



Institut für Photogrammetrie und GeoInformation Leibniz Universität Hannover

Masterarbeit

im Studiengang Navigation und Umweltrobotik

3D-Rekonstruktion von Betonoberflächen mit Methoden der Nahbereichsphotogrammetrie

zur Erlangung des akademischen Grades Master of Science

Autor: Amadeus Langer MatNr. 10006117

Erstprüfer:Prof. Dr.-Ing. habil. Christian HeipkeZweitprüfer:Dr.-Ing. Manfred Wiggenhagen

Hannover, den 2. Januar 2021

Zusammenfassung

Frischbeton ist einer der meist verwendeten Baustoffe im modernen Bauwesen. Umso bedeutender ist dessen ständige Qualitätssicherung. Für vollständige Analysen sind heutzutage immer noch aufwendige Laboruntersuchungen notwendig. Direkt an der Baustelle können nur rudimentäre Eigenschaften getestet werden.

In dieser Arbeit wird als Alternative zu den etablierten Testverfahren die mögliche Anwendung von Bildmessmethoden auf Frischbeton-Oberflächen untersucht. Hierfür wird eine geeignete Aufnahmekonstruktion geplant und realisiert. Mit Methoden der Nahbereichsphotogrammetrie erfolgt eine Rekonstruktion der aufgenommenen Frischbeton-Oberflächen. Des Weiteren wird untersucht, welche Genauigkeiten bei der Rekonstruktion erreichbar sind, und wie diese von der Anzahl an Bildern abhängt. Verschiedene Kamera-Konstellationen werden ebenso betrachtet. Das Ergebnis stellen Realisierungsvorschläge in Abhängigkeit von Aufwand, Bildmaterial und Qualitätsanspruch dar.

Diese grundlegenden Untersuchungen ebnen den Weg zur Etablierung photogrammetrischer Messmethoden im Baubereich.

Abstract

Fresh concrete is one of the most commonly used building materials in the modern building industry. Therefore, regular quality checks are crucial. For complete analyses complex laboratory tests are still necessary. Tests that are immediatly carried out on the construction site can only provide results of rudimentary qualities.

This thesis investigates the possible application of photogrammetry methods on fresh concrete surfaces as an alternative to the established testing procedures. For this purpose, an experimental capturing setup was planned and implemented. The recorded fresh concrete surfaces are reconstructed with methods of close-range photogrammetry. Achievable accuracies are evaluated and their dependency on the numbers of images is examined. Different camera positions are also being considered. The results are implementation proposals with regard to effort, image material and quality requirements.

These fundamental investigations prepare the way for establishing photogrammetric measurement methods in the building industry.

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit eigenständig und ohne fremde Hilfe angefertigt habe. Textpassagen, die wörtlich oder dem Sinn nach auf Publikationen oder Vorträgen anderer Autoren beruhen, sind als solche kenntlich gemacht.

Die Arbeit wurde bisher keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch noch nicht veröffentlicht.

