100
5.26	Photogrammetrische Dehnungsmessung in festen Intervallen (Teilprojekt C1, Sonderforschungsbereich 528)	101
5.27	Ergebnis für berechnetes Rissbild mit eingetragenen Messprofilen (C1 T24-5)	102
5.28	Lastabhängige Rissentstehung (C1 T14-1, Profil 9)	103
5.29	Brucherfassung bei einem Schubversuch einer textilverstärkten Betonprobe (SFB 528 C1) mittels Hochgeschwindigkeitskamera (2 ms, 4000 Bilder/s)	103
6.1	Rissanalyse (1. Ableitung der synthetisch erzeugten Ausgangsdaten für Laststufe $L_i = 80$)	108
6.2	Rissanalyse (1. Ableitung der synthetisch erzeugten und aufbereiteten Ausgangsdaten für Laststufe $L_i = 80$)	109
6.3	Rissanalyse (2. Ableitung der synthetisch erzeugten Ausgangsdaten für Laststufe $L_i = 80$)	110

6.4	Rissanalyse (2. Ableitung der synthetisch erzeugten und aufbereiteten Ausgangsdaten für Laststufe $L_i = 80$)	111
6.5	Verzeichnungskurven (Vergleich ausgewählter Untersuchungen) [92] . . .	112

Tabellenverzeichnis

3.1	Versuchsobjektarten im <i>Bautechnischen Mess- und Versuchswesen</i>	17
3.2	Elastizitätsmodul E und Längenausdehnungskoeffizient α von ausgewählten Materialien bzw. Werkstoffen [2]	18
3.3	Reflexionsgrad ausgewählter Materialien [33]	20
4.1	Wellenlängenbereiche ausgewählter Strahlungsarten (DIN 5031 Teil 7) . .	27
4.2	Einflussgrößen von Beleuchtungsquellen	29
4.3	Einteilung elektrischer Lampen nach DIN 5039 [66]	31
4.4	Flächenbasierte Bildzuordnungsverfahren	52
5.1	Digitale Bilderfassungssysteme	72
5.2	Auswahl entwickelter Auswerte- und Interaktionsmodule	72
5.3	Rissdetektion in Verschiebungsprofilen (Bearbeitungsschritte)	94
6.2	Punktzentrenermittlung (Vergleich ausgewählter Untersuchungen) [92] . .	113

1 Einführung

1.1 Motivation

Verfahren der digitalen Nahbereichsphotogrammetrie ermöglichen eine dreidimensionale Erfassung von Objekten und stellen damit interessante Lösungsansätze für Messaufgaben im *Bautechnischen Mess- und Versuchswesen* dar. Ihr Einsatz bietet bei einer Vielzahl baumechanischer Untersuchungen die Voraussetzung für eine kontinuierliche, zeit-synchrone Objektoberflächenerfassung bei kurz- und langzeitigen Belastungsversuchen im Labor und in situ. Die daraus resultierenden Möglichkeiten der kontinuierlichen Erfassung von Verformungs-, Riss- und Schädigungsentwicklungen an Objektoberflächen stellen für viele experimentelle Untersuchungen im Bauingenieurwesen eine signifikante Qualitätssteigerung dar, die mit klassischen Messtechniken – wie z. B. Dehnmessstreifen oder induktiven Wegaufnehmern – nur bedingt bzw. nicht realisiert werden kann.

Um das Potential der digitalen Nahbereichsphotogrammetrie zur kontinuierlichen Erfassung der Verformungs-, Riss- und Schädigungsentwicklung an Objektoberflächen bei baumechanischen Untersuchungen zu erfassen, sind – aufbauend auf den bekannten Grundlagen und Lösungsansätzen – systematische Untersuchungen erforderlich. Diese bilden den Ausgangspunkt für den Einsatz photogrammetrischer Verfahren bei experimentellen Untersuchungen in den verschiedenen Teildisziplinen des Bauingenieurwesens, z. B. im Holz-, Massiv-, Mauerwerks-, Stahl- und Straßenbau. Die photogrammetrisch zu erfassenden Versuchsobjekte – einschließlich ihrer Veränderungen bei den Belastungsversuchen – sind u. a. kleinformative Prüfkörper, Baukonstruktionen sowie bestehende Bauwerke aus den verschiedensten Materialien bzw. Verbundmaterialien. Bei den vorgenannten anwendungsorientierten Untersuchungen muss beachtet werden, dass aufgrund der z. T. sehr heterogenen Anforderungen und der zahlreichen Möglichkeiten, die beim Einsatz photogrammetrischer Verfahren denkbar sind, die Notwendigkeit der Auswahl und ggf. einer Weiter- bzw. Neuentwicklung geeigneter Systeme, effizienter Verfahren und optimaler Auswertalgorithmen der digitalen Nahbereichsphotogrammetrie besteht. In diesem Zusammenhang wird eine Untersuchung aller relevanten Einflussgrößen erforderlich, die den photogrammetrischen Messprozess in Abhängigkeit der jeweiligen Messaufgabe beeinflussen.

1.2 Erkenntnisstand

Im Verlauf der letzten Jahrzehnte haben sich in den verschiedensten Industrie- und Wissenschaftsbereichen photogrammetrische Messtechniken etabliert.

Einen besonderen Aufschwung bewirkte die Einführung digitaler Bilderfassungs- und Auswertesysteme, deren Erschließung für bestehende und neue Aufgaben der Nahbereichsphotogrammetrie umfangreiche Grundlagen- und Detailuntersuchungen initiierte. Diese sind teilweise durch die beständige Weiterentwicklung digitaler Aufnahme- und Auswertetechniken geprägt.

Die in [11, 25, 28, 34, 35, 37–39] detailliert vorgestellten Anwendungsbeispiele der Nahbereichsphotogrammetrie dokumentieren sehr eindrucksvoll die vorgenannten Entwicklungen und zeigen, dass sich die digitale Nahbereichsphotogrammetrie im Verlauf der letzten Jahre als ein effizientes Messverfahren für eine Vielzahl von Messaufgaben erwiesen hat. Mit den anwendungsorientierten Untersuchungen, die direkt bzw. indirekt mit der vorliegenden Arbeit verbunden sind, konnte aktiv dazu beigetragen werden.

Im Bauwesen dominieren photogrammetrische Anwendungen, die sich beispielsweise auf eine statische, zwei- und dreidimensionale Erfassung von Bauwerken beziehen und ggf. eine photorealistische Objektmodellierung beinhalten. Diese Aufgaben werden häufig durch die Architektur, Archäologie und Denkmalpflege initiiert und dienen der Dokumentation des jeweiligen Ist-Zustandes [34, Kap. 1]. Weitergehende photogrammetrische Messaufgaben ergeben sich z. B. bei der kurz- bzw. langzeitigen Bauwerksüberwachung zur Dokumentation der zeitabhängigen Verformungs- und Schadensentwicklung [12, 97]. Einen Spezialfall stellen Belastungsversuche an bestehenden Bauwerken dar, für die unter Beachtung der jeweiligen Randbedingungen photogrammetrische Messverfahren herangezogen werden können [9, 10, 68, 85, 98].

Für eine Auswahl der vorgenannten Anwendungen wurden Systeme eingesetzt bzw. entwickelt, die Bilddatensätze vollautomatisch auswerten und Resultate in Echtzeit bzw. Quasi-Echtzeit zur Verfügung stellen. Die Vielzahl der entwickelten Systeme unterstreicht, dass es praktisch unmöglich ist, alle prinzipiell und sinnvoll photogrammetrisch lösbaren Messaufgaben mit einem System abzudecken. Daher werden nur für häufig auftretende, klar definierte Messaufgaben kommerzielle Systeme angeboten. Einschränkend ist festzustellen, dass diese oftmals keinen ausreichenden Einblick in die ablaufenden Prozesse zur objektiven Bewertung und z. T. keine ausreichenden Zugriffs- und Erweiterungsmöglichkeiten für die Einbeziehung in vollautomatisierte Prozesse bieten. Vor diesem Hintergrund ist die große Anzahl spezieller Systementwicklungen in vielen Industrie- und Wissenschaftsbereichen verständlich, die den Vorteil eines *transparenten* und frei konfigurierbaren Systems bieten.

Das starke Interesse an photogrammetrischen Verfahren führte in den letzten Jahrzehnten zu einer Reihe von umfangreichen Werken [18, 25, 31, 32, 36]. Neben der Abhandlung von Grundlagen wurden in diesen Monographien bzw. Arbeiten auch spezielle, anwendungsbezogene Aspekte photogrammetrischer Verfahren behandelt, die als allgemeine Grundlage der vorliegenden Arbeit angesehen werden können. Auf spezielle Bezüge und Grundlagen, die Einfluss auf die Arbeit hatten, wird in den jeweiligen Abschnitten eingegangen.

1.3 Ausgangsfragestellung und Zielsetzung

Diese Arbeit soll die Einsatzmöglichkeiten von Verfahren der digitalen Nahbereichsphotogrammetrie zur kontinuierlichen, zeitsynchronen Erfassung der Verformungs-, Riss- und Schädigungsentwicklung an Oberflächen von z. B. Probekörpern und Baukonstruktionen bei kurz- und langzeitigen Belastungsversuchen im bautechnischen Versuchswesen erschließen.

Die Bearbeitung dieser komplexen Thematik erfordert u. a. eine Auswahl und ggf. eine Adaption bzw. Weiterentwicklung von Verfahren der digitalen Nahbereichsphotogrammetrie, die eine optimale Erfassung der Verformungs-, Riss- und Schädigungsentwicklung für baumechanische Untersuchungen ermöglicht. Die Kriterien für eine optimale Erfassung sind i. d. R. von subjektiven und objektiven Aspekten des jeweiligen Versuchsprozesses abhängig und können unterschiedlich ausgelegt werden. Diesbezüglich sind weiterführende Erläuterungen sinnvoll, die Aufschluss über die jeweiligen Optimierungen geben und damit eine objektive Beurteilung und einen Vergleich der Ergebnisse erlauben.

In Verbindung mit konkreten Messaufgaben in verschiedenen Teildisziplinen des Bauingenieurwesens – z. B. im Holz-, Massiv-, Mauerwerks- und Straßenbau – sollen die eingesetzten photogrammetrischen Verfahren hinsichtlich der erreichbaren Messgenauigkeit und Effizienz bewertet werden. Die dafür erforderlichen fachbezogenen Detailuntersuchungen beziehen sich auf

- alle relevanten Aspekte der Vorbereitung,
- den photogrammetrischen Aufnahmeprozess mittels digitaler Kameras,
- den photogrammetrischen Auswerteprozess sowie
- die bauspezifische Datenanalyse

und führen zu Fragestellungen bzw. Problemkreisen, die in den Abschnitten 1.3.1–1.3.4 näher erläutert werden.

1.3.1 Bautechnisches Versuchswesen

Das bautechnische Versuchswesen umfasst die Planung, Durchführung und Auswertung baumechanischer Untersuchungen für experimentell orientierte Teildisziplinen des Bauingenieurwesens. Die Realisierung vorgenannter Untersuchungen erfolgt üblicherweise unter aktiver Mitwirkung von Experimentatoren aus den jeweiligen Teilfachgebieten des Bauingenieurwesens und erfordert in der Planungsphase i. d. R. auch eine Entscheidung über geeignete Messverfahren. Im Zusammenhang mit der Auswahl spezieller Messtechniken ist zu beachten, dass oftmals eine Reihe von Entscheidungen erforderlich werden, die einen signifikanten Einfluss auf den Ablauf und das Ergebnis der jeweiligen Untersuchungen haben können. In Abhängigkeit von deren Komplexität und der einbezogenen Messtechnologien kann sich dieser Prozess als sehr aufwendig und unübersichtlich erweisen.

In Bezug auf die photogrammetrische Erfassung der Verformungs-, Riss- und Schädigungsentwicklung bei baumechanischen Untersuchungen kann beispielsweise auf viele Aspekte der jeweiligen Messaufgabe Rücksicht genommen werden. Die damit verbundenen – oftmals sehr zahlreichen und voneinander abhängigen – Entscheidungen erfordern bei der Planung und Realisierung bauspezifischer photogrammetrischer Messprozesse ein systematisches Vorgehen.

In der vorliegenden Arbeit wird nach einem geeigneten Rahmen bzw. einer übersichtlichen Orientierungshilfe gesucht, die dem Experimentator eine verlässliche Entscheidungsgrundlage für die systematische, optimale Planung und Umsetzung photogrammetrischer Messprozesse zur Erfassung der Verformungs-, Riss- und Schädigungsentwicklung bei baumechanischen Untersuchungen bieten kann.

Ein weiterer Schritt zur systematischen Einbeziehung photogrammetrischer Verfahren in baumechanische Untersuchungen wird – unter Einbeziehung bekannter Messaufgaben aus dem bautechnischen Versuchswesen – in der Zusammenstellung typischer und spezieller Einfluss- und Zielgrößen gesehen. Aus diesem Katalog können z. B. konkrete Anforderungen und Randbedingungen für den Einsatz photogrammetrischer Verfahren im bautechnischen Versuchswesen erarbeitet werden. In diesem Zusammenhang muss beachtet werden, dass die Relevanz der jeweiligen Einflussgrößen für den photogrammetrischen Messprozess von der jeweiligen Messaufgabe abhängt und keine absolute Vorgabe darstellt.

1.3.2 Digitale Nahbereichsphotogrammetrie

Die Auswahl geeigneter Verfahren der digitalen Nahbereichsphotogrammetrie für die Erfassung der Verformungs-, Riss- und Schädigungsentwicklung bei baumechanischen

Untersuchungen erfordert – aufgrund der teilweise sehr hohen Anforderungen und Besonderheiten im bautechnischen Versuchswesen – eine wissenschaftliche Auseinandersetzung mit vielen Details photogrammetrischer Messprozesse. Aufbauend auf detaillierten Kenntnissen der *Digitalen Nahbereichsphotogrammetrie* bietet sich die systematische Abhandlung entsprechender Themenkomplexe in der Reihenfolge der Informationsentstehung, -übertragung und -auswertung bei photogrammetrischen Messprozessen an.

Zu Beginn der Untersuchungen sind relevante Aspekte bzgl. der Objektbeleuchtung, der Objektsignalisierung und der photogrammetrischen Bilderfassung zu behandeln. Einen besonderen Schwerpunkt bildet dabei der photogrammetrische Bilderfassungsprozess unter Einbeziehung digitaler Kameras. In diesem Zusammenhang können detaillierte Untersuchungen erforderlich werden, beispielsweise in Bezug auf die

- System- und Kamerakalibrierung,
- Überprüfung der Stabilität (z. B. Temperaturstabilität bei kurz- und langzeitigen Versuchen bzw. Versuchsserien) und
- Synchronität bei der Aufnahme von Bildsequenzen.

Für die Erfassung zwei- und dreidimensionaler Objekte und Verschiebungsfelder sowie ihrer Veränderungen sind optimale bzw. effiziente Aufnahmedispositionen unter den Aspekten Objektgröße und Auflösung der Bilder abzuleiten und deren Invarianz während der photogrammetrischen Aufnahme zu untersuchen.

Die Bildzuordnung homologer Bildbereiche stellt einen wichtigen Schritt bei der belastungsabhängigen Erfassung von diskreten Objektverschiebungen und Verschiebungsfeldern aus einer Folge von Bildern dar. Entsprechend der Messaufgabe – die z. B. die Erfassung von diskreten bzw. flächenhaften Verschiebungen bzw. Verschiebungsfeldern anhand natürlicher bzw. künstlicher Oberflächenstrukturen beinhaltet – sind für die Bildzuordnung homologer Bildbereiche unter den Aspekten erreichbarer Messgenauigkeit, Robustheit und Messgeschwindigkeit geeignete merkmals- und intensitätsbasierte Verfahren zu untersuchen. Die digitale Bildzuordnung für die Erfassung der Verschiebungsfelder setzt eine strukturierte Objektfläche der Prüfkörper voraus. Da die natürliche Oberfläche vielfach zu geringe Kontraste und Texturen aufweist, sind geeignete Objektsignalisierungen zu untersuchen und ggf. zu entwickeln.

Die Ergebnisse der photogrammetrischen Verschiebungs- und Rissmessung sind vom Bild- in den Objektraum zu transformieren. Zur Bestimmung der Transformationsparameter sind Untersuchungen zur Definition des Objektkoordinatensystems, zur optimalen Ermittlung der Daten der äußeren Orientierung sowie zur Erfassung und Korrektur von Orientierungsfehlern erforderlich.

Im Verlauf der Untersuchungen soll neben der Bewertung material- und verfahrenstechnisch bedingter Zusammenhänge geprüft werden, inwiefern durch die Einbeziehung

von a priori Wissen der photogrammetrische und bauspezifische Auswerteprozess hinsichtlich der Messgenauigkeit und Auswertegeschwindigkeit unterstützt bzw. abgesichert werden kann.

Auf den erarbeiteten Grundlagen soll ein flexibel einsetzbares, modular aufgebautes Messsystem entwickelt werden, das die Realisierung von Grundlagenuntersuchungen ermöglicht und für verschiedenste Messaufgaben im bautechnischen Versuchswesen eingesetzt werden kann. Das zu entwickelnde, modular aufgebaute photogrammetrische Messsystem soll Hard- und Softwarekomponenten enthalten, die für den bauspezifischen photogrammetrischen Aufnahme- und Auswerteprozess erforderlich sind. Die Modulentwicklung soll durch die Einbeziehung von kommerziellen Produkten und Eigenentwicklungen eine flexible, effiziente Realisierung von Untersuchungen ermöglichen. Es ist zu prüfen, ob diese Strategie für die Realisierung umfangreicher Messaufgaben bzw. Massenexperimente geeignet ist.

1.3.3 Bauspezifischer Auswerteprozess

Der bauspezifische Auswerteprozess beinhaltet hinsichtlich der photogrammetrisch ermittelten zwei- und dreidimensionalen Verformungs-, Riss- und Schädigungsentwicklungen bei baumechanischen Untersuchungen eine

- bauspezifische Datenanalyse,
- geeignete Visualisierung von Zwischen- und Endergebnissen und
- Entwicklung von effizienten Datenformaten zur Bereitstellung komplexer Ergebnisdaten

Die qualitative und quantitative Interpretation der photogrammetrisch ermittelten und bauspezifisch aufbereiteten Versuchsdaten ist nicht unmittelbarer Gegenstand der Arbeit. Dennoch soll auf einige Aspekte der Kopplung von Experiment und mathematisch-numerischer Analyse eingegangen werden, die sich auf die hohe Messpunktdichte photogrammetrischer Messungen bezieht.

1.3.4 Konzeption für die Durchführung bauspezifischer photogrammetrischer Messprozesse

Die Vielzahl der zu untersuchenden Details und die teilweise Komplexität der in den Abschnitten 1.3.1–1.3.3 geschilderten Problemstellungen zeigen sehr deutlich die Notwendigkeit eines systematischen Vorgehens bei den grundlagen- und anwendungsorientierten Untersuchungen.

Eine Möglichkeit für ein systematisches Vorgehen wird in einer Konzeption auf Basis von Ablaufschemen gesehen. Der konzeptionelle Entwurf von Ablaufschemen auf unterschiedlichen Abstraktionsniveaus bietet eine übersichtliche Darstellung des gesamten Messprozesses sowie detaillierter Teilprozesse.

Die zu entwickelnde Konzeption soll letztlich dem Experimentator eine ausreichende Entscheidungsgrundlage für die optimale Planung und Umsetzung photogrammetrischer Messprozesse zur Erfassung der Verformungs-, Riss- und Schädigungsentwicklung bei baumechanischen Untersuchungen bieten, die alle relevanten Aspekte der praktischen Umsetzung photogrammetrischer Messungen im experimentellen Umfeld berücksichtigt und systematische, reproduzierbare Untersuchungen ermöglicht.

1.4 Aufbau der Arbeit

Die systematische Untersuchung der im vorangegangenen Abschnitt 1.3 beschriebenen Themenkomplexe erfordert zu Beginn eine Charakterisierung der Versuchsprozesse. Aufgrund der unterschiedlichen Terminologie in den Fachbereichen des Bauingenieurwesens und der Photogrammetrie werden in Kapitel 2 Begriffe aus der Versuchsplanung – einem eigenständigen Wissenschaftsgebiet – vorgeschlagen, die im Rahmen der vorliegenden Arbeit eine einheitliche Darstellung und Zusammenführung bauspezifischer und photogrammetrischer Teilprozesse ermöglicht. Darüber hinaus bietet die Versuchsplanung u. a. einen allgemein gültigen, systematischen Ansatz zur Charakterisierung und Planung optimierter Versuchsprozesse.

Auf dieser Basis werden entsprechend der Zielstellung der Arbeit in Kapitel 3 (S. 15) grundlegende Zusammenhänge des bautechnischen Mess- und Versuchswesens erläutert, die den Ausgangspunkt zur Formulierung von konkreten Anforderungen und Randbedingungen für den Einsatz photogrammetrischer Verfahren zur Erfassung der Verformungs-, Riss- und Schädigungsentwicklung bei baumechanischen Untersuchungen bilden.

Unter Berücksichtigung dieser Vorgaben werden in Kapitel 4 (S. 25) in der Reihenfolge der Informationsentstehung, -übertragung und -auswertung relevante Grundlagen bauspezifischer photogrammetrischer Messprozesse zusammengestellt und erarbeitet. Die Einordnung bauspezifischer Lösungsansätze bzgl. photogrammetrischer Aufnahme- und Auswerteverfahren, die sich durch konkrete anwendungsorientierte Untersuchungen im *Bautechnischen Mess- und Versuchswesen* ergeben haben, erfolgt aus Gründen der Übersichtlichkeit ebenfalls in diesem Kapitel.

Die bauspezifische Analyse und Auswertung photogrammetrisch ermittelter Messdaten zur Bestimmung zeit- / lastabhängiger Verformungs-, Dehnungs- und Risszuständen wird dagegen im Kontext mit den jeweiligen Versuchen in Abschnitt 5.3 (S. 73) behandelt.

Im Zuge der Planung bauspezifischer photogrammetrischer Messprozesse wird i. d. R. die aufgabenbezogene Zusammenführung bauspezifischer und photogrammetrischer Teilprozesse erforderlich. Aufgrund der Bedeutung – die der Zusammenführung bauspezifischer und photogrammetrischer Teilprozesse zukommen kann – wird in Abschnitt 4.7 (S. 64) auf wichtige Aspekte eingegangen und an ausgewählten Beispielen die prinzipielle Vorgehensweise erläutert.

In Abschnitt 5.1 (S. 69) wird auf den erarbeiteten Grundlagen eine Konzeption zur Durchführung bauspezifischer photogrammetrischer Messprozesse entwickelt. Diese soll einen systematischen Einsatz photogrammetrischer Verfahren zur Erfassung der Verformungs-, Riss- und Schädigungsentwicklung bei baumechanischen Untersuchungen ermöglichen. Viele der in Abschnitt 5.3 dargestellten Versuche wurden auf dieser Basis durchgeführt. Das dabei in den überwiegenden Fällen eingesetzte modular aufgebaute photogrammetrische Messsystem wird in Abschn. 5.2, S. 71 vorgestellt. Die Auswahl der in Abschnitt 5.3 vorgestellten Versuche dient der Darstellung von Besonderheiten und der Vielgestaltigkeit photogrammetrischer Messprozesse im bautechnischen Versuchswesen.

Abschließend werden in Kapitel 6 (S. 105) die wesentlichen Ergebnisse der Arbeit zusammengefasst und offene Probleme angesprochen. Diese bilden Ausblick und Abschluss der vorliegenden Arbeit.

2 Versuchsplanung

Versuche werden in den verschiedensten Entwicklungs- und Forschungsbereichen – z. B. als Labor- oder Feldexperimente – durchgeführt und erfordern i. d. R. eine sorgfältige Planung, die alle relevanten Aspekte in einer ausreichenden Form berücksichtigt. Dafür bietet das eigenständige Wissenschaftsgebiet der *Versuchsplanung* einen allgemein gültigen Lösungsansatz, der eine systematische Charakterisierung und Planung von Versuchsprozessen ermöglicht [42–48]. Das große Potential der *Versuchsplanung* führt i. d. R. zu wirtschaftlichen, effizienten Versuchsprogrammen und ist in Industrie und Wissenschaft eine weit verbreitete und häufig angewendete Methode.

In den nachfolgenden Abschnitten werden Begriffe der *Versuchsplanung* erläutert. Diese dienen in der Folge als Grundlage für die einheitliche, konsistente Darstellung und Zusammenführung bauspezifischer und photogrammetrischer Teilprozesse.

2.1 Charakterisierung von Versuchsprozessen

Zu Beginn der Planung von Versuchen besteht eine wesentliche Aufgabe in der Ermittlung bzw. Festlegung von Einfluss- und Zielgrößen, die den Versuchsprozess charakterisieren (Abb. 2.1). Das Vorgehen zur Ermittlung bzw. Festlegung relevanter Steuer-, Stör- und Zielgrößen kann nach dem in Abbildung 2.2 entwickelten Ablaufschema erfolgen.

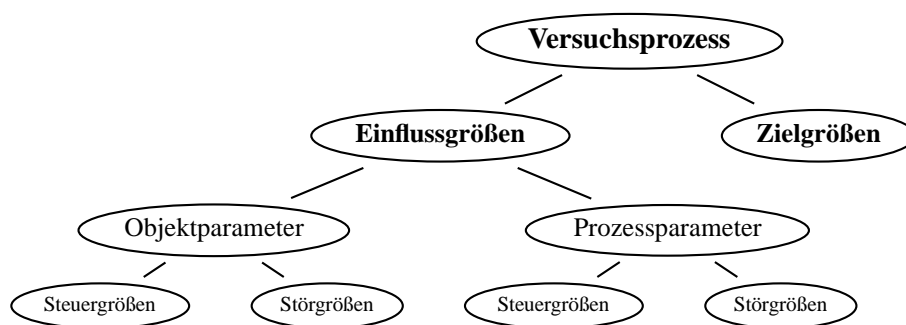


Abbildung 2.1: Charakterisierung von Versuchsprozessen

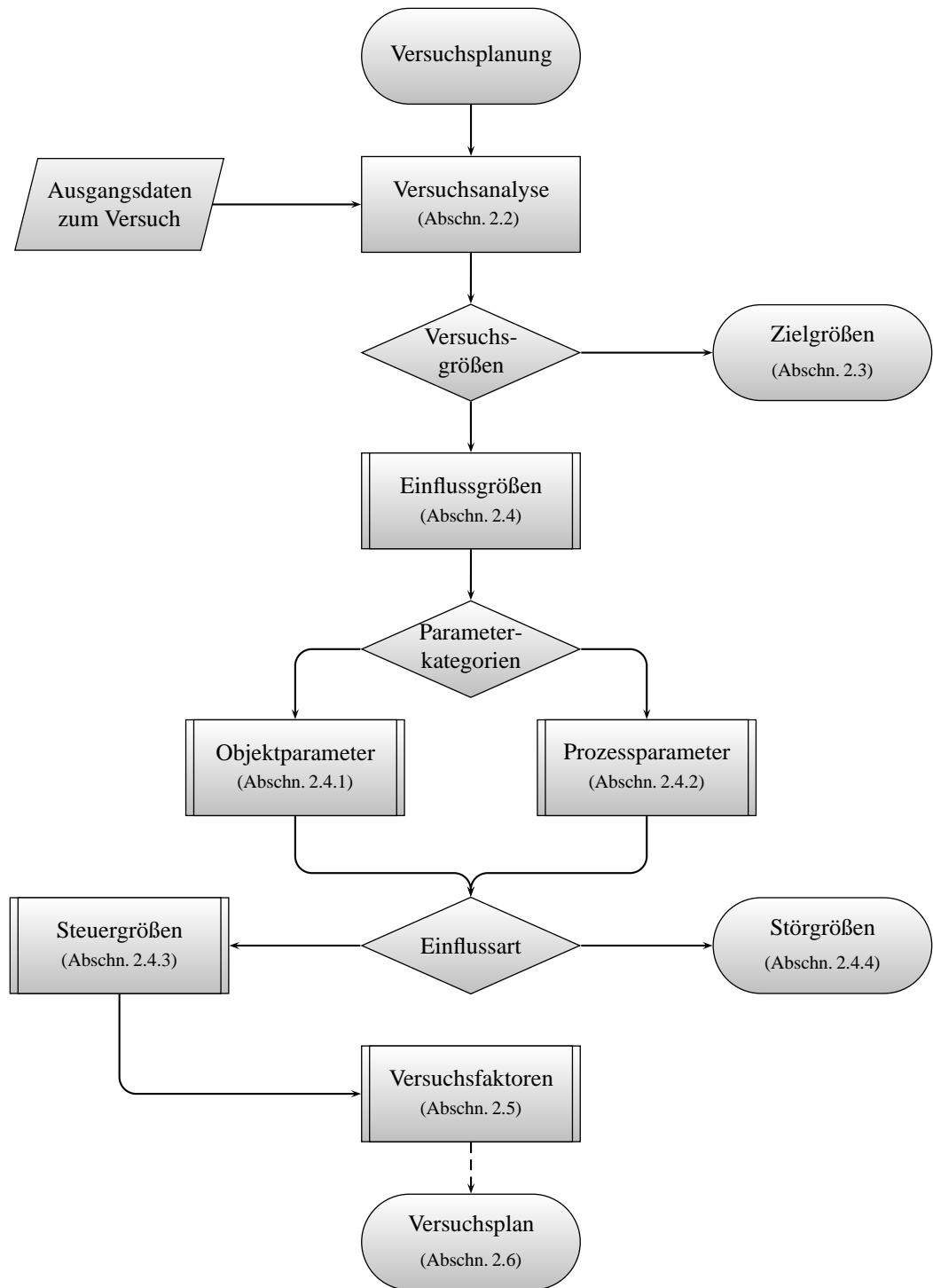


Abbildung 2.2: Versuchsplanung

2.2 Versuchsanalyse

Die Versuchsanalyse stellt den Ausgangspunkt der Versuchsplanung dar (Abb. 2.2). Ein erster Schritt besteht in der Beschreibung der Ausgangssituation und des Untersuchungszieles. Auf dieser Basis erfolgt eine Bewertung der vorliegenden Versuchsdaten und Informationen zur Findung von Einfluss- und Zielgrößen (Abschn. 2.3 und 2.4).

Ziel der Versuchsanalyse ist die Festlegung von Faktoren (Abschn. 2.5), deren Einfluss – als variierende Größen – auf die Zielgröße/-größen im Versuch bzw. in den Versuchsreihen qualitativ bzw. quantitativ untersucht werden soll. Oftmals ist der Versuch auch nur durch *einen* Faktor bestimmt.

Ein weiterer wichtiger Punkt in der Versuchsanalyse besteht im Erkennen von relevanten Störgrößen (Abschn. 2.4.4). Liegen keine ausreichenden Informationen vor, bieten sich zur Ermittlung relevanter Einflussgrößen Tastversuche an. Diese können auch dazu dienen, für festgelegte Faktoren optimale Versuchswerte bzw. -bereiche zu ermitteln.

2.3 Zielgrößen

Die Zielgröße stellt das direkt bzw. indirekt zu bestimmende Ergebnis des Versuches dar und wird mindestens durch einen Faktor (Abschn. 2.5) beeinflusst. Es können pro Versuch auch mehrere Zielgrößen festgelegt werden.

Eine Zusammenstellung bauspezifischer Zielgrößen, die für photogrammetrische Messaufgaben eine Bedeutung haben können, findet sich in Kapitel 3 (S. 15).

2.4 Einflussgrößen

Einflussgrößen üben eine Wirkung auf die Zielgrößen aus und können in Steuer- bzw. Störgrößen eingeteilt werden. Abhängig von den jeweiligen Untersuchungen kann eine weitere Unterteilung von Einflussgrößen in Parameterkategorien, z. B. Objekt- und Prozessparameter (Abschn. 2.4.1 und 2.4.2), einer klaren Darstellung von Zusammenhängen im Versuchsprozess zugute kommen. Unabhängig von der Gliederungstiefe führen die jeweiligen Einflussgrößen bzw. Einflussparameter immer zu einer Zuordnung als Steuer- bzw. Störgröße (Abschn. 2.4.3 und 2.4.4).

Einflussgrößen werden als Faktoren (Abschn. 2.5) bezeichnet, sofern diese in den Versuch bzw. in die Versuchsreihen als variierende Größen einbezogen werden.

2.4.1 Objektparameter

Objektparameter charakterisieren das Versuchsobjekt. Allgemeine Objektparameter beziehen sich auf eine fachspezifische Objektbeschreibung, die u. a. Aufschluss über den Verwendungszweck geben kann. Diesbezüglich wurde für das bautechnische Versuchswesen in Abschnitt 3.2 (S. 16) eine Zusammenstellung von allgemeinen Bewertungskriterien vorgenommen. Spezielle Objektparameter ergeben sich in Abhängigkeit von den jeweiligen Versuchen und beziehen sich z. B. auf Material- und Geometrieparameter (Abschn. 3.2.2 und 3.2.5). Für photogrammetrische Messprozesse können aber auch die Oberflächenstruktur und die Oberflächentextur (Abschn. 3.2.4, S. 21) von Bedeutung sein (Abschn. 3.2.3, S. 18).

2.4.2 Prozessparameter

Prozessparameter nehmen als Steuer- bzw. Störgröße direkt bzw. indirekt Einfluss auf die Zielgrößenerfassung.

Die Einführung von Prozesssteuereigenschaften erlaubt eine präzise Charakterisierung von Prozesssteuergrößen entsprechend ihrer Aufgabe bzw. Funktion. Die daraus resultierende weiterreichende Gliederung ist in Abbildung 2.3 dargestellt und ermöglicht die eindeutige Unterscheidung zwischen aktiven und passiven Prozesssteuergrößen.

Aktive Prozesssteuergrößen bestimmen den unmittelbaren Versuchsablauf. Bei Vorhandensein mehrerer aktiver Prozesssteuergrößen besteht die Notwendigkeit der Festlegung einer prozessbestimmenden, primären Steuergröße.

Passive Prozesssteuergrößen nehmen keinen unmittelbaren Einfluss auf den Versuchsablauf. Diese beschränken sich auf die direkte bzw. indirekte Erfassung von Zielgrößen und können als abhängig bzw. unabhängig vom Versuchsablauf eingestuft werden. Abhängig bedeutet dabei, dass die Zielgrößenerfassung an den Versuchsverlauf gekoppelt ist und durch diesen vorgegeben wird. Autonome Prozesssteuergrößen dienen ebenfalls der Zielgrößenerfassung, sind aber vom Versuchsablauf unabhängig und werden ggf. nur im Verlauf des Versuches initialisiert.

2.4.3 Steuergrößen

Steuergrößen sind Einflussgrößen, die bekannt sind und gezielt im Versuchsprozess variiert werden können. Im Zusammenhang mit bauspezifischen Versuchsprozessen bietet sich die in den vorangegangenen Abschnitten vorgenommene Einteilung in Objekt- und Prozessparameter an (Abschn. 2.4.1 und 2.4.2).

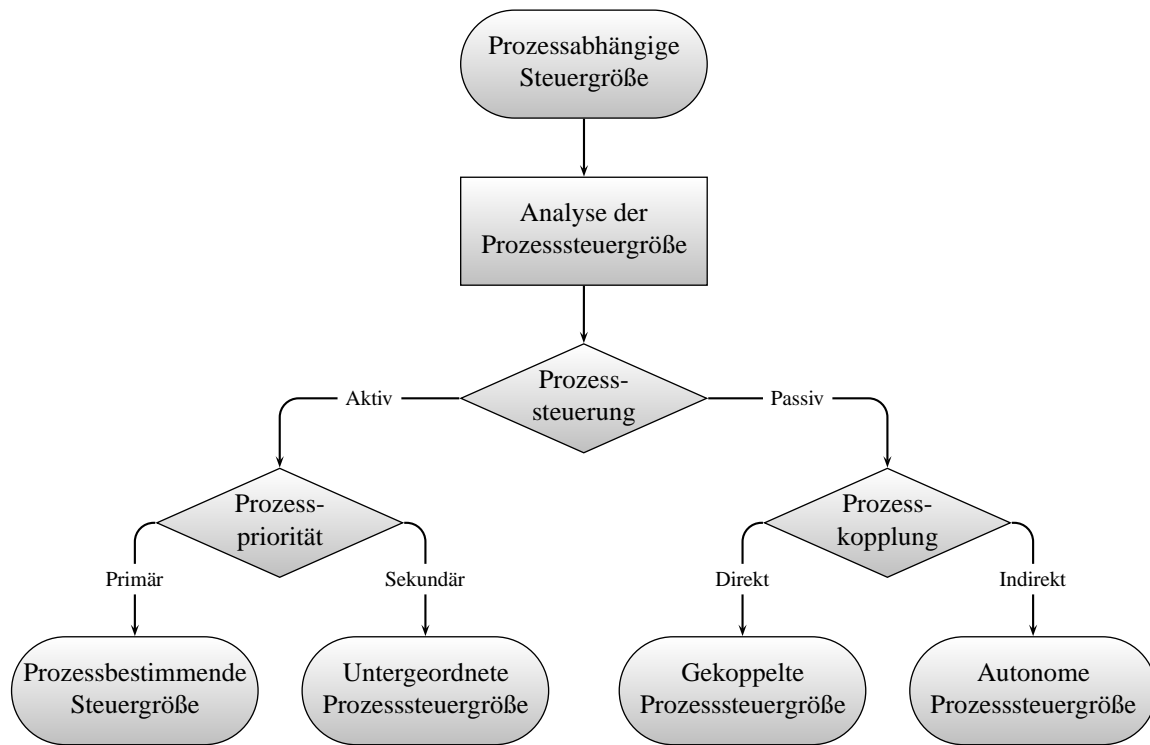


Abbildung 2.3: Prozessabhängige Steuergrößen

2.4.4 Störgrößen

Störgrößen umfassen alle Einflussgrößen, deren Wert nicht vorgegeben werden kann bzw. soll. Das kann bedeuten, dass Einflussgrößen aufgabenbezogen entweder als Steuer- oder Störgröße auftreten. Ein typisches Beispiel stellt die Einbeziehung der Einflussgröße *Temperatur* dar. Wenn durch unregelmäßige Temperaturänderungen ein signifikanter Einfluss auf den Versuchsverlauf bzw. die Zielgrößenermittlung ausgeübt wird, gilt die *Temperatur* als Störgröße, bei einer gezielten Temperaturregelung hingegen als Steuergröße.

Für die Störgrößen ergibt sich – wie für die vorgenannten Steuergrößen – eine objekt- bzw. prozessabhängige Zuordnungsmöglichkeit. Eine Zusammenstellung typischer Störgrößen, die im *Bautechnischen Mess- und Versuchswesen* auftreten können, findet sich in Kapitel 3 (S. 15).

2.5 Faktoren

Faktoren – auch als Versuchsfaktoren bezeichnet – stellen ausgewählte Einflussgrößen dar, die als variierende Größen in den Versuchsprozess einbezogen sind. Pro Versuch kann mehr als ein Faktor festgelegt werden. Nach der Faktorenauswahl besteht die Notwendigkeit der Festlegung von Faktorstufen, die im Versuch realisiert werden sollen. Diese können sich auf qualitative Eigenschaften (z. B. auf eine allgemeine Materialauswahl, Versuchsbedingungen, Konstruktionsdetails usw.) bzw. quantitative Werte (z. B. Kraft- bzw. Weggrößen usw.) beziehen.

Im Hinblick auf die effiziente Umsetzung von Versuchen bzw. Versuchsserien sollte bei der Auswahl von Faktoren bzw. Faktorkombinationen und der Festlegung der jeweiligen Faktorstufen sorgsam vorgegangen werden. In der eingangs aufgeführten Literatur zur *Versuchsplanung* werden wichtige Richtlinien zur Auswahl von Faktoren und Faktorkombinationen formuliert, die zu effizienten und robusten Versuchen bzw. Versuchsserien führen können. Mit der Festlegung der Faktoren und Faktorstufen ist die erste Phase der Versuchsplanung abgeschlossen.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass der Versuchsumfang maßgeblich durch die festgelegten Faktoren, die zugehörigen Faktorstufen und ggf. durch entsprechende Wiederholungen bestimmt wird. Durch die zu realisierenden Variationen entstehen oftmals umfangreiche Versuchsprogramme, deren praktische Umsetzung durch zeitliche bzw. wirtschaftliche Aspekte in Frage gestellt wird. In diesem Zusammenhang bietet die Versuchsplanung u. a. durch den Entwurf von Versuchsplänen (Abschn. 2.6) die Möglichkeit zur systematischen Reduzierung des Versuchsumfanges.

2.6 Versuchsplan

Die Entwicklung konkreter, optimaler Versuchspläne, die den Umfang und den Ablauf der Versuche/Versuchsserien festlegt, stellt ein wesentliches Aufgabengebiet der *Versuchsplanung* dar. Die systematischen Lösungsansätze beziehen die festgelegten Faktoren und Faktorstufen ein und können ggf. auch die gewünschte Präzision bzw. Genauigkeit bei der Zielgrößenermittlung berücksichtigen. Für die Entwicklung von Versuchsplänen bestehen verschiedene Möglichkeiten, die in der vorliegenden Literatur ausführlich beschrieben werden [42, 44, 46–48]. Aufgrund der Ausrichtung der vorliegenden Arbeit (Abschn. 1.3, S. 3) wird das umfangreiche Themengebiet der konkreten Versuchsplanentwicklung nicht weiter ausgeführt. Auf die Möglichkeiten zur Entwicklung von optimalen Versuchsplänen im Kontext systematischer Untersuchungen bauspezifischer Sachverhalte wird ausdrücklich hingewiesen, da diese sich vorteilhaft auf das Erreichen von Versuchszielen im *Bautechnischen Mess- und Versuchswesen* auswirken können.

3 Bautechnisches Mess- und Versuchswesen

3.1 Aufgaben und Besonderheiten

Im Bauingenieurwesen werden in vielfältiger Weise experimentell orientierte Untersuchungen durchgeführt. Diese können – unabhängig vom Fachbereich usw. – unter dem Begriff *Bautechnisches Mess- und Versuchswesen* subsumiert werden. Die Vielzahl und Vielfalt der in der Literatur [1, 3–6] beschriebenen Untersuchungen lässt verschiedene Aufgabengebiete erkennen, z. B.:

- die Bestimmung materialspezifischer Kennwerte,
- baumechanische Untersuchungen von Probekörpern, Bauwerksteilen usw. und
- die Bauwerksüberwachung (Monitoring).

Im Hinblick auf die dabei verwendeten Technologien und Methoden – aber auch auf den Untersuchungsgegenstand selbst – sind die Untersuchungen im *Bautechnischen Mess- und Versuchswesen* nicht selten interdisziplinär angelegt. Für eine optimale Planung und Anwendung sind fachspezifische Kenntnisse in den beteiligten Disziplinen unverzichtbar – so auch beim Einsatz photogrammetrischer Verfahren zur Erfassung der Verformungs-, Riss- und Schädigungsentwicklung bei baumechanischen Untersuchungen.

Aufgrund der Ausrichtung der vorliegenden Arbeit (Abschn. 1.3, S. 3) wird im Folgenden vorrangig auf die Belange eingegangen, die für den Einsatz photogrammetrischer Verfahren bei baumechanischen Untersuchungen Bedeutung erlangen können. In diesem Zusammenhang wird in den nachfolgenden Abschnitten – auf Basis der *Versuchsplanung* (Abschn. 2, S. 9) – eine Zusammenstellung relevanter Einfluss- und Zielgrößen vorgenommen, die als Grundlage für die Ableitung von allgemeinen und speziellen Anforderungen an photogrammetrische Verfahren in Kapitel 4 (S. 25) dient.

Bei der Darstellung entsprechender Einfluss- und Zielgrößen des *Bautechnischen Mess- und Versuchswesens* wird auf die Versuchsobjekte (Abschn. 3.2, S. 16) und die Versuchsprozesse (Abschn. 3.3, S. 23) separat eingegangen.

3.2 Versuchsobjekt

Im *Bautechnischen Mess- und Versuchswesen* existieren vielgestaltige Versuchsobjekte, die jeweils einer Teildisziplin (z. B. Holzbau, Massivbau, Straßenbau) des Bauingenieurwesens zugeordnet und durch die

- Versuchsobjektart (Abschn. 3.2.1),
- Materialeigenschaften (Abschn. 3.2.2) und
- allgemeine Objektgeometrie (Abschn. 3.2.5.1)

charakterisiert werden können. In Abhängigkeit von den jeweiligen Messaufgaben kann die Einbeziehung weiterer spezieller Objekteigenschaften erforderlich werden. In Bezug auf die photogrammetrische Bilderfassung (Abschn. 4.4, S. 41) können beispielsweise spezielle Objekteigenschaften Bedeutung erlangen, die – durch den optischen Abbildungsprozess bedingt – von der Oberflächenstruktur (Abschn. 3.2.3) und der Oberflächentextur (Abschn. 3.2.4, S. 21) des Messobjektes abhängig sind.

3.2.1 Versuchsobjektarten

Die Unterscheidungsmerkmale bauspezifischer Versuchsobjektarten beziehen sich auf allgemeine Kriterien, ohne dass dabei direkt auf die speziellen Eigenschaften der Versuchsobjekte (z. B. Material- und Geometrieparameter) bzw. der Versuchsprozesse Bezug genommen wird. Die in Tabelle 3.1 zusammengestellten Versuchsobjektarten dienen im Folgenden als Grundlage zur allgemeinen Bezeichnung von Versuchsobjekten des Bauingenieurwesens.

3.2.2 Materialeigenschaften

Materialeigenschaften beziehen sich auf die physikalischen, chemischen und technologischen Eigenschaften eines Materials und werden i. d. R. durch Kennwerte funktional beschrieben.

Für die Planung bauspezifischer photogrammetrischer Messprozesse haben diejenigen Materialeigenschaften eine besondere Bedeutung, die den Versuchsprozess unmittelbar beeinflussen, z. B. als Einfluss- oder Zielgröße.

Eine Auswahl von materialabhängigen Einflussgrößen werden in den nachfolgenden Abschnitten im Zusammenhang mit anderen Objekteigenschaften zusammengeführt, die dadurch eine aufgaben- bzw. messspezifische Charakterisierung erleichtern. Die in diesem Abschnitt nachfolgend behandelten materialabhängigen Einfluss- bzw. Zielgrößen bezie-

Versuchsobjekt	Beschreibung	Versuchsumfang*
Baustoffprüfkörper	Kleinformartige Prüf- bzw. Normprüfkörper zur Bestimmung materialspezifischer Kennwerte	Kleinserien . . . Großserien
Prüf-/Probekörper	Allgemeine Bezeichnung für die Versuchsobjekte. Das Versuchsziel besteht i. d. R. in der Untersuchung von Konstruktionsdetails in Abhängigkeit entsprechender Materialien bzw. Verbundmaterialien.	Einzelobjekte/ Kleinserien
Modellbauwerke	Maßstabsgetreuer Nachbau von Bauwerken bzw. Bauwerksteilen zur Untersuchung des Trag- und Verformungsverhaltens	Einzelobjekte
Bauwerke	Der Begriff <i>Bauwerke</i> bezieht sich ohne Einschränkung auf alle bestehenden und eigens für Untersuchungen errichtete Hoch-, Tief- und Spezialbauwerke.	Einzelobjekte

*Die Angaben dienen zur Orientierung und stellen keine festgelegten Vorgaben dar.

Tabelle 3.1: Versuchsobjektarten im *Bautechnischen Mess- und Versuchswesen*

hen sich vorrangig auf die Parameter bzw. Kennzahlen, die das mechanische Materialverhalten und die Temperaturabhängigkeit beschreiben. Beispiele dafür sind Kennzahlen und funktionale Beziehungen, die sich u. a. auf die Steifigkeit (E-Modul), die Festigkeit (Zug- und Druckfestigkeit usw.), die Duktilität (Bruchdehnung) und das temperaturabhängige Ausdehnungsverhalten beziehen.

Aufgrund der großen Bandbreite und Spezifika materialabhängiger Kennzahlen, die das mechanische Verhalten bauspezifischer Materialien bzw. Verbundmaterialien charakterisieren, wird auf eine allgemeine Darstellung verzichtet und auf die vorliegenden Normen usw. verwiesen [2, 7].

Nachfolgend werden nur am Beispiel des linear-elastischen Verhaltens isotroper Baustoffe einige baumechanische Zusammenhänge erläutert, deren Kenntnis bei der Zusammenführung bauspezifischer und photogrammetrischer Teilprozesse (Abschn. 4.7, S. 64) und bei der Darstellung baumechanischer Untersuchungen (Abschn. 5.3, S. 73) erforderlich bzw. hilfreich sein können. Die Beschreibung des vorgenannten linearen Spannungs-Verformungs-Verhaltens kann auf der Grundlage des Hook'sches Gesetzes unter Einbeziehung des Elastizitätsmodules E (E-Modul) mit Gleichung (3.1) erfolgen [2].

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (3.1)$$

Material/ Werkstoff	E [kN/mm ²]	α [10 ⁻⁶ /K]	Material/ Werkstoff	E [kN/mm ²]	α [10 ⁻⁶ /K]
Marmor	60 ... 90	5 ... 16	Stahl	215	12,0
Granit	50 ... 90	3 ... 8	Aluminium	71	23,9
Beton	22 ... 39	5,4 ... 14,2	Glas (allg.)	39 ... 98	3,5 ... 5,5
Ziegelstein	10 ... 40	8 ... 10	Quarzglas	62 ... 75	0,5 ... 0,6

Tabelle 3.2: Elastizitätsmodul E und Längenausdehnungskoeffizient α von ausgewählten Materialien bzw. Werkstoffen [2]

Eine weitere wichtige Einflussgröße stellt das temperaturabhängige Ausdehnungsverhalten bauppezifischer Materialien bzw. Verbundmaterialien dar. Tabelle 3.2 zeigt eine Auswahl von Längenausdehnungskoeffizienten und ist nicht auf bauppezifische Materialien beschränkt, da entsprechende Temperaturänderungen während des Versuches nicht nur unerwünschte Effekte auf das Versuchsobjekt selbst ausüben können, sondern auch einen Einfluss auf den Versuchsaufbau und die einbezogene Messtechnik – auch auf photogrammetrische Messkomponenten – haben kann. Für Überprüfungen usw. kann die funktionale Beziehung in Gleichung (3.2) und (3.3) herangezogen werden.

$$\Delta L = \alpha \cdot \Delta T \cdot L \quad (3.2)$$

$$= \varepsilon \cdot L = \frac{\sigma}{E} \cdot L \quad (3.3)$$

Die Ursachen für entsprechende Temperaturänderungen können i. d. R. auf die jeweiligen Versuchsbedingungen (Abschn. 3.3, S. 23) zurückgeführt werden. In diesem Zusammenhang müssen die bei photogrammetrischen Messprozessen oftmals einbezogenen Objektbeleuchtungen berücksichtigt werden, da diese nicht selten eine starke Wärmeentwicklung aufweisen (Abschn. 4.2, S. 27).

3.2.3 Oberflächenstruktur

Die Oberflächenstruktur charakterisiert im Folgenden die materialbezogene Beschaffenheit der Objektoberfläche hinsichtlich der mikrostrukturellen Oberflächengeometrie (Ab-

schn. 3.2.3.1) und der strahlungsphysikalischen und lichttechnischen Eigenschaften (Abschn. 3.2.3.2). Zur Beschreibung der Oberflächenstruktur wird oftmals auch die Oberflächentextur einbezogen. In der vorliegenden Arbeit wird aus verschiedenen Gründen auf die Oberflächentextur separat eingegangen. Diese werden u. a. in Abschnitt 3.2.4 näher erläutert.

3.2.3.1 Mikrostrukturelle Oberflächengeometrie

Die mikrostrukturelle Oberflächengeometrie bezieht sich auf die materialabhängige Feinstruktur der Objektoberfläche, die durch verschiedene Parameter charakterisiert bzw. spezifiziert werden kann. Nach DIN EN ISO 4287 [54] kann die Oberflächenbeschaffenheit z. B. durch verschiedene Rauheitsparameter angegeben werden, z. B. durch den Mittenrauwert R_a oder die gemittelte Rautiefe R_z . Die Rauheits-Kennzahlen werden i. d. R. in Mikrometern angegeben, was bezeichnend für die Größenordnung dieser Einflussgröße ist. Die Auswirkungen der mikrostrukturellen Oberflächengeometrie auf den photogrammetrischen Messprozess muss differenziert betrachtet werden. In Bezug auf die geometrische Erfassung kann die mikrostrukturelle Oberflächengeometrie – sofern nicht als Zielgröße festgelegt – in den überwiegenden Fällen als Störgröße aufgefasst werden. In Abhängigkeit der bekannten bzw. zu erwartenden Messauflösung kann entschieden werden, ob der Einfluss der mikrostrukturellen Oberflächengeometrie vernachlässigbar ist.

Hinsichtlich einiger strahlungsphysikalischer und lichttechnischer Materialeigenschaften, die im nachfolgenden Abschnitt 3.2.3.2 beschrieben werden, kann die mikrostrukturelle Oberflächengeometrie dagegen von entscheidender Bedeutung sein.

3.2.3.2 Strahlungsphysikalische und lichttechnische Materialeigenschaften

Die Charakterisierung strahlungsphysikalischer und lichttechnischer Materialeigenschaften wird i. Allg. durch die Beschreibung des Reflexions-, Transmissions- und Absorptionsverhaltens vorgenommen, die auf Grundlage verschiedener Normen und Richtlinien erfolgen kann – beispielsweise durch die DIN 5036 [49–52] oder den Bericht der Internationalen Kommission für Licht [53]. Im Folgenden wird Bezug auf die DIN 5036 genommen, da diese auf grundlegenden strahlungsphysikalischen und lichttechnischen Größen, Bezeichnungen und Einheiten der DIN 5031 Teil 1 [58] aufbaut, die als eine allg. Grundlage der vorliegenden Arbeit angesehen wird.

Bei der Verwendung entsprechender Kennzahlen muss beachtet werden, dass es sich um keine rein materialspezifischen Größen handelt, sondern diese von einer Reihe weiterer Einflussgrößen abhängen, beispielsweise von

- der Schichtdicke,
- dem Oberflächenzustand,
- der Temperatur,
- der spektralen Zusammensetzung und
- dem Polarisationszustand der Strahlung.

Erfordert eine photogrammetrische Messaufgabe die direkte Einbeziehung entsprechender Kennzahlen, müssen diese Randbedingungen ggf. berücksichtigt werden.

In den überwiegenden Fällen werden im *Bautechnischen Mess- und Versuchswesen* keine strahlungsphysikalischen und lichttechnischen Größen unmittelbar in die Planung photogrammetrischer Messprozesse einbezogen. Sie können aber im Zusammenhang mit speziellen Messaufgaben Bedeutung erlangen. Dies ist i. d. R. im Zusammenhang mit den Einflussgrößen der Beleuchtungsquellen (Abschn. 4.2, S. 27) der Fall, die ebenfalls durch strahlungsphysikalische und lichttechnische Kennzahlen charakterisiert bzw. spezifiziert werden können.

Die in Tabelle 3.3 zusammengestellten Reflexionsgrade geben einen Überblick über ausgewählte Materialien und dienen zur Orientierung bei der Planung photogrammetrischer Messprozesse, beispielsweise im Zusammenhang mit der Planung von Messmarken (Abschn. 4.3.3, S. 35). Für den Fall, dass gleichzeitig die natürliche Objektfläche und entsprechende Messmarken (oftmals in schwarz-weißer Ausführung) in den photogrammetrischen Messprozess einzubeziehen sind, bieten sich die in Abschnitt 4.3.3.5 (S. 39) vorgestellten modifizierten Messmarken an, die sich an den jeweiligen natürlichen Oberflächenstrukturen und deren Reflexionsgraden orientieren.

Material	Reflexionsgrad ρ
Granit	0,2
Kalkstein	0,35 ... 0,55
Sandstein	0,2 ... 0,4
Zement, Beton	0,2 ... 0,3
Papier (weiß)	0,7 ... 0,8

Tabelle 3.3: Reflexionsgrad ausgewählter Materialien [33]

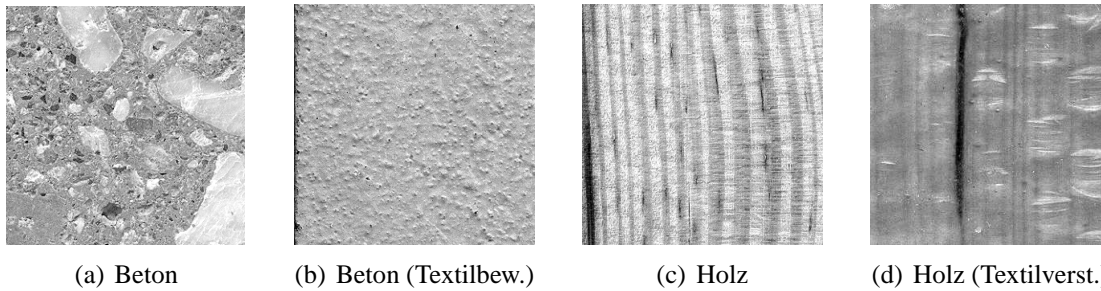


Abbildung 3.1: Natürliche Oberflächentexturen bauspezifischer Materialien

3.2.4 Oberflächentextur

Die Oberflächentextur bezieht sich im Folgenden auf die im Bildraum vorliegende Abbildung der Objektoberfläche und ist damit durch den optischen Abbildungsprozess beeinflusst.

Inwiefern die Einbeziehung der Oberflächentextur in den photogrammetrischen Messprozess erforderlich wird, hängt von der jeweiligen Messaufgabe ab. Besteht aufgabenbezogen die Notwendigkeit, z. B. im Zusammenhang mit einer flächenbasierten Messung, wird i. d. R. geprüft, ob die natürliche Oberflächentextur für den photogrammetrischen Messprozess geeignet ist oder durch eine künstliche Oberflächenmarkierung (Abschn. 4.3.2, S. 34) modifiziert werden muss. In der Praxis werden dafür – sofern keine abgesicherten Erkenntnisse vorliegen – Testmessungen erforderlich, bei denen die Messbedingungen so gewählt werden, dass diese den realen Versuchsverhältnissen sehr nahe kommen bzw. identisch sind. Gleiches gilt für den Auswerteprozess. In diesem Zusammenhang werden auch die relevanten Einflussgrößen bestimmt, die in Bezug auf die jeweilige Aufnahme- und Auswertekonfiguration relevant sind.

Aufgrund der Vielzahl natürlicher Oberflächentexturen (Abb. 3.1), die im *Bautechnischen Mess- und Versuchswesen* vorkommen können, und der Vielfalt an Messaufgaben, die über die Art und Weise der photogrammetrischen Bilderfassung (Abschn. 4.4, S. 41) und Auswertung (Abschn. 4.5, S. 51) entscheiden, besteht kaum Aussicht auf eine systematische Charakterisierung bauspezifischer Oberflächentexturen nach einheitlichen Kriterien. Die Texturanalyse ist daher aufgabenbezogen zu bewältigen (Abschn. 4.3.1, S. 32).

3.2.5 Objektgeometrie

Die geometrische Beschreibung von Versuchsobjekten kann oftmals differenziert vorgenommen werden – beispielsweise in Bezug auf die allgemeine Objektgeometrie (Abschn. 3.2.5.1) und die Oberflächentopologie (Abschn. 3.2.5.2). Darüber hinaus kann eine

weiterreichende Charakterisierung bzw. Spezifikation der Objektgeometrie erfolgen, die i. d. R. auf den Geometrie-Rohdaten basiert.

Im *Bautechnischen Mess- und Versuchswesen* ergeben sich bezüglich der zu erfassenden Versuchsobjekte und deren Geometrie häufig Besonderheiten, die zu einer Vereinfachung des photogrammetrischen Messprozesses führen können. Beispielsweise sind die photogrammetrisch zu erfassenden Objekte bzw. Objektbereiche nicht selten eben ausgebildet und behalten die ebene Formgestalt auch während des Versuches bei. Diese Besonderheit kann u. a. zu einer vereinfachten Aufnahmeanordnung führen (Abschn. 4.4.2.3, S. 45). Eine weitere Vereinfachung kann sich dadurch ergeben, dass keine vollständige Erfassung der gesamten Objektgeometrie erforderlich wird, sondern eine reduzierte Anzahl diskreter Objektpunkte ausreichend ist. Diese sind oftmals ausreichend, um beispielsweise das belastungsabhängige Verformungsverhalten des zu erfassenden Objektes während des Versuches eindeutig beschreiben zu können.

3.2.5.1 Allgemeine Objektgeometrie

Die allgemeine Objektgeometrie bezieht sich auf die Objektform bzw. -gestalt – unabhängig von der Oberflächentopologie (Abschn. 3.2.5.2) – und wird i. d. R. durch geometrische Rohdaten (1D/2D/3D) und ggf. durch abgeleitete Form- bzw. Modellparameter quantitativ beschrieben.

Die Art und Weise der photogrammetrischen Erfassung der allgemeinen Objektgeometrie hängt sehr stark von der jeweiligen Messaufgabe ab. Nicht selten tritt hier der Fall ein, dass nur eine reduzierte Anzahl diskreter Objektpunkte erfasst werden muss, beispielsweise im Zusammenhang mit hybriden Untersuchungsmethoden, bei denen experimentell gewonnene Versuchsdaten mit rechnerischen Modellierungen gekoppelt werden. Im Zusammenhang mit FEM-Berechnungen kann dies dazu führen, dass die zu erfassenden Objektpunkte beispielsweise durch das FEM-Netz vorgegeben werden (Abschn. 5.3.5).

Bei einer direkten Vorgabe diskreter Objektpunkte müssen diese für den photogrammetrischen Messprozess in geeigneter Form – z. B. durch den Einsatz von Messmarken – gekennzeichnet werden.

Besteht die Aufgabe in der vollständigen Erfassung der Objektgeometrie, muss – entsprechend der anvisierten Objektauflösung – das Objekt eine geeignete Oberflächenstruktur aufweisen. Dies ist auch dann erforderlich, wenn beispielsweise diskrete Punkte bzw. Punktraster erst nach der photogrammetrischen Bilderfassung – während des Auswerteprozesses – festgelegt werden sollen, um z. B. eine flexible Festlegung eines FEM-Netzes zu erzielen.

3.2.5.2 Oberflächentopologie

Die unmittelbare räumliche Gestalt der Versuchsobjektoberfläche wird im Folgenden als Oberflächentopologie bezeichnet. Sie kann als Steuer-, Stör- oder Zielgröße auftreten bzw. festgelegt werden und in Abhängigkeit der Messaufgabe von essentieller Bedeutung für den photogrammetrischen Messprozess sein.

Die Oberflächentopologie wird i. Allg. durch 3D-Koordinaten und ggf. durch abgeleitete Form- bzw. Modellparameter beschrieben.

3.3 Versuchsprozess

Der Versuchsprozess bezieht sich im Folgenden auf alle Aspekte der unmittelbaren Versuchsdurchführung, unabhängig vom Versuchsobjekt (Abschn. 3.2).

Die dabei vorkommenden Einflussgrößen, die einen maßgeblichen Einfluss auf den Versuchsablauf und die Zielgrößenerfassung haben können, beziehen sich auf die

- Versuchsart (Abschn. 3.3.1),
- Versuchstechnologien (Abschn. 3.3.2) und
- Versuchsbedingungen (Abschn. 3.3.3).

In den folgenden Abschnitten wird vorrangig auf die Belange eingegangen, die einen Einfluss auf den photogrammetrischen Messprozess ausüben bzw. hinsichtlich der Zusammenführung bauspezifischer und photogrammetrischer Teilprozesse (Abschn. 4.7, S. 64) Bedeutung erlangen können.

3.3.1 Versuchsarten

Die im *Bautechnischen Mess- und Versuchswesen* existierenden Versuchsarten können nach verschiedenen Gesichtspunkten unterschieden werden, z. B. nach dem zeitlichen Ablauf und der Art und Weise der Beanspruchung. In Bezug auf den zeitlichen Ablauf kann im Wesentlichen zwischen Kurz- und Langzeitversuchen unterschieden werden.

Der zeitliche Ablauf ist oftmals weg- bzw. kraftgekoppelt. Das bedeutet, dass die Weg- bzw. Kraftgrößen in Abhängigkeit eines vorgegebenen zeitlichen Verlaufs oder einer entsprechenden Funktion geregelt werden. Die dabei erzielten Regelzustände werden als statisch, quasi-statisch bzw. kontinuierlich bezeichnet und haben für die zeitabhängigen photogrammetrischen Einflussgrößen eine entsprechende Bedeutung.

3.3.2 Versuchstechnologien

Die im *Bautechnischen Mess- und Versuchswesen* eingesetzten Versuchstechnologien sind sehr vielschichtig und umfassen prinzipiell alle Mess-, Steuer-/Regel- und Belastungstechnologien, die für die Versuchsdurchführung erforderlich werden.

Aufgrund der Ausrichtung der Arbeit (Abschn. 1.3, S. 3) wird auf eine allgemeine Darstellung verzichtet und auf die umfangreiche Literatur verwiesen [1, 3–6]. Auf spezielle Aspekte wird im Zusammenhang mit den in Abschnitt 5.3 (S. 73) vorgestellten Untersuchungen eingegangen, sofern diese für den photogrammetrischen Messprozess von Bedeutung sind.

3.3.3 Versuchsbedingungen

Unter Versuchsbedingungen werden im Folgenden, in Anlehnung an die Betriebsbedingungen in der VDI/VDE-Richtlinie 2634 Blatt 1 [67], die äußeren Einflussgrößen verstanden, die einen direkten bzw. indirekten Einfluss auf die Zielgrößenermittlung durch den photogrammetrischen Messprozess ausüben können. Beispielsweise durch:

- Temperatur und den Temperaturgradienten
- Feuchte
- Schwingungen (mechanisch)
- elektromagnetische Störeffekte
- Umgebungsbeleuchtung
- Refraktion
- Staub

4 Grundlagen bauspezifischer photogrammetrischer Messprozesse

4.1 Vorbetrachtungen

Die Planung photogrammetrischer Messprozesse im Kontext experimenteller Untersuchungen erfordert i. d. R. ein systematisches Vorgehen. In den überwiegenden Fällen sind diese Untersuchungen interdisziplinär ausgerichtet, daher sind Kenntnisse über fachspezifische Begriffe aller beteiligten Disziplinen erforderlich.

Die vorliegende Arbeit bezieht sich bei der Darstellung photogrammetrischer Sachverhalte auf die DIN 18716. In Teil 1 [55] sind Grundbegriffe und besondere Begriffe der photogrammetrischen Aufnahme zusammengefasst; Teil 2 [56] geht auf besondere Begriffe der photogrammetrischen Auswertung ein. Darüber hinaus werden in den folgenden Abschnitten weitere Normen und Richtlinien einbezogen, die auf spezielle Aspekte optischer Messprozesse Bezug nehmen. Die Verwendung von Symbolen und Formelzeichen erfolgt in den überwiegenden Fällen in Anlehnung an die jeweiligen Normen und Richtlinien. Änderungen und Anpassungen wurden im Hinblick auf eine einheitliche und eindeutige Darstellung fachübergreifender Sachverhalte vorgenommen. Weiterhin erscheinen aufgrund der Besonderheiten photogrammetrischer Messprozesse im *Bautechnischen Mess- und Versuchswesen* einige begriffliche Ergänzungen sinnvoll, die in der vorliegenden Arbeit eine eindeutige Charakterisierung und Darstellung ermöglichen.

Für eine systematische Darstellung von grundlegenden und speziellen Zusammenhängen, die für das Verständnis und die Einbeziehung der *Digitalen Nahbereichsphotogrammetrie* im *Bautechnischen Mess- und Versuchswesen* erforderlich sind, wurde die in Abbildung 4.1 gewählte Reihenfolge gewählt. Diese basiert auf dem Informationsfluss photogrammetrischer Messprozesse. Ausgehend vom Informationsträger Licht wird entsprechend dem Informationsfluss auf die jeweiligen Zusammenhänge eingegangen, die auf den Prozess der Informationsentstehung, -übertragung und -wandlung Einfluss haben können.

In Bezug auf die Darstellungen optischer Abbildungsprozesse und der zugrundeliegenden Zusammenhänge finden im Folgenden strahlungsphysikalische und lichttechnische Größen gleichermaßen Verwendung. Die Gründe dafür sind in den zugehörigen Fachdis-

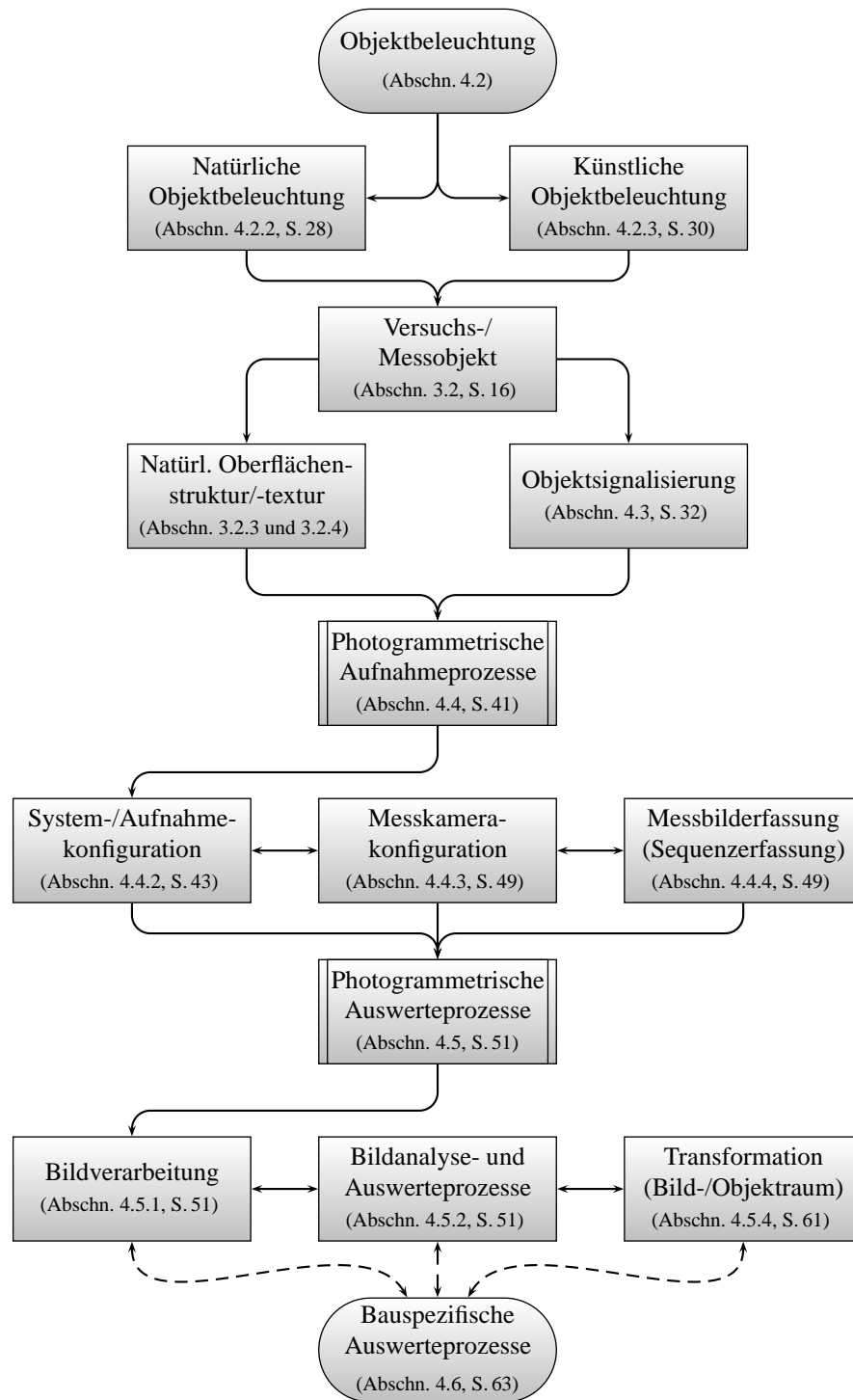


Abbildung 4.1: Informationsfluss photogrammetrischer Messprozesse bei experimentellen Untersuchungen im *Bautechnischen Mess- und Versuchswesen*

ziplinen zu suchen. Strahlungsphysikalische Größen dienen dabei der Beschreibung von allgemeinen Strahlungsquellen, die eine elektromagnetische Strahlung aussenden und nicht auf den sichtbaren Spektralbereich elektromagnetischer Strahlung beschränkt sind. Photometrische bzw. lichttechnische Größen beziehen die Eigenschaften des menschlichen Auges ein, um die Wahrnehmung der optischen Strahlung durch den Menschen als Licht zu beschreiben [29].

Die Zusammenstellung relevanter Einfluss- und Zielgrößen erfolgt auf den Grundlagen der in Abschnitt 2 (S. 9) geschilderten *Versuchsplanung*.

4.2 Objektbeleuchtung

4.2.1 Grundlagen

Im Informationsfluss photogrammetrischer Messprozesse erzeugen natürliche und künstliche Beleuchtungsquellen optische Strahlung, die durch photometrische bzw. strahlungsphysikalische Größen charakterisiert bzw. spezifiziert werden können – beispielsweise auf Grundlage der Teile der DIN 5031 [57–65]. Prinzipiell können Beleuchtungsquellen und die damit verbundenen Beleuchtungstechniken als ein Bestandteil der Objektsignalisierung (Abschn. 4.3, S. 32) angesehen werden.

Im Folgenden werden – auf Grundlage der DIN 5039 [66] – Beleuchtungsquellen auch als Lichtquellen bezeichnet, sofern sich die spektrale Zusammensetzung auf sichtbare Strahlung (VIS) und ggf. auf gleichzeitige Strahlung im ultravioletten (UV) und/oder im nahen infraroten Bereich (NIR) bezieht. Den vorgenannten Strahlungsarten (UV/VIS/NIR) können auf Grundlage der DIN 5031 Teil 7 [63] Wellenlängenbereiche zugeordnet werden. Diese sind in Tabelle 4.1 zusammengestellt.

Beleuchtungs- bzw. Lichtquellen haben im Zusammenhang mit den strahlungsphysikalischen und lichttechnischen Materialeigenschaften des jeweiligen Versuchsobjektes

Kurzzeichen	Strahlung (Bezeichnung)	Wellenlänge λ [nm]
UV	Ultraviolettstrahlung	100 ... 380
VIS	Sichtbare Strahlung	380 ... 780
NIR	Infrarotstrahlung (Nahes IR)	780 ... 1400

Tabelle 4.1: Wellenlängenbereiche ausgewählter Strahlungsarten (DIN 5031 Teil 7)

(Abschn. 3.2.3.2, S. 19) und den relevanten Versuchsbedingungen (Abschn. 3.3.3, S. 24) i. d. R. einen entscheidenden Einfluss auf die Bildentstehung (Abschn. 4.4, S. 41). Aufgrund der Bedeutung kann eine entsprechende aufgabenbezogene Bewertung von Beleuchtungsquellen und -verhältnissen erforderlich werden, wobei die in Tabelle 4.2 zusammengestellten Einflussgrößen Bedeutung erlangen können. Die Art und Weise der Einbeziehung entsprechender Einflussgrößen hängt sehr stark von der jeweiligen Messaufgabe ab. Im *Bautechnischen Mess- und Versuchswesen* werden diese für photogrammetrische Messprozesse in den überwiegenden Fällen qualitativ einbezogen. Die Herstellung quantitativer Zusammenhänge ist sehr stark von den jeweiligen Versuchsobjekten und -prozessen abhängig und kann nur im Zusammenhang mit konkreten Messkonfigurationen sinnvoll dargestellt werden. Aufgrund der Ausrichtung der vorliegenden Arbeit (Abschn. 1.3, S. 3) wird diesbezüglich auf eine allgemeine Darstellung verzichtet und auf die umfangreichen Normen [49–52, 57–65] und die vorliegende Literatur [17, 19, 27, 30] verwiesen. Diese Normen usw. ermöglichen unter Einbeziehung der strahlungsphysikalischen und lichttechnischen Materialeigenschaften des jeweiligen Versuchsobjektes (Abschn. 3.2.3.2, S. 19) eine aufgabenbezogene Modellierung ausgewählter Zusammenhänge bzw. der gesamten Beleuchtungssituation.

4.2.2 Natürliche Objektbeleuchtung

Unter natürlicher Objektbeleuchtung wird im Folgenden das Licht verstanden, das durch direkte bzw. indirekte Sonnenstrahlung zu einer Beleuchtung des Versuchsobjektes bzw. zu einer Ausleuchtung des Messraumes führt und im Wesentlichen durch die in Tabelle 4.2 aufgeführten Einflussgrößen charakterisiert werden kann. Die Sonnenstrahlung als solche tritt i. d. R. als Störgröße auf.

Bei Versuchen mit natürlicher Beleuchtung können sich aufgabenbezogen verschiedene Einflüsse störend auf den bauspezifischen und photogrammetrischen Messprozess auswirken – beispielsweise auf globale und lokale Intensitätsschwankungen und eine thermische Beeinflussung des Versuchsobjektes und der Versuchstechnik.

Globale Intensitätsschwankungen können nicht nur bei Feldversuchen, sondern auch bei entsprechenden Laborversuchen zu unerwünschten Störeffekten führen. Bei Laborversuchen besteht i. d. R. die Möglichkeit, den Einfluss entsprechend zu verhindern bzw. zu minimieren. Bei Versuchen in situ hingegen bestehen diesbezüglich oftmals kaum Möglichkeiten, was bei der Planung entsprechender – davon abhängiger – Messprozesse berücksichtigt werden muss.

Lokale Intensitätsschwankungen beziehen sich beispielsweise auf richtungs- und ortsabhängige Schattenbildungen, die von der zu erfassenden Objektgeometrie und Oberflächentopologie bzw. Oberflächenstruktur und dem zeitabhängigen Sonnenstand beein-

Einflussparameter	Beschreibung
Ausbreitungscharakteristik	Die Ausbreitungscharakteristik beschreibt die Art und Weise der Ausbreitung der Strahlung bzw. des Lichtes von Beleuchtungsquellen.
Spektrum	Das Spektrum bezieht sich auf die wellenlängenabhängige Zusammensetzung der Strahlung bzw. des Lichts und kann in direkter und indirekter Weise auf die Bildentstehung Einfluss ausüben. Eine direkte Beeinflussung bezieht sich im Folgenden auf die Bildentstehung, bei der die spektrale Zusammensetzung unmittelbar erfasst wird, z. B. bei Verwendung von Farb-Sensoren. Ein indirekter Einfluss besteht i. d. R. bei allen bildgebenden Sensoren in Bezug auf die wellenlängenabhängige Quanteneffizienz.
Stabilität	Die Stabilität von Beleuchtungsquellen kann durch verschiedene Faktoren beeinflusst werden. Bei einer entsprechenden Relevanz kann diese als Störgröße einen entscheidenden Einfluss auf den Messprozess ausüben.
Strahl- bzw. Lichtleistung	Die Strahl- bzw. Lichtleistung wird i. d. R. als allg. Bewertungskriterium herangezogen und stellt eine wesentliche Einflussgröße bei der Planung photogrammetrischer Messprozesse dar.
Wärmeentwicklung	Die Wärmeentwicklung von Beleuchtungsquellen kann einen entscheidenden Einfluss auf das Versuchsobjekt (Ausdehnungskoeffizient) und die photogrammetrische Messtechnik ausüben.

Tabelle 4.2: Einflussgrößen von Beleuchtungsquellen

flusst sein kann. Dieser Effekt konnte z. B. bei photogrammetrischen Verformungs- und Rissmessungen an einem Brückenbauwerk beobachtet werden [98], aber auch bei zahlreichen Laborversuchen. Im Labor führten aber auch künstliche Objektbeleuchtungen zu derartigen Effekten.

Bei natürlichen Beleuchtungsverhältnissen können auch wetterbedingte Einflüsse (z. B. Wolken) auftreten und je nach Objektgröße bzw. Messbereich zu lokalen bzw. globalen kurzzeitigen Intensitätsschwankungen führen.

Thermisch bedingte Einflüsse infolge direkter Sonneneinstrahlung können in Bezug auf das Versuchsobjekt und die Versuchstechnik – einschließlich der photogrammetrischen Messtechnik – einen direkten bzw. indirekten Einfluss ausüben, beispielsweise auf den material- und temperaturabhängigen Dehnungszustand der Versuchsobjekte. Ebenso kann ein Einfluss auf die photogrammetrische Messtechnik, die Messkonfiguration usw. bestehen. Ein derartiger Fall ist in Abschnitt 5.3.1 (S. 73) dargestellt, bei dem beispielsweise ein signifikanter Einfluss infolge Temperaturänderung auf die äußere Orientierung der Messkamera bestand, die u. a. auch auf die direkte Sonneneinstrahlung zurückgeführt werden konnte.

4.2.3 Künstliche Objektbeleuchtung

Künstliche Objektbeleuchtungen können nach verschiedenen Gesichtspunkten eingeteilt bzw. kategorisiert werden – beispielsweise nach dem Aufbau, der Kohärenz und dem Funktions- oder Wirkprinzip. Nach DIN 5039 [66] werden Leuchten beispielsweise als Geräte definiert, die zur Verteilung, Filterung oder Umformung des Lichtes von Lampen dienen, einschließlich der zur Befestigung, zum Schutz oder zum Betrieb der Lampen notwendigen Bestandteile. Lampen werden dabei als technische Ausführung künstlicher Lichtquellen definiert, die elektromagnetische Strahlung im Wellenbereich der sichtbaren Strahlung entsprechend Abschnitt 4.2.1 ausstrahlen. Lampen werden nach DIN 5039 entsprechend Abb. 4.2 eingeteilt. Eine weiterführende Gliederung mit ausgewählten Beispielen findet sich in Tabelle 4.3.

Im Folgenden werden künstliche Objektbeleuchtungen – in Anlehnung an die Definition nach DIN 5039 – als Leuchten verstanden, deren vorrangige Aufgabe in der Beleuchtung der zu erfassenden Versuchs- bzw. Messobjekte besteht. Ein Überblick über Beleuchtungstechniken, die prinzipiell bei photogrammetrischen Messprozessen eingesetzt werden können, findet sich beispielsweise in [34]. In [25] werden darüber hinaus die Möglichkeiten beschrieben, die sich durch den Einsatz von strukturiertem Licht ergeben. Aufgrund der Vielschichtigkeit aktueller Beleuchtungstechniken, die in die photogrammetrischen Aufnahmeprozesse einbezogen werden können, wird nachfolgend nur auf die Beleuchtungstechniken Bezug genommen, die im Zusammenhang mit den in Abschnitt 5.3 (S. 73) vorgestellten Anwendungen eingesetzt wurden. Diese beziehen sich beispielsweise auf Halogenstrahler (Warmlicht), Kaltlichtstrahler (jeweils als Weißlicht) und LED-Strahler.

Die Auswahl geeigneter Beleuchtungsquellen erfolgt aufgabenbezogen im Zusammenhang mit den in Tabelle 4.2 genannten Einflussgrößen. Dabei spielt der zu erfassende Objektraum bzw. Objektbereich eine wesentliche Rolle. Die LED-Strahler wurden in ver-

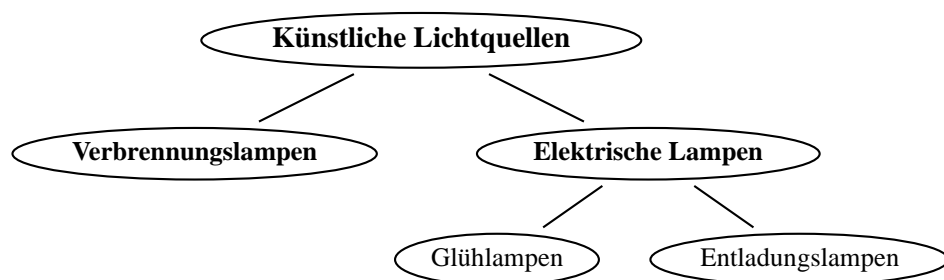


Abbildung 4.2: Einteilung künstlicher Lichtquellen (Lampen) nach DIN 5039 [66]

Kategorie	Beschreibung
Glühlampen	Glühlampen erzeugen Licht, das durch einen durch elektrischen Strom erhitzten Körper ausgestrahlt wird. z. B.: Vakuumglühlampen, gasgefüllte Glühlampen und Halogen-Glühlampen
Entladungslampen	Entladungslampen erzeugen Licht, das direkt oder indirekt durch elektrische Entladung in Gasen, Metaldämpfen oder einer Mischung beider erzeugt wird. z. B.: Glimmlampen, Hochdruck- und Niederdruckentladungslampen

Tabelle 4.3: Einteilung elektrischer Lampen nach DIN 5039 [66]

schiedenen Ausführungen – beispielsweise als Ring- oder Flächenstrahler – eingesetzt. Ringstrahler werden i. d. R. am Objektiv befestigt und ermöglichen bei kurzen Objektentfernungen eine ausreichende Objektausleuchtung, ohne dass dabei ein signifikanter Temperatureinfluss entsteht. LED-Flächenstrahler ermöglichen die objektnahe Positionierung und können dadurch flexibel zur Be- und Ausleuchtung komplexer Objektgeometrien mit Vorteil eingesetzt werden. Aufgrund der begrenzten Lichtleistung von LED-Strahlern werden zur Beleuchtung größerer Objekte u. a. Halogenstrahler eingesetzt. Halogenstrahler verursachen durch eine hohe Farbtemperatur eine hohe Hitzeentwicklung, die bei der Versuchsaufnahme u. a. das Kamerasystem aufheizt. Bessere Ergebnisse können mit der Verwendung von Kaltlichtstrahlern erzielt werden, die in einem engen Wellenlängenbereich ohne Hitzeentwicklung arbeiten. Kaltlichtstrahler werden u. a. auch in kompakten Geräten angeboten, bei denen z. B. im Gehäuse das Licht erzeugt wird, welches über Glasfaserleitungen eine flexible Objektbeleuchtung ermöglicht.

Besonders hohe Anforderungen an die Beleuchtungsquellen können sich im Zusammenhang mit dem Einsatz von Hochgeschwindigkeitskameras ergeben. Aufgrund der kurzen Integrationszeiten (Belichtungszeiten) wird eine hohe Lichtleistung erforderlich. Diese kann oftmals nur durch entsprechende Hochleistungslampen erzielt werden, die teilweise zu einer enormen Wärmeentwicklung führen.

Einen Spezialfall stellen Beleuchtungstechniken mit kohärenten Lichtquellen dar. Bei photogrammetrischen Messprozessen bezieht sich der Einsatz in den überwiegenden Fällen auf Laserprojektionen, die beispielsweise in Form von Punkten, Linien bzw. flächenhaften Mustern auf Objektoberflächen projiziert werden [34]. Die sich daraus ergebenden Messkonfigurationen sind in den überwiegenden Fällen für die in Abschnitt 5.3 (S. 73) vorgestellten Messaufgaben nicht unmittelbar nutzbar, können aber für spezielle Teilprozesse Bedeutung erlangen – beispielsweise für die Erfassung von Starrkörperbewegungen. Einen Spezialfall stellt die Erzeugung von Speckle-Mustern durch den Einsatz

kohärenter Beleuchtungstechniken dar, auf die im Zusammenhang mit der Objektsignalisierung in Abschnitt 4.3.2 (S. 34) eingegangen wird.

Prinzipiell kann festgestellt werden, dass nur künstliche Objektbeleuchtungen für photogrammetrische Verformungs-, Riss- und Schädigungsmessungen herangezogen werden können, die eine orts- und zeitabhängige Zuordnung lokaler Objektbereiche während des Versuches ermöglichen. In den überwiegenden Fällen können photogrammetrische Messkonfigurationen, die z. B. strukturiertes Licht einbeziehen, dies nicht ohne zusätzliche Maßnahmen leisten.

4.3 Objektsignalisierung

Die natürlich vorliegenden Oberflächenstrukturen und -texturen der photogrammetrisch zu erfassenden Versuchsobjekte stellen im Zusammenhang mit der Objektbeleuchtung (Abschn. 4.2) die Ausgangssituation für den bauspezifischen photogrammetrischen Aufnahme- und Auswerteprozess dar. Abbildung 3.1 (S. 21) zeigt eine Auswahl natürlicher Oberflächentexturen, die im bautechnischen Versuchswesen anzutreffen sind.

Generell wäre es wünschenswert, den photogrammetrischen Messprozess unter Einbeziehung der natürlich vorliegenden Oberflächentexturen – ohne zusätzliche Maßnahmen (Objektsignalisierung) – vornehmen zu können. Die im Rahmen der Arbeit vorgenommenen Untersuchungen haben aber ergeben, dass für viele Messaufgaben die natürlichen Oberflächentexturen nicht geeignet sind, einen robusten effizienten Aufnahme- und Auswerteprozess zu gewährleisten. Die Entscheidung über die Notwendigkeit und die Art der Objektsignalisierung muss in Abhängigkeit von der jeweiligen Messaufgabe vorgenommen werden und kann auf Grundlage des entwickelten Ablaufschemas entsprechend Abbildung 4.3 erfolgen.