Amadeus Langer

Inhaltsverzeichnis

1	Mo	tivation und Zielsetzung 1
	1.1	Einleitung 1
	1.2	Stand der Technik 2
	1.3	Ziel und Aufbau der Arbeit
	1.4	Gliederung der Arbeit
2	The	eoretische Grundlagen
	2.1	Modell der Lochkamera
	2.2	Physikalische Kameramodellierung 7
		2.2.1 Optische Abbildung
		2.2.2 Schärfentiefe im Objektraum
		2.2.3 Sichtfeld der Kamera
	2.3	Grundlagen der Bildmessung
		2.3.1 Koordinatensysteme und Kameraorientierung 10
		2.3.2 Kollinearitätsgleichungen $\dots \dots \dots$
		2.3.3 Grundlagen der Epipolargeometrie
		2.3.4 Genauigkeitsbetrachtung im Stereonormalfall 13
	2.4	Mehrbildausgleichung mittels Bündeltriangulation
		2.4.1 Mathematisches Modell der Bündelausgleichung
		2.4.2 Qualität der Bündelausgleichung
	2.5	Structure-from-Motion 17
	2.6	Grundlagen Beton
		2.6.1 Konsistenzprüfung durch den Ausbreitversuch
		2.6.2 Oberflächenanalyse nach EN-ISO-25178 20
3	Au	fnahme- und Auswertungskonzepte
	3.1	Wahl der Aufnahmekonfiguration 22
		3.1.1 Bezug zwischen Aufnahmekonfiguration und Objektraum 23
		3.1.2 Konzeptionelle Umsetzung
		3.1.3 Maskierung im Objektbereich
		3.1.4 Signalisierung im Objektbereich
	3.2	Reduktion von benötigten Projektionszentren
		3.2.1 Ansatz durch Betrachtung im Stereonormalfall
		3.2.2 Geometrien im Mehrbildverband
	3.3	Beurteilungskriterien für Aufnahmekonfigurationen
		3.3.1 Konstruktion von Längenmaßstäben
		3.3.2 Konstruktion von Höhenmaßstäben

	3.3.3 Lücken im 3D Modell	31
	Analyse Digitaler Höhenmodelle	31
4	Realisierung	33
	4.1 Anforderungen an den Messaufbau	33
	4.2 Kamerasystem und Kameraeinstellungen	34
	4.2.1 Schärfentiefe, Blende, Brennweite	35
	4.2.2 Belichtungszeit und Lichtempfindlichkeit	37
	4.3 Aufnahmesystem	37
	4.3.1 Realisierung der Objektsignalisierung	38
	4.3.2 Realisierung der Objektmaskierung	39
	4.4 Auswertungssystem	40
5	Versuchsdurchführung und Evaluation	41
	5.1 Extraktion von Oberflächenmerkmalen	41
	5.1.1 Einfluss von Konsistenzklassen	42
	5.1.2 Einfluss von Gesteinskörnung und Betonzusätze	43
	5.1.3 Evalutation der Merkmalsextraktion	45
	5.2 Beurteilung der Referenzdaten	45
	5.3 Genauigkeit in Abhängigkeit der Anzahl an Proiektionszentren	48
	5.3.1 Gleichverteilte Basis	49
	5.3.2 Asymmetrisch verteilte Basis	51
	5.3.3 Asymmetrisch verteilte Basis mit Vorahkalibrierung	53
	5.4 Praktische Anwendung: Oberflächenanalyse	54
	5.4 Traktische Anwendung. Obernachenanaryse	94
6	Fazit und Ausblick	56
\mathbf{A}	Anhang	63
	A.1 Prüfberichte - Aufnahmekonstellationen	63
	A.2 Prüfberichte - Oberflächenanalyse	71

1 Motivation und Zielsetzung

1.1 Einleitung

Bei der Photogrammetrie handelt es sich um ein flexibel anwendbares, berührungsloses Auswerteverfahren. Sie beschäftigt sich mit der Analyse von Bildern, um aus zweidimensionalen Abbildungen, dreidimensionale Informationen zurückzugewinnen. Neben geometrischen Eigenschaften sind auch inhaltliche Zusammenhänge Teil dieser Auswertung. Je nach Anzahl auszuwertender Aufnahmen wird zwischen Einzelbild-, Stereobildund Mehrbildauswertung unterschieden. Die Analyse terrestrischer Bilder bezeichnet einen eigenen Teilbereich der Photogrammetrie. Dieser wird Nahbereichsphotogrammetrie genannt [Heipke, 2016, S. 4].

Die Grundzüge der Photogrammetrie reichen bis Mitte des 19. Jahrhunderts zurück und waren direkt mit dem Bauingenieurwesen verwoben. Der Baumeister Albrecht Meydenbauer arbeitete bereits 1858 an einem Messbild-Verfahren zur Ersetzung herkömmlicher Bauaufnahmen. Die Aufnahmen erfolgten ausschließlich über an Stativen aufgestellte Kameras. Weitere Vermessungen von Gebäuden, Denkmälern und ganzen Gebirgsregionen folgten. Ein Meilenstein im Hinblick auf die Stereophotogrammetrie gelang 1907 durch die Entwicklung des Stereoautografen. Es handelte sich um das erste hochgenaue Messinstrument zur photogrammetrischen Auswertung zwei sich überlappender Luftaufnahmen [Albertz, 2009].

Den größten Entwicklungssprung der letzten Jahrzehnte brachten Digitalkameras und Computersysteme. Sie bilden die Grundbausteine für die flexiblen Einsatzmöglichkeiten moderner photogrammetrischer Messsysteme. Aktuelle Digitalkameras ermöglichen Aufnahmefrequenzen, die selbst für die Betrachtung dynamischer Prozesse ausreichen. Deren Auswertung erfolgt durch moderne Computersysteme. Diese erfuhren innerhalb der letzten Jahre rasante Leistungssteigerungen. Vor allem Mehrbildauswertungen haben davon profitiert. Sie sind dank digitaler Aufnahmesysteme leicht zu realisieren, benötigen jedoch enorme Rechenleistungen bei der Auswertung. In der Theorie bereits früher entwickelte Auswertemethoden können dadurch effizient in praktischen Anwendungen eingesetzt werden. Ein heutzutage viel angewandtes Beispiel ist das Verfahren der Bündeltriangulation. Die Kombination beider Entwicklungen trug maßgeblich dazu bei, dass die Photogrammetrie sich heutzutage als ein Standardwerkzeug für wissenschaftliche und industrielle Messaufgaben etabliert hat. Trotz der bereits anfänglichen Verbindung von Photogrammetrie und Bauingenieurwesen sind mögliche Einsatzbereiche auf modernen Baustellen noch lange nicht ausgeschöpft. Vor allem in Bereichen der Qualitätssicherung vor Ort wird bis dato meist auf aufwendige und händische Prüfverfahren zurückgegriffen. Für die Bestimmung von Frischbetoneigenschaften muss unter anderem ein genormter Ausbreit- oder Verdichtungsversuch durchgeführt werden. Eine Abweichung des Ergebnisses, durch verschiedene Operateure, kann allerdings nicht vollständig ausgeschlossen werden. Es handelt sich bei Beton um einen der meistverwendeten Baustoffe im modernen Bauingenieurwesen. Allein im Jahr 2019 wurden innerhalb Europas über 200 Millionen Kubikmeter Transportbeton hergestellt und verarbeitet [BTB, 2019]. Es ist kaum vermessen zu behaupten, dass selbst stichprobenartig ausgeführte händische Prüfverfahren in diesen Größenordnungen schnell an ihre Testgrenzen stoßen.

Gerade die Analyse von Frischbeton vor Ort bringt wesentliche Vorteile. Eine gewünschte Eigenschaft kann oftmals auch bei abweichenden Prüfergebnissen durch Zusätze nachträglich erreicht werden. Dies setzt allerdings voraus, dass die Zusammensetzung und die Eigenschaften des vorliegenden Betons genau bestimmbar sind. Bei den bereits erwähnten Prüfverfahren können jedoch nur sehr rudimentäre Frischbetoneigenschaften geprüft werden. Genauere Analysen müssen häufig immer noch in Laboren erfolgen. Aufgrund des Potentials diese Analysen direkt auf der Baustelle zu ermöglichen, bietet Frischbeton einen idealen Ansatz zur weiteren Etablierung photogrammetrischer Messmethoden im Baubereich.