4.3.1 Aufgabenspezifische Texturanalyse

Die Entscheidung, ob die natürlich vorliegende Oberflächentextur in den photogrammetrischen Messprozess einbezogen werden kann, muss i. d. R. aufgabenbezogen erfolgen. Wie bereits in Abschnitt 3.2.4 (S. 21) dargestellt, besteht aufgrund der Vielzahl natürlicher Oberflächentexturen (Abb. 3.1), die im *Bautechnischen Mess- und Versuchswesen* vorkommen können, und der Vielfalt an Messaufgaben, die über die Art und Weise der photogrammetrischen Bilderfassung (Abschn. 4.4, S. 41) und -auswertung (Abschn. 4.5, S. 51) entscheiden, kaum Aussicht, eine systematische Charakterisierung bauspezifischer Oberflächentexturen nach einheitlichen Kriterien vorzunehmen. Selbst für den Fall, dass beispielsweise bei Versuchsserien ähnliche Oberflächentexturen vorliegen,

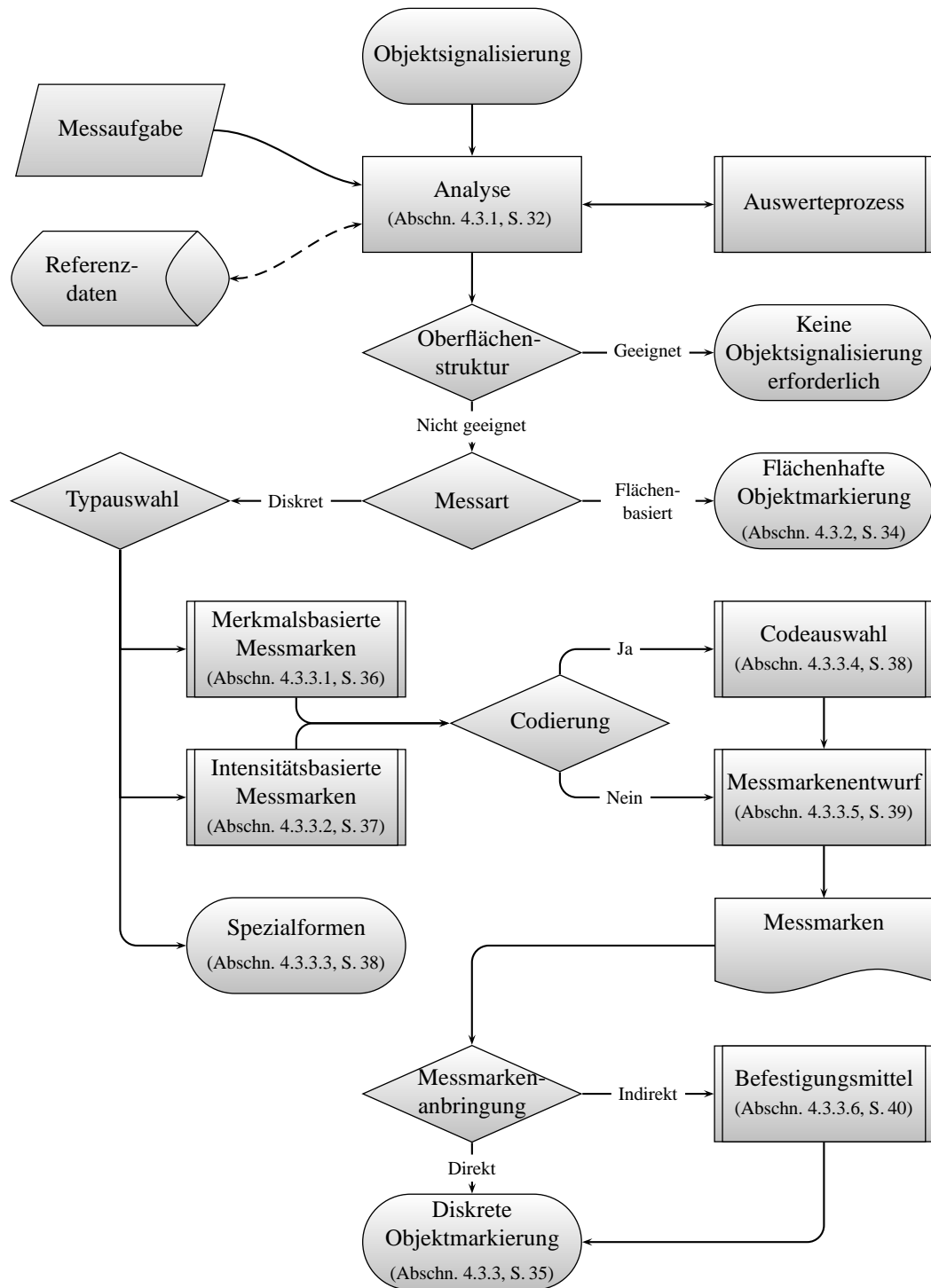


Abbildung 4.3: Ablaufschema zur Festlegung der Objektsignalisierung

ergibt eine direkte Texturanalyse nur dann Sinn, wenn die Analyseparameter in einen Zusammenhang mit der jeweiligen photogrammetrischen Auswertung gebracht werden können.

Die systematische Charakterisierung bauspezifischer Oberflächentexturen kann an Bedeutung gewinnen, wenn diese unmittelbarer Bestandteil einer Messaufgabe ist. Diesbezüglich existieren verschiedene Lösungsansätze [26], die in der vorliegenden Arbeit nicht weiter behandelt werden.

Um dennoch eine Bewertung relevanter Oberflächentexturen vornehmen zu können, werden in der Praxis – sofern keine abgesicherten Erkenntnisse vorliegen – Testmessungen durchgeführt, bei denen die Aufnahmebedingungen so gewählt werden, dass diese den realen Versuchsverhältnissen sehr nahe kommen bzw. identisch sind. Gleiches gilt für den Auswerteprozess. In diesem Zusammenhang werden auch die relevanten Einflussgrößen bestimmt, die in Bezug auf die jeweilige Aufnahme- und Auswertekonfiguration relevant sind.

4.3.2 Flächenbasierte Objektsignalisierung

Die flächenbasierte Objektmarkierung stellt eine spezielle Form der flächenbasierten Objektsignalisierung dar, die auf einer direkten Modifikation der Objektoberfläche basiert. Dies geschieht beispielsweise unter Einsatz spezieller Farbpigmente (weiß/schwarz), die keine Veränderung der mechanischen Oberflächeneigenschaften hervorrufen und somit eine unbeeinflusste, flächenhafte photogrammetrische Erfassung der Verformungszustände an der Objektoberfläche ermöglicht. Die erzeugten Zufallsmuster, z. B. in Abb. 4.4(a), bieten i. d. R. eine optimale Grundlage für die Bildzuordnung homologer Bildbereiche im photogrammetrischen Auswerteprozess und werden dann eingesetzt, wenn die natürlich vorliegenden Oberflächentexturen (Abschn. 3.2.4, S. 21) in Bezug auf die jeweilige Messaufgabe keine ausreichenden Voraussetzungen bieten. Im Hinblick auf die durchgeführten Untersuchungen (Abschn. 5.3, S. 73) hat sich diese Form der Objektmarkierung besonders bei der flächenhaften Erfassung kleinformatiger Versuchsobjekte als hilfreich erwiesen. In Bezug auf die Erfassung von Originalbauwerksteilen bzw. von Bauwerken selbst erscheint die flächenbasierte Objektmarkierung nur partiell sinnvoll.

Weitere spezielle Formen der flächenhaften Objektsignalisierung stellen beispielsweise künstliche Beleuchtungstechniken dar, die auf strukturiertem Licht basieren. Wie bereits in Abschnitt 4.2.3 (S. 30) erwähnt, eignet sich diese Art der flächenhaften Objektsignalisierung in den überwiegenden Fällen und ohne zusätzliche Maßnahmen nicht für die photogrammetrische Erfassung von Oberflächenveränderungen (inplane).

Der Einsatz kohärenter Beleuchtungsquellen bietet sich für ausgewählte Messkonfigurationen an. Dabei muss beachtet werden, dass sich bei der Bestrahlung optisch rau-

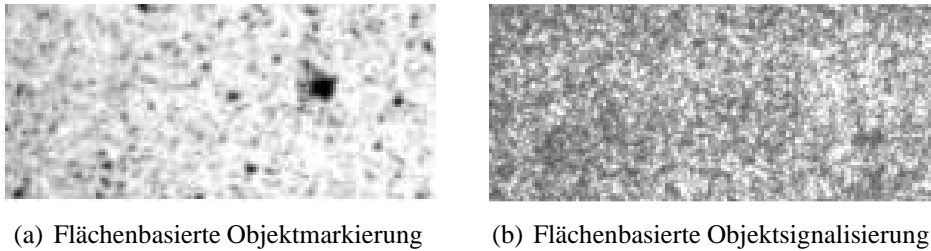


Abbildung 4.4: Künstliche flächenbasierte Objektsignalisierung in Form einer direkten Objektmarkierung (a) und mittels Einsatz kohärenter Beleuchtungsquellen (Laser) zur Erzeugung von Speckle-Mustern (b)

er Objektoberflächen, wie z. B. in Abbildung 4.4(b) ein *ortsfestes* Speckle-Muster ausbildet, das u. a. vom Betrachtungsstandpunkt abhängig ist [13, 14]. Das bedeutet, dass von verschiedenen Standpunkten aus der identische Objektbereich durch verschiedene Speckle-Muster dargestellt wird. Begonnene Untersuchungen dazu haben ergeben, dass bei kleinen Objektveränderungen bzw. Objektverschiebungen das Speckle-Muster erhalten bleibt und unter den vorgenannten Randbedingungen in den photogrammetrischen Auswerteprozess einbezogen werden kann. Die Einbeziehung von Speckle-Mustern würde gegenüber der direkten flächenhaften Objektmarkierung den Vorteil bieten, dass keine Modifikation der Objektoberfläche vorgenommen werden muss und jede optisch raue Objektoberfläche – auch ohne Textur – unmittelbar in den Messprozess einbezogen werden könnte. Aus aktueller Sicht ist – unter den vorgenannten Voraussetzungen – der Einsatz von Speckle-Mustern in Bezug auf eine photogrammetrische 2D-Objekterfassung denkbar.

4.3.3 Diskrete Objektsignalisierung

Die diskrete Objektsignalisierung kann aus verschiedenen Gründen erforderlich werden – beispielsweise zur eindeutigen Festlegung diskreter Objektpunkte, zur Erreichung einer hohen Einmessgenauigkeit, aber auch zur Absicherung eines hohen Automatisierungsgrades.

Im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen (Abschn. 5.3, S. 73) erfolgt in den überwiegenden Fällen die diskrete Objektsignalisierung mittels Messmarken.

Wird der Einsatz von Messmarken erforderlich, bestehen verschiedene Möglichkeiten der praktischen Umsetzung, die in den nachfolgenden Abschnitten näher erläutert werden.

4.3.3.1 Merkmalsbasierte Messmarken

Merkmalsbasierte Messmarken ermöglichen aufgrund geometrischer Merkmale eine präzise, eindeutige Lagebestimmung der Messmarke im Bildraum und ggf. auch im Objektraum. Bei den durchgeführten Anwendungen (Abschn. 5.3, S. 73) wurden in Bezug auf die merkmalsbasierten Messmarken in den überwiegenden Fällen Punktmarken verwendet, die teilweise auch mit einer Codierung versehen waren (Abschn. 4.3.3.4, S. 38). Neben den klassischen merkmalsbasierten Punktmarken (Abb. 4.5) kamen bei den verschiedensten Anwendungen immer wieder auch spezielle merkmalsbasierte Markenformen zum Einsatz. So auch im Zusammenhang mit den in Abschnitt 5.3.2 (S. 78) vorgestellten Untersuchungen. Für diese wurde die in Abbildung 4.6 gezeigte Messmarke entworfen, die eine Erweiterung bestehender Lösungen darstellt [24]. Diese ermöglicht die automatisierte Bestimmung der Bildkoordinaten im Rasterbild mit Subpixelgenauigkeit, in Abhängigkeit der Markengröße ggf. auch eine Erfassung der Rotation der Marke und die direkte Einmessung im Objektraum. Die Merkmale am Rand dienen der Codierung der Punktnummer (1...128), der Orientierung der Marke, des Punkttyps (Messpunkt, Passpunkt usw.) sowie des Durchmessers der Marke [96]. Die Befestigung erfolgt selbstklebend entweder direkt auf der Prüfkörperoberfläche oder direkt auf einem speziellen Unterbau, der die Deformation der Marke verhindert und eine exakte Objektpositionierung ermöglicht (Abschn. 4.3.3.6, S. 40).

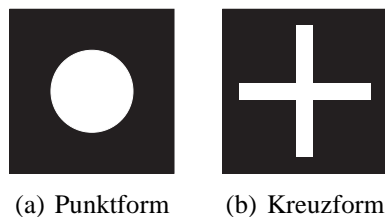


Abbildung 4.5: Klassische Formen merkmalsbasierter Messmarken

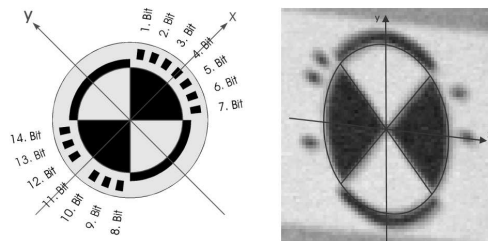


Abbildung 4.6: Spezialform einer merkmalsbasierten Messmarke [96]

4.3.3.2 Intensitätsbasierte Messmarken

Der Entwurf einer geeigneten intensitätsbasierten Marke basiert auf dem Grundgedanken, die automatische Messung in digitalen Bildern nicht nur auf die Erfassung der Gradienten an Kanten, beispielsweise von punkt- bzw. kreuzförmigen Marken, zu gründen, sondern eine kreisförmige Fläche mit genau definierten rotations-symmetrischen Intensitätsgradienten zu verwenden, um eine hohe Genauigkeit zu erreichen [16, 96]. Der Vorteil dieser Markierungsart liegt im bekannten Intensitätsverlauf der Marke, in der Einbeziehung einer gegenüber der üblichen Markierung vergrößerten Anzahl der Beobachtungen und in der Nutzung kreisförmiger Fenster zur Merkmalsextraktion und Bildzuordnung. Für den Entwurf der Marken mit dem Radius r wurde der Intensitätsverlauf durch eine Potenzreihenentwicklung n -ten Grades nach Gleichung (4.1) genutzt [96].

$$g_e(r, n) = \sum_{i=0}^n a_i \cdot r^i \quad (4.1)$$

$$g_e(x', y', n) = \sum_{i=0}^n a_i \cdot (\sqrt{x'^2 + y'^2})^i \quad (4.2)$$

Untersuchungen zeigten, dass die Nutzung eines Polynoms > 2 . Grades (Abb. 4.7) günstige Voraussetzungen für eine optimale Kennzeichnung und automatische Einmessung der Punkte bietet. Die Intensitätsverteilungsfunktionen können den jeweiligen Anforderungen usw. flexibel angepasst werden – beispielsweise durch eine Gauß-Verteilungsfunktion [8].

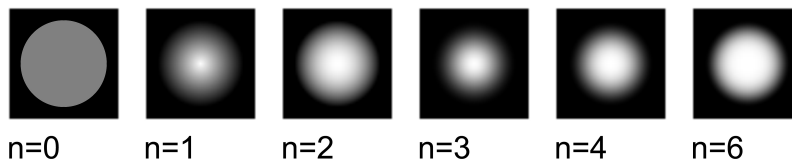


Abbildung 4.7: Intensitätsbasierte Messmarken (n -ten Grades)

Um Aussagen über die praktisch erreichbare Einmessgenauigkeit von intensitätsbasierten Messmarken mittels Merkmalsextraktion und Bildzuordnung treffen zu können, wurden theoretische Untersuchungen, Berechnungssimulationen und praktische Soll-Ist-Messungen – unter Einbeziehung eines Verschiebetisches – vorgenommen [81, 96]. Der mit dem Testfeld in Abbildung 4.8 auf einem Verschiebetisch erzielte mittlere Fehler der Gesamtmessung betrug beispielsweise 0,0083 Pixel. Die Verschiebungsanalyse erfolgte dabei mittels LSM (Abschn. 4.5, S. 51).

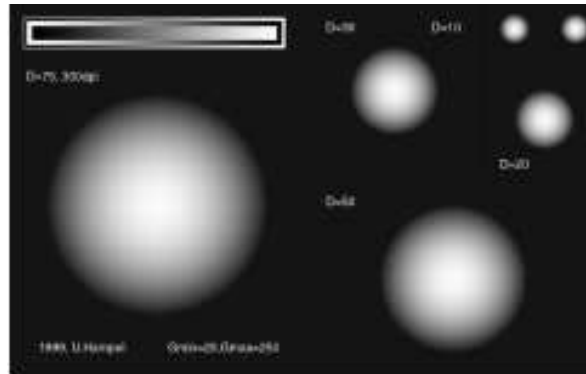


Abbildung 4.8: Testfeld mit Varianten intensitätsbasierter Messmarken zur Verifizierung der Einmessgenauigkeit intensitätsbasierter Messmarken [81]

4.3.3.3 Sonderformen diskreter Objektsignalisierungen

Spezielle diskrete Objektsignalisierungen ergeben sich beispielsweise durch den Einsatz retro-reflektierender bzw. selbstleuchtender Messmarken oder durch eine Musterprojektion. Die in [34] gezeigten speziellen diskreten Objektsignalisierungen können für spezielle Messaufgaben im *Bautechnischen Mess- und Versuchswesen* an Bedeutung erlangen. Die in der Photogrammetrie häufig eingesetzten Retro-reflektierenden Messmarken eignen sich für bauspezifische photogrammetrische Messprozesse i. d. R. nicht, sofern die Messaufgabe eine gleichzeitige Erfassung der Messmarken und der natürlichen bzw. künstlichen Oberflächentextur des Versuchsobjektes vorsieht.

4.3.3.4 Messmarkencodierung

Die in Abbildung 4.9 gezeigten Messmarkenbeschriftungen bzw. -codierungen veranschaulichen anhand einer Auswahl die Vielfalt vorhandener Lösungen [21, 24]. In den überwiegenden Fällen beinhaltet die Codierung eine Punktnummer, die im photogrammetrischen Auswerteprozess i. d. R. automatisiert erfasst wird. Oftmals liegt eine redundante Codierung vor, mit der Einfach- und Mehrfachfehler bei der Codebestimmung erkannt und behoben werden können [20].

Die Codierung von Messmarken kann in den überwiegenden Fällen gleichermaßen für merkmals- und intensitätsbasierte Messmarken angewendet werden.

In der Praxis hat sich die in Abbildung 4.9 gezeigte Form der Markencodierung bewährt, die auch im Rahmen der vorliegenden Arbeit – neben der in Abbildung 4.6 gezeigten Codierung – Verwendung fand.



Abbildung 4.9: Auswahl von Messmarkenbeschriftungen und -codierungen [20, 24]

4.3.3.5 Aufgabenspezifischer Messmarkenentwurf

Der aufgabenbezogene Messmarkenentwurf stellt eine Optimierung von Markenparametern dar. Diese beziehen sich beispielsweise auf die

- Anpassung der Markengröße,
- Farb- bzw. Grautongestaltung und
- Ausstattung mit zusätzlichen Merkmalen.

Die Anpassung der Markengröße erfolgt in Bezug auf ein optimales Abbildungsverhältnis der Messmarken, das durch den photogrammetrischen Aufnahme- und Auswerteprozess beeinflusst wird.

Hinsichtlich der Farbgestaltung, die sich oftmals nur auf Schwarz/Weiß- bzw. Grautöne bezieht, ist eine optimale Anpassung der Messmarken an die natürlich vorliegenden Objektoberflächen beabsichtigt, sofern die Aufgabe besteht, dass gleichzeitig die Messmarken und die verbleibende Objektoberfläche in den photogrammetrischen Aufnahme- und Auswerteprozess einzubeziehen sind. Durch die Anpassung kann i. d. R. eine Optimierung des optischen Abbildungsprozesses bewirkt werden. Die Bewertung der ortsabhängigen Intensitätsverteilung im Bildraum kann u. a. durch Einbeziehung eines Histogramms erfolgen.

Die Ausstattung mit zusätzlichen Merkmalen dient der optimalen Erfassung der Messmarken im Objekt- und Bildraum. In einigen Fällen ist beispielsweise die Einmessung von Messmarken am Objekt, z. B. im Zusammenhang mit der Verwendung von Passpunkten, erforderlich. Durch die in Abbildung 4.10 gezeigte Modifikation durch einen zusätzlichen Einmesspunkt im Markenzentrum wird eine optimale Lagebestimmung im Objektraum unterstützt. In den überwiegenden Fällen bewirkt der kleine zusätzliche Einmesspunkt keine Störungen im photogrammetrischen Aufnahme- und Auswerteprozess, da dieser oftmals – aufgrund des jeweiligen Abbildungsverhältnisses – nicht abgebildet wird.

Zur Herstellung optimierter merkmals- und intensitätsbasierter Messmarken wurde ein Programmmodul geschrieben, das eine nahezu beliebige farbliche und geometrische Messmarkengestaltung ermöglicht, einschließlich einer flexiblen Codieringerzeugung. Bei der



Abbildung 4.10: Modifikation von Messmarken durch einen zusätzlichen Einmesspunkt im Markenzentrum für eine optimale Einmessung im Objektraum

Programmierung der Coderingerzeugung wurde kein festes Codesystem vorgegeben. Durch die Angabe geometrischer Parameter (Coringdurchmesser usw.) und der Anzahl von Coderingsegmenten können unter Vorgabe einer Bitfolge (Zahl) entsprechende Ringcodes flexibel erzeugt werden. Die Messmarke in Abbildung 4.10 zeigt beispielsweise im linken oberen Bereich drei Parameterangaben. N12 gibt die Anzahl der Coderingsegmente an, die der maximalen Anzahl von Bits entspricht. B71 repräsentiert die Basiscodezahl, oftmals auch gleichzeitig die Punktnummer. A2 stellt ein Beispiel für ein spezielles Codesystem dar, das nicht unmittelbar auf den Basiscode zurückgeführt werden kann, sondern beispielsweise eine Zuordnungstabelle benötigt, mit der eine entsprechende Zuordnung für das jeweilige Codesystem vorgenommen werden kann.

4.3.3.6 Messmarkenanbringung

Die Anbringung von Messmarken erfolgt in Abhängigkeit der Aufgabenstellung direkt auf dem Objekt bzw. auf einem speziellen Unterbau (Abb. 4.11). Der Unterbau stellt dabei sicher, dass sich die Messmarkenform bei Objektdeformation nicht verändert und sich die Messmarke nicht undefiniert vom Objekt lösen kann. So kann eine hohe Einmessgenauigkeit und ein eindeutiger Objektbezug auch während des Belastungsversuches sichergestellt werden.

Untersuchungen haben gezeigt, dass Messmarken bei einer direkten Anbringung auf der Objektoberfläche entsprechend Abbildung 4.11(a) nicht selten unzureichend befestigt wurden bzw. der Befestigungsschwerpunkt nicht mit dem Messmarkenhauptpunkt übereinstimmte. Dies führte besonders bei sehr hochgenauen Verformungs- und Dehnungsmessungen zu fehlerhaften Messungen und macht deutlich, dass eine möglichst punktuelle Befestigung im Messmarkenschwerpunkt erfolgen sollte. Dies bietet die Garantie, dass die gemessenen Objektverschiebungen bzw. -dehnungen auch fehlerfrei den jeweiligen Objektbereichen zugeordnet werden können.

Bei Verwendung von speziellen Unterbauten entsprechend Abbildung 4.11(b) muss be-

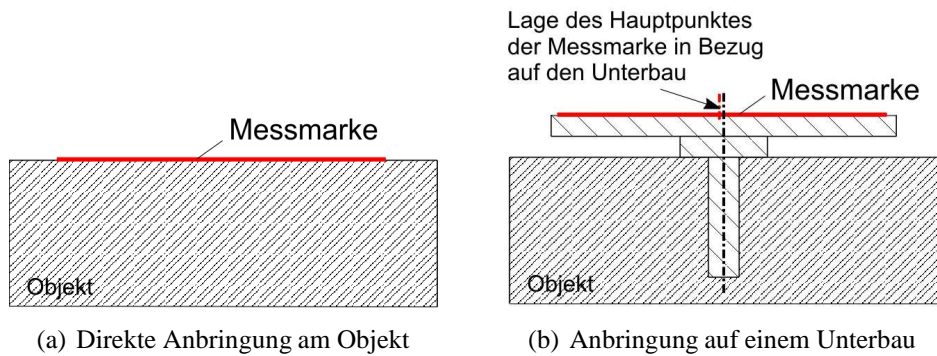


Abbildung 4.11: Messmarkenanbringung am Versuchsobjekt (z. B. für Holzversuche).

achtet werden, dass der Messmarkenhauptpunkt möglichst exakt mit dem Befestigungspunkt am Objekt übereinstimmt. Größere Abweichungen können bei entsprechenden Objektdeformationen zu Fehlern bei der Dehnungsanalyse bzw. bei der Bestimmung der Rotation führen. Bei Verwendung von Unterbauten müssen bzw. können diese nicht – wie in Abbildung 4.11 gezeigt – im Objekt verankert werden. Oftmals ist eine kleine vordefinierte Befestigungsfläche zum Fixieren – z. B. mittels Kleber – ausreichend und bewirkt eine Reduzierung bzw. Vermeidung vorgenannter Fehlereinflüsse.

4.4 Photogrammetrischer Aufnahmeprozess

Der photogrammetrische Aufnahmeprozess umfasst alle Prozesse, die im direkten und indirekten Zusammenhang mit der Messbilderzeugung stehen. Im Folgenden bezieht sich das auf relevante Aspekte der Planung und Umsetzung der System-, Aufnahme- und Kamerakonfiguration, einschließlich der Messbilderfassung.

4.4.1 Begriffsdefinitionen

In DIN 18716-1 [55, Abschn. 7] werden photogrammetrische Aufnahmekonfigurationen beschrieben, die im Wesentlichen durch die Aufnahmeanordnung der Messbilder charakterisiert sind und letztlich durch die Anzahl und die Orientierung der Messbilder definiert werden (Abschn. 4.4, S. 41). Entsprechend DIN 18716-1 wird u. a. die Photogrammetrie selbst durch die Anzahl der verwendeten Messbilder eingeteilt, was zu den entsprechenden Bezeichnungen führt, beispielsweise der

- Einzelbildphotogrammetrie,
- Zweibildphotogrammetrie und
- Mehrbildphotogrammetrie.

In der Literatur wird oft auch zwischen einer Ein-, Zwei- und Mehrbildaufnahme unterschieden [34].

In Bezug auf experimentelle Untersuchungen können die vorgenannten Unterscheidungsmerkmale teilweise zu Missverständnissen führen. Beispielsweise werden bei experimentellen Untersuchungen Bildfolgen aufgenommen, für deren Zuordnung innerhalb der Sequenz und zwischen den Sequenzen verschiedener Messkameras oftmals auch die vorgenannten Begriffe, wie z. B. Bildpaar oder Mehrbildaufnahme, benutzt werden – hier allerdings teilweise mit einer anderen Bedeutung bzw. mit einem anderen Bezug.

Im Zusammenhang mit der Beschreibung von Versuchen hat sich eine zielgrößenorientierte Charakterisierung der jeweiligen Aufnahmekonfigurationen etabliert, die für eine Charakterisierung photogrammetrischer Aufnahmekonfigurationen im experimentellen Umfeld sinnvoll erscheint. Diese basiert im Wesentlichen auf der Geometrie der zu erfassenden Objekte (2D/3D) und deren Veränderungen während des Versuches. Entsprechend wird zwischen einer 2D- bzw. 3D-Objekterfassung unterschieden. Spezialfälle, die im *Bautechnischen Mess- und Versuchswesen* nicht selten vorkommen und zu starken Vereinfachungen des photogrammetrischen Messprozesses führen können, wurden in Abschnitt 3.2.5 (S. 21) beschrieben und führen beispielsweise zu einer 2.5D-Objekterfassung.

Die Art und Weise der jeweiligen Objekterfassung (2D/2.5D/3D) wird in den folgenden Abschnitten näher erläutert und bezieht sich auf den klassischen Fall der direkten Objekterfassung. Das bedeutet, dass die Objekte direkt in den Messbildern abgebildet werden und der optische Abbildungsprozess nicht durch zusätzliche optische Elemente verändert wurde – beispielsweise durch Spiegel oder Prismen außerhalb der Messkamera (Abschn. 4.4.2.3, S. 45). Der Einsatz zusätzlicher optischer Elemente führt zu einer Modifikation des Abbildungsprozesses und erfordert i. d. R. eine entsprechende Berücksichtigung bei der mathematischen Modellierung. In Abschnitt 4.4.2 wird auf spezielle Aufnahmekonfigurationen eingegangen, die bei der Durchführung photogrammetrischer Messprozess im *Bautechnischen Mess- und Versuchswesen* Bedeutung erlangt haben.

Im Folgenden werden unter *Systemkonfiguration* die Prozesse bzw. Komponenten zusammengefasst, die nicht zur klassischen photogrammetrischen Aufnahme- und Kamera-konfiguration gezählt werden können, aber im Zusammenhang mit bauspezifischen photogrammetrischen Messprozessen an Bedeutung gewinnen können – beispielsweise die Datensynchronisierungsmodule zur Versuchssteuerung und die speziellen Bezugssysteme der 2.5D-Objekterfassung.

4.4.2 Zielgrößenorientierte Kategorisierung von Aufnahmekonfigurationen

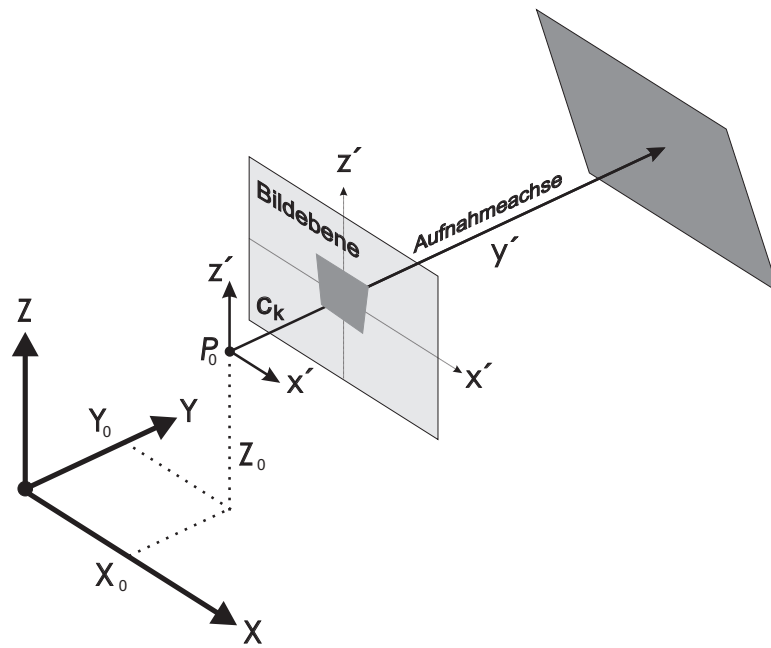
4.4.2.1 2D-Objekterfassung

Die 2D-Aufnahmekonfigurationen stellen – auf einer direkten Objekterfassung basierend – die einfachste Form der photogrammetrischen Objekterfassung dar und erfordern i. d. R. nur eine einzelne Messkamera. Ohne die Kenntnis zusätzlicher Informationen sind 2D-Aufnahmekonfigurationen auf die Erfassung zweidimensionaler Objekte bzw. Objekttoberflächen beschränkt, die im *Bautechnischen Mess- und Versuchswesen* nicht selten anzutreffen sind (Abschn. 3.2.5, S. 21). In Bezug auf die Erfassung entsprechender Objekte ist bei experimentellen Untersuchungen zu beachten, dass ohne weitere Maßnahmen nur inplane Objektveränderungen erfasst werden können. Absolute und relative Objektbewegungen bzw. -veränderungen, bei denen das Objekt bzw. die Objektbereiche außerhalb der im Referenzzustand eingenommenen Bezugsebene liegen, führen zu entsprechenden Fehlern. Abbildung 4.12 zeigt eine Auswahl von 2D-Aufnahmekonfigurationen.

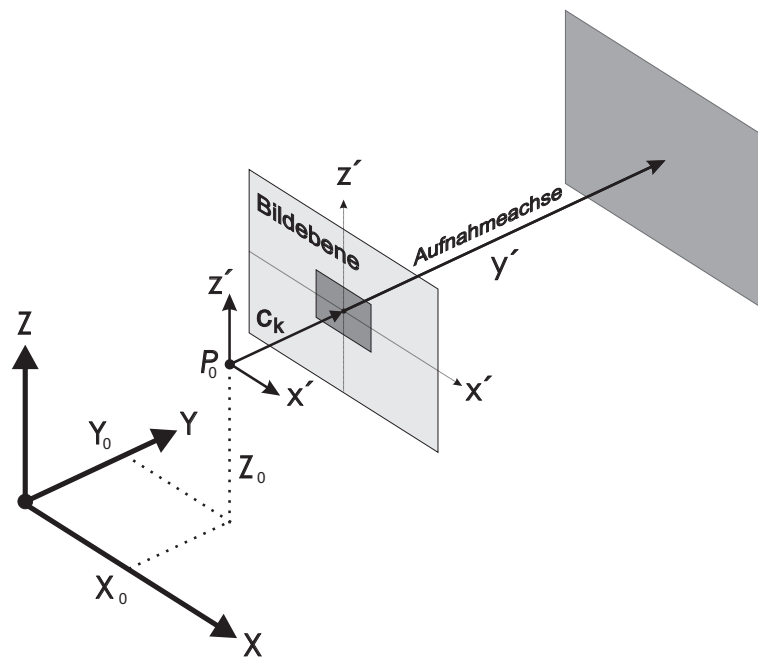
4.4.2.2 2.5D-Objekterfassung

Im bautechnischen Versuchswesen haben photogrammetrische Verformungsmessungen gezeigt, dass bei einer Vielzahl von Versuchen die zu erfassenden Probekörper bzw. die Baukonstruktionen auch während des Belastungsversuches im festgelegten Messbereich eine Ebene beschreiben und gegenüber den eintretenden Deformationen (2D) relativ große Starrkörperbewegungen (3D) vorliegen. Von besonderem Interesse sind i. d. R. nur die in dem Messbereich aufgetretenen Relativverschiebungen des Probekörpers, die oftmals nur zweidimensional auftreten. Prinzipiell lassen sich 2D-Objekte und 2D-Objektdeformationen – bei Kenntnis der Objektkoordinaten von mindestens 4 Passpunkten – durch die photogrammetrische Einbildauswertung mittels projektiver Transformation auch während des Belastungsversuches bestimmen. Die Einbeziehung von entsprechenden diskreten Objektpunkten als Passpunkte ist aber nur dann möglich, wenn diese während des Belastungsversuches ihre relative Position zueinander nicht verändern bzw. gegenüber den zu messenden Objektdeformationen vernachlässigbar sind. Ist dies nicht der Fall, so kann durch die Verwendung eines Bezugssystems – das an der Objektbewegung definiert teilnimmt, die relative Position zur Messbereichsebene nicht verändert und auf dem Passpunkte definiert sind – die projektive Transformation für jedes Lastbild vorgenommen werden.

Bei dem Einsatz der dynamischen projektiven Transformation muss beachtet werden, dass die Positionen von Objektpunkten bzw. -bereichen fehlerhaft bestimmt werden,



(a) Schrägaufnahme



(b) Senkrechtaufnahme (Bildebene || Objektebene)

Abbildung 4.12: Aufnahmekonfigurationen für die 2D-Objekterfassung

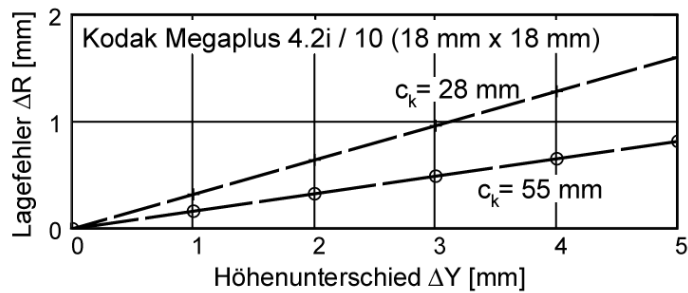


Abbildung 4.13: Zusammenhang zwischen Lagefehler ΔR und Höhenunterschied ΔY

wenn diese von der definierten Objektebene abweichen. Die Differenz zwischen der aufgespannten Objektebene und der realen Position eines Objektpunktes wird nachfolgend als *Höhenunterschied* ΔY und der daraus resultierende *Lagefehler* für den Objektraum mit ΔR bezeichnet. Ausgehend von einer angenähert parallelen Lage der Bild- zur Objektebene, kann mit Gleichung (4.3) der *Lagefehler* ΔR für den Objektraum berechnet bzw. abgeschätzt werden. Abbildung 4.13 zeigt den Zusammenhang zwischen *Lagefehler* ΔR und *Höhenunterschied* ΔY in Abhängigkeit der Kamerakonstante c_k und des radialen Abstands r'_{max} .

$$\Delta R \approx \frac{r'}{c_k} \cdot \Delta Y \quad (4.3)$$

Unter Beachtung der vorgenannten Einflüsse ermöglicht die dynamische projektive Transformation bei der photogrammetrischen Einbildauswertung eine Korrektur von Fehlern, die durch 3D-Starrkörperbewegungen hervorgerufen wurden. Diese Vorgehensweise wurde mit speziellen Anpassungen bzw. Erweiterungen bei vielen Versuchen eingesetzt (Abschn. 5.3, S. 73). Abbildung 4.14 zeigt den prinzipiellen Messaufbau für einen Zugversuch an einer textilbewehrten Betonprobe.

4.4.2.3 2D/2.5D-Objekterfassung mittels Spiegelphotogrammetrie

Durch den Einsatz von Spiegelementen kann für spezielle Messaufgaben bzw. Versuchsaufbauten die Anzahl der benötigten Kameras reduziert und die Erfassung komplizierter 3D-Strukturen vereinfacht werden. In Abhängigkeit der jeweiligen Messaufgabe ist der Einsatz von speziellen Spiegeln erforderlich, die über eine hohe Planheit verfügen, bei denen die Trägerschicht nicht die Reflexion beeinflusst und die Reflexionsschicht aus einer hochwertigen Beschichtung besteht (z. B. Silber). Abbildung 4.15 zeigt als Beispiel das Prinzip einer Spiegelaufnahme mit einer Messkamera. Die Beschreibung bzw.

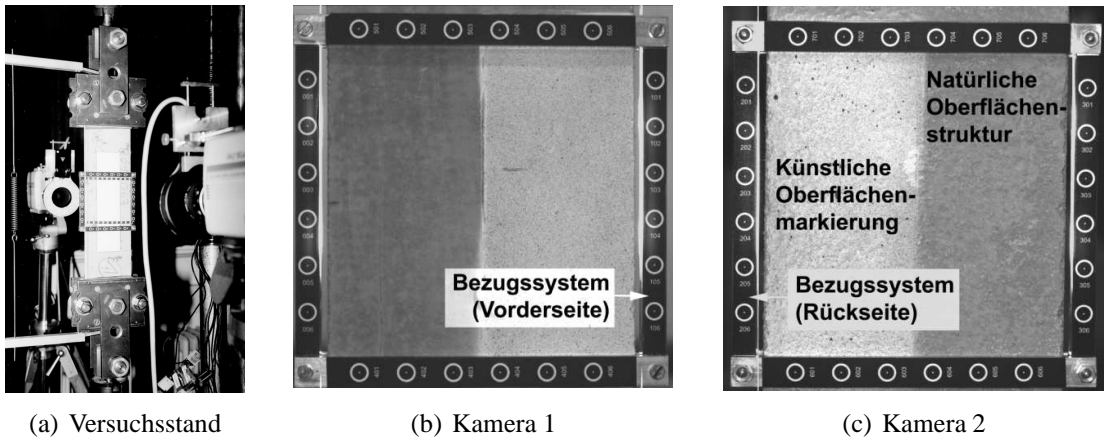


Abbildung 4.14: Einsatz der 2.5D-Objekterfassung (*Dynamische Projektive Transformation*) bei einem Zugversuch an einer textilbewehrten Betonprobe

Charakterisierung photogrammetrischer Messungen, bei denen Spiegelelemente benutzt werden, kann durch die Anzahl der verwendeten Spiegelgruppen und Kameras erfolgen. Eine Spiegelgruppe fasst die zur Objekteinmessung einbezogenen Spiegel zusammen. Abbildung 4.15 zeigt ein Beispiel für einen Versuchsaufbau zur photogrammetrischen Verformungs- und Rissmessung an einem textilbewehrten Betonprobekörper, bei dem eine digitale Kamera und zwei Spiegelgruppen, aus jeweils einem Spiegel bestehend, zum Einsatz kamen. Für den in Abbildung 4.15 vorgestellten Versuchsaufbau wurden drei Berechnungsmodelle untersucht. Das erste Berechnungsmodell nutzt pro Spiegelgruppe die projektive Transformation und entspricht der klassischen Einbildauswertung (2D). Das zweite Berechnungsmodell verwendet unter Einbeziehung eines Bezugssystems die *dynamische projektive Transformation*, wobei kein Bezug zwischen den beiden Spiegelgruppen hergestellt wurde (2.5D). Das dritte Berechnungsmodell stellt eine Erweiterung des vorgenannten dar, in dem zusätzlich die rechnerische Kopplung der beiden Spiegelgruppen (über Bezugssystem) zur Stabilisierung bzw. Absicherung der photogrammetrischen Messung führt (2.5D). Eine 3D-Erfassung ist u. a. für die Fälle möglich, bei denen der einzumessende Objektbereich mindestens zweimal – direkt bzw. indirekt (über Spiegelbild) – erfasst werden kann. Typische Anordnungen der 3D-Spiegelphotogrammetrie ergeben sich durch einen Spiegel und eine Kamera (indirekt und direkt), durch einen Spiegel und zwei Kameras (indirekt) bzw. durch zwei Spiegel einer Spiegelgruppe und eine Kamera (indirekt). Besondere Beachtung kommt den Beleuchtungselementen zu. Bei den durchgeführten Untersuchungen zeigten diffus strahlende Beleuchtungselemente die besten Resultate.

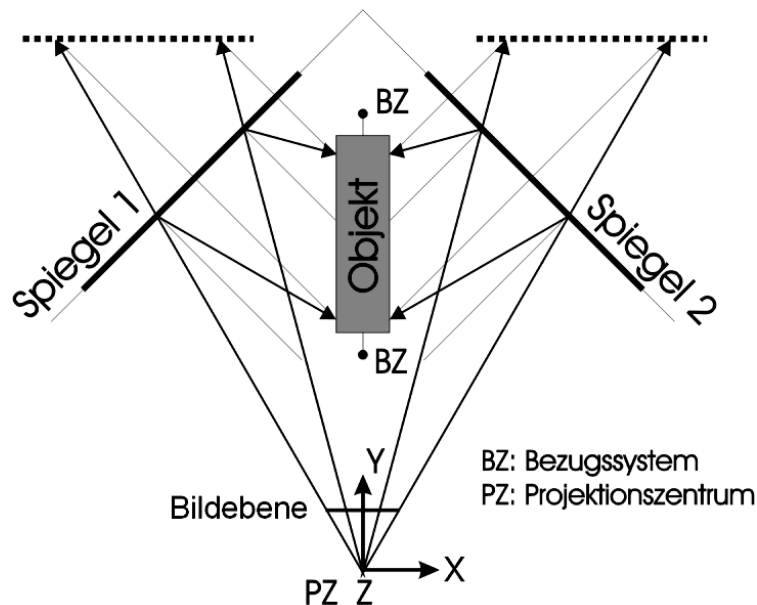


Abbildung 4.15: Einsatz der Spiegelphotogrammetrie.

4.4.2.4 3D-Objekterfassung

Im *Bautechnischen Mess- und Versuchswesen* werden zur 3D-Objekterfassung bei experimentellen Untersuchungen oftmals zwei Kameras in den photogrammetrischen Aufnahme- und Auswerteprozess einbezogen. In den überwiegenden Fällen kommt dabei die in Abbildung 5.24 (S. 99) gezeigte konvergente Aufnahmekonfiguration zum Einsatz. Bei der Auswahl müssen mehrere Aspekte abgewogen werden – beispielsweise in Bezug auf die Abbildung selbst (Schrägaufnahme bzw. Senkrechtaufnahme) und die jeweils erreichbare Genauigkeit bei der Objektkoordinatenberechnung [31]. Bei der in Abbildung 4.16 gezeigten Stereoaufnahme verlaufen die Aufnahmeachsen der beiden Kameras parallel. Das bietet u. a. den Vorteil, dass entsprechende Objekte – beispielsweise mit einer ebenen Oberflächen – weitestgehend unverzerrt in den Bildern abgebildet werden, sofern die Kameras gegenüber dem zu erfassenden Objekt bzw. den Objektoberflächen entsprechend ausgerichtet sind. Im Hinblick auf die Auswertemodule, die z. B. auf eine Interaktion mit dem Experimentator ausgelegt sind und die Bilddaten in direkter Weise einbeziehen, kann dies unter Umständen an Bedeutung gewinnen, beispielsweise bei der Profilstellung unter Einbeziehung berechneter Rissbilder (Abschn. 5.3.7, S. 90). Weiterhin bietet der Normalfall – besonders bei eben ausgebildeten Objektoberflächen – den Vorteil, dass alle Objektbereiche in einem ähnlichen Abbildungsverhältnis erfasst werden. Dies kann im Zusammenhang mit der Bildzuordnung homologer Bildbereiche Bedeutung erlangen.