1.2 Stand der Technik

Bislang wurden photogrammetrische Messmethoden nicht zur Bestimmung von Oberflächeneigenschaften von Frischbeton angewendet. Die im Bauingenieurwesen dem am nächsten kommende Anwendung beschränkt sich meist auf die Rauigkeit von bereits ausgehärteten Betonoberflächen. So wird in Vogler u. a. [2015] ein Lasertriangulationsverfahren benutzt, um die klassische Rauigkeitsmessung durch ein berührungsloses Messverfahren zu ersetzen. Ein ähnlicher Ansatz, unter der Verwendung eines Laserscanners, wird in Grzelka u. a. [2011] verfolgt.

Bildmessungen im Baustellenbereich werden unter anderem in Tuttas [2017] angewandt. Mit einem Structure-from-Motion Ansatz wird der Fortschritt einer Baustelle kontrolliert. Der Einsatz von Luftaufnahmen und terrestrischen Bildern wird dabei getrennt betrachtet. Als Datensatz wurden Bilder der Baustelle in verschiedenen Zeitabschnitten aufgenommen. Aus den Bilddaten wird anschließend eine Punktwolke berechnet. Die Auswertung des Baufortschrittes erfolgt unmittelbar durch Vergleiche zwischen diesen Punktwolken. Die beschriebene Vergleichsmethodik kann ebenso für die Auswertung des Frischbetons in Betracht gezogen werden. Weitere Parallelen zur Aufnahmeplanung finden sich in anderen Wissenschaftsbereichen. In der Archäologie sind beispielsweise Objektaufnahmen und Oberflächenanalysen weit verbreitet. Gerade durch die oft sensiblen Objekte werden dabei berührungslose Erfassungsmethoden bevorzugt. So wurden beispielsweise in Lindstaedt u. a. [2007] Steinglyphen photogrammetrisch ausgewertet. Diese Steinzeichnungen unterscheiden sich vom Trägermaterial hauptsächlich durch deren Konturen. Der Fokus liegt dementsprechend auf der Extraktion dieser Übergänge, um die Glyphen auszuwerten. Die Oberflächenbeschaffenheit der Steinglyphen ist vergleichbar mit der von ausgehärtetem Beton. Eine starke Objekttextur ist im Allgemeinen nicht vorhanden. Ähnliche Extraktionsverfahren werden bei der Oberflächenanalyse des Frischbetons angewandt.

Betreffend der Planung des benötigten Bildmaterials kann grob zwischen zwei Herangehensweisen unterschieden werden. So liegt einerseits der Fokus in der Reduktion von großen Datensätzen, während andererseits vorab die theoretische Betrachtung der Bildperspektive für optimale und kleinstmögliche Bildverbände im Vordergrund steht.

In Hosseininaveh u. a. [2012] wird ausgehend von wenigen Bildern zunächst ein qualitativschlechtes 3D-Modell erzeugt und anschließend wichtige Sichtpunkte daraus extrahiert. Anhand dieser Sichtpunkte wird die Anzahl an Bildern des zugrundeliegenden Bildverbands reduziert. Dafür werden Abstand, Sichtfeld und Blickwinkel der Kameras zu den Sichtpunkten analysiert.

Ein weiterer Ansatz zur Datenreduktion liefern Fuse und Harada [2016] durch die Konstruktion eines Graphen aus dem vorhandenen Bildverband. Jedes Bild entspricht einem Knoten des Graphen. Zwischen vorselektierten Bildpaaren erfolgt eine Bündelausgleichung. Die Varianzen der externen Orientierung werden anschließend, als Kantenkosten der betreffenden Bilder, in den Graph eingefügt. Die Darstellung als Graph ermöglicht die Anwendung von Algorithmen der Graphentheorie. In diesem Fall wird eine Reduktion des Bildverbandes über den Schnitt-Algorithmus von Ford und Fulkerson erreicht.

Gegensätzlich zu beiden vorherigen Ansätzen beschäftigt sich Maas [1997] mit der theoretischen Betrachtung geeigneter Kamerapositionen. Ein Teil dieser Analyse umfasst die Aufgaben von Punktzuordnungen im Bildraum. Das Ziel ist die Reduktion von Mehrdeutigkeiten durch Hinzunahme einer geeigneten Anzahl an Kameras. Die geometrischen Beziehungen zwischen diesen Kameras sind ebenso ein Teil seiner Betrachtung.

1.3 Ziel und Aufbau der Arbeit

Das Ziel dieser Arbeit besteht in einer hinreichend genauen photogrammetrischen Rekonstruktion von Frischbeton-Oberflächen unter der Verwendung von minimal notwendigem Bildmaterial. Hierfür werden Bilder eines Konsistenzprüfverfahrens, dem Ausbreitversuch, aufgenommen und analysiert. Die benötigten Genauigkeiten werden durch praktische Vorgaben definiert. Zunächst wird die prinzipielle Eignung der Oberfläche für Bildmessverfahren getestet. Dafür werden Merkmale aus Bildern von Frischbetonen extrahiert. Die Konsistenzklasse und die Zusammensetzung des Frischbetons variiert dabei. Extrahierbare Merkmale sind die Grundlage für photogrammetrische Auswerteverfahren. Können keine geeigneten Merkmale in der Oberfläche gefunden werden, ist das Bildmaterial nicht für weitere Auswertungen geeignet.

Nach diesen ersten grundlegenden Tests erfolgt eine Prüfung maximal erreichbarer Genauigkeiten. Hierfür wird die Frischbeton-Oberfläche durch eine möglichst optimale Aufnahmekonfiguration aufgenommen. Anschließend wird aus den Bilddaten ein Oberflächenmodell erstellt und analysiert. Als Ausgleichungsverfahren wird eine Bündelausgleichung mit Simultankalibrierung verwendet. Die Umsetzung erfolgt mit der Software Agisoft Metashape. Nach [Luhmann, 2018, S.341] handelt es sich bei der Bündelausgleichung um das leistungsfähigste und genaueste Verfahren zur Bildorientierung und Punktgewinnung der Photogrammetrie. Die Planung und Entwicklung der Aufnahmekonfiguration ist ein wesentlicher Teil dieser Arbeit.

Eine optimale Aufnahmekonfiguration ist meist in der Praxis nicht umsetzbar oder zu aufwendig. Ein weiteres Ziel besteht deswegen in der strukturierten Reduktion an benötigtem Bildmaterial. Zunächst werden theoretische Reduktions-Konzepte analysiert. Ausgewählte Aufnahmekonfigurationen werden anschließend an dem Ausbreitversuch getestet. Für jedes Konzept wird eine Abschätzung erreichbarer Genauigkeiten zusammengefasst. Diese wird in Abhängigkeit zu der Anzahl verwendeter Aufnahmen gestellt. Das Ergebnis stellt eine Empfehlung für praktikabel anwendbare Aufnahmekonfigurationen dar. Je nach gewünschter Genauigkeit kann aus diesen gewählt werden.

Die reine Betrachtung von Genauigkeiten stellt nur eine mögliche Auswertung dar. Ob die rekonstruierten Modelle auch für die Extraktion von Frischbetonkennwerten ausreichen, wird ebenso überprüft.

1.4 Gliederung der Arbeit

Die vorliegende Arbeit besteht aus fünf Teilbereichen.

In Kapitel 2 werden die theoretischen Grundlagen der Bildgewinnung und der Bildmessung für die angewandten Methoden dieser Arbeit erläutert. Danach folgt eine Einführung in grundlegende Frischbetoneigenschaften und in Frischbeton Konsistenzprüfverfahren. Kapitel 3 beschreibt entwickelte Aufnahme- und Auswertungskonzepte, die für eine Rekonstruktion von Frischbetonoberflächen notwendig sind. Teil des Aufnahmekonzeptes ist die Planung einer Aufnahmekonstruktion und die Betrachtung von Kamera-Konstellationen. Das Auswertungskonzept befasst sich mit Methoden, die für die Auswertung der rekonstruierten Modelle notwendig sind. In Kapitel 4 fließen die theoretischen Erkenntnisse aus Kapitel 2 und die Methoden aus Kapitel 3 in einer Realisierung zusammen. Es werden alle Aspekte, die für den realen Versuchsaufbau benötigt werden, beschrieben.