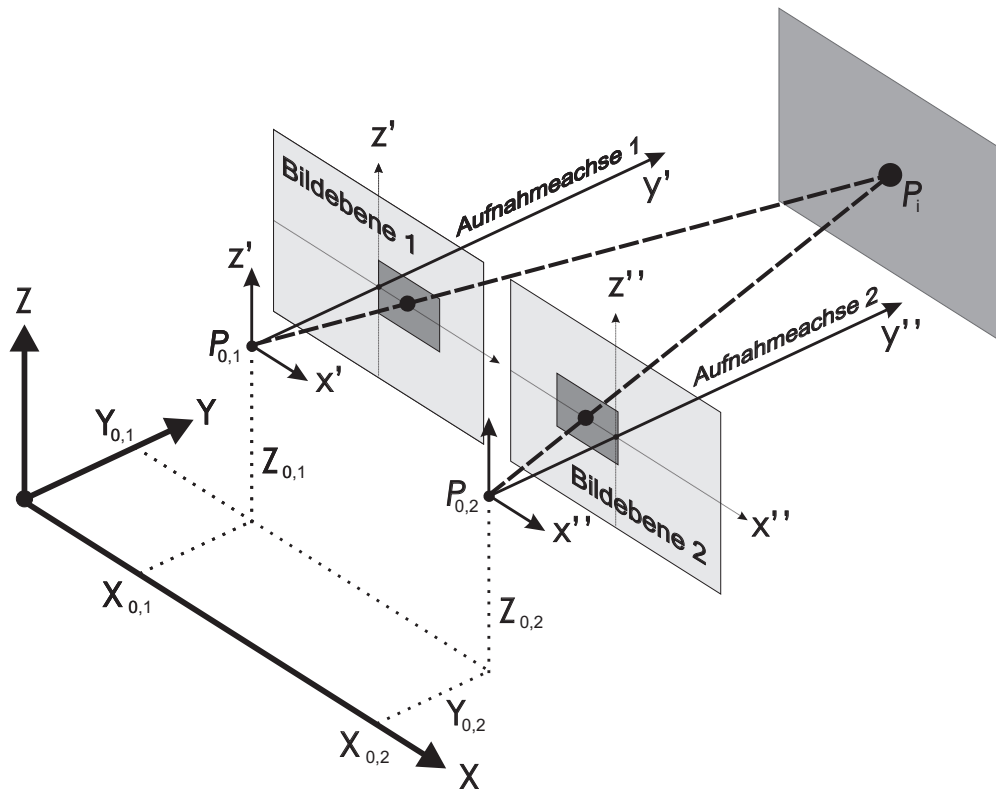


Abbildung 4.16: Aufnahmeconfiguration für die 3D-Objekterfassung (Stereoaufnahme, normal)

Nachteilig wirkt sich bei einer *normalen* Stereoaufnahme aus, dass die Genauigkeit in Aufnahmerichtung im Verhältnis zu den anderen Koordinatenrichtungen geringer ausfällt. Die Genauigkeit ist maßgeblich durch das Verhältnis von Objektentfernung zur Basis (Entfernung zwischen den Projektionszentren der beiden Kameras) geprägt. Aufgrund der Tatsache, dass sich die Versuchsobjekte – oftmals durch die Lasteintragung bedingt – während des Belastungsversuches bewegen, kann dies bei hochgenauen Verformungs- und Dehnungsmessungen zu unerwünschten Effekten führen. Eine Abschätzung des Lagefehlers infolge einer Objektverschiebung in Aufnahmerichtung kann entsprechend den Angaben in Abschnitt 4.4.2.3 (S. 45) erfolgen. Bei kritischen Anwendungen wird daher der Einsatz einer *konvergenten* der einer *normalen* Stereoaufnahme vorgezogen.

Der Einsatz von mehr als 2 Kameras stellt prinzipiell kein Problem dar, erhöht aber entsprechend den Aufwand bei der photogrammetrischen Aufnahme und Auswertung. Eine Abschätzung kann mit den in der Literatur vorgenommenen Angaben erfolgen [25, 31].

4.4.3 Messkamerakonfiguration

Nach der prinzipiellen Festlegung der System- und Aufnahmekonfiguration erfolgt i. d. R. die Messkamerakonfiguration. Diese bezieht sich auf die Auswahl und Einrichtung geeigneter Messkameras (Sensoren), einschließlich der Optik. Digitale Messkameras können im Wesentlichen durch die

- geometrische,
- radiometrische und
- zeitliche

Auflösung charakterisiert werden und stellen wichtige Einflussgrößen dar. Oftmals werden zur Bewertung digitaler Kameras die bildgebenden Sensoren (z. B. CCD- oder CMOS-Sensoren), aber auch das mechanische und thermische Systemverhalten einbezogen [26, 31]. Hinsichtlich der wellenlängenabhängigen Quanteneffizienz bildgebender Sensoren kann bei besonderen Anforderungen eine Anpassung der künstlichen Objektbeleuchtung an die jeweilige Quanteneffizienz vorteilhaft bzw. in einigen Fällen auch unumgänglich sein. Zur Bewertung der jeweiligen Messkamerakonfiguration können aufgabenabhängig – sofern keine Erkenntnisse darüber vorliegen – Detailuntersuchungen erforderlich werden. Oftmals ist das geometrische Auflösungsvermögen des Gesamtsystems von besonderem Interesse und kann z. B. durch die optische Transferfunktion beschrieben werden. Eine ausführliche Darstellung dazu findet sich in [31, 40].

4.4.4 Messbilderfassung

4.4.4.1 Photogrammetrische Messkameras und Messbilder

Ergebnis der digitalen photogrammetrischen Bilderfassung sind i. d. R. mittels Messkameras aufgenommene Messbilder, deren Bilddaten in digitaler Form vorliegen. Photogrammetrische Messkameras und -bilder sind nach DIN 18716-1 dadurch charakterisiert, dass die äußere bzw. innere Orientierung bekannt bzw. bestimmbar ist. Die Bestimmung der inneren und äußeren Orientierungsparameter wird als System- und Kamerakalibrierung bezeichnet und wird in Abschnitt 4.5.3 (S. 59) und im folgenden Abschnitt näher erläutert [31]. Eine erfolgreiche System- bzw. Kamerakalibrierung stellt eine Grundvoraussetzung für viele photogrammetrische Messprozesse im *Bautechnischen Mess- und Versuchswesen* dar.

Im Hinblick auf eine 2D/2.5D-Objekterfassung ist eine Kamerakalibrierung aber nicht immer zwingend erforderlich. Wenn beispielsweise sehr kleine Objektdeformationen erfasst werden müssen und nur kleine Starrkörperbewegungen vorliegen, in diesen Fällen ist der Einfluss einer fehlenden inneren Orientierung oftmals vernachlässigbar.

Wenn keine Online-Messung erforderlich wird, kann die Systemkalibrierung in zwei Schritten erfolgen. Der erste bezieht sich dabei auf die Bilderfassung vor dem Versuch und der zweite auf die Auswertung, die auch nach dem Versuch vorgenommen werden kann. Entsprechend dieser Aufteilung erfolgt nachfolgend in Bezug auf die Kalibrierung eine separate Darstellung hinsichtlich der Bilderfassung (Abschn. 4.4.4.2) und -auswertung (Abschn. 4.5.3).

4.4.4.2 Kalibrierprozess – Bilderfassung

Bei den in Abschnitt 5.3 (S. 73) vorgestellten Messprozessen, für die eine System- bzw. Kamerakalibrierung erforderlich wurde, erfolgte diese unter Verwendung von formstabilen Prüftafeln unterschiedlicher Größe (10 cm x 10 cm, 15 cm x 15 cm, 30 cm x 30 cm, 50 cm x 50 cm, . . .). Auf diesen Prüftafeln wurden beispielsweise 36, 64 bzw. 100 Punkte, oftmals als Klebmarken, angebracht. Die dabei verwendeten Messmarken wurden in Abhängigkeit der jeweiligen Auswertemodule bzw. -programme ausgewählt und den entsprechenden Abbildungsverhältnissen angepasst. Zum Einsatz kamen i. d. R. merkmalsbasierte Punktmarken mit Ringcodierung, beispielsweise nach Aicon oder Thielbeer [20]. Für die Kalibrierung wurden i. d. R. 7 bis 20 Aufnahmen der Prüftafel je Kamera bzw. für das Gesamtsystem realisiert [15]. In Abhängigkeit von der jeweiligen Messkonfiguration wurden auch pro Kamera entsprechende Bildsequenzen von der Prüftafel aufgenommen, um ggf. Ausfälle durch Beleuchtungsunterschiede und Unschärfen durch geringe Tiefenschärfebereiche kompensieren zu können. Die jeweilige Prüftafel wird in fünf definierten Positionen (Normalbildlage, nach links verdreht, nach rechts verdreht, nach oben geneigt, nach unten geneigt) aufgenommen, in denen die Tafeln jeweils in vier Lagen, um 90° gekantet, beobachtet werden. Das Kamerasystem bleibt dabei unverändert fest. Nur die Prüftafel wird in definierter Entfernung vor dem Kamerasystem in die entsprechenden Positionen bewegt. Auf Besonderheiten bei der Auswertung der vorgenannten Bildsequenzen wird in Abschnitt 4.5.3 (S. 59) eingegangen.

4.4.4.3 Synchronisierung zeitabhängiger Steuergrößen

Die zeitliche Konfiguration der Messkameras erfolgt i. d. R. bereits im Zuge der Kamera-konfiguration (Abschn. 4.4.3). Im Zusammenhang mit der Messbilderfassung wird eine Synchronisierung mit dem Versuchsprozess erforderlich. Dies erfolgt i. d. R. im Vorfeld des Versuches. Dabei können die digitalen Kameras auch als prozessbestimmende Steuergröße auftreten. Eine entsprechende Abstimmung der jeweiligen Teilprozesse muss sorgsam vorgenommen werden und kann auf Grundlage der in Abschnitt 4.7 (S. 64) vorgestellten Vorgehensweise erfolgen, die die Zusammenführung bauspezifischer und photogrammetrischer Teilprozesse behandelt.

4.5 Photogrammetrische Auswerteprozesse

4.5.1 Digitale Bildverarbeitung

Die digitale Bildverarbeitung kann für verschiedene Aufgaben im photogrammetrischen Auswerteprozess herangezogen werden [31, 41]. Im Folgenden werden diese in direkte und indirekte Bildverarbeitungsprozesse gegliedert. Indirekte Bildverarbeitungsprozesse beziehen sich dabei beispielsweise auf vorbereitende Bildmanipulationen, die im Zusammenhang mit der nachfolgenden Bildanalyse bzw. Bildinterpretation erforderlich werden. Bei den direkten Bildverarbeitungsprozessen wird aufgabenbezogen das Resultat unmittelbar durch die Bildverarbeitung selbst erzeugt.

Ein Beispiel dafür bieten Untersuchungen, die sich auf die direkte Rissdetektion im Bildraum beziehen. Die Untersuchungen haben ergeben, dass nur Risse erkannt werden können, die sich im Bild deutlich abbilden. Diese können beispielsweise mit verschiedenen Faltungsoperatoren detektiert werden (Abb. 5.18). Risse, die z. B. nur eine Rissbreite im Pixel- bzw. Sub-Pixelbereich aufweisen, können durch die vorgenannte Art und Weise nicht bzw. nur bedingt erfasst werden. Eine Bestimmung der Rissbreite ist durch diese Vorgehensweise kaum möglich. In [11] ist z. B. ein Programm zur Rissbreitenbestimmung vorgestellt, das auf einer direkten Bildanalyse beruht.

4.5.2 Bildanalyse- und Bildauswerteverfahren

4.5.2.1 Diskrete Bildpunktmessungen

Bei vielen photogrammetrischen Bildverarbeitungssystemen stehen im Wesentlichen zwei Verfahren zur automatischen Punktbestimmung zur Verfügung: Schwerpunktoperator und Ellipsenoperator. Beim Schwerpunktverfahren erfolgt eine Suche nach Bildmustern mit einer symmetrischen Verteilung von Grauwerten, an denen ein lokaler Schwerpunkt für die Bestimmung eines Punktzentrums berechnet werden kann. Ein Schwerpunktoperator kann mit geringem Rechenaufwand auch leicht defokussierte Punktzentren ermitteln. Wenn die Unschärfe der Punktzentren aufgrund einer geringen Tiefenschärfe bei der Aufnahme zunimmt und die Punktzentren somit schwer defokussierbar sind, versagt der Schwerpunktoperator.

Eine exakte Signalmessung kann mit einem Ellipsenoperator erfolgen. Dazu werden allerdings in der Regel Näherungswerte der Punktzentren benötigt. In diesem Fall kann ein automatisches Verfahren wie der Schwerpunktoperator benutzt werden oder eine manuelle Messung ausgeführt werden. Der Ellipsenoperator liefert die besten Ergebnisse an ungestörten Punktmustern. Ist der Anteil fehlerhafter Kantenpunkte der Zielmarke durch

Unschärfe sehr groß, versagt auch der Ellipsenoperator. Der Ellipsenoperator gehört zur Gruppe der strukturellen Messverfahren [31]. Eine Alternative zum Ellipsenoperator bilden die in Abschnitt 4.5.2.2 vorgestellten flächenbasierten Bildzuordnungsverfahren.

4.5.2.2 Flächenbasierte Bildzuordnung

Im Verlauf zahlreicher Untersuchungen wurden die in Tabelle 4.4 zusammengestellten flächenbasierten Bildzuordnungsverfahren untersucht [92, 96]. Die durchgeführten Untersuchungen bestätigten die Bedeutung der Bildzuordnung homologer Bildbereiche für die erreichbare Messgenauigkeit bei photogrammetrischen Messungen im *Bautechnischen Mess- und Versuchswesen*.

Symbol	Verfahren	Literatur
SO	Schwerpunktoperator	[31]
KOR	Korrelation (Kreuzkorrelation)	[31, 96]
LSM/LSTM	Least Squares Matching/Least Squares Template Matching	[22, 23]
SA	Stereo-Algorithmus	[92]

Tabelle 4.4: Flächenbasierte Bildzuordnungsverfahren

Aufgrund der ausführlichen Beschreibungen in der vorliegenden Literatur (Tab. 4.4) wird auf eine allgemeine Darstellung der einzelnen flächenbasierten Bildzuordnungsverfahren in der vorliegenden Arbeit verzichtet. Auf spezielle Aspekte wird an verschiedenen Stellen dieser Arbeit eingegangen, beispielsweise im Zusammenhang mit der Darstellung von Versuchen in Abschnitt 5.3 (S. 73) und in den folgenden Abschnitten.

Neben konkreten Fragestellungen hinsichtlich der Bestimmung optimaler Verfahren und Parameter (Abschn. 4.5.2.3, S. 55) oder dem zeitlichen Verhalten der einzelnen Verfahren (Abschn. 4.5.2.4, S. 57) wird im Folgenden auch auf die prinzipielle Vorgehensweise bei der Bildzuordnung homologer Bildbereiche bei experimentellen Untersuchungen eingegangen. Diese können für bauspezifische photogrammetrische Messprozesse von besonderer Bedeutung sein und über den richtigen Einsatz der zur Verfügung stehenden flächenbasierten Bildzuordnungsverfahren mitentscheiden.

Prinzipielle Vorgehensweise

Bei der photogrammetrischen Aufnahme von Versuchsprozessen werden i. d. R. Bildsequenzen aufgenommen. Die Aufnahmekonfiguration entscheidet dabei über die Anzahl

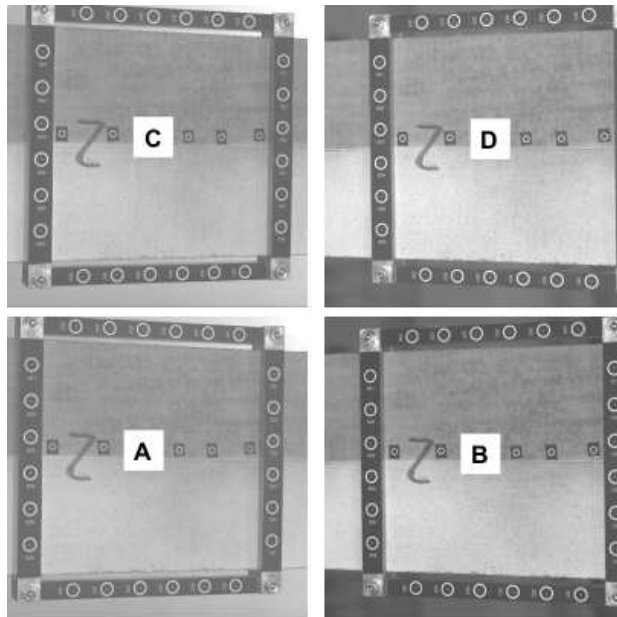


Abbildung 4.17: Bildzuordnung homologer Bildbereiche am Beispiel von zwei konvergenten Stereoaufnahmen (Lastbild 0 [A,B], Lastbild 1 [C,D])

der Bildsequenzen (Lastbildsequenzen). Ausgehend von bekannten Bildbereichen im Referenzzustand, besteht eine wesentliche Aufgabe der photogrammetrischen Auswertung in der lastbildabhängigen Zuordnung homologer Bildbereiche. Prinzipiell kann dabei unterschiedlich vorgegangen werden. Beispielsweise kann die Bildzuordnung in den einzelnen Bildern bzw. Lastbildpaaren in Abbildung 4.17 mit den in Abbildung 4.18 und 4.19 gezeigten Strategien vorgenommen werden. Die unabhängige Bildzuordnung erfolgt in den einzelnen Bildsequenzen separat, ohne eine Kopplung des jeweiligen Lastbildpaares. Bei der abhängigen Bildzuordnung erfolgt auch innerhalb eines Lastbildpaares eine Zuordnung. In Bezug auf die Zuordnung innerhalb einer Sequenz wird zwischen der relativen und absoluten Zuordnung unterschieden. Die relative Zuordnungsstrategie eignet sich z. B. besonders bei sehr starken Objektdeformationen des Objektes. In diesen Fällen versagt die absolute Zuordnungsstrategie oftmals, da diese stets eine Zuordnung zum Referenzzustand vornimmt; bei sehr starken Veränderungen kann es in Abhängigkeit des jeweiligen Bildzuordnungsverfahrens zu Fehlern kommen. Einige Bildzuordnungsverfahren ermöglichen prinzipiell nur eine Zuordnung zwischen zwei Bildern, wie z. B. die Korrelationsverfahren. Die LSM-Verfahren ermöglichen dagegen eine Zuordnung auch in mehr als zwei Bildern und sind deshalb für die abhängige Zuordnungsstrategie besonders geeignet. Dabei muss beachtet werden, dass es qualitative Unterschiede bei der Zuordnung innerhalb der Sequenz und im Bildpaar geben kann.

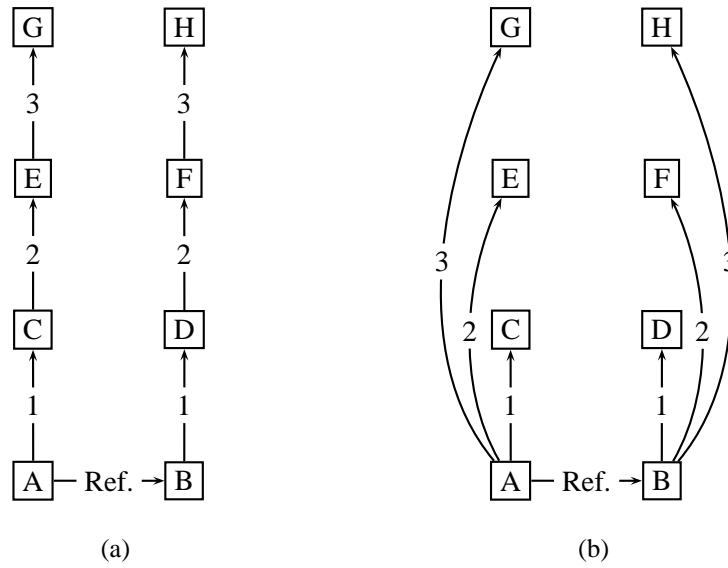


Abbildung 4.18: Unabhängige Bildzuordnung mit relativem (a) und absolutem (b) Bezug

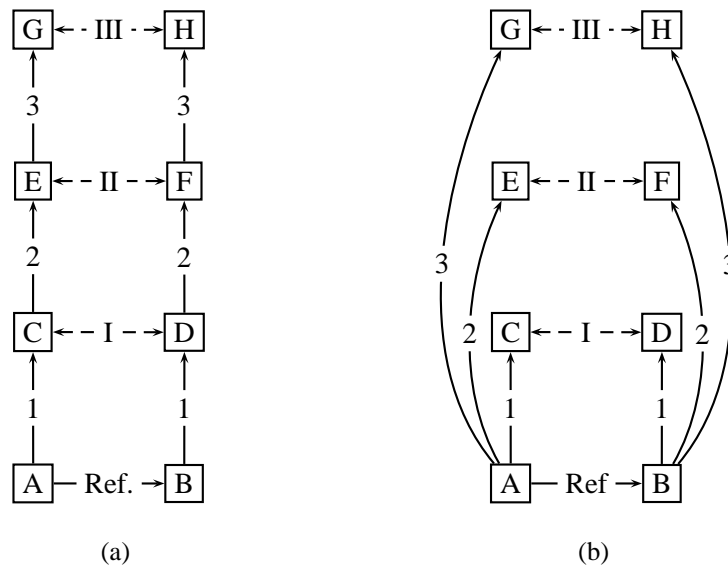
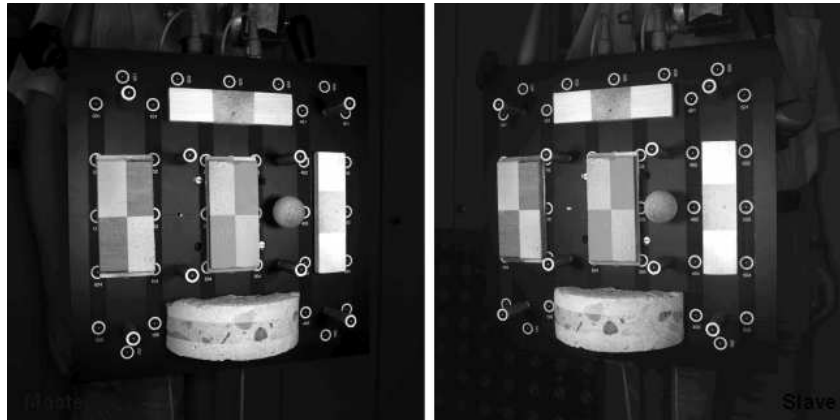


Abbildung 4.19: Abhängige Bildzuordnung mit relativem (a) und absolutem (b) Bezug

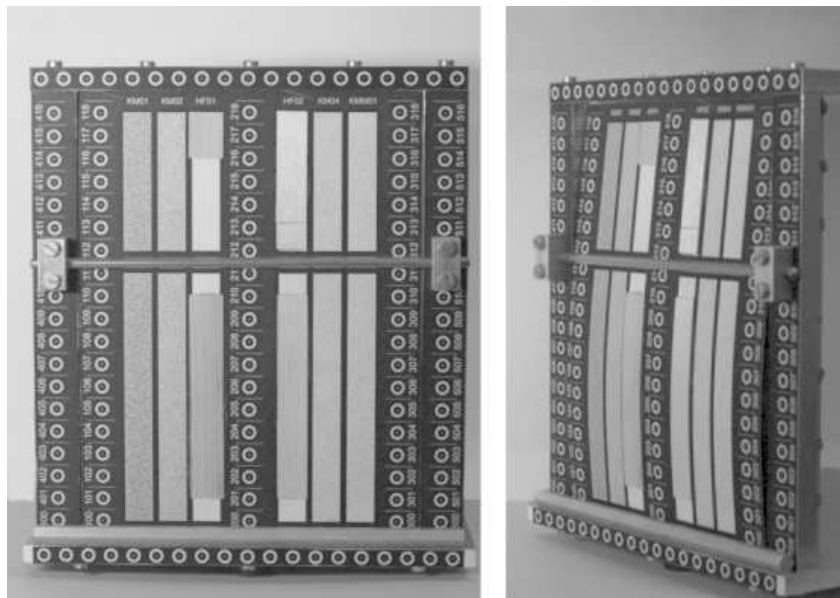
4.5.2.3 Bestimmung optimaler Verfahren und Parameter

Die Ergebnisse photogrammetrischer Verformungs- und Dehnungsmessungen bei Belastungsversuchen mit unterschiedlichen Messaufgaben – bei denen einerseits der zu erfassende Objektraum und die geforderte Messauflösung und andererseits die zu erfassenden Objektoberflächentexturen (Abb. 3.1, S. 21) stark variieren – haben bestätigt, dass bei sehr hohen Anforderungen nur unter Verwendung optimaler Verfahren und Parameter verwertbare Ergebnisse erzielt werden können bzw. eine Messung erst ermöglicht wird. Aufgrund der Besonderheit, dass der Zuordnung homologer Bildbereiche von natürlichen Oberflächentexturen z. Z. keine bzw. ungenügende Genauigkeitsangaben abgeleitet werden können, bietet sich aufgabenbezogen die systematische Untersuchung der jeweils zu erfassenden Objektoberflächentextur an. Die dazu durchgeführten Untersuchungen beziehen sich u. a. auf die Verifizierung der entsprechenden Verfahren in Abhängigkeit der einzumessenden verschiedenen Oberflächentexturen. In einem ersten Versuchsteil wurden für verschiedene Materialien und Aufnahmedispositionen und unter Verwendung eines Verschiebetisches bei Soll-Ist-Vergleichen optimale Verfahren und Parameter bestimmt. Abb. 4.21 zeigt die erzielten Ergebnisse für das Beispiel in Abbildung 4.20(a).

Für die Bestimmung optimaler Parameter wurden verschiedene Verfahren einbezogen und Steuerparameter variiert. Die erzielten Ergebnisse ermöglichen aufgabenbezogen einen Vergleich der jeweiligen Bildzuordnungsverfahren und letztlich die Auswahl optimaler Verfahren und Parameter [92], wobei der Geltungsbereich beachtet werden muss. Bei Änderungen, z. B. des Abbildungsverhältnisses, kann die im Bildraum vorliegende Oberflächentextur zu anderen Ergebnissen führen. Aufgrund der Tatsache, dass nur ausgewählte Systemkomponenten (z. B. der Verschiebetisch und das Bilderfassungssystem) vollautomatisch benutzt werden konnten, sind umfangreiche Parametervariationen – beispielsweise auch des Abbildungsverhältnisses – mit einem entsprechenden Aufwand verbunden und verursachen durch die Interaktion teilweise unerwünschte Effekte. Weiterhin stellen die vorgenannten Untersuchungen hinsichtlich der erreichbaren Genauigkeit bei der Bildzuordnung homologer Bildbereiche einen oberen Grenzwert dar, da nur eine statische Objektverschiebung (2D und 3D) betrachtet wurde, das Objekt sich aber bei realen Belastungsversuchen deformiert hat und zusätzlich Strukturveränderungen, wie z. B. Risse, Delaminierungen usw., eintreten können. Um den Einfluss von dreidimensionalen Deformationen zu untersuchen, wurden in einem zweiten Schritt unter Verwendung eines 3D-Deformationsmodells für unterschiedliche Materialien bzw. Oberflächenstrukturen Soll-Ist-Messungen vorgenommen. Bild 4.20(b) zeigt einen Teil des Messaufbaus. Das u. a. aus einem (federharten) Phosphor-Bronze-Blech bestehende 3D-Deformationsmodell wurde mit den zu untersuchenden künstlichen und natürlichen Oberflächentexturen präpariert. Die Lagerung des Biegebleches erfolgt auf zwei Linienlagern (Schneiden-



(a) 3D-Verschiebetischexperiment (Ref.-Bildpaar)



(b) 3D-Deformationsmodell

Abbildung 4.20: Versuchsanordnungen für Soll-Ist-Vergleiche unter Verwendung eines Verschiebetisches mit einem Messfeld von 30 cm x 30 cm (a) und einem 3D-Modell mit einem Messfeld von 20 cm x 20 cm (b) für Materialproben mit unterschiedlichen Oberflächenstrukturen und -geometrien

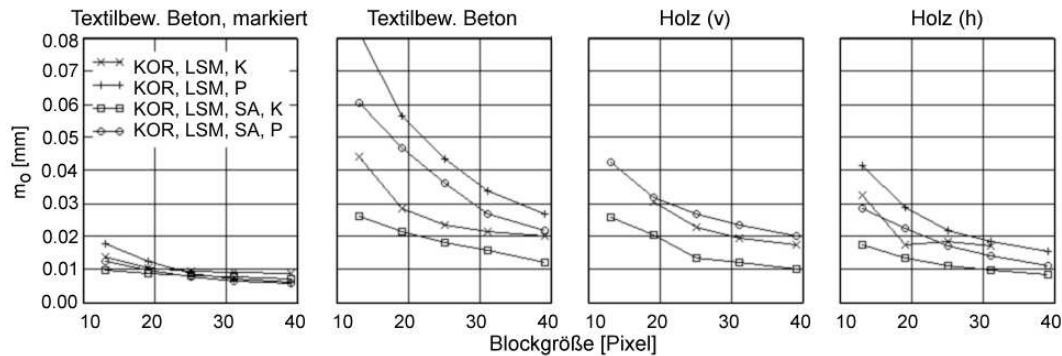


Abbildung 4.21: Ergebnisse der Bestimmung optimaler Parameter für ausgewählte Verfahren und Materialien (KOR Korrelation, LSM Least Square Matching, SA Stereoalgorithmus, K Konvergent- und P Parallelaufnahme)

und Rollenlager), wobei 1/3 des Biegebleches auskragt. Diese Anordnung bietet den Vorteil, dass im Bereich zwischen den Linienlagern eine stetig gekrümmte Fläche und im Kragarmbereich eine Ebene vorliegt. Damit lassen sich verschiedene Einflüsse untersuchen. Der Einsatz des Verschiebetisches bzw. des 3D-Deformationsmodells wird neben der Bestimmung optimaler Verfahren und Parameter auch zur ständigen Verifizierung von neu- bzw. weiterentwickelten Verfahren eingesetzt.

4.5.2.4 Zeitbedarf

Der Einsatz von Verfahren der digitalen Nahbereichsphotogrammetrie im bautechnischen Versuchswesen erfordert für umfangreiche Messaufgaben – wie z. B. die Erfassung der Verformungs-, Riss- und Schädigungsentwicklung bei baumechanischen Untersuchungen von textilbewehrten Holz- und Betonproben – den Einsatz hochgenauer, zeitoptimierter und robuster Verfahren.

Die Ergebnisse der 3D-Kamerakalibrierung als Grundlage für die Verfahren der digitalen Nahbereichsphotogrammetrie können dabei in wenigen Minuten berechnet werden. Die Bereitstellung von unterschiedlichen Bildformaten für die automatische Bildmessung (Schwerpunkt- und Ellipsenoperator bzw. LSM) sowie die Punktnummernermittlung, die notwendige Einstellung von Parametern, die Kontrolle von Zwischenergebnissen bei der Bündelblockausgleichung und die Elimination von fehlerhaften Bildpunkten führen zu einem erhöhten Zeitbedarf.

Im Verlauf der Untersuchungen bestätigte sich, dass – neben der prinzipiellen Optimierung von Algorithmen – die z. T. aufgabenspezifische Implementierung einen entscheidenden Einfluss auf das zeitliche Verhalten hat. Daraus resultiert, dass bei speziellen

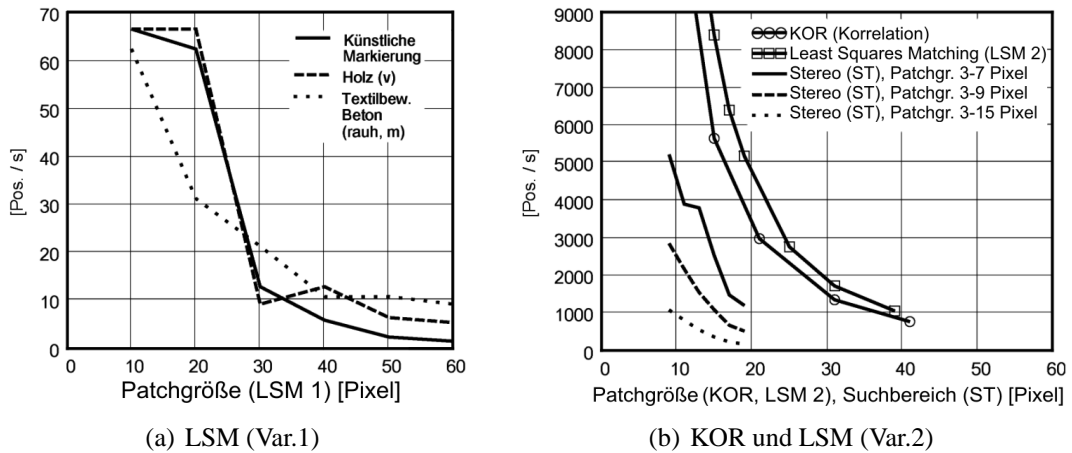


Abbildung 4.22: Zeitanalyse für Bildzuordnung homologer Bildbereiche mittels Least Squares Matching (LSM) und Korrelation (KOR) für ausgewählte natürliche und künstliche Oberflächenstrukturen [92]

Messaufgaben eine Reimplementierung vorhandener Softwaremodule zu einem verbesserten zeitlichen Verhalten führt. Im Zusammenhang mit den durchgeführten Untersuchungen erfolgten Analysen zum zeitlichen Verhalten der einzelnen Module bzw. Algorithmen. Abbildung 4.22(a) zeigt Ergebnisse einer Zeitanalyse für die Bildzuordnung homologer Bildbereiche mittels Least Squares Matching (LSM) und Korrelation (KOR) für verschiedene Materialien (Oberflächentexturen) für einen Messpunkt in Abhängigkeit der Patchgröße. Liegen keine pixelgenauen Näherungskoodinaten für den homologen Bildbereich im Such- bzw. Lastbild vor, dann beträgt die max. bestimmbare Verschiebungsdifferenz die Hälfte der Patchgröße. Die bei Versuchen auftretenden Verschiebungen (z. T. Starrkörperbewegungen) können mehrere hundert Pixel betragen. Hier ist der Einsatz von schnellen Verfahren erforderlich, die Näherungskoodinaten für die subpixelgenaue Verschiebungsanalyse liefern. Für die Bildzuordnung homologer Bildbereiche bei der Bestimmung sehr dichter und umfangreicher Verschiebungsfelder wurden im Verlauf verschiedener Untersuchungen zahlreiche Optimierungsstrategien entwickelt, die in Bezug auf die Algorithmen und die Implementierung erfolgten [73, 92].

Die vorgenannten Ergebnisse veranschaulichen die Leistungsfähigkeit der entwickelten Algorithmen, die unter Beachtung weiterer Randbedingungen (Hardware, Implementierung im Gesamtsystem) die Voraussetzung für eine Online-Erfassung in Echtzeit bzw. Quasi-Echtzeit bieten.

4.5.3 Kalibrierprozess – Auswertung

Im Zusammenhang mit der Objektkoordinatenberechnung (Abschn. 4.5.4, S. 61) wird in vielen Anwendungsfällen – besonders bei 3D-Messprozessen – die Einbeziehung der inneren und äußeren Orientierung der verwendeten Kameras bzw. Kamerasysteme erforderlich.

Die Bestimmung dieser Parameter kann in Abhängigkeit der jeweiligen Messprozesse auf verschiedene Arten vorgenommen werden, beispielsweise durch eine Simultankalibrierung oder durch eine separate System- bzw. Kamerakalibrierung [18, 25, 31, 32, 36]. Für photogrammetrische Messprozesse, bei denen die Kamerastandorte vorgegeben sind und während der Aufnahme nicht verändert werden dürfen, erfolgt die System- und Kamerakalibrierung i. d. R. separat, wie beispielsweise in den überwiegenden Anwendungsfällen der vorliegenden Arbeit.

Die Systemkalibrierung bezieht sich dabei u. a. auf die Parameter der äußeren Orientierung, die für jede Kamera den Standort bzw. die Position des Projektionszentrums

$$P_0 = \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

und die Orientierung

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

des Bildkoordinatensystems (x', y', z') in Bezug auf ein übergeordnetes bzw. systembezogenes Objektkoordinatensystem (X, X, Z) funktional beschreiben.

Unter Kamerakalibrierung wird im Folgenden die Bestimmung von Parametern verstanden, die sich auf den Bildhauptpunkt H' , die Kamerakonstante c_k und relevante Parameter zur Beschreibung von Bildfehlern beziehen. Erfordert die photogrammetrische Auswertung die Berücksichtigung von Bildfehlern, können diese durch $\Delta x'$ bzw. $\Delta z'$ allgemein angegeben werden. Diese enthalten weitere Terme, die sich u. a. auf die radial-symmetrische und radial-asymmetrische Verzeichnung beziehen [31]. Die radial-symmetrische Verzeichnung bezieht sich auf Abbildungsfehler, die z. B. durch Brechungseffekte in der Optik verursacht werden. Radial-asymmetrische Verzeichnungen beziehen sich

dagegen auf Fehler durch eine Dezentrierung der Optik. Eine ausführliche Darstellung findet sich in der angegebenen Grundlagenliteratur, z. B. in [31].

Mit den bekannten Parametern der inneren und äußeren Orientierung kann nun der mathematische Zusammenhang zwischen einem Bild- und Objektpunkt P_i formuliert werden (4.7), wobei im Folgenden der Bildpunkt p_i auch die Parameter der inneren Orientierung beinhalten kann (4.6). Die in (4.7) eingeführte skalare Größe m_i stellt einen Maßstabsfaktor dar, auf den in Abschnitt 4.5.4 (S. 61) eingegangen wird.

$$p'_i = \begin{bmatrix} x'_i - x'_0 + \Delta x' \\ -c_k \\ z'_i - z'_0 + \Delta z' \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

$$P_i = P_0 + m_i \cdot R \cdot p'_i = \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} + m_i \cdot \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x'_i - x'_0 + \Delta x' \\ -c_k \\ z'_i - z'_0 + \Delta z' \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

Die Bestimmung der Daten der inneren und äußeren Orientierung wird i. d. R. als eine Einheit betrachtet und gemeinsam in einer Bündelblockausgleichung berechnet [18, 25, 31, 32, 36]. Für die in dieser Arbeit vorgestellten Untersuchungen wurde für die System- und Kamerakalibrierung in den überwiegenden Fällen das Softwaresystem der Firma *Aicon* benutzt. Die Ergebnisse der jeweils durchgeführten Kalibrierungen werden dabei in Dateien ausgegeben und automatisiert in die entwickelten photogrammetrischen Auswertemodule des modular aufgebauten photogrammetrischen Messsystem einbezogen (Abschn. 5.2.4, S. 71).

Im Anhang (S. 112) sind ausgewählte Ergebnisse zusammengestellt, die bei Untersuchungen zur System- und Kamerakalibrierung im Sonderforschungsbereich 528 durchgeführt wurden und u. a. eine Auswahl von Verzeichnungskurven zeigen.

Die Parameter der inneren und äußeren Orientierung stellen für bauspezifische photogrammetrische Messprozesse wichtige Einflussgrößen dar und können einen signifikanten Einfluss auf die Zielgrößenermittlung haben. Mit der Planung neuer Messaufgaben sollten i. d. R. detaillierte Betrachtungen bzw. Untersuchungen zum Kalibrierprozess einhergehen. Auf eine weiterführende Darstellung wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit verzichtet. Im Zusammenhang mit den in Abschnitt 5.3 (S. 73) vorgestellten Untersuchungen wird auf entsprechende Besonderheiten separat eingegangen.

4.5.4 Objektkoordinatenberechnung

4.5.4.1 2D-Objektkoordinatenberechnung

Die Berechnung von 2D-Objektkoordinaten aus Bildkoordinaten kann unter Verwendung der projektiven Transformation mit den Gleichungen (4.8) und (4.9) erfolgen. Dafür sind die 8 Parameter der projektiven Transformation erforderlich bzw. mindestens 4 Passpunktkoordinaten, aus denen diese Parameter bestimmt werden können [31].

$$X = \frac{a_0 + a_1 x' + a_2 z'}{1 + c_1 x' + c_2 z'} \quad (4.8)$$

$$Z = \frac{b_0 + b_1 x' + b_2 z'}{1 + c_1 x' + c_2 z'} \quad (4.9)$$

Im *Bautechnischen Mess- und Versuchswesen* kommen sehr häufig Messaufgaben vor, bei denen im Verlauf der Auswertung Objektkoordinaten in den Bildraum transformiert werden müssen – beispielsweise bei der Einbeziehung von FEM-Netzen in die Verschiebungsanalyse. Dies kann mit den inversen Funktionen der Gleichungen (4.8) und (4.9) erfolgen und führt nach Umstellung zu den Gleichungen (4.10) und (4.11)

$$x' = \frac{(a_0 b_2 - a_2 b_0) + (b_0 c_2 - b_2) X + (a_2 - a_0 c_2) Z}{(a_2 b_1 - a_1 b_2) + (b_2 c_1 - b_1 c_2) X + (a_1 c_2 - a_2 c_1) Z} \quad (4.10)$$

$$z' = \frac{(a_1 b_0 - a_0 b_1) + (b_1 - b_0 c_1) X + (a_0 c_1 - a_1) Z}{(a_2 b_1 - a_1 b_2) + (b_2 c_1 - b_1 c_2) X + (a_1 c_2 - a_2 c_1) Z} \quad (4.11)$$

4.5.4.2 2.5D-Objektkoordinatenberechnung

Die 2.5D-Objektkoordinatenberechnung basiert auf einer dynamischen Parameterberechnung der Koeffizienten der projektiven Transformation. Diesem Umstand verdankt sich der Begriff *Dynamische Projektive Transformation*. Dies setzt voraus, dass sich die im Ausgangszustand einbezogenen Passpunkte – z. B. auf einem Bezugssystem – in unveränderter Position zueinander befinden. Eine absolute Bewegung – z. B. des Bezugssystems – stellt kein Problem dar. Weiterhin muss sichergestellt sein, dass die Passpunkte sich noch in der Objektebene befinden, die durch den Referenzzustand festgelegt wurde.

Die Methode der 2.5D-Objektkoordinatenberechnung wird im *Bautechnischen Mess- und Versuchswesen* sehr oft eingesetzt. Unter Einbeziehung eines Bezugssystems (Abb. 4.14) können unter den vorgenannten Voraussetzungen Objektstarrkörper- und/bzw. Kamerabewegungen erfasst werden. Kamerabewegungen verursachen i. d. R. eine Änderung der äußeren Orientierung.

4.5.4.3 3D-Objektkoordinatenberechnung

Für die 3D-Objektkoordinatenberechnung ist in den überwiegenden Fällen die Kenntnis der inneren und äußeren Orientierung erforderlich, die durch die System- und Kamera- kalibrierung (Abschn. 4.5.3, S. 59) bestimmt werden kann.

Die Berechnung von 3D-Objektkoordinaten erfolgt bei experimentellen Untersuchungen im *Bautechnischen Mess- und Versuchswesen* in den überwiegenden Fällen durch einen räumlichen Vorwärtsschnitt [31], beispielsweise unter Verwendung von zwei Kameras. Diese Aufnahmekonfiguration wurde bei vielen der durchgeführten Untersuchungen im Rahmen der vorliegenden Arbeit eingesetzt und soll deshalb kurz erläutert werden.

Den Ausgangspunkt bilden zwei Kameras, für deren funktionale Beschreibung des Zusammenhangs zwischen einem Bild- und einem Objektpunkt die Gleichungen (4.12) und (4.13) auf der Grundlage der Gleichung (4.7) angegeben werden können. Es wird weiter davon ausgegangen, dass die Parameter der inneren und äußeren Orientierung und die jeweiligen Bildkoordinaten $p'_{i,1}$ und $p'_{i,2}$ bekannt sind. Unbekannt sind der Objektpunkt P_i sowie die Maßstabsfaktoren $m_{i,1}$ und $m_{i,2}$. Für die Berechnung des Objektpunktes P_i wird die Berechnung der Maßstabsfaktoren erforderlich. Dies kann mithilfe der Gleichungen (4.12) und (4.13) erfolgen, indem diese entsprechend Gleichung (4.14) zusammengeführt und umgestellt werden. Bei genauer Betrachtung von Gleichung (4.14) wird deutlich, dass es sich um ein überbestimmtes Gleichungssystem mit zwei Unbekannten handelt. Die Berechnung der beiden unbekannt Maßstabsfaktoren kann mittels der Ausgleichsrechnung [31] problemlos vorgenommen werden. Mit den nun bekannten Maßstabsfaktoren $m_{i,1}$ und $m_{i,2}$ kann durch Einsetzen in Gleichung (4.12) und (4.13) der Objektpunkt P_i jeweils berechnet werden. In den überwiegenden Fällen werden die berechneten Objektkoordinaten geringfügige Unterschiede aufweisen. Aus den Koordinatendifferenzen kann ein Fehler berechnet werden und beispielsweise zur Bewertung der Schnittkonfiguration dienen.

$$P_i = P_{0,1} + m_{i,1} \cdot R_1 \cdot p'_{i,1} = P_{0,1} + m_{i,1} \cdot \hat{p}'_{i,1} \quad (4.12)$$

$$P_i = P_{0,2} + m_{i,2} \cdot R_2 \cdot p'_{i,2} = P_{0,2} + m_{i,2} \cdot \hat{p}'_{i,2} \quad (4.13)$$

$$P_{0,2} - P_{0,1} = m_{i,1} \cdot \hat{p}'_{i,1} - m_{i,2} \cdot \hat{p}'_{i,2} \quad (4.14)$$

Unabhängig von der Art der Objekterfassung kann auch hier im Verlauf der Auswertung die Notwendigkeit bestehen, Objektkoordinaten in den Bildraum zu transformieren. Dies kann auf der Grundlage der *Kollinearitätsgleichungen* mit den Gleichungen (4.15) und (4.16) erfolgen [31].

$$x'_i = x'_0 - \frac{r_{11} \cdot (X_i - X_0) + r_{21} \cdot (Y_i - Y_0) + r_{31} \cdot (Z_i - Z_0)}{r_{13} \cdot (X_i - X_0) + r_{23} \cdot (Y_i - Y_0) + r_{33} \cdot (Z_i - Z_0)} \cdot c_k + \Delta x'_i \quad (4.15)$$

$$z'_i = z'_0 - \frac{r_{12} \cdot (X_i - X_0) + r_{22} \cdot (Y_i - Y_0) + r_{32} \cdot (Z_i - Z_0)}{r_{13} \cdot (X_i - X_0) + r_{23} \cdot (Y_i - Y_0) + r_{33} \cdot (Z_i - Z_0)} \cdot c_k + \Delta z'_i \quad (4.16)$$

4.6 Bauspezifische Auswerteprozesse

Bauspezifische Auswerteprozesse beinhalten im Zusammenhang mit der photogrammetrischen Erfassung von Verformungs-, Riss- und Schädigungsentwicklungen bei baumechanischen Untersuchungen eine

- bauspezifische Datenanalyse,
- geeignete Visualisierung von Zwischen- und Endergebnissen und
- Entwicklung von effizienten Datenformaten zur Bereitstellung komplexer Ergebnisdaten.