Kapitel 5 befasst sich mit der Beschreibung und Auswertung durchgeführter Versuche.

Allgemeine Empfehlungen für weitere Analysen und ein Fazit der gewonnenen Erkenntnisse werden in Kapitel 6 zusammenfasst.

2 Theoretische Grundlagen

In diesem Kapitel werden die theoretischen Grundlagen für die angewandten Methoden dieser Arbeit erläutert. Die ersten Abschnitte befassen sich mit der Bildgewinnung. So werden in Abschnitt 2.1, ausgehend vom einfachen Modell der Lochkamera, die Grundelemente der Kameramodellierung eingeführt. Die physikalische Modellierung erfolgt anschließend in Abschnitt 2.2. Mittels Betrachtung der Schärfentiefe und des Blickwinkels werden hierbei die Grundbausteine der späteren Versuchsplanung gelegt.

In Abschnitt 2.3 steht die Einführung der Bildmessung im Vordergrund. Hierfür werden zunächst in 2.3.1 benötigte Koordinatensysteme eingeführt. Des Weiteren wird in 2.3.2 über die Definition von innere- und äußere-Orientierung der Zusammenhang von Bildund Objektkoordinaten formuliert. In 2.3.3 erfolgt eine kurze Einführung in die Epipolargeometrie. Abschließend wird in 2.3.4 eine näherungsweise Abschätzung erreichbarer Messgenauigkeiten der Stereobildauswertung getroffen.

Abschnitt 2.4 beschäftigt sich mit der Mehrbildauswertung, insbesondere mit der in dieser Arbeit angewandten Bündelausgleichung. Der Fokus liegt dabei in der Beschreibung des mathematischen Modells und der Qualitätsbeurteilung der resultierenden Ergebnisse. Abschnitt 2.5 liefert einen kurzen Exkurs in die Structure-from-Motion Technik.

Im abschließenden Abschnitt 2.6 werden grundlegende Betoneigenschaften und dessen Zusammensetzungen besprochen. Des Weiteren wird der Begriff Konsistenz eingeführt und Prüfverfahren für Frischbeton-Konsistenzen vorgestellt.

2.1 Modell der Lochkamera

Das Abbildungsverhalten realer Kameras wird durch einzelne Kameramodelle beschrieben. Als erste Annäherung dient das in Abbildung 2.1 gezeigte Modell der Lochkamera. Hierbei handelt es sich um eine zentral-perspektivische Projektion. Durch den Bildpunkt P' und das Projektionszentrum O' entsteht ein geradliniger Strahl zum Objektpunkt P. Der Abstand zwischen Bildebene und Projektionszentrum wird dabei als Kamerakonstante c bezeichnet [Luhmann, 2018, S.29].

Durch das Verhältnis der Aufnahmeentfernung h zur Kamerakonstante c wird die Bildmaßstabszahl m definiert. Diese ist eine wichtige Kenngröße mittels derer die Detailerkennbarkeit und erreichbare Genauigkeit der photogrammetrischen Messung bestimmt



Abbildung 2.1: Modell der Lochkamera [Luhmann, 2018]

wird. Sie entspricht ebenso dem Verhältnis einer parallel zum Bild liegenden Strecke im Objektraum X zur zugehörigen Strecke im Bildraum x' [Luhmann, 2018, S.30].

$$m = \frac{h}{c} = \frac{X}{x'} \tag{2.1}$$

Der detaillierte Einfluss von Aufnahmeabstand und Kamerakonstante auf den Bildmaßstab wird in [Luhmann, 2018, S.167] beschrieben.