Die Datenanalyse bezieht sich in den überwiegenden Fällen auf die photogrammetrisch ermittelten Objektkoordinaten (1D/2D/3D). Dabei liegt der Schwerpunkt auf der aufgabenbezogenen Berechnung und Analyse von Verformungs- bzw. Dehnungszuständen und der qualitativen und quantitativen Riss- und Schädigungsanalyse. Schädigungsanalysen beziehen sich z. B. auf lokale Schädigungen jeglicher Art, die während des Versuches an den zu erfassenden Objektflächen eintreten und für die jeweilige Anwendung Bedeutung haben bzw. erlangen können – beispielsweise auf die Erfassung von Delaminationsprozessen.

In den überwiegenden Fällen sind die bauspezifischen Auswerteprozesse sehr stark durch die jeweiligen Versuche geprägt. Aus diesem Grund findet sich deren detaillierte Darstellung in Verbindung mit den in Abschnitt 5.3 (S. 73) vorgestellten Anwendungen.

4.7 Zusammenführung bauspezifischer und photogrammetrischer Teilprozesse

4.7.1 Grundlagen

Experimentelle Untersuchungen bestehen oftmals aus mehreren voneinander abhängigen Teilprozessen, deren Steuergrößen i. d. R. aufeinander abgestimmt bzw. gekoppelt werden müssen. Die Art und Weise der Zusammenführung relevanter Teilprozesse wird im Verlauf der Planung des Versuchsprozesses festgelegt und kann von essentieller Bedeutung für das Versuchsergebnis sein.

Auch in Bezug auf die Zusammenführung bauspezifischer und photogrammetrischer Teilprozesse wird für einen effizienten Versuchsprozess und ein optimales Versuchsergebnis in den überwiegenden Fällen eine Abstimmung bzw. Anpassung entsprechender Steuergrößen erforderlich.

Die folgenden Abschnitte stellen eine prinzipielle Vorgehensweise vor, die eine systematische Kopplung bauspezifischer und photogrammetrischer Steuergrößen ermöglicht. Die Basis dafür bilden die in Kapitel 2 (S. 9) vorgestellten Begriffsdefinitionen und Zusammenhänge der *Versuchsplanung* sowie die in der vorliegenden Arbeit zusammengestellten Steuergrößen des bautechnischen Versuchswesens (Kap. 3, S. 15) und der digitalen Nahbereichsphotogrammetrie (Kap. 4, S. 25).

4.7.2 Prinzipielle Vorgehensweise

Voraussetzung für eine optimale Zusammenführung bauspezifischer und photogrammetrischer Teilprozesse ist die Kenntnis relevanter Prozesssteuergrößen, die in direkter bzw. indirekter Weise die Zielgrößenermittlung beeinflussen. Die in Abschnitt 2.4.2 (S. 12) eingeführten Prozesssteuereigenschaften ermöglichen die Charakterisierung von Prozesssteuergrößen und bieten damit eine Grundlage für die systematische Zusammenführung bauspezifischer und photogrammetrischer Teilprozesse.

Die Abhängigkeiten entsprechender Prozesssteuergrößen der jeweiligen Teilprozesse voneinander haben häufig hierarchischen Charakter, ihr Anfang kann durch die primäre, prozessbestimmende Steuergröße festgelegt und gleichermaßen durch den bauspezifischen oder photogrammetrischen Teilprozess vorgegeben werden.

In der Praxis werden normalerweise durch die zur Verfügung stehenden Versuchstechnologien, z. B. der Mess- und Versuchstechnik, Rahmenbedingungen vorgegeben, die maßgeblichen Einfluss auf die relevanten Steuergrößen haben können und nicht selten die prozessbestimmenden Steuergrößen festlegen. Existieren keine Vorgaben, können ent-

sprechend der Priorität, die die jeweiligen Steuergrößen bei der Zielgrößenermittlung haben, entsprechende Festlegungen getroffen werden. Liegen diesbezüglich keine Erkenntnisse vor, bieten sich u. a. Tastversuche bzw. systematische Detailuntersuchungen an.

Im Folgenden wird davon ausgegangen, dass die Reihenfolge und die zusammenzuführenden Steuergrößen bekannt und konkrete Parameter teilweise vorgegeben sind. Im Zuge der Zusammenführung besteht nun die Aufgabe, für die relevanten, voneinander abhängigen Steuergrößen die unbekannt Parameter zu ermitteln, die wiederum Ausgangspunkt für weitere, untergeordnete Parameterfestlegungen sein können. Der prinzipielle Vorgang kann als eine Kopplung von Steuergrößen angesehen werden, für die in den nachfolgenden Abschnitten ein grafikorientierter Lösungsansatz entwickelt wurde. Die grafische Lösung bietet den Vorteil einer übersichtlichen Darstellung des Kopplungsprozesses und kann sowohl in der Planungsphase, als auch in der Ausführungsphase – bei evtl. Anpassungen während des Versuchsprozesses – herangezogen werden, um eine optimale Entscheidung zu treffen.

4.7.3 Kopplungsprozess

Den Ausgangspunkt des Kopplungsprozesses bildet ein Paar von zwei Steuergrößen bzw. einer Steuer- und einer Zielgröße, deren Abhängigkeit durch einen funktionalen Zusammenhang definiert ist. Das Ziel besteht darin, unter Verwendung der funktionalen Beziehung zu dem gegebenen Parameter (Argumentwert) den unbekannt Parameter (Funktionswert) zu bestimmen und umgekehrt.

4.7.3.1 Zeitbasierte Kopplungsprozesse

Die Kopplung der primären Prozesssteuergrößen, aber auch anderer Steuergrößen mit den photogrammetrischen zeitbasierten Prozesssteuergröße kann im Verlauf der Planung bzw. während der Versuchsvorbereitung erforderlich werden.

Kennzahlen zeitbasierter photogrammetrischer Steuergrößen beziehen sich beispielsweise auf die

- Integrationszeit (Belichtungszeit),
- Bilderfassungsrate,
- maximale Sequenzdauer (beispielsweise beim Einsatz von Hochgeschwindigkeitskameras) oder
- zeitlichen Abhängigkeiten von Aufnahme- und Auswerteprozessen.

4 Grundlagen bauspezifischer photogrammetrischer Messprozesse

In einem Beispiel soll die primäre Prozesssteuergröße, z. B. der Verfahrenweg s einer zeitgesteuerten Zugprüfanlage, auf den photogrammetrischen Bilderfassungsprozess abgestimmt werden. Prinzipiell lassen sich unter Einbeziehung des Diagramms in Abbildung 4.23 alle Kennzahlen von Prozesssteuergrößen in Verbindung mit den zeitabhängigen Steuergrößen schrittweise ermitteln bzw. aufeinander abstimmen. Die Prozesssteuergröße ist prozentual angegeben und kann somit jeden koppelbaren Sachverhalt repräsentieren.

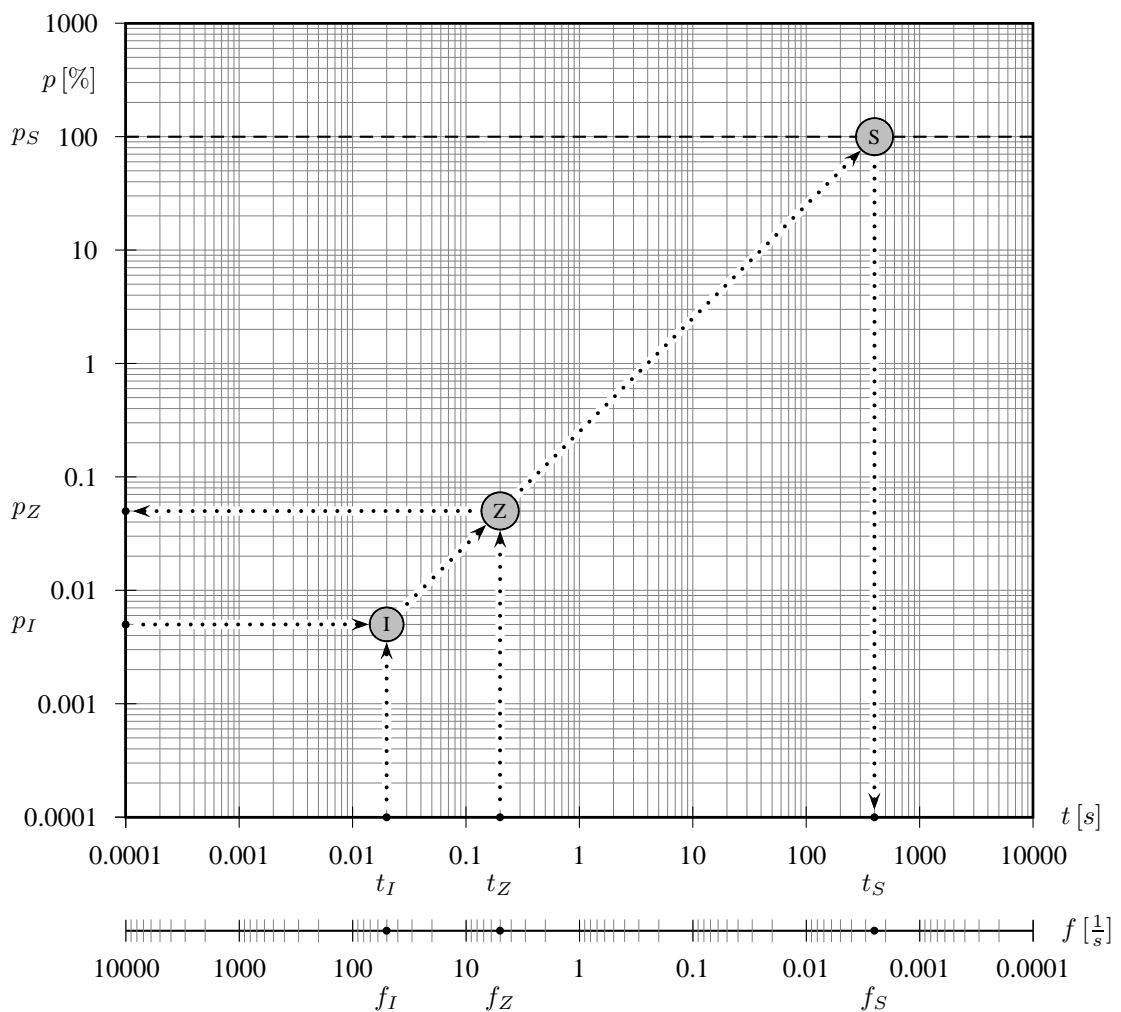


Abbildung 4.23: Kopplung prozess- und zeitabhängiger Steuergrößen

In einem ersten Schritt wird in dem gewählten Beispiel die Wegänderung p_I ins Verhältnis mit der Integrationszeit t_I gesetzt. Damit ergibt sich die Geschwindigkeit p_i/t_i , die durch den Punkt I im Diagramm (Abb. 4.23) gekennzeichnet ist. Erfolgt die Wegänderung bei dem Versuch konstant, stellt das einen linearen Sachverhalt dar. Aufgrund der doppelt-logarithmischen Gestaltung des Diagramms kann, ausgehend von Punkt I , eine unter 45° verlaufende Gerade im Diagramm festgelegt werden. Damit kann unmittelbar der Punkt S und damit die Zeit t_s (Versuchsdauer) bestimmt werden. In Bezug auf den Einsatz digitaler Bilderfassungssysteme ergibt sich i. d. R. zwischen der Integrationszeit t_I und der eigentlichen Bilderfassungsrate t_Z eine Differenz, die z. B. für den elektronischen Bildtransfer benötigt wird. In dieser Zeit t_Z kann keine erneute Bilderfassung initialisiert werden. Trägt man den Zeitpunkt t_Z an der Linie im Diagramm an, dann kann die Wegänderung p_Z ermittelt werden. Damit können in direkter Weise alle zeitabhängigen Steuergrößen aufeinander abgestimmt werden.

4.7.3.2 Ortsbasierte Kopplungsprozesse

Die Kopplung von Prozesssteuergrößen kann – wie bei den zeitbasierten Kopplungsprozessen – im Verlauf der Planung bzw. während der Versuchsvorbereitung erforderlich werden.

Kennzahlen ortsbasierter photogrammetrischer Steuergrößen beziehen sich vorrangig auf geometrische Einflussgrößen, beispielsweise die Sensorgröße, aber auch auf das geometrische Auflösungsvermögen. Letzteres muss in Zusammenhang mit weiteren Einflussgrößen betrachtet werden, die sich beispielsweise auf den gesamten photogrammetrischen Aufnahme- und Auswerteprozess beziehen können.

Das folgende Beispiel bezieht sich auf eine 2D-Verformungsmessung in einem Messbereich von $100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$. Dabei soll in einem ersten Schritt die zu erwartende Messgenauigkeit im Objektraum ermittelt werden. Das vorhandene digitale Aufnahmesystem verfügt über einen $1024\text{ Pixel} \times 1024\text{ Pixel}$ großen CCD-Sensor. Die zu erwartende Messgenauigkeit beträgt im Bildraum ca. $1/100$ Pixel. Anhand des Diagramms in Abbildung 4.24 soll in einem ersten Schritt die zu erwartende Messgenauigkeit im Objektraum bestimmt werden.

Ausgehend von der Kennzahl x_S , die der Anzahl der Pixel in einer Achse entspricht, wird der Punkt S in Verbindung mit der Prozesssteuergröße p_S gebracht. Durch den linearen Zusammenhang zwischen dem Bild- und Objektraum kann eine unter 45° verlaufende Linie bis zum Punkt R geführt werden. Dieser ist durch die zu erwartende Messgenauigkeit x_R im Bildraum vorgegeben und ermöglicht in direkter Weise die Ermittlung der zu erwartenden Messgenauigkeit im Objektraum p_R . Der grafische Sachverhalt (Linienverlauf) kann zur Bestimmung weiterer prozess- bzw. ortsabhängiger Kennzahlen flexibel

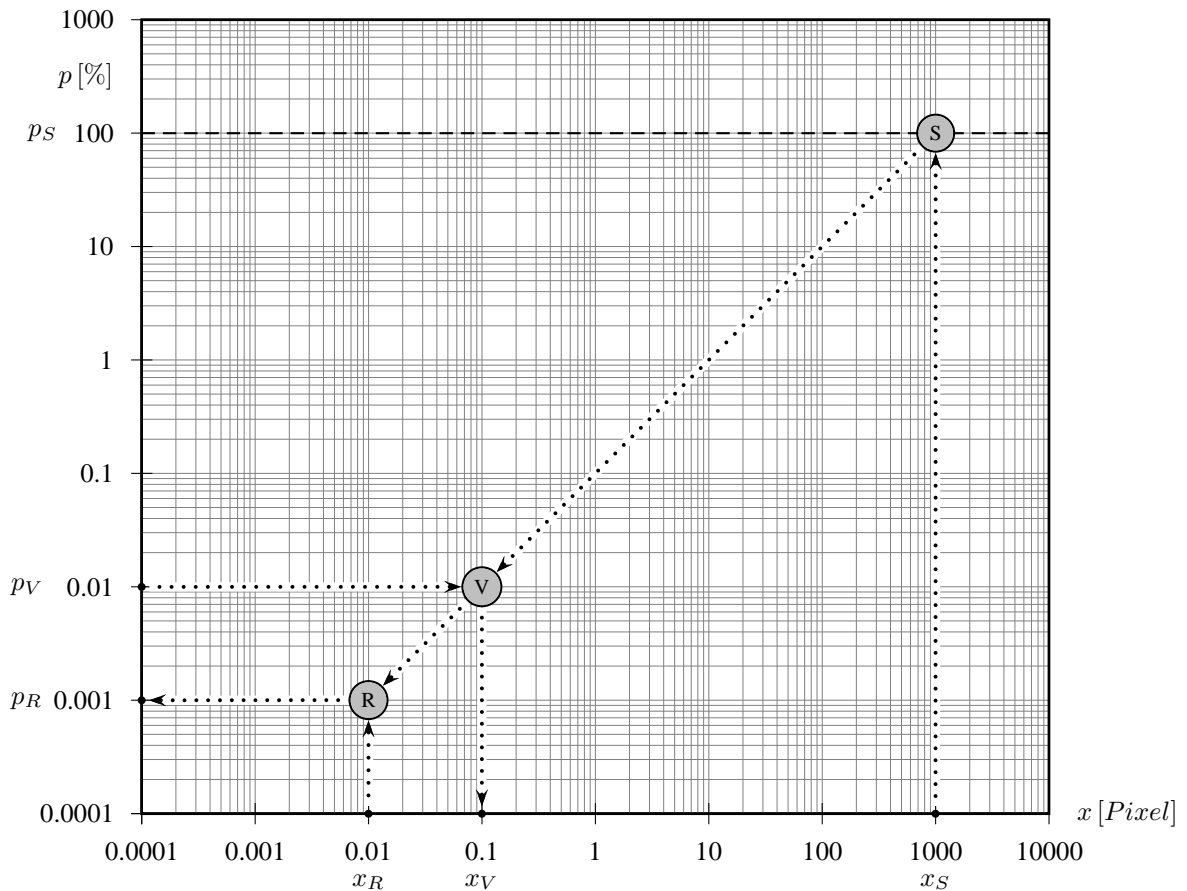


Abbildung 4.24: Kopplung prozess- und ortsabhängiger Steuergrößen

benutzt werden. Beispielsweise soll geprüft werden, wie groß die zu erwartenden Bildverschiebungen x_V infolge der Objektbewegungen bzw. -verformungen p_V pro Laststufe ausfallen.

Die Achsenbeschriftungen des in Abbildung 4.24 gezeigten Diagramms können flexibel den jeweiligen Erfordernissen angepasst werden. Dabei muss jeweils die logarithmische Skaleneinteilung beachtet werden.

Einer der entscheidenden Vorteile der doppelt-logarithmischen Darstellung liegt in der gleichzeitigen Darstellung von Kennzahlen in einem – theoretisch unbegrenzten – Wertebereich. In dem gewählten Beispiel konnte z. B. gleichzeitig der Messbereich (10^2) und die Objektmessgenauigkeit (10^{-3}) dargestellt und direkt in Verbindung gesetzt werden. Ein weiterer Vorteil der entworfenen Diagramme liegt in der Darstellung nichtlinearer Zusammenhänge. Diese würden beispielsweise zu einer Verdrehung der Geraden zwischen den Punkten R und S führen, die für lineare Zusammenhänge unter 45° verläuft.

5 Photogrammetrische Messprozesse im bautechnischen Mess- und Versuchswesen

5.1 Konzeption für die Umsetzung bauspezifischer photogrammetrischer Messprozesse

Der Einsatz von Verfahren der digitalen Nahbereichsphotogrammetrie im bautechnischen Versuchswesen erfordert ein systematisches Vorgehen. In vielen Fällen lassen sich die prinzipiellen Abläufe verallgemeinern und ermöglichen damit den Entwurf einer Konzeption. Diese kann dem Experimentator helfen, einen detaillierten Überblick über die Zusammenhänge und Abläufe der teilweise sehr komplexen Teilprozesse zu bekommen.

In Bezug auf die vorliegende Arbeit bezieht sich der Konzeptionsentwurf auf die Formulierung eines systematischen Lösungsansatzes für die photogrammetrische Erfassung der Verformungs-, Riss- und Schädigungsentwicklung bei baumechanischen Untersuchungen. Die Basis dafür bilden die für das bautechnische Versuchswesen (Kap. 3, S. 15) und die digitale Nahbereichsphotogrammetrie (Kap. 4, S. 25) zusammengestellten und untersuchten Grundlagen. Weitere Voraussetzungen für einen vollständigen Konzeptionsentwurf sind die Zusammenführung bauspezifischer und photogrammetrischer Teilprozesse (Abschn. 4.7) sowie bauspezifischer Auswerteprozesse (Abschn. 4.6).

5.1.1 Planungsphase

Die Planungsphase beinhaltet im Vorfeld von Versuchen bzw. Versuchsserien die Formulierung der Messaufgabe und die Festlegung der Messkonfiguration und des Messablaufes einschließlich der Art und Weise, wie der photogrammetrische Teilprozess in den gesamten Versuchsprozess einbezogen wird. In der Planungsphase wird auch über evtl. Voruntersuchungen entschieden. Bei Standardaufgaben oder abgesicherten Erkenntnissen kann i. d. R. auf diese verzichtet werden. Die Absicherung eines problemlosen Versuchsablaufes kann besondere Bedeutung erlangen, wenn beispielsweise sehr aufwendige bzw. nicht wiederholbare Versuche realisiert werden sollen. Mit dem Abschluss der

Planungsphase sind i. d. R. alle wesentlichen Entscheidungen getroffen, die sich auf die nachfolgenden Phasen der Vorbereitung und Ausführung beziehen.

5.1.2 Vorbereitungsphase

Die Vorbereitungsphase bezieht sich auf alle Abläufe, die unmittelbar vor dem eigentlichen Versuch stattfinden.

Hinsichtlich der unmittelbaren Vorbereitung liegt der Schwerpunkt auf der Umsetzung der geplanten Messkonfiguration, die sich z. B. auf die Einrichtung des Kamerasystems, die Beleuchtungseinrichtung, das Bezugssystem, eine evtl. Objektmarkierung, eine Systemkalibrierung und die Kopplung mit anderen Messsystemen zur synchronen Datenerfassung und Steuerung beziehen kann. Voruntersuchungen können in Bezug auf den Untersuchungsgegenstand selbst aber auch hinsichtlich der einbezogenen Versuchstechnologie erforderlich werden.

5.1.3 Ausführungsphase

Die Ausführungsphase bezieht sich auf den Versuch selbst. Im Zusammenhang mit dem photogrammetrischen Messprozesse ist damit die Erfassung des Referenzzustandes des Versuchsobjektes verbunden sowie die gesteuerte, synchronisierte digitale Bilderfassung in Echtzeit. In Abhängigkeit der jeweiligen Messaufgabe können Auswerteprozesse teilweise auch in der Ausführungsphase in Echtzeit bzw. Quasi-Echtzeit erfolgen. Diese Vorgehensweise ist für Standardmessaufgaben zweckmäßig, wie z. B. die Einmessung signalisierter Punkte. Messaufgaben, deren Auswertung nicht in Echtzeit ausgeführt werden bzw. eine Interaktion mit dem Experimentator – beispielsweise für Parametereingaben und -anpassungen – erfordern, sind bei kurzzeitigen Belastungsversuchen in der Nachbereitungsphase vorzunehmen.

5.1.4 Nachbereitungsphase

In der Nachbereitungsphase erfolgt die abschließende photogrammetrische und fachspezifische Auswertung. Diese umfasst alle erforderlichen Auswerteprozeduren, die nicht während der Vorbereitungs- und Ausführungsphase vorgenommen wurden bzw. durch Parameteranpassungen wiederholt werden müssen. Verfahrens- und Parameteranalysen sind in der Nachbereitungsphase vorzunehmen.

5.2 Modulares Mess- und Auswertesystem

Für die Realisierung photogrammetrischer Messungen im *Bautechnischen Mess- und Versuchswesen* wurde ein modular aufgebautes Messsystem entwickelt, das in den nachfolgenden Abschnitten erläutert wird.

5.2.1 Steuer- und Datensynchronisierungsmodul

Das zentrale Steuerungs- und Datensynchronisierungsmodul stellt das Kernstück für die zeitlich synchrone Steuerung der nachfolgend beschriebenen Module dar.

5.2.2 Beleuchtungsmodule

Die Auswahl geeigneter Beleuchtungsmodule ist in Abhängigkeit der jeweiligen Messaufgaben, der zum Einsatz kommenden digitalen Kameras und der Versuchsbedingungen vorzunehmen und ist für eine optimale Objekterfassung von entscheidendem Einfluss. Aktuell werden neben Halogen- und Kaltlichtstrahlern, LED-Flächen/Ringleuchten und Glasfaserkaltlichtstrahler eingesetzt (s. Anwendungsbeispiele).

5.2.3 Bilderfassungsmodule

Das Bilderfassungsmodul beinhaltet neben den digitalen Kameras die Software zur synchronen Erfassung verschiedener Bildquellen und der Serialisierung. Die in die Untersuchungen einbezogenen digitalen Kameras sind in Tabelle 5.1 zusammengefasst. Die z. T. sehr unterschiedlichen Eigenschaften bzgl. der geometrischen, radiometrischen und zeitlichen Auflösung ermöglichen einen flexiblen Einsatz bei baumechanischen Untersuchungen von hochauflösenden Verformungsmessungen bis hin zur Erfassung von Bruchvorgängen mit einer Hochgeschwindigkeitskamera (Abschn. 5.3.7, S. 90).

5.2.4 Auswertemodule

Tabelle 5.2 zeigt eine Zusammenstellung von Auswertemodulen, die während der Bearbeitung der Thematik selbständig entwickelt wurden.

Kamerabezeichnung	Geometrische/radiometrische/zeitliche Auflösung	Sensor
Kodak Megaplust 4.2i	2k x 2k Pixel / 10 Bit / < 2 Hz	CCD
Stemmer ST2	2k x 2k Pixel / 8 Bit / < 0,5 Hz	CCD
Fastcam Ultima 1024	1k x 1k Pixel / 8 Bit / < 16000 Hz	CMOS
Kodak DCS 660	3k x 2k Pixel / 8 Bit / < 0.1 Hz	CCD

Tabelle 5.1: Digitale Bilderfassungssysteme

Modul	Kurzbeschreibung
Analysemodul	Funktionen zur Analyse bzw. Bewertung von Software/ Implementierungen
Messmarkenmodul	Modul zur Erzeugung optimierter Messmarken (inkl. variabler Codierung)
IO-Modul	Modul für Datentransfer/-konvertierung
Kreuzkorrelation	Modul zur sub-/pixelgenauen Bildzuordnung homologer Bildpunkte
Least Squares Matching	Modul zur subpixelgenauen Bildzuordnung homologer Bildpunkte
Rissbildanalyse- modul	Rissbildberechnung aus Verschiebungsfeldern
Transformation (Bild-/Objektraum)	Implementierung von Funktionen zur Berechnung/ Transformation Bild-/Objektraum (2D/2.5D/3D)
Dynamische Intervallberechnung	Dynamische Intervallberechnung bei Schubversuchen
Messbereichs-/ Profilstellung	Grafikorientiertes Programm zur Festlegung von Messbereichen/ -profilen

Tabelle 5.2: Auswahl entwickelter Auswerte- und Interaktionsmodule

5.3 Anwendungsbeispiele

In diesem Kapitel ist eine Auswahl photogrammetrischer Messungen dargestellt, die im Zusammenhang mit sehr vielen Forschungsprojekten durchgeführt wurden und sich in vielfältiger Weise unterscheiden. Eine vollständige Liste von Veröffentlichungen zu den durchgeführten Versuchen finden sich im Anhang (121).

5.3.1 Photogrammetrische Verformungsmessungen bei Untersuchungen zum Verhalten von Pflasterdecken unter horizontaler Belastung

Im Rahmen der *Untersuchungen zum Verhalten von Pflasterdecken unter horizontaler Belastung* bestand u. a. die Aufgabe, unter Einbeziehung der *Digitalen Nahbereichsphotogrammetrie* flächenhafte Verformungsmessungen zu realisieren. Die experimentellen Untersuchungen wurden unter Leitung von Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. F. Weller¹ im *Otto-Mohr-Laboratorium* an der *Technischen Universität Dresden* durchgeführt.

Das generelle Messkonzept sah für die dynamischen Belastungsversuche an einer begrenzten Anzahl diskreter Objektpunkte kontinuierliche Verformungsmessungen mittels induktiver Wegaufnehmer vor, die durch eine flächenhafte photogrammetrische Verformungsmessung an der Pflasteroberfläche ergänzt werden sollte. Für die flächenhaften Verformungsmessungen bestand die vorrangige Aufgabe in der Erfassung der Verschiebungen der einzelnen Pflastersteine in Bezug auf den Schwerpunkt. Optional sollte eine Möglichkeit zur Erfassung der Gesamtbewegung (inkl. Rotation) der einzelnen Pflastersteine geprüft werden.

Der photogrammetrisch zu erfassende Objektbereich hatte eine Größe von ca. $2,2\text{ m} \times 2,2\text{ m}$, die geforderte Messgenauigkeit lag bei ca. $0,1\text{ mm}$. Die Dauer eines dynamischen Belastungsversuches betrug bis zu 55 Stunden, wobei die photogrammetrische Bilderfassung nur in größeren vorgegebenen Zeitintervallen – lastwechselabhängig – zu erfolgen hatte. Der Versuchsraum konnte aufgrund der Ausdehnung des Versuchsstandes nicht klimatisiert und vollständig gegen Umgebungslichteinflüsse abgeschottet werden. Ein unmittelbarer Einfluss durch direkte Sonneneinstrahlung konnte verhindert werden, da ansonsten zusätzliche Temperatureinflüsse bestanden und ungünstige Lichtverhältnisse ggf. eine Messung behindert hätten. Die Objektbeleuchtung musste so gewählt werden, dass möglichst kein Einfluss durch das normale Umgebungslicht vorlag – unabhängig von der Tageszeit.

¹*Technische Universität Dresden, Institut für Stadtbauwesen und Straßenbau*

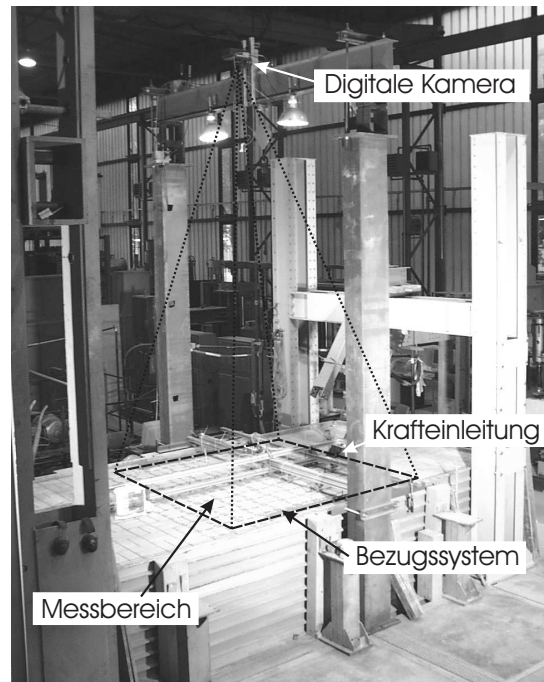


Abbildung 5.1: Versuchsaufbau für photogrammetrische Verformungsmessungen bei Untersuchungen zum Verhalten von Pflasterdecken unter horizontaler Belastung

Prinzipielle Vorgehensweise – Versuchsaufbau

Entsprechend den im vorangegangenen Abschnitt genannten Anforderungen wurden auf der Grundlage der entwickelten Konzeption (Abschn. 5.1, S. 69) in der Planungsphase geeignete Verfahren ausgewählt, eine Messkonfiguration aufgestellt und im Zuge von Voruntersuchungen getestet und angepasst. Der Versuchsaufbau und das Messobjekt selbst erlauben normalerweise eine 2D-Objekterfassung (Abschn. 4.4.2.1, S. 43).

Aufgrund der im Verlauf des Belastungsversuches aufgetretenen Änderungen der äußeren Orientierung der Kamera wurde eine 2.5D-Objekterfassung (Abschn. 4.4.2.3, S. 45) erforderlich. Das in diesem Zusammenhang nötige Bezugssystem wurde unmittelbar über der Objektfläche an der Messbasis der induktiven Wegaufnehmer angebracht. Die zum Einsatz gebrachten merkmalsbasierten Messmarken auf der Objektfläche (Pflaster) und dem Bezugssystem dienen der Absicherung einer hohen Messgenauigkeit an den vorgegebenen diskreten Punkten, brachten aber einen hohen Aufwand beim Applizieren der Marken mit sich. Eine Codierung der Marken war aufgrund der gewählten Vorgehensweise bei der Auswertung nicht erforderlich und hätte bei einigen Pflaster-

steinformaten u. a. auch zu Platzproblemen geführt. Die Einbeziehung der natürlichen Oberflächentextur der Pflastersteine in den photogrammetrischen Messprozess musste aufgrund unzureichender Testergebnisse verworfen werden. Pro Stein wurden vier Messmarken vorgesehen. Diese ermöglichen eine redundante Bestimmung der Steinverschiebung in Bezug auf den Schwerpunkt, aber auch eine eventuelle Ermittlung der Rotation der Steine, sofern dies die jeweils erzielte Messgenauigkeit zulässt. Der Einsatz von Retromarken wurde in der Planungsphase berücksichtigt. Der damit verbundene Vorteil einer unproblematischen Markenerfassung – besonders bei den vorhandenen Umgebungsbedingungen – stand dem Nachteil gegenüber, dass damit eine vollständige Erfassung der natürlichen Oberflächentextur (Pflasteroberfläche, Fugen usw.) im Bild verhindert worden wäre. Diese erschien aber hinsichtlich weiterführender Auswertungen als unverzichtbar, um beispielsweise aufgehende Fugen oder evtl. Beschädigungen erkennen zu können.

Der photogrammetrische Messprozess umfasst neben der Erfassung digitaler Bilder, die Einmessung der merkmalsbasierten, uncodierten Messmarken (Abschn. 4.3.3.1, S. 36), die Verschiebungsanalyse (Abschn. 4.5.2.1, S. 51), die Objektkoordinatenberechnung (Abschn. 4.5.4, S. 61) und die Aufbereitung der Versuchsdaten, auf die in Abschnitt 5.3.1 gesondert eingegangen wird. Aufgrund von Besonderheiten bei der Auswertung bzw. Versuchsdatenaufbereitung erfolgte diese off-line.

Der Versuchsaufbau in Abbildung 5.1 zeigt die wesentlichen Komponenten der Messkonfiguration, die für eine photogrammetrische 2.5D-Objekterfassung (Abschn. 4.4.2.3, S. 45) für den genannten Anwendungsfall erforderlich waren.

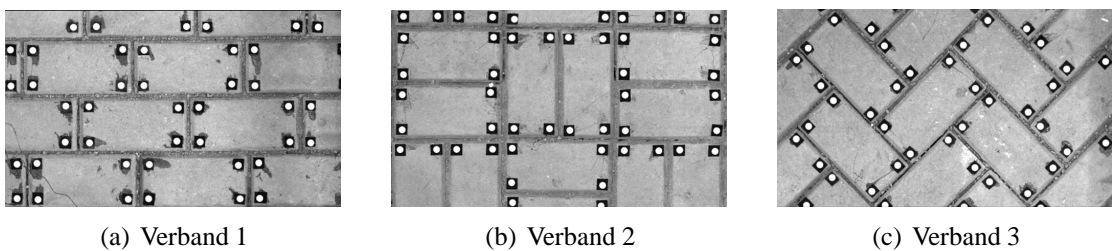
Das zum Einsatz gebrachte digitale Kamerasystem ST2 (Abschn. 5.2.3, S. 71) wurde an einem stabilen Stahlrahmen befestigt. Der Rahmen verformte sich infolge von Temperatureinflüssen und verursachte eine Änderung der äußeren Orientierung der Messkamera. Dieser Umstand führte zum Einsatz des bereits erläuterten Bezugssystems (Abb. 5.2).

Versuchsauswertung und Ergebnisse

Die photogrammetrische Auswertung erfolgte in mehreren Schritten und umfasste beispielsweise die Aufbereitung der Passpunktkoordinaten, die Verschiebungsanalyse einschließlich der Bestimmung der Referenzpositionen der Messmarken im Bildraum und die Objektkoordinatenberechnung auf der Basis der *Dynamischen Projektiven Transformation* (Abschn. 4.5.4.2, S. 61). Besonderheiten traten bei der Berechnung der steinbezogenen Schwerpunktverschiebungen auf. Hierfür wurde die Gruppierung der betreffenden Messpunkte pro Stein erforderlich. Unter Ausnutzung der Regelmäßigkeit, die die meisten Pflasterverbände aufwiesen, konnten Module entwickelt werden, die eine flexible Gruppierung bzw. Zuordnung ermöglichten. Eine Vereinfachung konnte durch die



Abbildung 5.2: Photogrammetrischer Messbereich bei Untersuchungen zum Verhalten von Pflasterdecken unter horizontaler Belastung



(a) Verband 1

(b) Verband 2

(c) Verband 3

Abbildung 5.3: Ausgewählte Detailansichten von Pflasterdecken

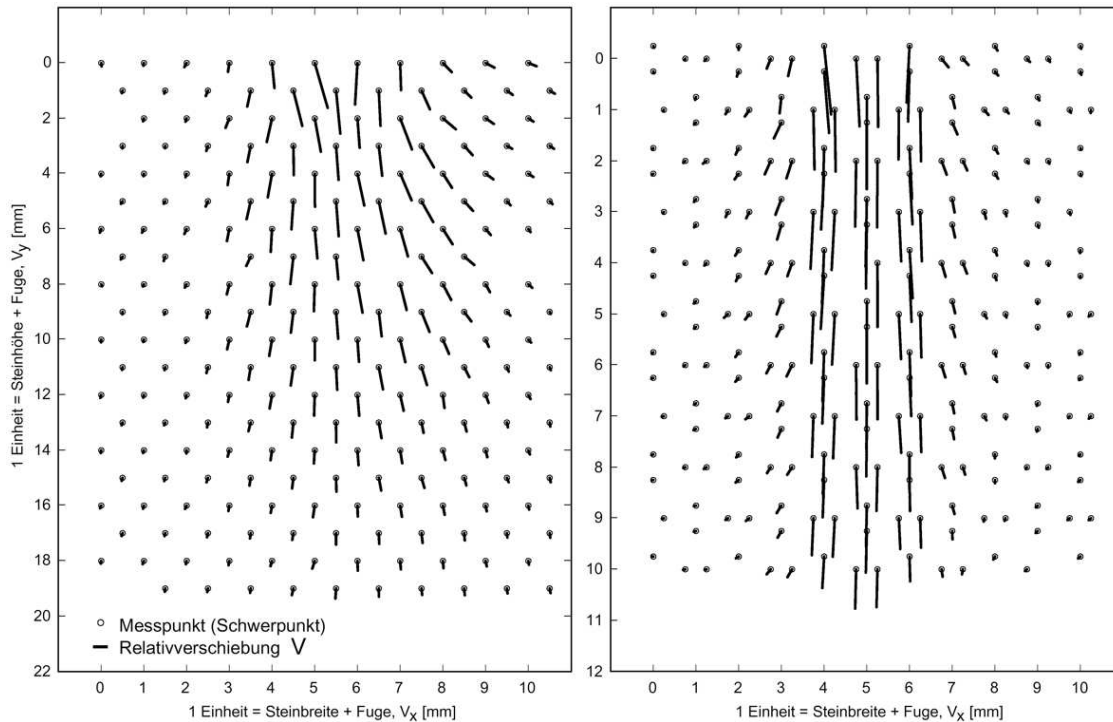


Abbildung 5.4: Photogrammetrisch bestimmtes Verschiebungsfeld (normiertes Koordinatensystem)

Einführung normierter Koordinatensysteme erzielt werden, bei der die Steinbreite bzw. -höhe jeweils eine Einheit darstellte. Unter Vorgabe der jeweiligen Verlegemuster im normierten System konnte die Zuordnung in effizienter Weise vorgenommen werden.

Abbildung 5.4 zeigt zwei Ergebnisse von unterschiedlichen Verbandarten für die berechneten Schwerpunktsverschiebungen, die jeweils in einem normierten Koordinatensystem dargestellt sind. Die Verschiebungen selbst wurden in Objektkoordinaten angegeben. Hier entspricht 1 Einheit gleich 1 Millimeter. Die Ergebnisse zeigen sehr deutlich die unterschiedliche Charakteristik bei der Lastausbreitung.

Eine Verifizierung konnte für die Objektbereiche vorgenommen werden, für die beispielsweise Messdaten der induktiven Wegaufnehmer vorlagen. Die Standardabweichung, die sich aus der Auswertung ergeben hat, lag zwischen 0,1 Pixel (0,1 mm) und 0,05 Pixel (0,05 mm).

5.3.2 Photogrammetrische Verformungsmessungen an Brettstapelelementen

Im Zusammenhang mit experimentellen Untersuchungen von Brettstapelelementen aus Leim- und Nagelverbindungen sowie unter Verwendung von Aussteifungselementen bestand die Aufgabe in der Erfassung ebener Verformungen unter Einbeziehung der *Digitalen Nahbereichsphotogrammetrie*. Die experimentellen Untersuchungen wurden unter Leitung von Herrn Prof. Dr.-Ing. P. Haller² durchgeführt. Der zu erfassende Objektraum betrug – wie bei der Messaufgabe in Abschnitt 5.3.1 (S. 73) – ca. 2,2 m × 2,2 m. Die Lasteintragung in horizontaler und vertikaler Richtung erfolgte in Elementebene und in definierten Laststufen. Abbildung 5.5 zeigt den für alle Belastungsversuche verwendeten Versuchsstand im *Otto-Mohr-Laboratorium* der *Technischen Universität Dresden*.



Abbildung 5.5: Versuchsstand für Brettstapelelemente

²Technische Universität Dresden, Institut für Stahl- und Holzbau

Die photogrammetrische Bilderfassung der Verformungszustände der jeweiligen Laststufen erfolgte mit dem Kamerasystem ST 2 (Abschn. 5.2.3, S. 71). Die vorhandenen Lasteinleitungen führten zu einem definierten Verformungszustand in der Elementebene und ermöglichten dadurch eine 2D-Objekterfassung (Abschn. 4.4.2.1, S. 43). Der zu erfassende Objektraum ergab im Zusammenhang mit der verwendeten Kamera (ST 2) einen Abbildungsmaßstab, bei dem ein Bildpunkt (Pixel) ca. 1 mm im Objektraum entspricht. Aufgrund des vorliegenden Abbildungsmaßstabes und der vorhandenen Objektstruktur wurde der Einsatz von Messmarken geplant. Wegen der Besonderheiten der Versuchsobjekte und der Messanforderungen erschien der Entwurf einer speziellen Messmarke als notwendig und führte – auf der Grundlage bestehender Messmarkenlösungen – zu einer Modifikation entsprechend Abbildung 4.6 (S. 36). Unter Verwendung eines Messmarkenunterbaues entsprechend Abbildung 4.3.3.6 (S. 41) ermöglichte diese Messmarkenform eine hochgenaue Punkterfassung im Bild- und Objektraum entsprechend der Aufgabenstellung [96].

Die konkrete Aufgabenstellung bestand in der Erfassung der eingetretenen Objektverschiebungen an ausgewählten diskreten Objektstellen sowie der Erfassung von Verschiebungen der einzelnen Brettschichten. Abbildung 5.6 zeigt am Beispiel des Brettstapелеlementes E1-ENa-2 u. a. die zur Einmessung mit Messmarken vorgesehenen diskreten Objektstellen, das Bezugssystem und die horizontale Objektmarkierung. Das Bezugssystem wurde zur Absicherung der photogrammetrischen Aufnahme hinsichtlich evtl. Kamerabewegungen eingerichtet. Die horizontale Objektmarkierung in einem vertikalen Abstand von 250 mm diente zur qualitativen und quantitativen Erfassung der eingetretenen Relativverschiebungen der einzelnen Brettlagen. Die Lasteintragung erfolgte für die Probekörper der Serie E2, die aus zwei Einzelelementen E1 bestehen und vor Ort zusammengesetzt wurden, ausschließlich in horizontaler Richtung. Die Einzelelemente der Serie E1 wurden in vertikaler und horizontaler Richtung belastet. Aufgrund der Elementgröße wurde in Höhe der Krafteinleitung eine Führung des Brettstapelelementes vorgesehen, die ein Ausweichen aus der vorgegebenen Ebene in Höhe der Krafteinleitung verhinderte und damit eine 2D-Objekterfassung ermöglichte. Im unteren linken Bereich wurde ein Zugband zur Aufnahme der Vertikalkräfte vorgesehen. Entlang der Unterseite wurde das Brettstapelelement auf Lastverteilungsplatten aufgesetzt und seitlich geführt. Für die Aufnahme der Horizontalkräfte wurde im unteren rechten Bereich ein unverschiebbarer Auflagerpunkt geschaffen.

Das Ergebnis der durchgeführten Untersuchungen sind u. a. 2D-Objektkoordinaten, die sich auf die vorgegebenen Objektpunkte pro Laststufe beziehen [96]. Zur besseren Veranschaulichung der großen Anzahl von Messdaten wurden Videosequenzen erzeugt, die den qualitativen und quantitativen Verformungszustand der geprüften Brettstapelelemente in Raster- und Vektordarstellung zeigen. Abbildung 5.7 zeigt den quantitativen Verformungszustand des Brettstapelelementes E1-ENa-2 für eine ausgewählte Laststufe.

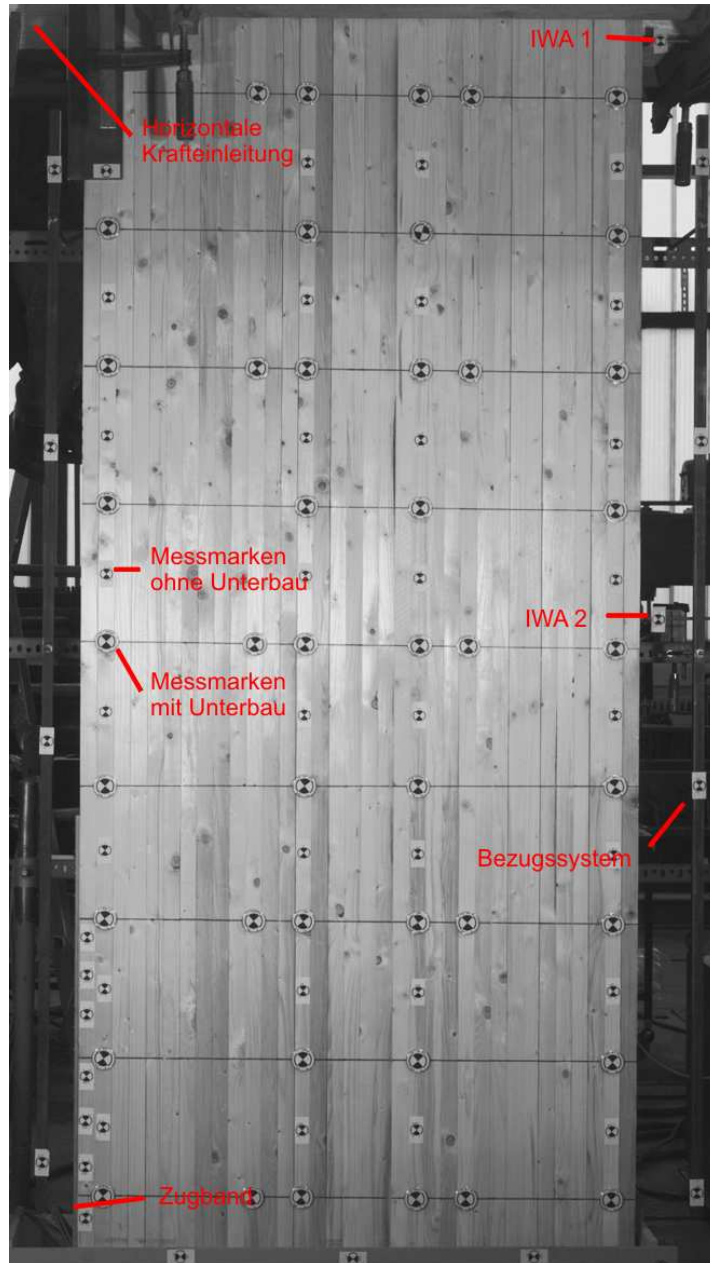


Abbildung 5.6: Brettstapelelement E1-ENa-2 (Systemkonfiguration: Bezugssystem, Messmarken, IWA, Krafteinleitungspunkt usw.)

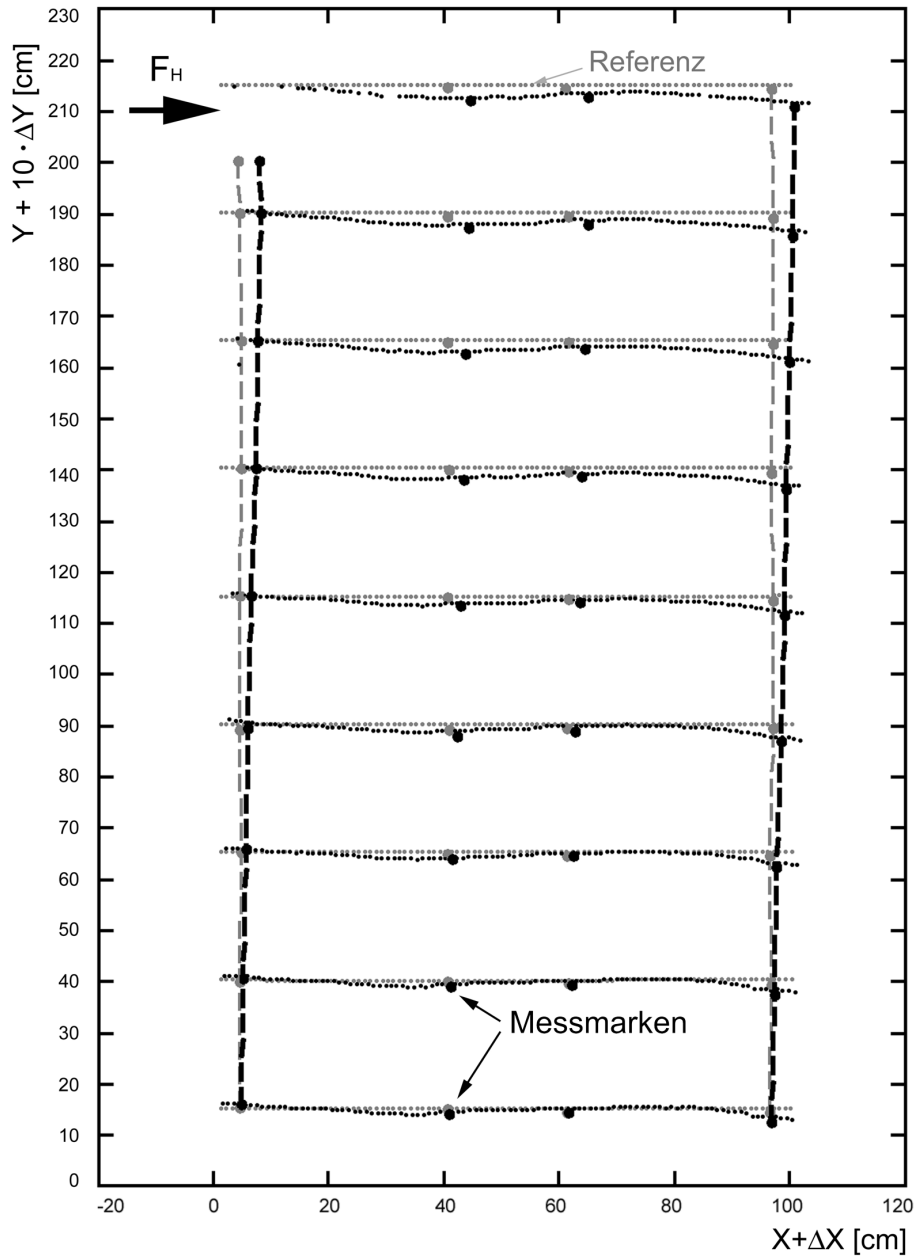


Abbildung 5.7: Photogrammetrisch erfasstes Verschiebungsfeld an einem Brettstapelelement bei $F_H = 160,2 \text{ kN}$, $F_V = 0,0 \text{ kN}$ (E1-ENa-2, Teil 2)

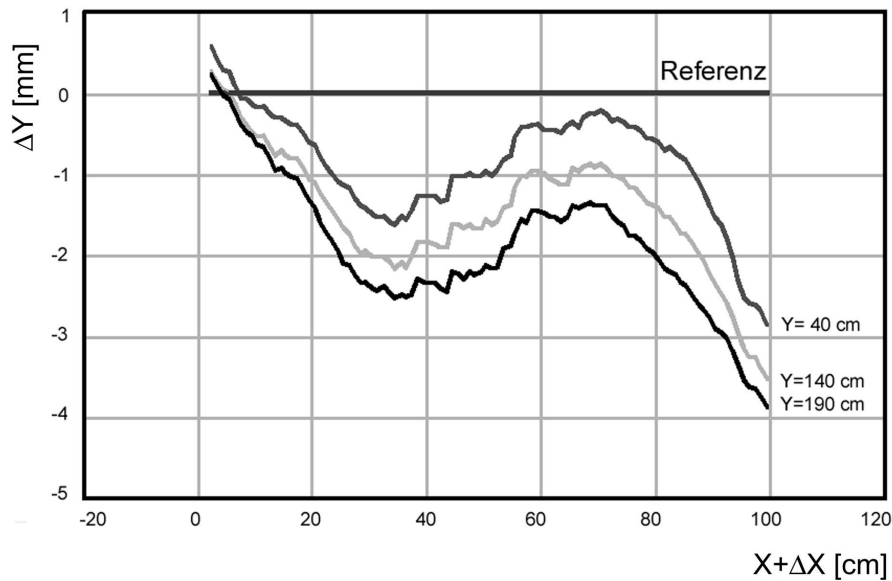
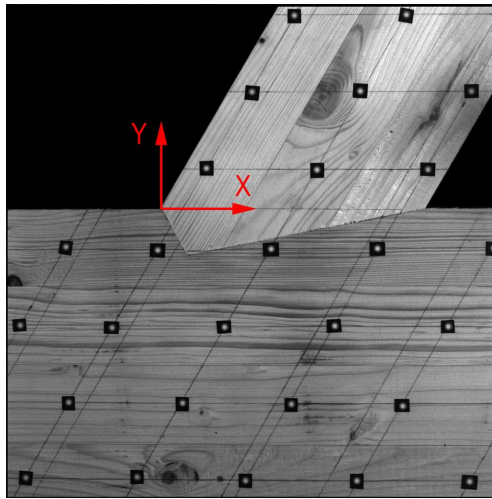


Abbildung 5.8: Vertikalverschiebungen in 3 Profilen bei $F_H = 160,2 \text{ kN}$, $F_V = 0,0 \text{ kN}$ (E1-ENa-2, Teil 2)

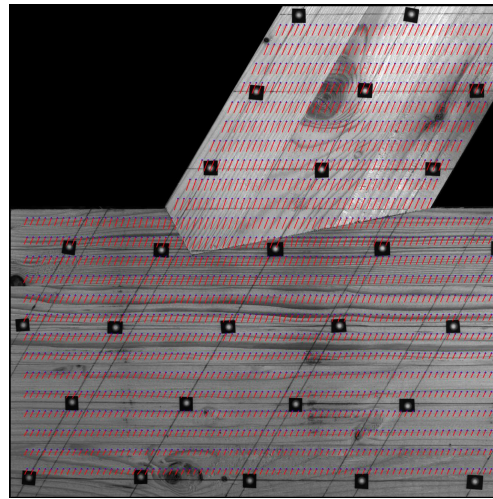
Zusätzlich zur diskreten Objektpunkteinmessung (Messmarken) erfolgte unter Einbeziehung der horizontalen Objektmarkierung eine quantitative Analyse der vertikalen Relativverschiebungen der Brettlagen zueinander. Diese sind ebenfalls in Abbildung 5.7 dargestellt (10-fach überhöht) und wurden unter Verwendung der Kreuzkorrelation berechnet. Aufgrund der kleinen vertikalen Verformungen bietet sich eine separate Darstellung entsprechend Abbildung 5.8 an. Diese zeigt beispielsweise die vertikalen Verschiebungsanteile von 3 Profilen des Brettstapelelementes E1-ENa-2.

5.3.3 Erfassung von flächenhaften Verformungen bei Druckversuchen an Holzversatzkonstruktionen

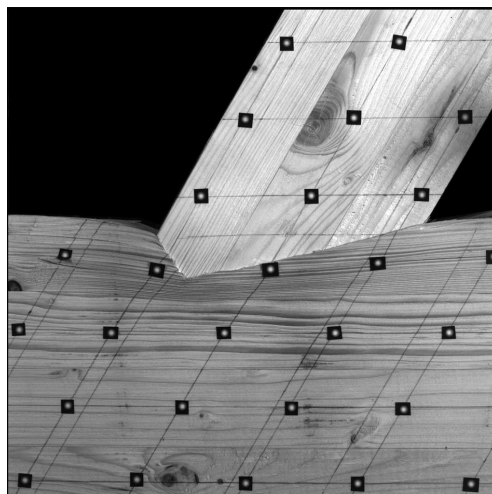
Die hier vorgestellte photogrammetrische 2D-Verformungsmessung bei einem Druckversuch an einer Holzversatzkonstruktion stellt die Referenzmessung zu weiteren Versuchen gleicher Art mit aufgebrachten Verstärkungen dar, die unter Leitung von Herrn Prof. Dr.-Ing. P. Haller durchgeführt wurden. Besonderheit dabei ist der Einsatz intensitätsbasierter Messmarken und die Verwendung des FEM-Netzes der durchgeführten rechnerischen Modellierung zur Verschiebungsanalyse. Abbildung 5.9 zeigt neben dem Referenzbild ausgewählte Ergebnisse der photogrammetrischen Auswertung. [89]



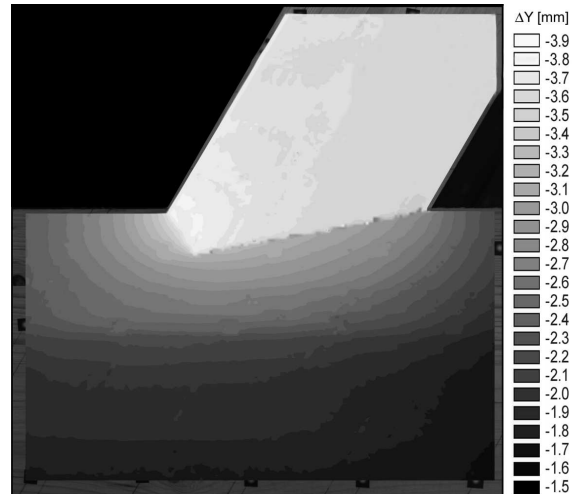
(a) $F = 0,0 \text{ kN}$ (Referenz)



(b) $F = 82,5 \text{ kN}$ ($\Delta X/\Delta Y \times 1,5$)



(c) $F = 127,5 \text{ kN}$ (Bruchzustand)



(d) $F = 82,5 \text{ kN}$ (ΔY [mm])

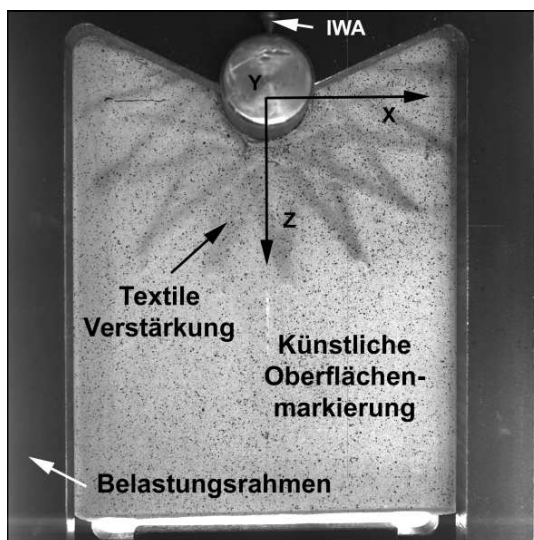
Abbildung 5.9: Diskrete und flächenhafte 2D-Verformungsmessungen bei Belastungsversuchen an Holzversatzkonstruktionen: (a) Referenzzustand, (b) 2D-Verformungen in 1,5-fach überhöhter Vektordarstellung, (c) Bruchzustand und (d) Umrissflächendarstellung der vertikalen Relativverschiebungen

5.3.4 Photogrammetrische Verformungsmessungen bei baumechanischen Untersuchungen von textilverstärkten Holzproben

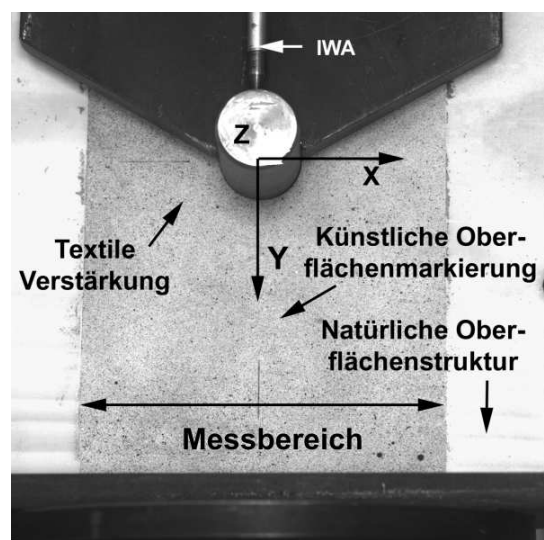
Im Rahmen von Untersuchungen des Teilprojektes C3 erfolgten im Sonderforschungsbereich 528 photogrammetrische Verformungsmessungen bei Druck- und Zugversuchen an textilverstärkten Probekörpern [92].

Abbildung 5.10(a) zeigt einen mit textilen Strukturen verstärkten Probekörper und den Belastungsrahmen. In Abbildung 5.10(b) ist ein unverstärkter Probekörper bei einem Druckversuch dargestellt. Die photogrammetrische Bilderfassung erfolgte entsprechend der gewählten Aufnahmekonfiguration (2D/3D) unter Einbeziehung von einer bzw. zwei Kodak Megaplas 4.2i/10 (Abschn. 5.2.3, S. 71).

Entsprechend der in Abschnitt 5.1 (S. 69) vorgestellten Konzeption wurden in Abhängigkeit des Versuchsaufbaus und wegen Besonderheiten der Oberflächentopologie – z. B. im Bereich der Textilverstärkung – 2D- und 3D-Verfahren ausgewählt. Zur Absicherung einer hohen Messgenauigkeit wurde entsprechend den Voruntersuchungen eine künstliche Oberflächenmarkierung vorgesehen (Abschn. 4.3.2, S. 34).



(a) Zugversuch O5PG (2D)



(b) Druckversuch UDPG (3D)

Abbildung 5.10: Referenzbilder für einen Zug- und Druckversuch an einem textilbewehrten Holzprobekörper mit künstlich markierten Objektflächen

Die Lage der diskreten Objektpunkte wurde durch entsprechende FEM-Netze vorgegeben, die von dem Objektraum in den Bildraum transformiert werden mussten. Dies erfolgte auf den in Abschnitt 4.5.4 (S. 61) vorgestellten Berechnungsgrundlagen.

Abbildung 5.11 zeigt ein prinzipielles Ergebnis der photogrammetrischen Auswertung für einen Zugversuch. Eine weiterführende Analyse der photogrammetrisch ermittelten Versuchsdaten (2D/3D-Objektverschiebungen) kann unter Einbeziehung der FEM-Berechnungsprogramme erfolgen, beispielsweise für eine Spannungs- bzw. Dehnungsanalyse.

Nach der photogrammetrischen 2D- und 3D-Auswertung erfolgte ein Vergleich mit Daten von FEM-Rechnungen. Diese ergaben für die mittels 2D-Auswertung erfassten Zugversuche größere Differenzen. Nach Analyse der Messwerte der induktiven Wegaufnehmer bestätigte sich, dass durch Schiefstellung des Dübels 3D-Objektbewegungen eintraten, die mit den bereits realisierten 3D-Messungen bzw. durch eine 2.5D-Erfassung bestimmt werden konnten. Der vorgenannte Einfluss bestand nicht bei den Druckversuchen.

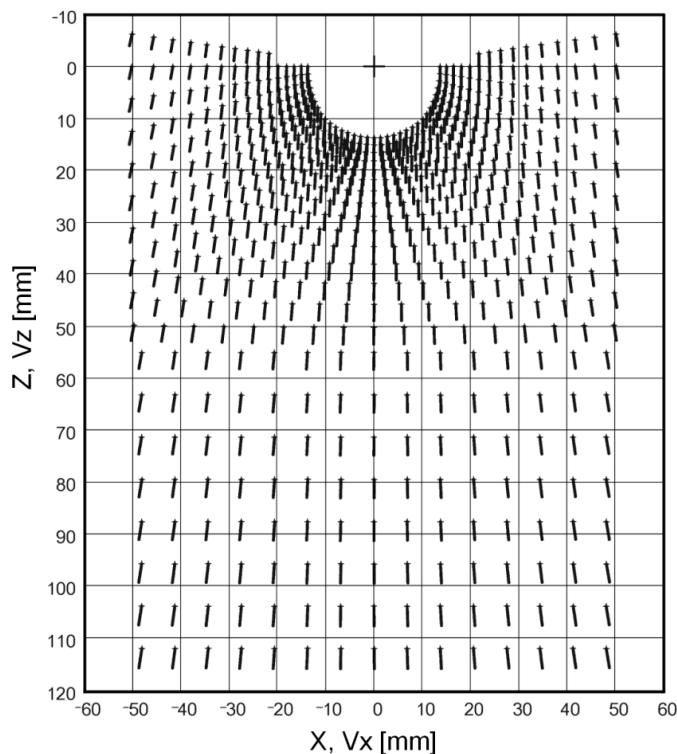


Abbildung 5.11: Photogrammetrische Verformungsmessung bei einem Zugversuch unter Verwendung eines FEM-Netzes

5.3.5 Verifikation von FEM-Berechnungen mittels photogrammetrischer Messungen bei baumechanischen Untersuchungen textilverstärkter Holzkonstruktionen

In Bezug auf die Verifikation von FEM-Berechnungen mittels photogrammetrischer Messungen ergab sich im Zusammenhang mit Belastungsversuchen an textilverstärkten Probekörpern im Teilprojekt C3 des Sonderforschungsbereichs 528 eine ähnliche Aufgabenstellung wie in Abschnitt 5.3.4. Die Besonderheit bestand hier in der Erfassung einer ausgeprägten dreidimensionalen Objektgeometrie. Diese erforderte den Einsatz einer 3D-Objekterfassung entsprechend Abschnitt 4.4.2.4 (S. 47).

Ein erstes Ziel bestand in der photogrammetrischen Bestimmung der Objektgeometrie durch die am Objekt angebrachten Messmarken. Die Position der Messmarken wurde näherungsweise durch das FEM-Netz vorgegeben. Diese Messaufgabe erfolgte im Vorfeld des Versuches unter Aufnahme und Auswertung eines Bildverbandes [31] mit einer digitalen Kamera DCS 660 (Abschn. 5.2.3, S. 71). Das Ergebnis wurde letztlich zur realitätsnahen FEM-Netz-Generierung herangezogen.

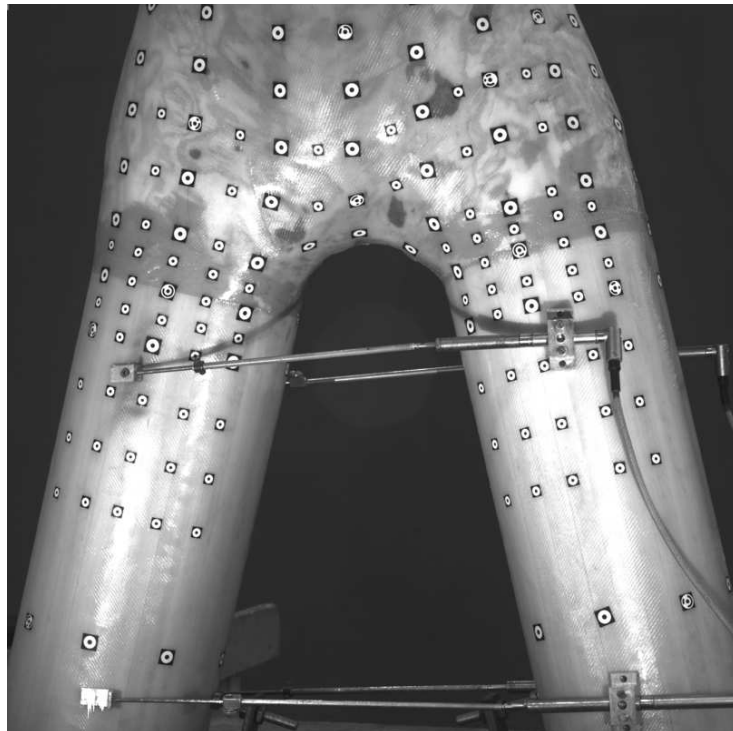


Abbildung 5.12: Textilverstärkte Holzprobe (Referenzbild Kamera 1).

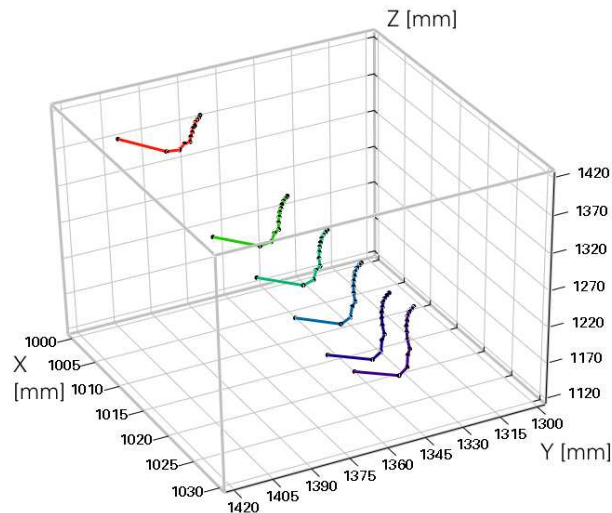


Abbildung 5.13: Trajektorien ausgewählter Objektpunkte

Die zweite Messaufgabe bestand in der photogrammetrischen 3D-Erfassung der signalisierten Objektpunkte eines ausgewählten Bereiches des Probekörpers (Abb. 5.12) während des Belastungsversuches. Die Belastungssteigerung erfolgte dabei weitestgehend kontinuierlich bis zum Bruchzustand. Zum Einsatz kamen zwei Kodak Megaplug 4.2i/10 (Abschn. 5.2.3, S. 71), die in einer konvergenten Aufnahmekonfiguration so angeordnet wurden, dass die Fehleranteile in den jeweiligen Koordinatenrichtungen ähnlich ausfielen. Das Ergebnis bestand in der Berechnung von 3D-Objektkoordinaten unter Einbeziehung der Messmarken. Abbildung 5.13 zeigt Trajektorien für ausgewählte Objektpunkte. Die Objektpunkte konnten bei einer separaten, unabhängigen Auswertung der einzelnen Laststufen mit einer Standardabweichung von 0,1–0,01 mm bestimmt werden.

5.3.6 Photogrammetrische Dehnungsmessung zur Kalibrierung von FBG-Sensoren

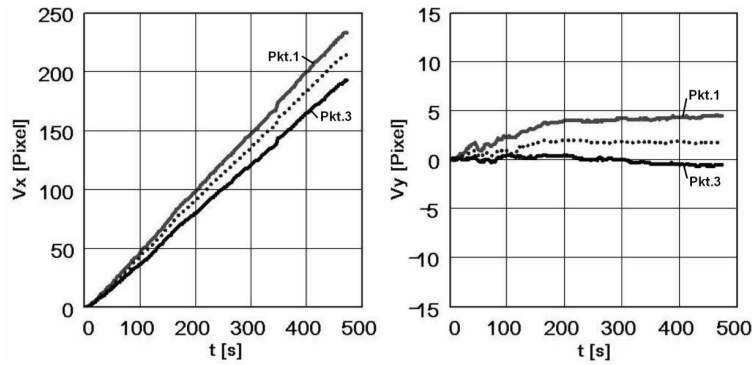
Die photogrammetrische Dehnungsmessung zur Kalibrierung von *Faser-Bragg-Gitter-Sensoren* (FBG-Sensoren) wurde im Sonderforschungsbereich 528 für das Teilprojekt A2 vorgenommen [92]. Bei den Zugversuchen mit kontinuierlicher Laststeigerung wurde der belastungsabhängige Dehnungsverlauf mit zwei unterschiedlichen Messverfahren, der photogrammetrischen Dehnungsmessung und der Dehnungsmessung mit FBG-Sensoren, erfasst. Als Referenzmessung zur Kalibrierung von FBG-Sensoren dient die photogrammetrische Dehnungsmessung. Entsprechend der vorgestellten Konzeption in Abschnitt 5.1 (S. 69) wurde aufgrund des vorgegebenen Versuchsaufbaues und der für die



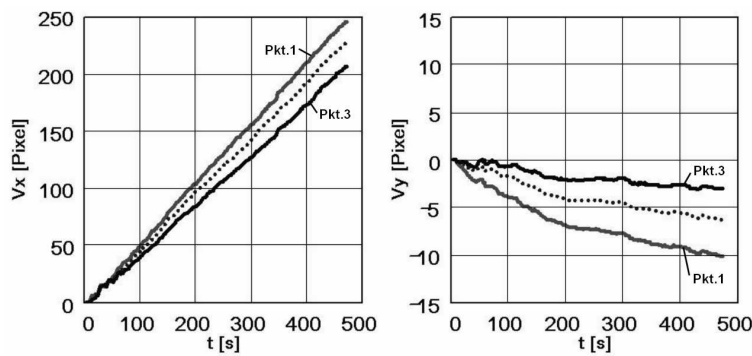
Abbildung 5.14: Photogrammetrische Dehnungsmessung zur Kalibrierung von FBG-Sensoren unter Verwendung von Spezialspiegeln

Dehnungsmessung geforderten Messgenauigkeit von 0,01% der Einsatz der Spiegelphotogrammetrie vorgesehen. Der Einsatz von Spezialspiegeln diente zur Feststellung von möglichen 3D-Bewegungen, die durch den vorliegenden Versuchsaufbau nicht ausgeschlossen werden konnten. Den gewählten Messaufbau zeigt Abbildung 5.14.

Die in Abbildung 5.14 nur schwer erkennbare Faser stellte auch in der Planungsphase durch ihren geringen Durchmesser (ca. 100 μm) und die Möglichkeit, dass sie sich während des Versuches verdreht, ein Problem für die photogrammetrische Dehnungsmessung dar. Der Einsatz von klassischen Messmarken erwies sich aufgrund der Randbedingungen als sehr problematisch, worauf dünne Hülsen ausgewählt wurden, die auf die Faser geschoben und an einer Seite befestigt wurden. Pro Faser wurden 2 Messintervalle durch 3 Hülsen realisiert. Dem Vorteil der nun rotationsinvarianten einzumessenden Merkmale (Hülsen) stand die geringe Größe und ein sich ändernder Hintergrund (beim Versuch) nachteilig gegenüber. Ein Zwischenergebnis der photogrammetrischen Messung – die gemessenen Relativverschiebungen im Bildraum – zeigt Abbildung 5.15. Gegenüber den geringen Dehnungen, die in den Messintervallen zu erfassen waren, ergaben sich durch den Versuchsaufbau relativ große Gesamtverschiebungen. Im Verlauf des Zugversuches wurden 3D-Bewegungen festgestellt, die auf den Versuchsaufbau zurückzuführen sind. Ein Vergleich (SFB 528, Teilprojekt A2) der Messwerte des FBG-Sensors und der Photogrammetrie zeigt bis ca. 1% Dehnung eine gute Übereinstimmung (Abb. 5.16). Ab 1% Dehnung wurde deutlich, dass mit dem FBG-Sensor nicht der gesamte Dehnungsverlauf bis 5% erfasst werden kann. Die belastungsabhängigen diskreten Einzelmessungen im Zusammenhang mit dem linearen Dehnungsverlauf weisen Standardabweichungen von 0,02 bis 0,01 Pixel auf.



(a) Spiegel 1



(b) Spiegel 2

Abbildung 5.15: Zwischenergebnisse der photogrammetrischen Dehnungsmessung [77]

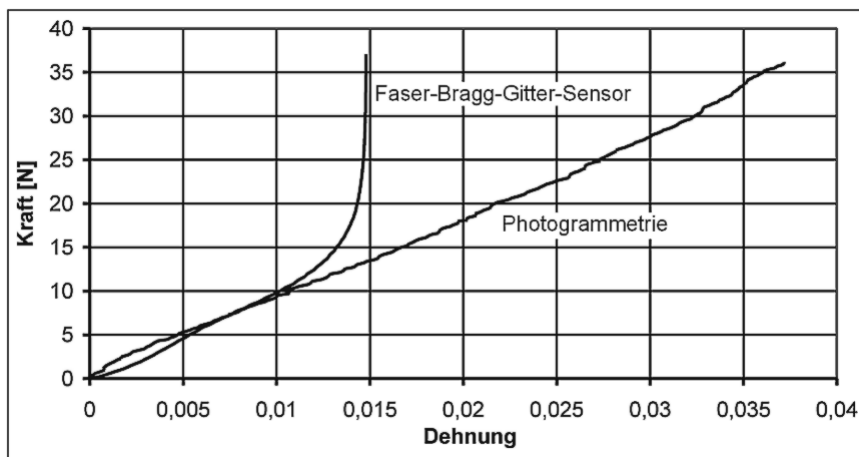


Abbildung 5.16: Vergleich der mit Faser-Bragg-Gittern und Photogrammetrie ermittelten Dehnungen

5.3.7 Verformungs- und Rissmessungen bei Zug- und Schubversuchen an textilverstärkten Betonproben

Im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 528 erfolgten zahlreiche Versuche an textilbewehrten bzw. -verstärkten Betonprobekörpern. In diesem Zusammenhang bestand besonderes Interesse an einer qualitativen und quantitativen Erfassung der Verformungs-, Riss- und Schädigungsentwicklung während der Versuche. Diese beziehen sich beispielsweise auf ein- und zweiachsiges Zugversuche textilbewehrter Betonproben (Teilprojekt B1) und auf Schubversuche an textilverstärkten Betonproben (Teilprojekt C1).

Zur Untersuchung der Einsatzmöglichkeiten erfolgten im Sonderforschungsbereich 528 umfangreiche Untersuchungen. Diese bezogen sich in einem ersten Schritt auf die photogrammetrische Erfassung der Verformungs- und Rissentwicklung (Risslage und -breite). Zielstellung war dabei die Klärung der Einsatzgrenzen (Messgenauigkeit, min. Rissbreite usw.) sowie die Auswahl und Entwicklung von Algorithmen bzw. Modulen, die in effizienter Weise die vorgenannten Messaufgaben ermöglichen. Die Ergebnisse einer 3D-Messung veranschaulichen am besten die zu beachtenden Einflüsse. Abbildung 5.17 zeigt das Referenzbildpaar einer Konvergentenaufnahme. Der konkrete Messbereich wurde durch die Verwendung eines Bezugssystems (Abb. 5.17) auf $10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ festgelegt. Der Probekörper wurde – aufgrund der z. T. sehr geringen Kontraste der Objektoberfläche – auf der Vorder- und der Rückseite jeweils zur Hälfte mit einer künstlichen Oberflächenmarkierung versehen, die i. d. R. zu einer Steigerung der Messgenauigkeit bei der Bildzuordnung homologer Bildbereiche führt (Abschn. 4.3.2, S. 34).



Abbildung 5.17: Zugversuch an einer textilbewehrten Betonprobe (Sonderforschungsbereich 528 Teilprojekt B1)

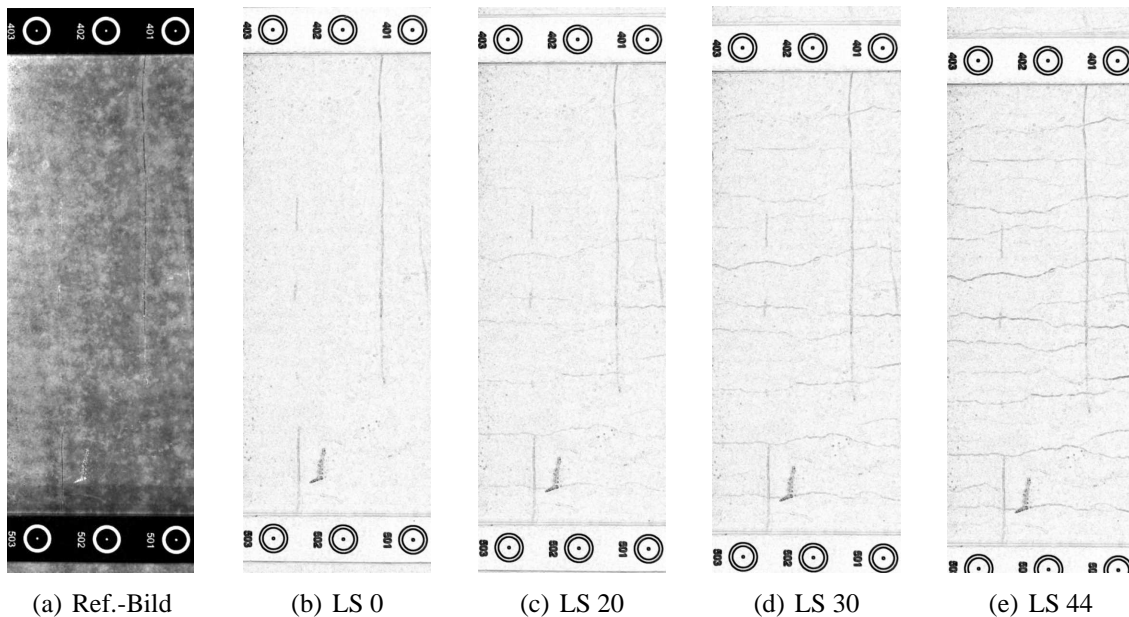


Abbildung 5.18: Flächige Bestimmung der Risslage für ausgewählte Laststufen und Bildausschnitt mittels Verfahren der digitalen Bildverarbeitung

Die Hälfte mit der natürlichen Oberflächenstruktur bietet gegenüber dem verwendeten Zufallsmuster für die nachfolgend erläuterte (digitale) Risskartierung deutlich bessere Ausgangsbedingungen. In der Planungsphase wurde die erreichbare Messgenauigkeit bei den vorliegenden Abbildungsverhältnissen auf ca. $1,5 \mu\text{m}$ (ca. 0,02 Pixel) geschätzt.

Die photogrammetrische Erfassung der Verformungs- und Rissentwicklung kann durch verschiedene Vorgehensweisen realisiert werden. Untersuchungen zeigen, dass zur Bestimmung der Lage von Rissen (Risskartierung) Verfahren der Bildverarbeitung (z. B. Faltungsoperatoren) vorteilhaft eingesetzt werden können (Abb. 5.18), sofern diese im Bild mindestens durch ein Pixel sichtbar werden [89, 92].

Für eine Rissbreitenbestimmung sehr kleiner Risse, die nur durch einen bzw. wenige Pixel abgebildet sind, ist die vorgenannte Vorgehensweise i. d. R. nicht geeignet. Hierfür erscheint eine Analyse der photogrammetrisch ermittelten Relativverschiebungen sinnvoll, die während eines Belastungsversuches erfasst werden. In Abbildung 5.19 sind die Anteile der 3D-Relativverschiebung (dX , dY und dZ) für eine ausgewählte Laststufe mit ausgeprägtem Rissbild und in einem vorgegebenen Profil in Belastungsrichtung (Zugrichtung) dargestellt. Durch die Relativverschiebung dZ lässt sich die Lage und Breite von Rissen bestimmen. In Bezug auf die laufenden Untersuchungen zeigte sich, dass bei einem erfassten Messbereich von $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ mit einer Kodak Megaplug 4.2i Rissbreiten ab ca. $5 \mu\text{m}$ erfasst werden können.

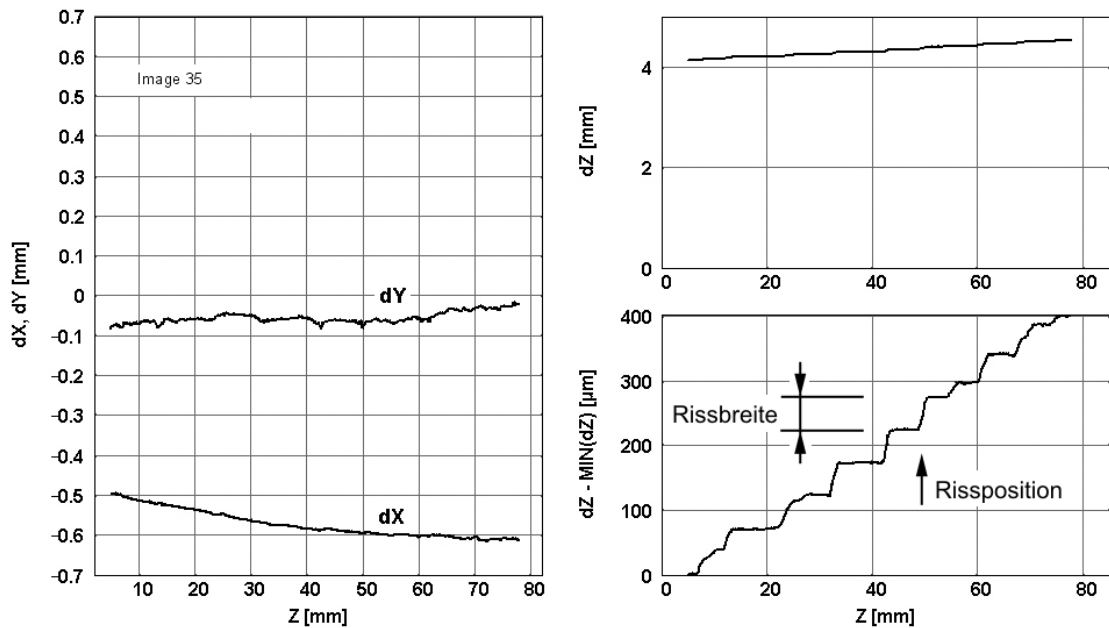


Abbildung 5.19: Ergebnis einer photogrammetrischen 3D-Messung für 1 Profil (ca. 1600 Messpunkte in Zugrichtung) bei einem Zugversuch einer textilbewehrten Betonprobe im Sonderforschungsbereich 528 (Teilprojekt B1)

Im Hinblick auf eine optimale (effiziente) Aufnahmekonfiguration zeigen die ermittelten Relativverschiebungen, dass sich der Dehnkörper im Raum bewegt (Starrkörperbewegungen), aber keine signifikanten 3D-Deformationen aufweist. Die Starrkörperbewegungen sind durch die Lasteinleitung bedingt und können kaum vermieden werden. Dass keine 3D-Deformationen des Objektes auftreten, entspricht den Erwartungen, da sich bei den Dehnkörpern durch Rissbildung *Gelenke* ausbilden, die dafür sorgen, dass die Dehnkörperoberflächen zwischen den zwei Zugpunkten in gespannter Form weitestgehend ebene Oberflächen bilden. Problematisch kann sich auswirken, wenn beispielsweise die Proben im ungerissenen Referenzzustand eine gekrümmte Form aufweisen. Hier können sich bei einer 2.5D-Objekterfassung durch das Geradeziehen der Probe fehlerhafte Messungen ergeben. Auf diesen Effekt muss besonders geachtet werden. Für den Fall, dass eine 2.5D-Objekterfassung (Abschn. 4.4.2.1) möglich ist, kann beispielsweise für den beschriebenen Zugversuch durch den Einsatz von zwei Kameras eine effiziente Erfassung des gesamten Probekörpers (Vorder- und Rückseite) erfolgen.

Aus der in Abbildung 5.19 gezeigten Risscharakteristik kann die prinzipielle Vorgehensweise für die **Rissdetektion in Verschiebungsprofilen** abgeleitet werden. Diese basiert im Wesentlichen auf der Analyse der ortsbezogenen ersten und ggf. auch zweiten Ablei-

tung der Relativverschiebungen und beinhaltet die in Tabelle 5.3 beschriebenen Bearbeitungsschritte.

Nachfolgendes Beispiel soll die prinzipielle Vorgehensweise für die Rissdetektion in Verschiebungsprofilen demonstrieren.

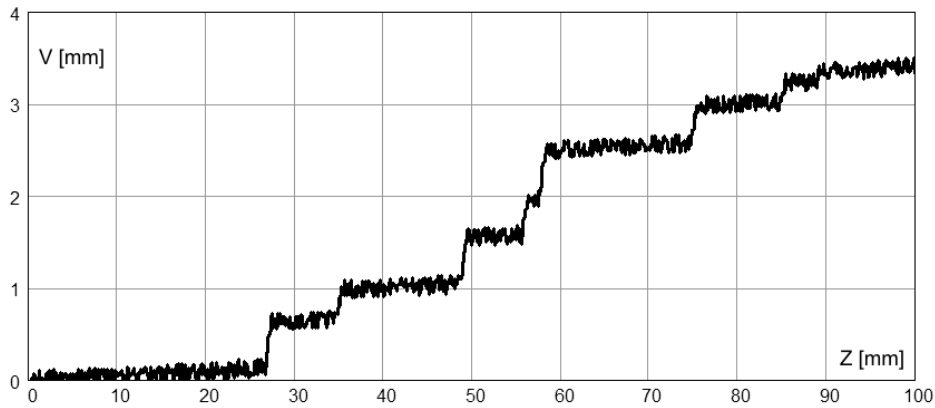
Die folgenden Betrachtungen gehen von photogrammetrisch ermittelten (lastabhängigen) Verschiebungsdaten eines Messprofils aus. Zur Demonstration und zu Testzwecken wurden verschiedene synthetische Messprofildaten erzeugt. Abbildung 5.20 zeigt die Ausgangsdaten eines Messprofils mit einer Länge von 100 mm bei der Laststufe $L_i = 80$. Insgesamt wurden 8 Risse in unterschiedlichen Abständen (Rissabständen) für 90 Laststufen erzeugt. Die Relativverschiebungen wurden – praxisnah – mit einem zufälligen Fehler versehen, der in Abhängigkeit der jeweiligen Messungen unterschiedlich ausfallen kann. Die Risse entstehen lastabhängig und haben keine einheitliche Rissbreite. Die in Abbildung 5.20(b) gezeigten Relativverschiebungen sind entsprechend Bearbeitungsschritt 2 aufbereitet und zeigen einen hinreichend glatten Verlauf, ohne dass dabei die Risscharakteristik beeinflusst wurde. Ausgehend von den in Abbildung 5.20(b) aufbereiteten Daten erfolgt entsprechend Analyseschritt 3 die Berechnung der ersten bzw. zweiten Ableitung der Relativverschiebungen nach dem Weg. Für das gewählte Beispiel wurden sowohl für die Ausgangsdaten in Abbildung 5.20 als auch für die aufbereiteten Daten in Abbildung 5.20(b) die erste und die zweite Ableitung entsprechend berechnet. Abbildung 5.20(c) zeigt als Beispiel das Berechnungsergebnis für die erste Ableitung unter Einbeziehung der aufbereiteten Relativverschiebungen. Im Anhang (S. 107) wurde eine Auswahl von Berechnungsergebnissen zusammengestellt, die für einen Vergleich usw. herangezogen werden können. Diese zeigen beispielsweise den Einfluss des Bereichsparameters B , der bei der Berechnung der Ableitung mittels Differenzoperator den einbezogenen Bereich bzw. den Abstand zwischen den diskreten Relativverschiebungen entsprechend (5.1) angibt.

$$\frac{dV}{dZ} = \frac{V(Z + B/2) - V(Z - B/2)}{B} \quad (5.1)$$

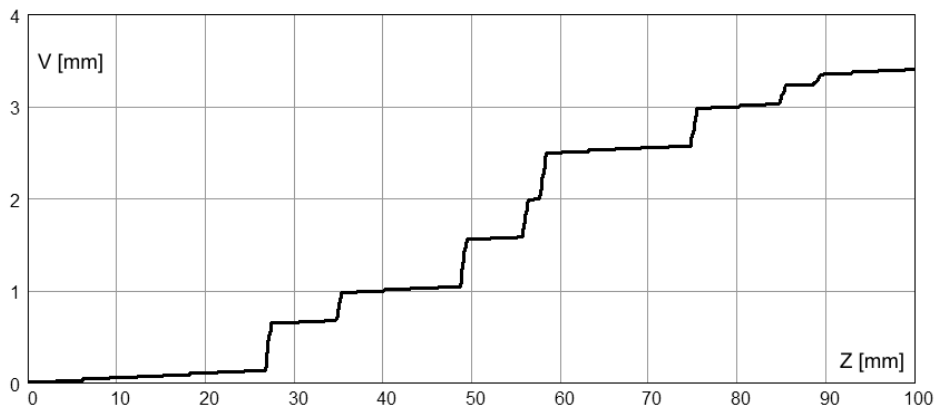
Ein Vergleich der im Anhang (S. 107 ff.) dargestellten Ergebnisse lässt den Einfluss des Bereichsparameters B in Bezug auf den bereits angesprochenen minimalen Rissabstand erkennen. Prinzipiell ergaben die durchgeführten Rissanalysen, dass große Bereichsparameter zu robusten Auswerteprozessen führen. Kleine Bereichsparameter (B) bieten zwar den theoretischen Vorteil einer hohen Auflösung in Bezug auf die Rissdetektion, führen aber diesbezüglich oftmals auch zu Fehlern. Zum aktuellen Zeitpunkt werden bei den Rissanalysen entsprechende Parameter direkt vorgegeben, die i. d. R. aufgabenbezogen getestet werden. Eine algorithmenbezogene, automatisierte Parameterfestlegung erscheint in vielen Fällen umsetzbar und wird in aktuellen Untersuchungen im Teilprojekt Y1 des Sonderforschungsbereichs 528 angestrebt.

lfd. Nr.	Beschreibung
1.	<p>Datenbereitstellung (Profilbezogene Relativverschiebungen)</p> <p>Bereitstellung der Relativverschiebungen für ein Messprofil pro Laststufe. Zur Vereinfachung sind geeignete Objektkoordinatentransformationen vorzunehmen, die das Profil auf eine Koordinatenachse ausrichten, die sich an der Belastungsrichtung orientiert – falls dies möglich ist. Im Folgenden wird von dem Fall eines einaxialen Zug- bzw. Schubversuches ausgegangen, bei dem eine entsprechende Festlegung problemlos möglich ist.</p>
2.	<p>Datenvorverarbeitung</p> <p>Die Vorverarbeitung der lastabhängigen Relativverschiebungen soll im Bereich der jeweiligen Risspositionen, aber auch in ungerissenen Bereichen zu einem hinreichend glatten Verlauf führen, ohne dass dabei der wesentliche Informationsgehalt (Risscharakteristik) beeinträchtigt wird. Dies kann beispielsweise auf der Grundlage verschiedener Mittelwertberechnungen erfolgen, aber auch im direkten Zusammenhang mit Faltungsoperatoren, die im nächsten Analyseschritt zum Einsatz kommen können. Die Art und Weise der Vorverarbeitung hat i. d. R. einen entscheidenden Einfluss auf den nachfolgenden Analyseschritt.</p>
3.	<p>Kennzeichnung der charakteristischen Sprünge in den Relativverschiebungen</p> <p>Kennzeichnung der charakteristischen Sprünge (Rissposition) in den Relativverschiebungen, z. B. durch Differenz- bzw. Faltungsoperatoren. In Abhängigkeit der jeweiligen Rissituation müssen die einbezogenen Operatoren aufgabenbezogen angepasst werden. In diesem Zusammenhang können verschiedene Parameter Bedeutung erlangen, z. B. der minimale Abstand zwischen zwei Rissen und die Größe der Operationsbereiche. Die minimale Rissbreite stellt einen ortsabhängigen Parameter dar, der festlegt, ab wann zwei nebeneinander liegende Risse erkannt werden. Die Operationsbereiche stellen beispielsweise den einbezogenen Objektbereich bei dem Einsatz von Differenz- und Faltungsoperatoren dar. Generell gilt: Je kleiner der Operationsbereich gewählt wird, umso empfindlicher wird die Rissdetektion – auch in Bezug auf eine fehlerhafte Rissdetektion. Dieses Verhalten kann zwar stark durch die in Schritt 2 vorgenommene Datenvorverarbeitung (Datenglättung) beeinflusst werden, es muss allerdings beachtet werden, dass eine starke Datenglättung die Erfassung kleiner Risse erschwert bzw. verhindert und somit einen gegenläufigen Effekt bewirken kann. Daraus folgt, dass die einzelnen Prozesse aufeinander abgestimmt werden müssen.</p>
4.	<p>Ermittlung charakteristischer Rissparameter (Rissentstehung, Rissposition und -breite)</p> <p>Lastabhängige Berechnung der Rissposition und -breite, einschließlich der Erstrissdetektion (Rissentstehung) unter Einbeziehung der Daten aus dem 3. Bearbeitungsschritt. Die Auswahl geeigneter Methoden hängt von diesen Daten ab. Prinzipiell lassen sich viele in der digitalen Bildverarbeitung und Photogrammetrie bekannten Verfahren zur Erfassung ausgeprägter Merkmale anwenden, beispielsweise die merkmals- und intensitätsbasierten Analyse- und Auswertemethoden zur Erfassung punktförmiger Merkmale. Die Sprung-Charakteristik in den Relativverschiebungen legt auch den Einsatz bekannter Verfahren für die Kantendetektion nahe.</p>

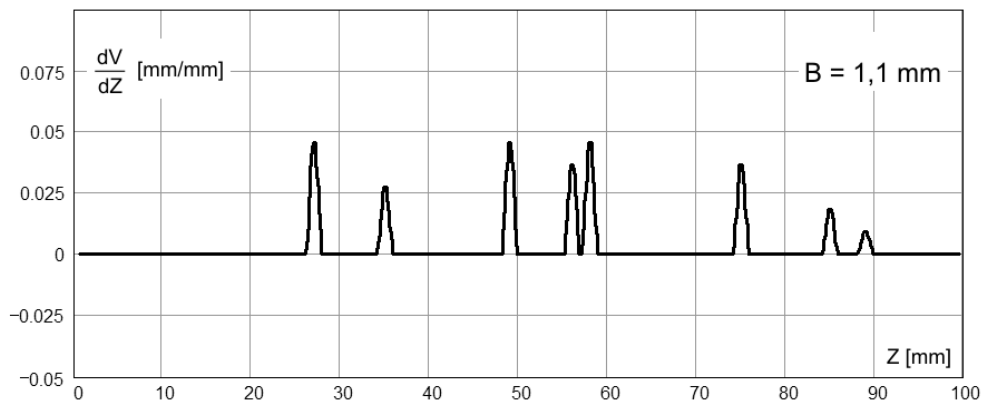
Tabelle 5.3: Rissdetektion in Verschiebungsprofilen (Bearbeitungsschritte)



(a) Relativverschiebungen (Schritt 1)



(b) Aufbereitete Relativverschiebungen (Schritt 2)



(c) 1. Ableitung mittels Differenzoperator (Schritt 3)

Abbildung 5.20: Ergebnisse der ersten Bearbeitungsschritte (1–3) bei einer Rissanalyse eines synthetisch erzeugten Messprofils (Laststufe $L_i = 80$)

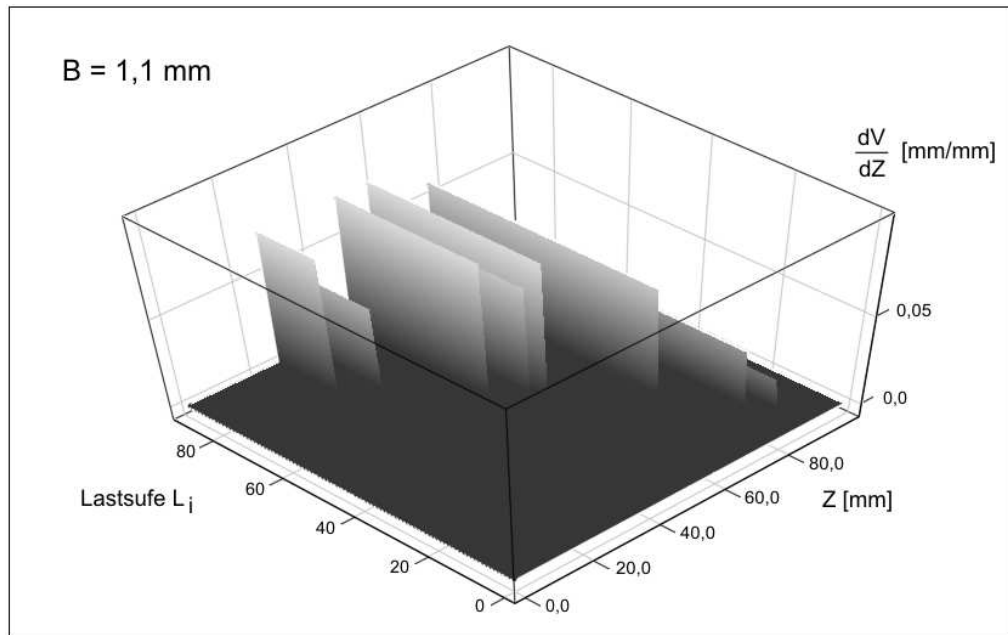


Abbildung 5.21: Rissanalyse für alle Laststufen unter Einbeziehung der Daten aus Analyseschritt 3 in 3D-Darstellung (Schritt 4).

Die bislang betrachteten Ergebnisse bezogen sich auf eine Laststufe. In einem nächsten Schritt wird deshalb die Zusammenführung der einzelnen Ergebnisse bzw. Zwischenergebnisse erforderlich. Während der Untersuchungen hat sich die Strategie als vorteilhaft erwiesen, bei der alle einzelnen Zwischenergebnisse aus Analyseschritt 3 entsprechend Abbildung 5.21 zusammengeführt werden. Letztlich stellt die in Abbildung 5.21 gezeigte Grafik eine lastabhängige Aneinanderreihung der einzelnen Profildaten dar – z. B. der ersten oder der zweiten Ableitung. Diese Vorgehensweise ermöglicht das Erkennen und Korrigieren ausgefallener oder fehlerhafter Ergebnisdaten einzelner Laststufen (Lastbilder). Eine andere – besser verständliche – Form der grafischen Darstellung des gleichen Sachverhaltes zeigt Abbildung 5.22.

Unter Verwendung der in Abbildung 5.21 und 5.22 dargestellten Daten erfolgt die lastabhängige Ermittlung des ersten Auftretens der jeweiligen Risse (L_w) und deren Position Z_w . Die Rissposition bezieht sich in den gezeigten grafischen Darstellungen auf die Position der Erstdetektion (L_w). Nach Ermittlung der vorgenannten rissbezogenen Parameter erfolgt in einem nächsten Schritt die Rissbreitenermittlung. Die Bestimmung der Rissbreite w kann auf Grundlage der ermittelten Relativverschiebungen der entsprechenden Rissufer erfolgen. Dabei ist zu beachten, dass der entstandene Riss bei der Verschiebungsanalyse – durch die veränderten lokalen Oberflächenstrukturen/-texturen – im

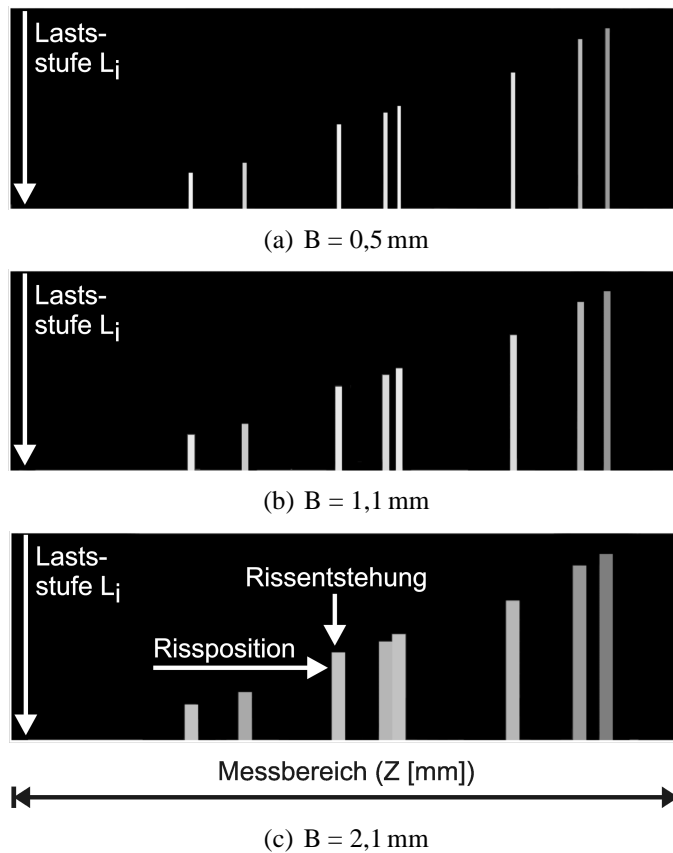


Abbildung 5.22: Rissanalyse (Rissentstehung und -position) für alle Laststufen unter Einbeziehung der Daten aus Analyseschritt 3.

Rissbereich zwangsläufig einen Fehler verursacht. Der Bereich ist einerseits von dem Riss selbst abhängig, andererseits aber auch von den ortsabhängigen Parametern der Bildzuordnungsverfahren (z. B. durch die Patchgröße). Unter Beachtung der aufgabenbezogenen Vorgaben können in einem entsprechenden Abstand dZ_w von der ermittelten Rissposition Z_w (i. d. R. die Rissmitte) die Rissbreiten (w) entsprechend (5.2) einbezogen werden.

$$w_i = |V(Z_w + dZ_w) - V(Z_w - dZ_w)| \quad (5.2)$$

In Abhängigkeit der jeweiligen Versuchsobjekte usw. können aber auch andere Positionen für die Rissbreitenermittlung genutzt werden. Ein Beispiel dafür stellen die im Folgenden vorgestellten Rissmessungen im Teilprojekt C1 des Sonderforschungsbereichs 528 dar. Dort wurde beispielsweise – unter Vernachlässigung der Betondehnung in den ungerissenen Bereichen – jeweils die Mitte dieser Abschnitte verwendet, was in den überwie-

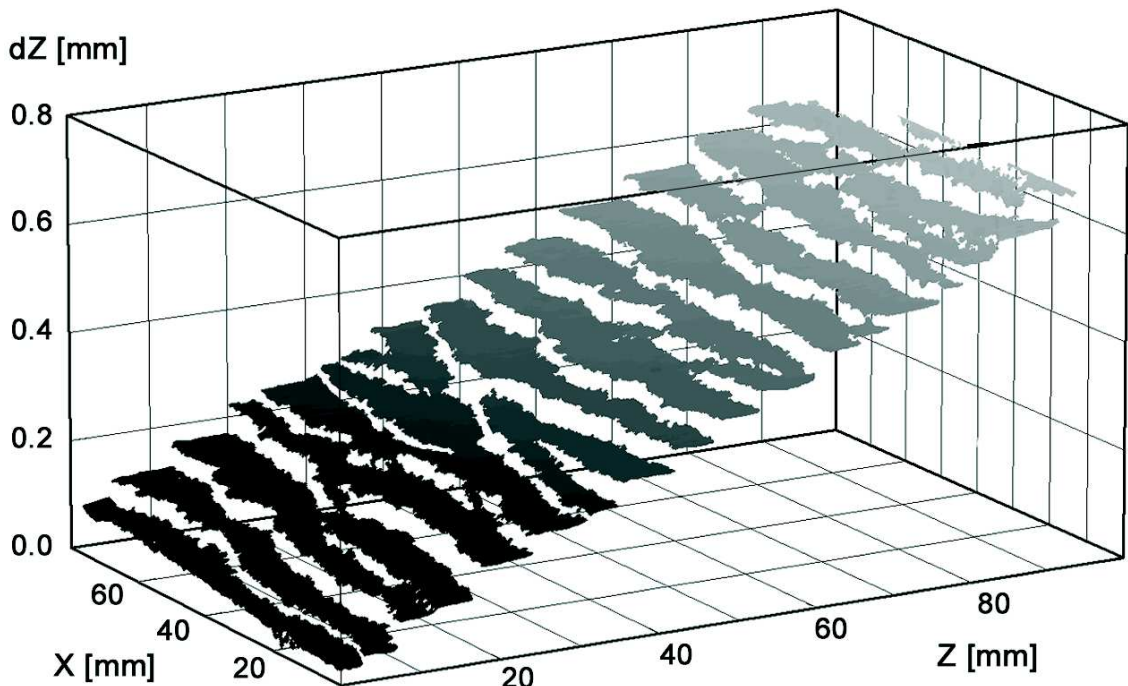


Abbildung 5.23: Flächenhafte Verschiebungsanalyse (ca. 1.8 Mio. Messpunkte)

genden Fällen zu einer eindeutigen und robusten Rissbreitenermittlung führte.

Mit der Ermittlung der Rissbreite sind alle Rissparameter bestimmt und der Rissanalyseprozess für Messprofile ist abgeschlossen.

Bei praktischen Messungen konnte gezeigt werden, dass Objektverformungen mit einer Genauigkeit bis $1 \mu\text{m}$ und Risse mit einer Genauigkeit von ca. 3 bis $5 \mu\text{m}$ kontinuierlich erfasst werden können. Im Zuge der vorgenannten Untersuchungen wurde auch deutlich, dass eine Erweiterung der Profilmessung hin zur Flächenmessung bei der Erfassung kleiner Risse und Rissverzweigungen die Qualität bzw. Sicherheit der Rissdetektion verbessert (Abb. 5.23). Problematisch ist der damit verbundene Aufwand, der für den betrachteten Messbereich quadratisch ansteigt. Typische Sequenzen bis 200 Lastbilder pro Kamera erfordern für einen praktischen Einsatz optimierte Auswerteroutinen. Die dafür entwickelten bzw. optimierten Verfahren wurden in Abschnitt 4.5.2.2 (S. 52) vorgestellt und ermöglichten im Zusammenhang mit der Verschiebungsanalyse für das in (Abb. 5.23) gezeigte Verschiebungsfeld die Berechnung von ca. 60.000 Punkten/s (Dual Xeon, 2,4 GHz, 2 GB RAM).

Im Zusammenhang mit den durchgeführten photogrammetrischen Messungen, die für das Teilprojekt C1 im Sonderforschungsbereich 528 durchgeführt wurden, soll im Fol-

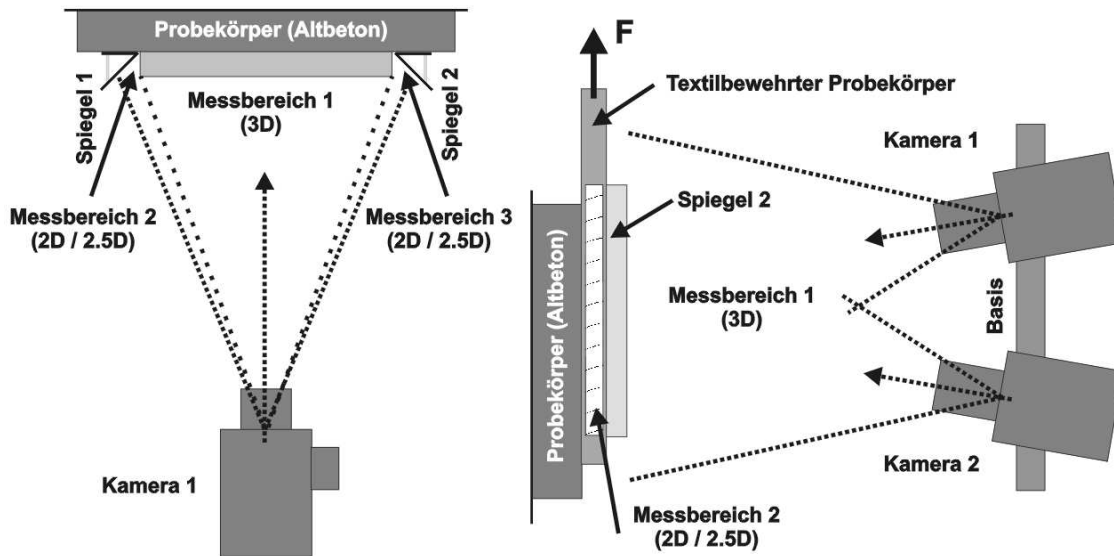


Abbildung 5.24: Photogrammetrische Verformungs- und Rissmessungen bei Schubversuchen textilverstärkter Betonprobekörper (SFB 528, C1)

genden auf Besonderheiten bei der Versuchsdurchführung und Auswertung eingegangen werden. Diese beziehen sich auf spezielle Aufnahmekonfigurationen und erläutern den praktischen Einsatz der vorgenannten Rissanalyse. Abbildung 5.24 zeigt den gewählten Versuchsaufbau, der für die photogrammetrische Erfassung der Verformungs-, Riss- und Schädigungsentwicklung textilverstärkter Probekörper bei Schubversuchen entwickelt wurde [69, 73]. Abbildung 5.25 zeigt ein Messbild (Kamera 1) mit der in Abbildung 5.24 gewählten Messkonfiguration. In dem gezeigten Messbild sind die Messbereiche 1 bis 3 erkennbar, wobei die Messbereiche 2 und 3 über seitlich angebrachte Spiegel erfasst werden. Die Seiten des textilbewehrten Betonprobekörpers sind für die Bewertung des lastabhängigen Verbundverhaltens von besonderem Interesse. Da diese während des Versuches i. d. R. eben bleiben, bietet sich eine photogrammetrische 2D- bzw. 2.5D-Objekterfassung entsprechend Abschnitt 4.4.2 (S. 43) an. Der Messbereich 1 wird zur Absicherung der photogrammetrischen Messung in 3D erfasst. Dies wurde erforderlich, da nicht selten die abgelösten Teile der textilbewehrten Betonprobe eine 3D-Objektbewegung bzw. -verformung verursachten.

Die ursprüngliche Messaufgabe sah die Erfassung von Verformungen bzw. Dehnungen in Intervallen konstanter Länge vor. Abbildung 5.25 zeigt in der Mitte – zwischen den Dehnmessstreifen (DMS) – eine Reihe von Messmarken, die die vorgegebenen festen Intervalle darstellen. Die in Abbildung 5.25 sichtbaren Dehnmessstreifen wurden zur Messung sehr kleiner Dehnungen (10^{-6}) zu Versuchsbeginn einbezogen, die mit der photo-

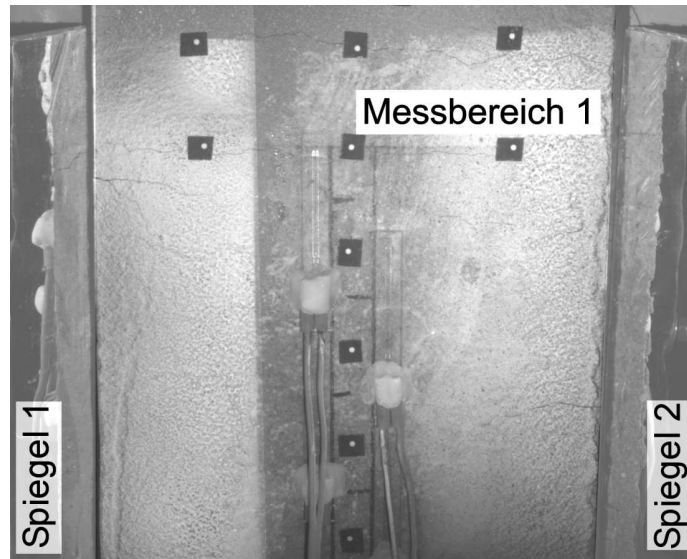


Abbildung 5.25: Messbereich für die photogrammetrische Erfassung der Verformungs-, Riss- und Schädigungsentwicklung bei Schubversuchen im Teilprojekt C1 des Sonderforschungsbereichs 528

grammetrischen Messung nicht aufgelöst werden können. Zusätzlich wurden die Randbereiche für eine flächige Rissanalyse mit einer künstlichen Oberflächenmarkierung (Abschn. 4.3.2, S. 34) versehen.

Ausgehend von der anfänglichen Messaufgabe, die eine Erfassung von Verformungen bzw. Dehnungen in Intervallen konstanter Länge (für vorgegebene Profile in Zugrichtung) vorsah, ergab die bauspezifische Auswertung keine brauchbaren Ergebnisse [69]. Abbildung 5.26 zeigt ein Beispiel für die photogrammetrische Dehnungsmessung in festen Intervallen. Mögliche Fehlerursachen bei der Erfassung durch Messmarken vorgegebener Intervalle konstanter Länge sind nachfolgend zusammengefasst:

1. In den Intervallen fester Länge können (wie sich gezeigt hat) mehrere Risse entstehen.
2. Risse können direkt unterhalb der angebrachten Messmarken verlaufen. Die Messmarke haftet an einem Rissufer bzw. wird undefiniert verschoben. Aufgrund der Tatsache, dass die Messmarken gegenüber den zu erfassenden Rissbreiten deutlich größer sind, entstehen in den Intervallgrenzbereichen für die Messung kritische Zonen, die in Abhängigkeit der Messmarkengröße von 2–3 mm und einer festen Intervalllänge von 20 mm ca. 15 % des Intervallbereiches ausfüllen.
3. Durch das Entstehen von Rissverzweigungen in den fest definierten Profilen entstehen Messabweichungen, die nachträglich nicht korrigiert werden können.

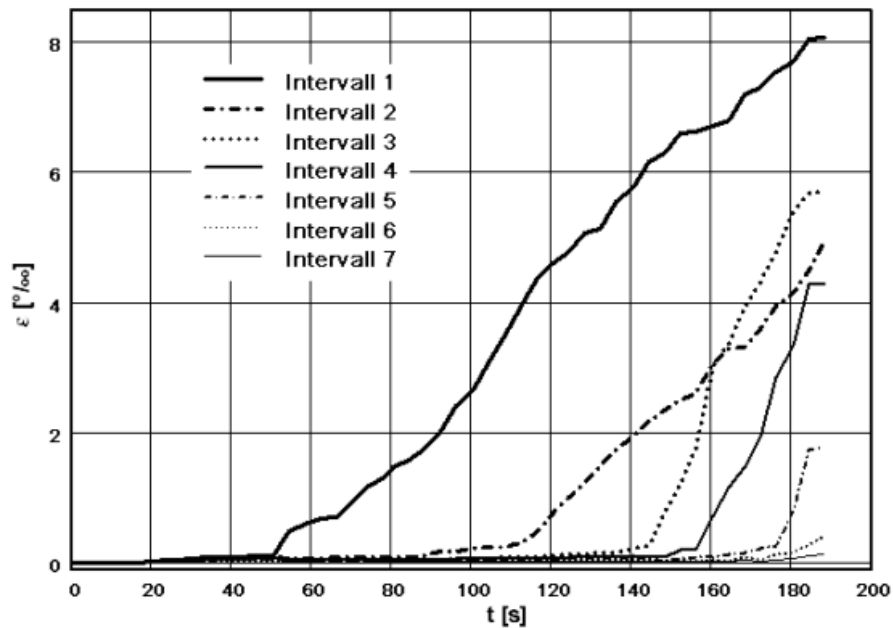


Abbildung 5.26: Photogrammetrische Dehnungsmessung in festen Intervallen (Teilprojekt C1, Sonderforschungsbereich 528)

Die vorgenannten Fehlerquellen haben zu einer neuen Messkonzeption mit dynamischen Intervallen in Abhängigkeit der jeweiligen Rissituation geführt.

Verformungs-/Dehnungsmessung mit dynamischer Intervallanpassung

Die neue Konzeption sieht eine Auswertung beliebig vorgegebener Profile (innerhalb des Verbundbereiches) vor, die nach der Messung auf der Grundlage des berechneten Rissbildes festgelegt werden (Abb. 5.27). Momentan erfolgt die Profilverfestlegung interaktiv (eine Automatisierung bzgl. einer sicheren Profilerfassung bzw. eine Ausweitung auf den gesamten Messbereich ist für Phase 3 vorgesehen). Ziel ist dabei, Profile zu finden, die außerhalb gestörter Bereiche und Rissverzweigungen liegen. Für die nachträglich vorgegebenen Profile werden nun auf Basis einer Verformungsmessung Risse detektiert, die sich als Sprünge in den Relativverschiebungen zeigen. Die jeweiligen Risspositionen definieren lastabhängig Intervallgrenzen. Abbildung 5.28 zeigt das Zwischenergebnis einer Messung bzgl. der lastabhängigen Rissdetektion. Aufgrund von Schwierigkeiten bei der Rissdetektion, die unterschiedliche Ursachen haben, wurden robuste Algorithmen für die dynamische Intervallerkennung auf Basis der Rissentstehung entwickelt. Ursachen für die z. T. erschwerte Rissdetektion liegen einerseits in der Rissentstehung selbst

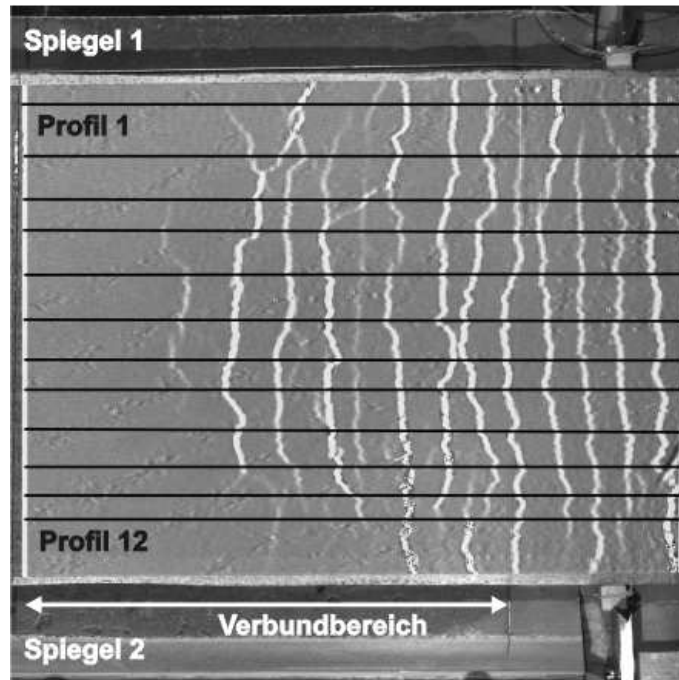


Abbildung 5.27: Ergebnis für berechnetes Rissbild mit eingetragenen Messprofilen (C1 T24-5)

(da sich in einigen Fällen Risse im Verlauf des Belastungsversuches öffnen und durch Lastumlagerung z. T. wieder schließen) und andererseits ergeben sich in einigen Fällen bei ungünstigen lokalen/globalen Messbedingungen Störungen, die Fehler bei der Verschiebungsanalyse und damit auch bei der Rissdetektion verursachen. Aufgrund dieser Randbedingungen wurde eine Vorgehensweise gewählt, die ausgehend vom Risszustand nahe des Bruchzustandes den Beginn des Risses detektiert. Für die Datenübergabe wurde in enger Zusammenarbeit mit dem Teilprojekt C1 ein Datenformat entwickelt, das eine direkte Weiterbearbeitung der Ergebnisdaten der photogrammetrischen, dynamischen Intervallmessung im Teilprojekt C1 des Sonderforschungsbereichs 528 ermöglicht.

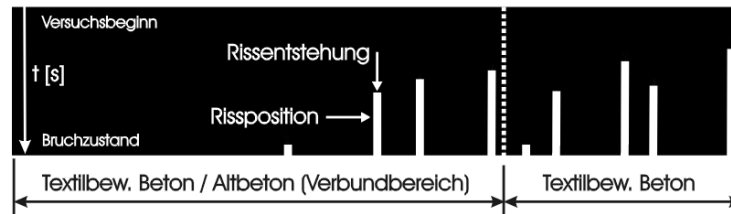


Abbildung 5.28: Lastabhängige Rissentstehung (C1 T14-1, Profil 9)

Erfassung des Bruchvorganges mittels Hochgeschwindigkeitskamera

Im Rahmen der Schubversuche im Teilprojekt C1 wurde eine Auswahl von Versuchen zusätzlich mit einer Hochgeschwindigkeitskamera aufgenommen (Abschn. 5.2.3, S. 71). Die Sequenzen umfassen bis 8000 Bilder und wurden u. a. zur Erfassung des Bruchzustandes eingesetzt. Aufgenommen wurde beispielsweise der seitliche Bereich der textilbewehrten Betonprobe zur Bestimmung der Rissentwicklung während des Bruchvorganges (Abb. 5.29).

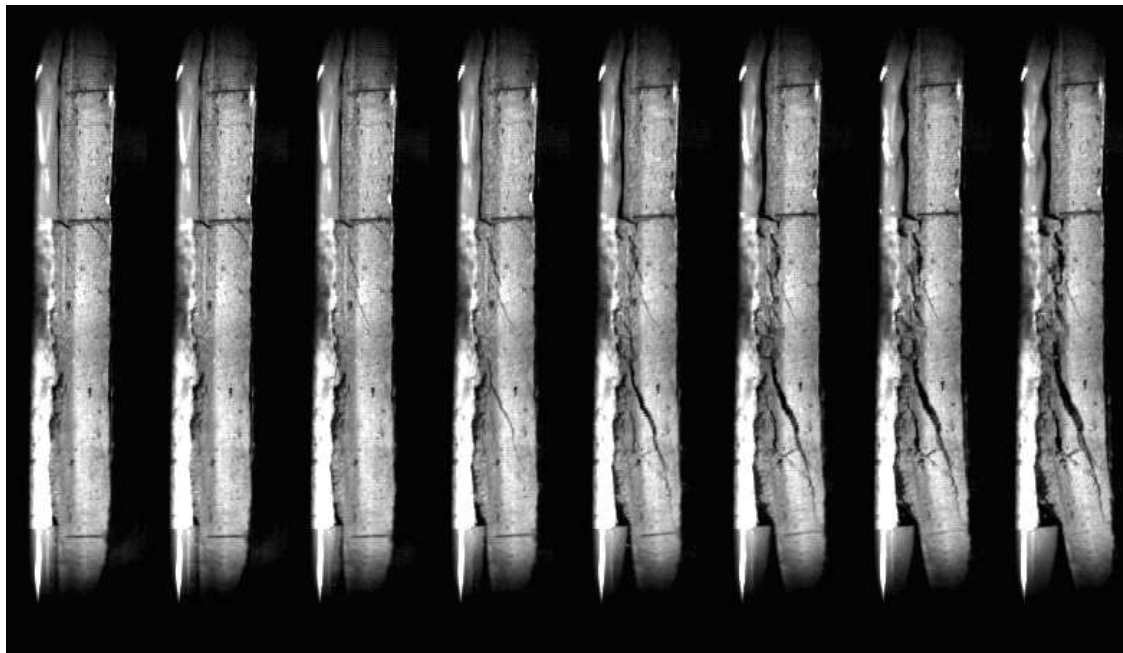


Abbildung 5.29: Brucherfassung bei einem Schubversuch einer textilverstärkten Betonprobe (SFB 528 C1) mittels Hochgeschwindigkeitskamera (2 ms, 4000 Bilder/s)

6 Zusammenfassung

Verfahren der *Digitalen Nahbereichsphotogrammetrie* ermöglichen die Erfassung der Verformungs-, Riss- und Schädigungsentwicklung für eine große Auswahl von baumechanischen Untersuchungen an Probekörpern und Baukonstruktionen.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden Methoden, Algorithmen und Module für ein modular aufgebautes photogrammetrisches Messsystem entwickelt, welches eine Basis für die Durchführung von Grundlagenuntersuchungen und vielseitigen Messaufgaben im *Bautechnischen Mess- und Versuchswesen* darstellt, die bisher in dieser Qualität und Aussagekraft nicht durchgeführt werden konnten.

Die Ergebnisse machen deutlich, dass die digitale Nahbereichsphotogrammetrie ein flexibel anwendbares Werkzeug für die Erfassung der Verformungs-, Riss- und Schädigungsentwicklung bei baumechanischen Untersuchungen darstellt. Spezielle Messaufgaben stellen im Bautechnischen Mess- und Versuchswesen oftmals sehr hohe Anforderungen an die Messgenauigkeit, die Robustheit und das Messvolumen. Sie erfordern optimierte Verfahren und führten im Zusammenhang mit der vorliegenden Arbeit zu einer Reihe von Lösungen, wie beispielsweise der 2.5D-Objekterfassung auf Basis der *Dynamischen Projektiven Transformation* oder der Objekterfassung mittels Spiegelphotogrammetrie. Im Hinblick auf die Objektsignalisierung wurde eine intensitätsbasierte Messmarke entwickelt. Diese beinhaltet besonders bei sehr hochgenauen Deformations- bzw. Dehnungsmessungen ein großes Genauigkeitspotential im Sub-Pixelbereich, das im 1/100 eines Pixels liegt.

In Bezug auf die photogrammetrischen Auswerteprozesse wurden optimierte Bildzuordnungsverfahren implementiert, die beispielsweise eine Punkteinmessung von bis zu 60.000 Punkten pro Sekunde ermöglichen und eine Grundlage für die flächenhafte Rissanalyse darstellen. In Bezug auf die qualitative und quantitative Risserfassung wurden verschiedene Verfahren entwickelt. Diese ermöglichen beispielsweise die lastabhängige Erfassung der Rissposition und -breite in Messprofilen. In einem Messbereich von 100 mm x 100 mm konnten beispielsweise Verformungen mit einer Genauigkeit bis 1 μm und Rissbreiten ab 3 μm erfasst werden.








Im Zusammenhang mit den zahlreichen anwendungsbezogenen Untersuchungen entstanden immer wieder Fragen hinsichtlich der Faktoren, die einen Einfluss auf den photogrammetrischen Messprozess im Bautechnischen Mess- und Versuchswesen ausüben. Aufgrund der zahlreichen Einflussgrößen, die als Steuer- bzw. Störgrößen eine mögliche

Wirkung auf bauspezifische photogrammetrische Messprozesse ausüben können, wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit mit der systematischen Zusammenstellung relevanter Einflussgrößen begonnen. Die Relevanz einzelner Einflussgrößen konnte durch Untersuchungen bereits bestätigt werden. Um eine ganzheitliche Bewertung aller relevanten Einflussgrößen aufgabenabhängig vornehmen zu können, wurde ein spezieller Versuchsstand entwickelt. Dieser ermöglicht eine weitestgehend vollautomatisierte systematische Untersuchung bauspezifischer photogrammetrischer Messprozesse unter definierten Versuchsbedingungen und dient dem systematischen Einsatz photogrammetrischer Verfahren im Bautechnischen Mess- und Versuchswesen hinsichtlich der Absicherung bestehender Messaufgaben, kann aber auch zu weiteren neuen und optimierten Messprozessen führen.

Anhang

A1 – Symbole für Flussdiagramme

Der Entwurf nachfolgender Flussdiagrammsymbole erfolgte in Anlehnung an die DIN-Norm 66001 bzw. ISO-Norm 5807.

-  Operation / Verarbeitung allgemein
-  Unterprogrammaufruf
-  Verzweigung
-  Daten, allgemein
-  Daten auf Schriftstück
-  Daten auf Speicher auch mit direktem Zugriff
-  Grenzstelle (Beginn oder Ende)

A2 – Rissanalyse

Die nachfolgenden vier Abbildungen 6.1 bis 6.4 zeigen eine Auswahl von Berechnungsergebnissen, die im Zusammenhang mit der Rissanalyse in Abschnitt 5.3.7 (S. 90) durchgeführt wurden.

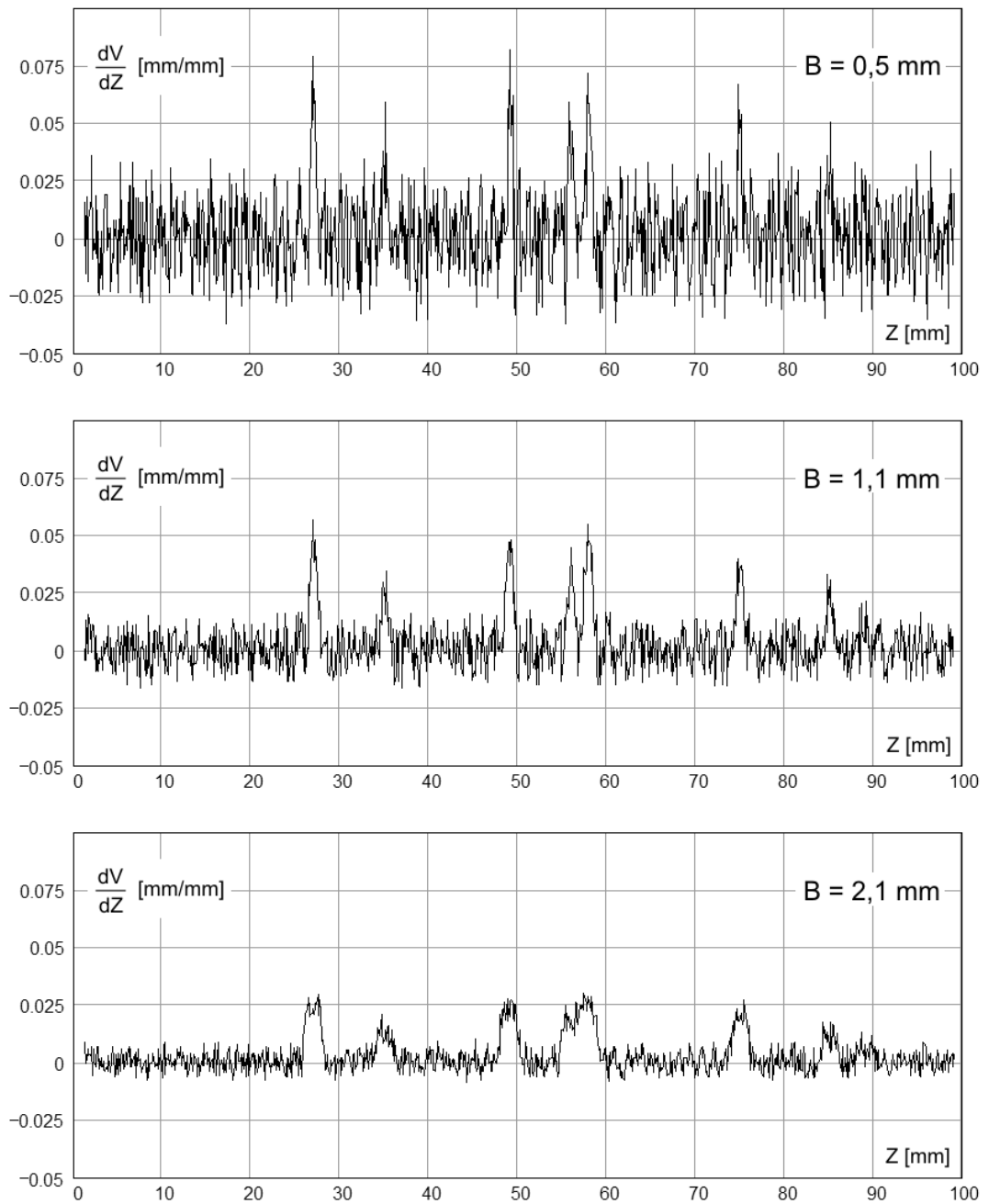


Abbildung 6.1: Rissanalyse (1. Ableitung der synthetisch erzeugten Ausgangsdaten für Laststufe $L_i = 80$)

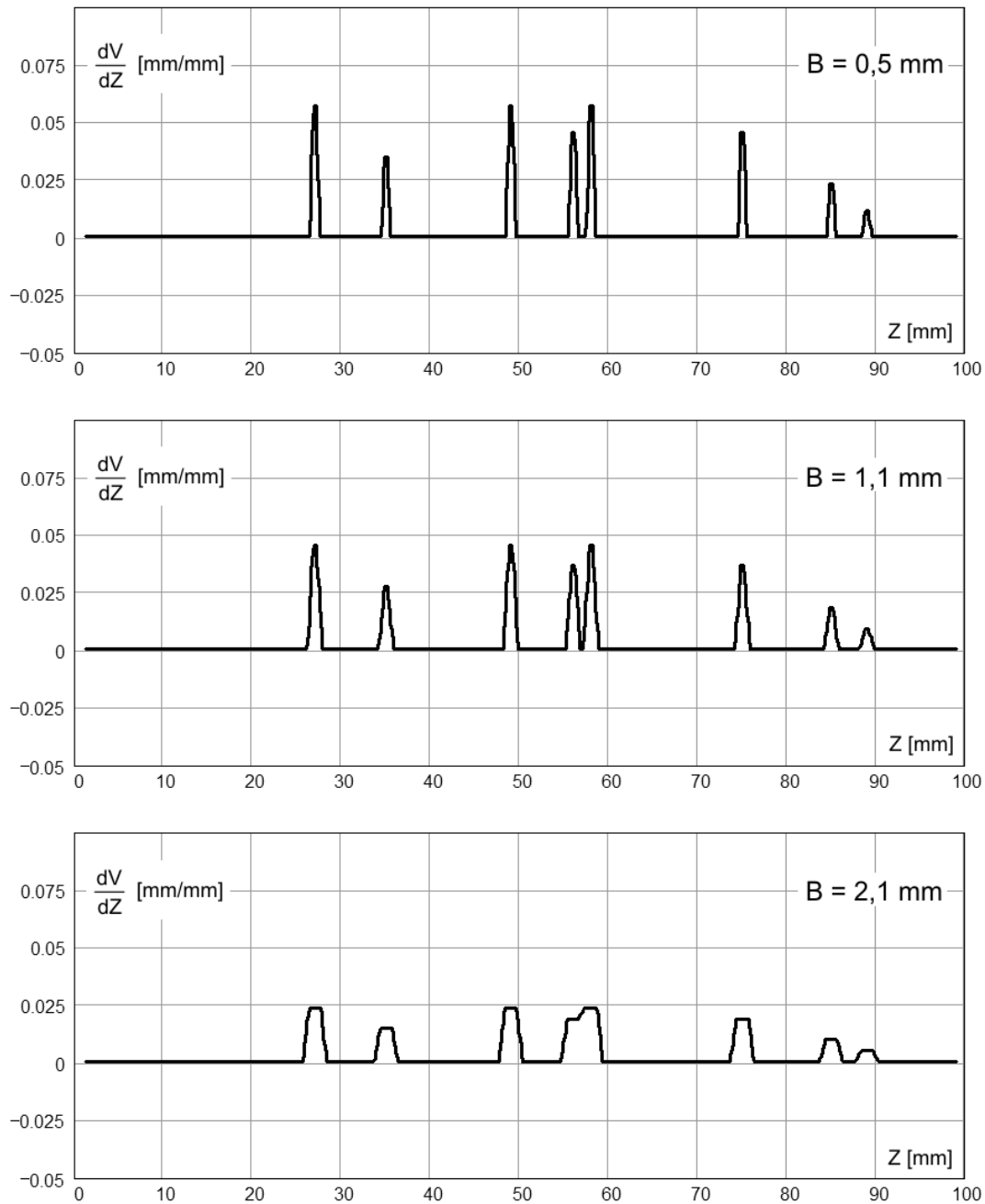


Abbildung 6.2: Rissanalyse (1. Ableitung der synthetisch erzeugten und aufbereiteten Ausgangsdaten für Laststufe $L_i = 80$)

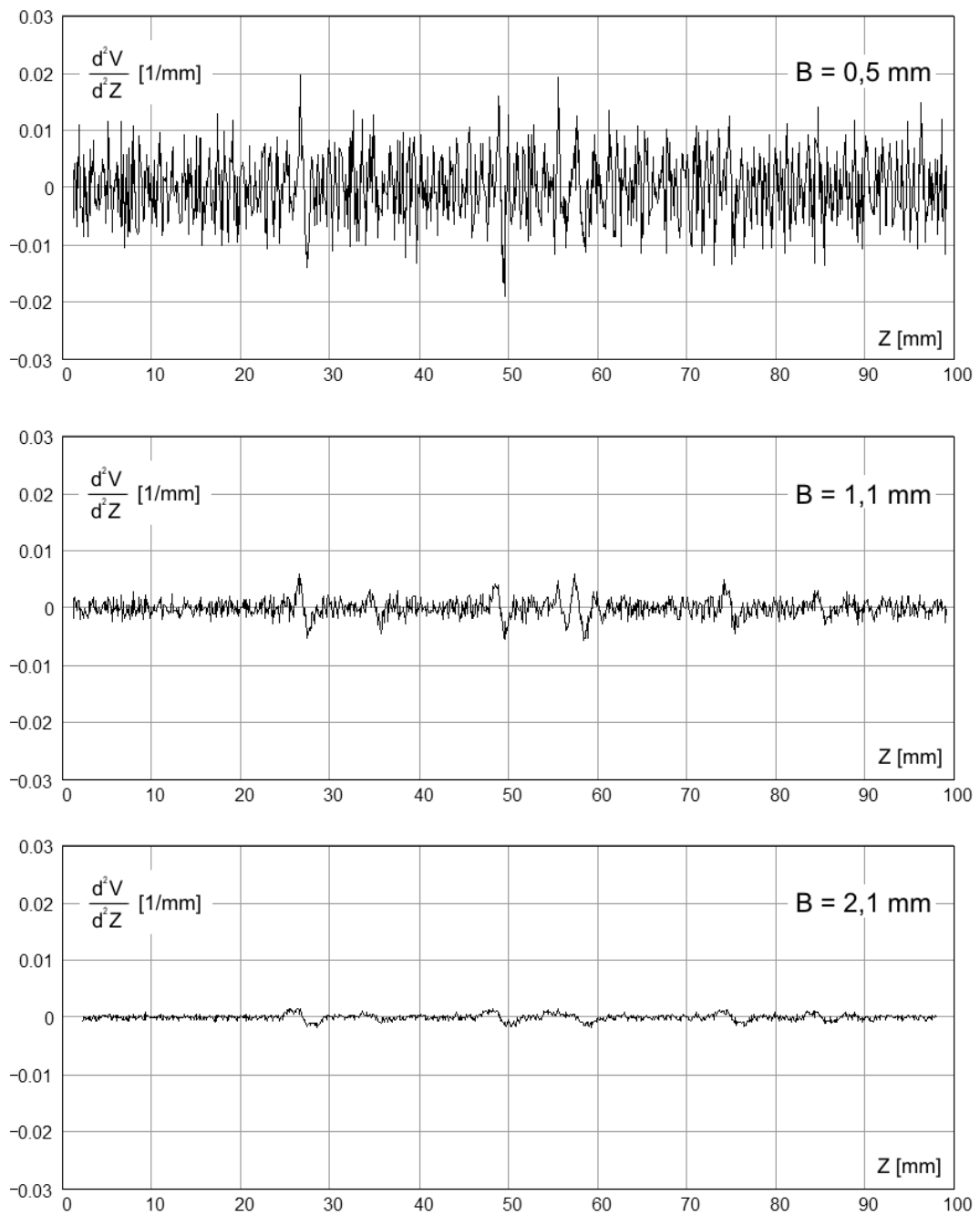


Abbildung 6.3: Rissanalyse (2. Ableitung der synthetisch erzeugten Ausgangsdaten für Laststufe $L_i = 80$)

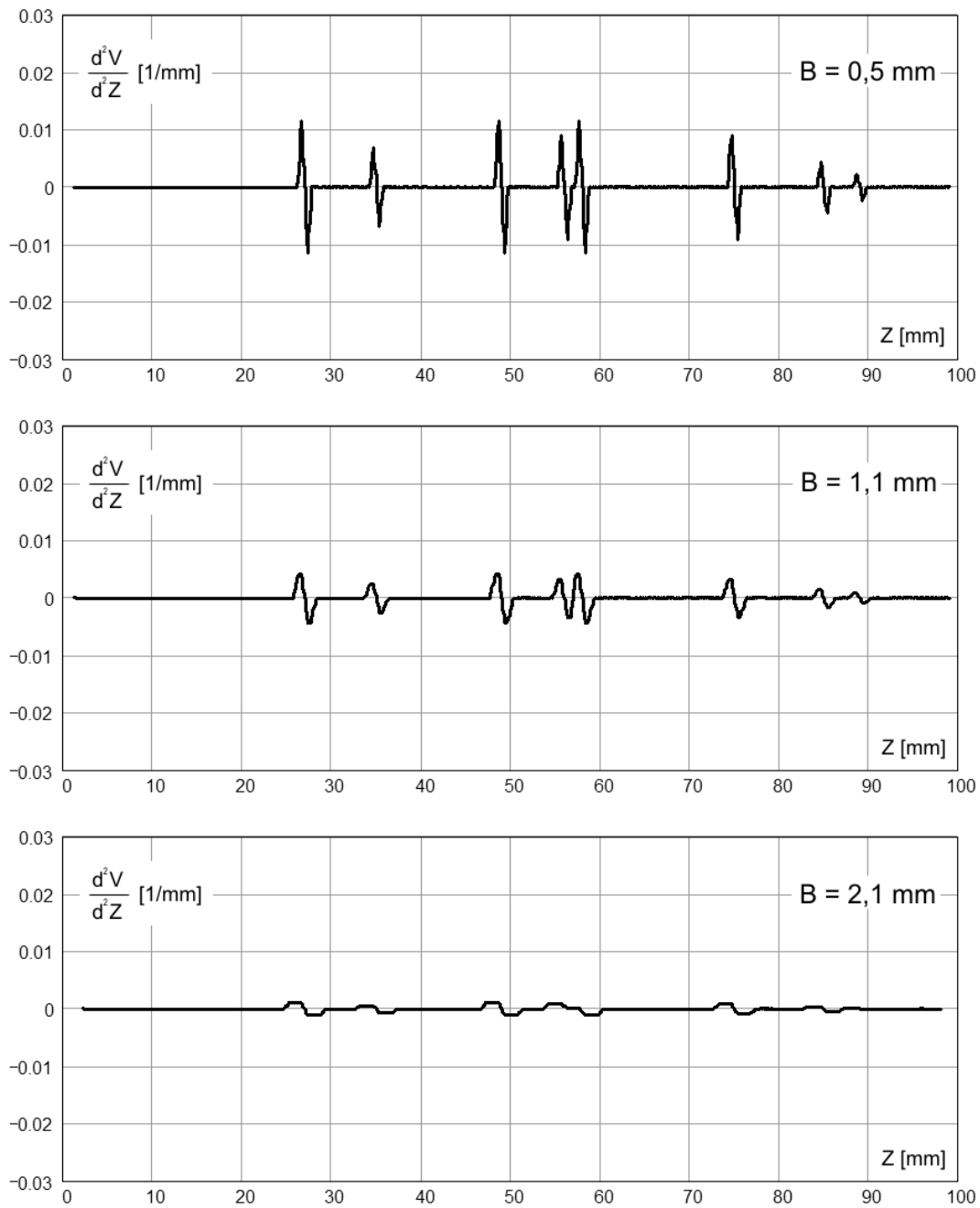


Abbildung 6.4: Rissanalyse (2. Ableitung der synthetisch erzeugten und aufbereiteten Ausgangsdaten für Laststufe $L_i = 80$)

A3 – Kalibrierprozesse

Im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 528 wurden im Teilprojekt D3 verschiedene Untersuchungen im Zusammenhang mit der System- und Kamerakalibrierung vorgenommen [92]. Eine Auswahl von Ergebnissen zeigt Tabelle 6.2 und Abbildung 6.5.

Tabelle 6.2 zeigt beispielsweise die Genauigkeitspotentiale der einbezogenen Berechnungsverfahren. Die durchgeführten Auswertungen ergaben ein vergleichbares Ergebnis der LSM-basierten Punkteinmessung mit den im Aicon-System zur Punkteinmessung verwendeten Schwerpunkt- und Ellipsenoperator. Die Unterschiede beim mittleren Gewichtseinheitsfehler m_0 und beim *Root Mean Square*-Fehler ergeben sich bei gleichen Bildquellen durch eine unterschiedliche Netzkonfiguration in den Projekten, die auf eine unterschiedliche Punktzahl zurückgeführt wurde. Entsprechend dazu ergeben sich die in Zeichnung (Abb. 6.5) dargestellten Verzeichniskurven [92].

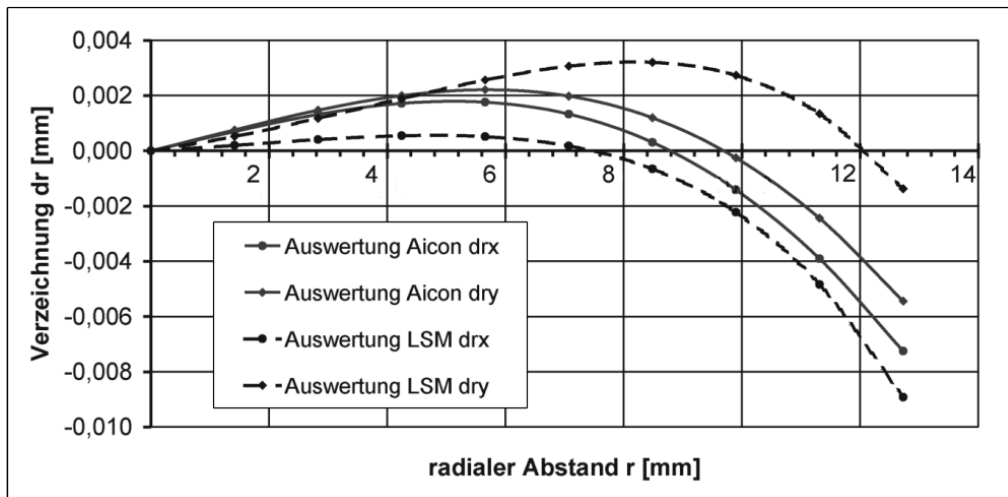


Abbildung 6.5: Verzeichniskurven (Vergleich ausgewählter Untersuchungen) [92]

Verfahren			Kamera 1	Kamera 2
	m_0	RMS X	$c_k \pm m_{C_k}$	$c_k \pm m_{C_k}$
		RMS Y	$x'_h \pm m_{x_h}$	$x'_h \pm m_{x_h}$
		RMS Z	$y'_h \pm m_{y_h}$	$y'_h \pm m_{y_h}$
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
manuelle	0.004413	0.01231	-65.1458 ± 0.1374	-64.5585 ± 0.1410
Messung		0.04255	-0.4704 ± 0.1017	-0.0504 ± 0.1022
		0.01076	-0.3241 ± 0.0974	-0.0798 ± 0.0913
Schwerpunkt	0.000782	0.00170	-65.1417 ± 0.0207	-64.6495 ± 0.0213
& Ellipsen-		0.00609	-0.4889 ± 0.0144	-0.1181 ± 0.0148
operator		0.00148	-0.2098 ± 0.0144	0.0908 ± 0.0132
manuelle	0.000796	0.00373	-65.0482 ± 0.0299	-64.8197 ± 0.0499
Messung		0.01292	-0.4943 ± 0.0213	-0.1051 ± 0.0293
& LSM		0.00278	-0.2574 ± 0.0203	0.4038 ± 0.0268

Tabelle 6.2: Punktzentrenermittlung (Vergleich ausgewählter Untersuchungen) [92]

Literaturverzeichnis

Bauwesen, Versuchswesen

- [1] Opitz, H.: *Bautechnisches Mess- und Versuchswesen*. Technische Universität Dresden, Institut für Tragwerke und Baustoffe, Professur für bautechnisches Mess- und Versuchswesen, 1998.
- [2] Czichos, H. (Hrsg.): *Hütte: Die Grundlagen der Ingenieurwissenschaften*. Springer, 30. Auflage, 1996, ISBN 3-540-58740-3.
- [3] Opitz, H. (Herausgeber): *1. Symposium – Experimentelle Untersuchungen von Baukonstruktionen*, Band 11 der Reihe *Schriftenreihe des Instituts für Tragwerke und Baustoffe*, Dresden, 30. März 2000. Technische Universität Dresden.
- [4] Opitz, H. (Herausgeber): *2. Symposium – Experimentelle Untersuchungen von Baukonstruktionen; Ehrenkolloquium Prof. Dr.-Ing. habil. H. Opitz*, Band 17 der Reihe *Schriftenreihe des Instituts für Tragwerke und Baustoffe*, Dresden, 26. September 2002. Technische Universität Dresden.
- [5] Curbach, M.; Opitz, H.; Marx, S. (Herausgeber): *3. Symposium – Experimentelle Untersuchungen von Baukonstruktionen*, Dresden, 23. Juni 2005. Technische Universität Dresden, ISBN 3-86005-476-7.
- [6] Curbach, M.; Opitz, H.; Marx, S. (Herausgeber): *4. Symposium – Experimentelle Untersuchungen von Baukonstruktionen*, Band 12 der Reihe *Konstruktiver Ingenieurbau Dresden*, Dresden, 27. September 2007. Technische Universität Dresden.
- [7] Schneider, K.-J.: *Bautabellen für Ingenieure. Mit Berechnungshinweisen und Beispielen*. Werner-Verlag, Neuwied, 17. Auflage, 2007, ISBN 3804152287.
- [8] Bronstein, I. N.; Semendjaew, K. A.; Musiol, G.; Mühlig, H.: *Taschenbuch der Mathematik*. Harri Deutsch AG, 2006, ISBN 3-8171-2006-0.
- [9] Warnecke, P.; Wendt, K.: *Photogrammetrische Verformungsmessung an Mauerwerkswänden*. Arbeitsberichte – Forschung über Baudenkmalpflege 127, Technische Universität Braunschweig, Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, Braunschweig, 1996.
- [10] Whiteman, T.; Litchi, D.; Chander, I.: *Measurement of deflections in concrete beams by close range photogrammetry*. IAPRS, XXXIV, Part 4., 2002.

- [11] Riedel, B.; Niemeier, W.; Fraser, C.; Dare, P.; Cronk, S.: *Development of an imaging system for monitoring cracks in concrete structures*. In Grün, A.; Kahmen, H. (editor): *6th Conference on Optical 3-D Measurement Techniques*, volume II of *Optical 3-D Measurement Techniques*, pages 96–103, Zurich, Switzerland, 22.–25. September 2003. Institute of Geodesy and Photogrammetry, Swiss Federal Institute of Technology.
- [12] Peipe, J.: *Photogrammetrie für die Bauwerksüberwachung*. VDI Bericht Nr. 1196, 1995.
- [13] Bimberg, D. (Hrsg.): *Messtechnik mit Lasern – Interferometrie, Holografie, Anemometrie, Speckles*. Expert Verlag, Ehningen, 1993, ISBN 3-8169-0777-6.
- [14] Meschede, D.: *Optik, Licht und Laser*. Teubner Verlag, Stuttgart, Leipzig, 1999.

Photogrammetrie

- [15] Wester-Ebbinghaus, W.: *Verfahren zur Feldkalibrierung von photogrammetrischen Aufnahmekammern im Nahbereich*. In: W. Wester-Ebbinghaus, G. Kupfer und (Herausgeber): *Arbeitstagung Kammerkalibrierung in der photogrammetrischen Praxis*, Band 275 der Reihe B. Deutsche Geodätische Kommission, München, 1985.
- [16] Trinder, J. C.: *Experiments on Target Location and Imaging matching*. Commission III. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Tokio, 1988.
- [17] Baer, B.: *Beleuchtungstechnik – Grundlagen*. VEB Verlag Technik, Berlin, 1990, ISBN 3-341-00674-5.
- [18] Regensburger, K.: *Photogrammetrie – Anwendung in Wissenschaft und Technik*. VEB Verlag für Bauwesen, Berlin, 1. auflage Auflage, 1990, ISBN 3-345-00461-5.
- [19] Hentschel, H.-J.: *Licht und Beleuchtung: Theorie und Praxis der Lichttechnik*. Hüthig Buch Verlag, Heidelberg, 4. edition, 1994, ISBN 3-7785-2184-5.
- [20] Thielbeer, B.: *Kalibrierung von ccd-kameras*. Institut für Prozeßmechanik und Elektronik, Otto-von-Guericke-Universität, 1995. Diplomarbeit.
- [21] Niederöst, M.; Maas, H.-G.: *Entwurf und Erkennung von kodierten Zielmarken*. Tagungsband, Jahrestagung DGPF Oldenburg, 1996.
- [22] Atkinson, K. B. (ed.): *Close Range Photogrammetry and Machine Vision*. Whittles Publishing, Caithness, Scotland, UK, 1996, ISBN 1-870325-46-X.
- [23] Dracos, Th. (ed.): *Three-Dimensional Velocity and Vorticity Measuring and Image Analysis Techniques*. KIU.r Academic Puplichers, Dordrecht, Boston, London, 1996.

-
- [24] Caesar, T.; Michaelis, M.: *Neues Verfahren zur robusten Erkennung textcodierter Messmarken*. Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung, (Heft 5-6), 1997.
- [25] Maas, H.-G.: *Mehrbildtechniken in der digitalen Photogrammetrie*, volume 62 of *Mitteilung Nr. 62*. Institut für Geodäsie und Photogrammetrie an der Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, 1997.
- [26] Holst, G. C.: *CCD Arrays Cameras and Displays*. SPIE - The International Society for Optical Engineering, Bellingham, 2nd Auflage, 1998, ISBN 0-8194-2853-1.
- [27] Baer, B.: *Praktische Beleuchtungstechnik: Lampen, Leuchten, Planung, Anlagen*. Huss-Medien GmbH, Berlin, 1999, ISBN 3-341-01213-3.
- [28] Maas, H.-G.: *Image sequence based automatic multi-camera system calibration techniques*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 54(5-6), 1999.
- [29] Paul, H. (Hrsg.): *Lexikon der Optik*, Band 2, M–Z. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, Berlin, 1999, ISBN 3-8274-0383-9.
- [30] Banda, S.: *Die lichttechnischen Grundgrößen: Theorie und Praxis – Definition, Deutung, Anwendung*. Expert Verlag, Renningen-Malmsheim, 1999, ISBN 3-8169-1699-6.
- [31] Luhmann, Th.: *Nahbereichsphotogrammetrie - Grundlagen, Methoden und Anwendungen*. Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg, 2000.
- [32] Kraus, K.: *Photogrammetrie*, volume 2. Bonn, 2000, ISBN 3-427-78694-3.
- [33] Weis, B.: *Grundlagen der Beleuchtungstechnik*. Pflaum GmbH, München, Bad Kissingen, Berlin, Düsseldorf, Heidelberg, 2001, ISBN 3-7905-0823-3.
- [34] Luhmann, Th.: *Nahbereichsphotogrammetrie in der Praxis – Beispiele und Problemlösungen*. Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg, 2002.
- [35] Grün, A.; Kahmen, H. (editor): *Optical 3-D Measurement Techniques – 5th Conference*, ETH Zürich, Switzerland, 22.–25. September 2003.
- [36] Kraus, K.: *Photogrammetrie*, Band 1. Berlin, 2004, ISBN 3-11-017708-0.
- [37] Grün, A.; Kahmen, H. (editor): *Optical 3-D Measurement Techniques – 6th Conference*, Vienna, Austria, October 3–5 2005.
- [38] Maas, H.-G.; Schneider, D. (editor): *Image Engineering and Vision Metrology*, volume 36 of *Proceedings ISPRS Com. V Symposium*, Dresden, Germany, 25.–27. September 2006. International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, ISPRS Commission V.
- [39] Grün, A.; Kahmen, H. (editor): *Optical 3-D Measurement Techniques – 8th Conference*, ETH Zürich, Switzerland, July 9–12 2007.

- [40] Boreman, G. D.: *Modulation Transfer Function in Optical and Electro-Optical Systems*, volume TT52 of *Tutorial texts in optical engineering*. SPIE PRESS, Bellingham, ISBN 0-8194-4143-0.
- [41] Jähne, B.: *Digitale Bildverarbeitung*. Springer, Heidelberg, 4. Auflage, 1997, ISBN 3-540-61379-X.

Versuchsplanung

- [42] Leppmann, W. K: *Taschenbuch Versuchsplanung – Produkte und Prozesse optimieren*. Praxisreihe Qualitätswissen. Carl Hanser Verlag, München, Wien, 2. Auflage, 2001, ISBN 3-446-21615-4.
- [43] Läuter, H. und R. Pincus: *Mathematisch-statistische Datenanalyse*. Akademie-Verlag, Berlin, 1989, ISBN 3-05500407-8.
- [44] Toutenburg, H.: *Versuchsplanung und Modellwahl – Statistische Planung und Auswertung von Experimenten mit stetigem oder kategorialem Response*. Physica-Verlag, Heidelberg, 1994, ISBN 3-7908-0772-9.
- [45] Bandemer, H. und A. Bellmann: *Statistische Versuchsplanung*. Mathematik für Ingenieure und Naturwissenschaftler. B. G. Teubner Verlagsgesellschaft, Stuttgart, Leipzig, 4. Auflage, 1994, ISBN 3-8154-2079-2.
- [46] Rasch, D., G. Herrendörfer, J. Bock, N. Victor und V. Guiard: *Verfahrensbibliothek – Versuchsplanung und -auswertung*, Band I der Reihe *Lehr- und Handbücher der Statistik*. Oldenbourg Verlag, München, Wien, 1996, ISBN 3-486-23146-4.
- [47] Scheffler, Eberhard: *Statistische Versuchsplanung und -auswertung – Eine Einführung für Praktiker*. Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Stuttgart, 3. Auflage, 1997, ISBN 3-527-30957-8.
- [48] Liebscher, Ulrich: *Anlegen und Auswerten von technischen Versuchen – Eine Einführung*. Wien: Manz-Verlag Schulbuch / Bohmann; Köln: Fortis-Verlag FH; Aarau; Bern: Bildung Sauerländer, 1999, ISBN 3-7068-0541-3.

Vorschriften und Normen

- [49] DIN – Deutsches Institut für Normung: *DIN 5036 Teil 4: Strahlungsphysikalische und lichttechnische Eigenschaften von Materialien; Klasseneinteilung*. Beuth Verlag, Berlin, Köln, August 1977.

- [50] DIN – Deutsches Institut für Normung: *Beiblatt 1 zu DIN 5036: Strahlungsphysikalische und lichttechnische Eigenschaften von Materialien; Inhaltsverzeichnis und Stichwortverzeichnis*. Beuth Verlag, Berlin, Köln, Februar 1980.
- [51] DIN – Deutsches Institut für Normung: *DIN 5036 Teil 1: Strahlungsphysikalische und lichttechnische Eigenschaften von Materialien; Begriffe und Kennzahlen*. Beuth Verlag, Berlin, Köln, Juli 1978.
- [52] DIN – Deutsches Institut für Normung: *DIN 5036 Teil 3: Strahlungsphysikalische und lichttechnische Eigenschaften von Materialien; Meßverfahren für lichttechnische und spektrale strahlungsphysikalische Kennzahlen*. Beuth Verlag, Berlin, Köln, November 1979.
- [53] International Commission on Illumination: *Strahlungsphysikalische und lichttechnische Stoffkennzahlen und deren Messung*, Band 38 der Reihe *Publication CIE*. CIE – International Commission on Illumination, Paris. Bureau Central de la CIE., 1977.
- [54] DIN – Deutsches Institut für Normung: *Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren – Benennungen, Definition und Kenngrößen der Oberflächenbeschaffenheit*. DIN EN ISO 4287, DIN – Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin, Oktober 1998.
- [55] DIN – Deutsches Institut für Normung: *DIN 18716-1: Photogrammetrie und Fernerkundung; Grundbegriffe und besondere Begriffe der photogrammetrischen Aufnahme*. Beuth Verlag, Berlin, November 1995.
- [56] DIN – Deutsches Institut für Normung: *DIN 18716-2: Photogrammetrie und Fernerkundung; Besondere Begriffe der photogrammetrischen Auswertung*. Beuth Verlag, Berlin, Juli 1996.
- [57] DIN – Deutsches Institut für Normung: *DIN 5031 Beiblatt 1: Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik; Inhaltsverzeichnis über Größen, Formelzeichen und Einheiten sowie Stichwortverzeichnis zu DIN 5031 Teil 1 bis Teil 10*. Beuth Verlag, Berlin, November 1982.
- [58] DIN – Deutsches Institut für Normung: *DIN 5031 Teil 1: Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik; Größen, Formelzeichen und Einheiten der Strahlungsphysik*. Beuth Verlag, Berlin, März 1982.
- [59] DIN – Deutsches Institut für Normung: *DIN 5031 Teil 2: Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik; Strahlungsbewertung durch Empfänger*. Beuth Verlag, Berlin, März 1982.
- [60] DIN – Deutsches Institut für Normung: *DIN 5031 Teil 3: Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik; Größen, Formelzeichen und Einheiten der Lichttechnik*. Beuth Verlag, Berlin, März 1982.

- [61] DIN – Deutsches Institut für Normung: *DIN 5031 Teil 4: Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik; Wirkungsgrade*. Beuth Verlag, Berlin, März 1982.
- [62] DIN – Deutsches Institut für Normung: *DIN 5031 Teil 5: Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik; Temperaturbegriffe*. Beuth Verlag, Berlin, März 1982.
- [63] DIN – Deutsches Institut für Normung: *DIN 5031 Teil 7: Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik; Benennung der Wellenlänge*. Beuth Verlag, Berlin, November 1982.
- [64] DIN – Deutsches Institut für Normung: *DIN 5031 Teil 8: Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik; Strahlungsphysikalische Begriffe und Konstanten*. Beuth Verlag, Berlin, März 1982.
- [65] DIN – Deutsches Institut für Normung: *DIN 5031 Teil 9: Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik; Lumineszenz-Begriffe*. Beuth Verlag, Berlin, März 1982.
- [66] DIN – Deutsches Institut für Normung: *DIN 5039: Licht, Lampen, Leuchten; Begriffe, Einteilung*. Beuth Verlag, Berlin, September 1995.
- [67] VDI/VDE: *Optische 3D-Messsysteme, Bildgebende Systeme mit punktförmiger An-tastung*. VDI/VDE-Richtlinie 2634, VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik (GMA), Beuth Verlag, Berlin, Mai 2002.

Veröffentlichungen des Autors

Publikationen in Fachzeitschriften

- [68] Maas, H.-G.; Hampel, U.: *Photogrammetric Techniques in Civil Engineering Material Testing and Structure Monitoring*. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 72(1):39–45, 2006. Am 9. Mai 2007 auf der Jahrestagung der ASPRS (American Society of Photogrammetry and Remote Sensing) in Tampa, Florida (USA) mit dem Talbert Abrams Award (Honorable Mention) ausgezeichnet.
- [69] Ortlepp, R.; Hampel, U.; Curbach, M.: *A new Approach for Evaluating Bond Capacity of TRC Strengthening*. Cement and Concrete Composites, 28(7):589–597, August 2006.

Publikationen in Konferenzbänden

- [70] Hampel, U.: *Neuere Ergebnisse zu photogrammetrischen Verformungsmessungen*. In: Curbach, M.; Opitz, H.; Marx, S. (Herausgeber): *4. Symposium – Experimentelle Untersuchungen von Baukonstruktionen*, Band 12 der Reihe *Konstruktiver Ingenieurbau Dresden*, Seiten 139–149, Dresden, 27. September 2007. Technische Universität Dresden.
- [71] Hampel, U.: *Besonderheiten bei photogrammetrischen Verformungs- und Rissmessungen im bautechnischen Versuchswesen*. In: VDI – Verein Deutscher Ingenieure (Herausgeber): *GESA-Symposium 2005 Strukturanalyse*, Nummer 1899 in *VDI Berichte*, Seiten 231–240, Düsseldorf, 21./22. September 2005. VDI/VDE – Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik, VDI Verlag, ISBN 3-18-091899-3.
- [72] Hampel, U.: *Genauigkeitspotenzial photogrammetrischer Messverfahren bei Belastungsversuchen textilverstärkter Beton- und Holzkonstruktionen*. In: Curbach, M.; Opitz, H.; Marx, S. (Herausgeber): *3. Symposium – Experimentelle Untersuchungen von Baukonstruktionen*, Seiten 43–52, Dresden, 23. Juni 2005. Technische Universität Dresden, ISBN 3-86005-476-7.
- [73] Maas, H.-G.; Hampel, U.; Schulze, M.: *Application of Digital Photogrammetry and Computer Tomography for Measuring Deformation, Cracks and Structural Changes during Load Tests of Textile Reinforced Test Objects*. In Curbach, M. (editor): *Textile Reinforced Structures – Proceedings of the 2nd Colloquium on Textile Reinforced Structures (CTRS2)*, pages 187–199, Dresden, Germany, 29. 9–1.10. 2003.

- [74] Hampel, U.; Maas, H.-G.: *Application of digital photogrammetry for measuring deformation and cracks during load tests in civil engineering material testing*. In Grün, A.; Kahmen, H. (editor): *6th Conference on Optical 3-D Measurement Techniques*, volume II of *Optical 3-D Measurement Techniques*, pages 80–88, Zurich, Switzerland, 22.–25. September 2003. Institute of Geodesy and Photogrammetry, Swiss Federal Institute of Technology.
- [75] Hampel, U.: *Photogrammetrische Verformungs- und Rissmessungen bei kurz- und langzeitigen Belastungsversuchen im bautechnischen Versuchswesen*. In: VDI – Verein Deutscher Ingenieure (Herausgeber): *Sicherheit und Wirtschaftlichkeit durch Messtechnik, Monitoring und Beanspruchungsanalyse*, Nummer 1599 in *VDI-Berichte*, Seiten 59–66, Düsseldorf, 12/13. Juni 2003. VDI/VDE – Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik, VDI Verlag, ISBN 3-18-091757-1.
- [76] Hampel, U.: *Einsatz bildgebender Verfahren zur Bewertung des mechanischen Verhaltens von Baukonstruktionen (Photogrammetrie, Computertomographie)*. In: Opitz, H. (Herausgeber): *2. Symposium – Experimentelle Untersuchungen von Baukonstruktionen*, Band 17 der Reihe *Schriftenreihe des Instituts für Tragwerke und Baustoffe*, Seiten 79–92, Dresden, 2002. Technische Universität Dresden.
- [77] Hampel, U.: *Erfassung der Verformungs-, Riss- und Schädigungsentwicklung bei Baukonstruktionen mit Bildverarbeitung*. In: Schwarz, W. (Herausgeber): *Interdisziplinäre Messaufgaben im Bauwesen*, Band 43, Seiten 43–56, Stuttgart, 16./17. Sept. 2002. DVW – Deutscher Verein für Vermessungswesen, Verlag Konrad Wittwer, ISBN 3-87919-279-0.
- [78] Opitz, H.; Hampel, U.: *Einsatz der digitalen Photogrammetrie und Bildverarbeitung bei Verformungs-, Riss- und Schädigungsmessungen an textilbewehrten Holz- und Betonprobekörpern*. In: VDI – Verein Deutscher Ingenieure (Herausgeber): *Sicherheit und Zuverlässigkeit durch experimentelle Struktur- und Beanspruchungsanalyse*, Nummer 1599 in *VDI-Berichte*, Seiten 101–106, Düsseldorf, 17./18. Mai 2001. VDI/VDE – Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik, VDI Verlag, ISBN 3-18-091599-4.
- [79] Hampel, U.; Schreiber, F.; Flach, B.: *Erfassung der Verformungs-, Riss- und Schädigungsentwicklung textilverstärkter Baukonstruktionen mit Hilfe digitaler photogrammetrischer Verfahren*. In: Hegger, J. (Herausgeber): *Textilbeton – 1. Fachkolloquium der Sonderforschungsbereiche 528 und 532*, Seiten 265–276, Aachen, 15./16. Februar 2001.
- [80] Hampel, U.; Schreiber, F.; Flach, B.: *Erfassung der Verformungs-, Riss- und Schädigungsentwicklung von Baukonstruktionen bei baumechanischen Untersuchungen mit Hilfe der digitalen Photogrammetrie und Bildverarbeitung*. In: Opitz, H. (Herausgeber): *1. Symposium – Experimentelle Untersuchungen von Baukonstruktionen*,

- Band 11 der Reihe *Schriftenreihe des Instituts für Tragwerke und Baustoffe*, Seiten 27–44, Dresden, 30. März 2000. Technische Universität Dresden.
- [81] Hampel, U.: *Einsatz der digitalen Photogrammetrie im bautechnischen Versuchswesen*. In: Albertz, J. (Herausgeber): *Photogrammetrie und Fernerkundung – Neue Sensoren – Neue Anwendungen*, 19. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF 1999, Band 8 der Reihe *Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung*, Seiten 301–307. DGPF – Deutsche Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung, DGPF, 13./15. Oktober 1999.
- [82] Opitz, H.; Hampel, U.: *Einsatz der digitalen Photogrammetrie bei Belastungsversuchen von Baukonstruktionen*. In: VDI – Verein Deutscher Ingenieure (Herausgeber): *Anspruch und Tendenzen in der Experimentellen Strukturmechanik: GESA-Symposium 1999, Tagung Warnemünde*, Nummer 1463 in *VDI-Berichte*, Seiten 311–316, Düsseldorf, 6./7. Mai 1999. VDI/VDE – Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik, VDI Verlag, ISBN 3-18-091463-7.
- [83] Hampel, U.: *Digitale Nahbereichsphotogrammetrie im bautechnischen Versuchswesen*. In: Wolf, H. (Herausgeber): *6. ABW-Workshop 3D-Bildverarbeitung*, Seiten 311–316. Technische Akademie Esslingen, 25./26. Januar 1999.
- [84] Hampel, U.: *Einsatz digitaler Verfahren der Nahbereichsphotogrammetrie bei Verformungs- und Rissbreitenmessungen von Stahlbetonbauteilen*. In: Curbach, M. (Herausgeber): *34. Forschungskolloquium des DAfStb*, Seiten 125–134. Institut für Tragwerke und Baustoffe, Technische Universität Dresden, Oktober 1997.
- [85] Hampel, U.: *Einsatz der Photogrammetrie bei Belastungsversuchen*. In: Opitz, H. (Herausgeber): *Praxisseminar: Tragsicherheits- und Gebrauchstauglichkeitsbewertung von Massivbauwerken durch Belastungsversuche*, Seiten 36–45, Dresden, 19. Juni 1997. Technische Universität Dresden.
- [86] Regensburger, K.; Hampel, U.: *Einsatz digitaler Verfahren der Nahbereichsphotogrammetrie bei Verformungs- und Rissmessungen im bautechnischen Versuchswesen*. In: GmbH, KAZ Bildmess (Herausgeber): *Leipziger Bildmesstage*, Band 6, 1997.

Sonstige Publikationen

- [87] Hampel, U.; Maas, H.-G.: *Schubversuche an textiltbewehrten Betonproben*. In: Luhmann, Th. (Herausgeber): *Nahbereichsphotogrammetrie in der Praxis – Beispiele und Problemlösungen*, Kapitel Sonderanwendungen, Materialprüfung, Seiten 281–284. Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg, 2002, ISBN 3-87907-385-6.

- [88] Hampel, U.; Wellner, F.: *Verformungsmessungen im Straßenbau*. In: Luhmann, Th. (Herausgeber): *Nahbereichsphotogrammetrie in der Praxis – Beispiele und Problemlösungen*, Kapitel Ingenieurbau, Hochbau, Seiten 117–120. Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg, 2002, ISBN 3-87907-385-6.
- [89] Hampel, U.: *Neue Aspekte beim Einsatz der digitalen Photogrammetrie im bautechnischen Versuchswesen*. In: Curbach, M.; Graße, W.; Haim, D.; Opitz, H.; Schorn, H.; Stritzke, J. (Herausgeber): *Jahresmitteilungen des Instituts für Tragwerke und Baustoffe*, Band 7 der Reihe *Schriftenreihe des Instituts für Tragwerke und Baustoffe*, Seiten 107–123. Technische Universität Dresden, 1998.
- [90] Hampel, U.: *Anwendungsmöglichkeiten der Photogrammetrie für die Messung von Rissen und Formänderungen bei Belastungsversuchen von Massivbauwerken und für die Bauwerksüberwachung*. Diplomarbeit, Technische Universität Dresden, 1996.

Forschungsberichte

- [91] Maas, H.-G.; Hampel, U.: *Photogrammetrische Erfassung der Verformungs-, Riß- und Schädigungsentwicklung bei baumechanischen Untersuchungen textilverstärkter Bauteile*. In: Curbach, M. (Herausgeber): *DFG Sonderforschungsbereich 528, Textile Bewehrungen zur bautechnischen Verstärkung und Instandsetzung, Finanzierungsantrag für Periode III (2005/2–2008/1), einschließlich Forschungsbericht für Periode II*, Kapitel Y1, Seiten 619–643. Technische Universität Dresden, SFB 528, Dresden, 2005.
- [92] Opitz, H.; Maas, H.-G., Fuchs, S.; Hampel, U.; Schreiber, F.; Flach, B; Kask, E.: *Erfassung der Verformungs-, Riß- und Schädigungsentwicklung von Baukonstruktionen bei baumechanischen Untersuchungen mit Hilfe digitaler photogrammetrischer Verfahren*. In: Curbach, M. (Herausgeber): *DFG Sonderforschungsbereich 528, Textile Bewehrungen zur bautechnischen Verstärkung und Instandsetzung, Arbeits- und Ergebnisbericht für Periode II/1999–I/2002*, Kapitel D3, Seiten 449–496. Technische Universität Dresden, Dresden, 2002.
- [93] Hampel, U.: *Photogrammetrische Verformungs- und Dehnungsmessungen bei Schubversuchen an unverstärkten und mit textilen Strukturen verstärkten Holzproben*. Technischer Bericht, Technische Universität Dresden, Institut für Textil- und Bekleidungstechnik, Institut für Baukonstruktionen und Holzbau, 2002. Der Forschungsbericht ist eine Zuarbeit für das von Prof. Dr.-Ing. habil. P. Offermann und Prof. Dr.-Ing. P. Haller geleitete Forschungsprojekt *Verstärkung von Holzverbindungen mit beanspruchungsgerechten textilen Strukturen (AiF/GAG 14 ZBR 1/2)*.

- [94] Hampel, U.: *Photogrammetrische Verformungsmessung bei Untersuchungen zum Verhalten von Pflasterdecken unter horizontaler Belastung*. Technischer Bericht, Technische Universität Dresden, Institut für Stadtbauwesen und Straßenbau, 2001. Der Forschungsbericht ist eine Zuarbeit für das von Prof. Dr.-Ing. habil. W. Wellner geleitete Forschungsprojekt *Untersuchungen zum Verhalten von Pflasterdecken unter horizontaler Belastung* (BAST FE 0.072/2000/AGB).
- [95] Hampel, U.: *Photogrammetrische Verformungsmessung bei Untersuchungen zur Technologie und zum Tragverhalten technischer Textilien im Holz-Beton-Verbundbau*. Technischer Bericht 1, Technische Universität Dresden, 2001. Der Forschungsbericht ist eine Zuarbeit für das von Prof. Dr.-Ing. P. Haller geleitete Forschungsprojekt *Technologie und Tragverhalten technischer Textilien im Holz-Beton-Verbundbau*.
- [96] Hampel, U.: *Digitale photogrammetrische Erfassung der Verformungs-, Riss- und Schädigungsentwicklung von Baukonstruktionen bei experimentellen Untersuchungen*. Zwischenbericht, Technische Universität Dresden, 1998. Der Zwischenbericht wurde im Rahmen des Graduiertenstudiums angefertigt, das durch den Freistaat Sachsen finanziert wurde.
- [97] Opitz, H.; Suleiman, A; Hampel, U.: *Verbesserung von Methoden zur Diagnose und Therapie von Tragstabilitätsschäden/-schwächen kritischer Mauerwerkspartien an Baudenkmälern*. Abschlussbericht zum Forschungsprojekt BMBF BAU 7025 B, Technische Universität Dresden, Februar 1998.
- [98] Hampel, U.; Opitz, H.: *Verformungs- und Rißbreitenmessungen mit digitaler Photogrammetrie*. In: *EXTRAII – Experimentelle Tragsicherheitsbewertung von Brücken in situ zur Substanzerhaltung und zur Verminderung der Umweltbelastung*, Seiten 47–54. K. Steffens, Bremen, 1999.