Aufgenommene Bilddaten können erst dann für photogrammetrische Messungen verwendet werden, wenn die Orientierung der zugehörigen Kamera bekannt ist. Diese unterteilt sich in die *innere Orientierung* und die *äußere Orientierung*.

Die innere Orientierung beschreibt die Lage des Projektionszentrums relativ zur Bildebene und bezieht sich somit auf die geometrischen Eigenschaften des Bildsensors. Die $\ddot{a}u\beta ere$ Orientierung definiert die Lage des Bildsensors im Raum zum Zeitpunkt der Bildaufnahme [Albertz und Wiggenhagen, 2009, S.132]. Eine detaillierte Beschreibung der inneren und $\ddot{a}u\beta eren$ Orientierung erfolgt nach der physikalischen Kameramodellierung in Abschnitt 2.3.1.

2.2 Physikalische Kameramodellierung

Ein grundlegendes Problem des Lochkameramodells ist die zu starke Vereinfachung des Systems. Unabhängig von der Entfernung wird ein Bild des Objektes erstellt. In einem realen-optischen System ist ein scharfes Bild jedoch durch einen Aufnahmebereich beschränkt. Dieser wird als *Schärfebereich* bezeichnet [Jähne, 2012, S.86].

2.2.1 Optische Abbildung

Die Abbildung komplexer optischer Systeme kann mit einer Modifikation dennoch über eine zentral-perspektivische Projektion modelliert werden. Hierfür wird die Fokalebene durch zwei Hauptebenen H_1 und H_2 ersetzt. Deren Schnittpunkte mit der optischen Achse

bilden die beiden Hauptpunkte O und O' [Jähne, 2012, S.87].

Die Konstruktion der optischen Abbildung ist in Abbildung 2.2 gezeigt. Die Bildweite a' setzt sich dabei aus der bildseitigen Brennweite f' und brennpunktbezogener Bildweite z' zusammen. Sie entspricht approximiert der Kamerakonstanten c. Äquivalent dazu setzt sich die Gegenstandsweite a aus dingseitiger Brennweite f und brennpunktbezogener Dingweite z zusammen. [Luhmann, 2018, S.142]



Abbildung 2.2: Konstruktion der Optischen Abbildung bei symmetrischer Objektivkonstruktion, verändert nach [Luhmann, 2018]

Durch Anwendung des Strahlensatzes der Geometrie kann für Abbildung 2.2 die Linsengleichung 2.2 formuliert werden. Sie beschreibt den Zusammenhang eines scharf abgebildeten Objektpunktes P zum Abstand a'. Punkte mit abweichender Dingweite werden bei gleichbleibendem a' dementsprechend unscharf dargestellt [Luhmann, 2018, S.143].

$$\frac{1}{a'} + \frac{1}{a} = \frac{1}{f'} \tag{2.2}$$

Eine detaillierte Herleitung der Beziehung 2.2 kann beispielsweise [Lüders und Pohl, 2018, S.308] entnommen werden.

Ein weiterer Einfluss auf die Schärfeabbildung innerhalb des physikalischen Kameramodells bilden bündel-begrenzende Elemente. Sie werden in weiterer Folge als Blenden aufgefasst, deren objektseitiges Bild durch die Eintrittspupille EP und deren bildseitiges Bild durch die Austrittspupille AP beschrieben wird. Handelt es sich, wie in Abbildung 2.2 visualisiert, um eine symmetrische Objektivkonstruktion, so fallen EP und AP mit den Hauptebenen zusammen. In diesem Fall entspricht der Winkel τ dem Winkel τ' und es handelt sich um eine verzeichnisfreie Abbildung. Der Fall $\tau \neq \tau'$ beschreibt entsprechend eine radiale symmetrische Objektivverzerrung, die als $\Delta r'$ eingeführt wird. Mittels der bekannten bildseitigen Brennweite f' und dem Durchmesser der Eintrittspupille d' kann somit die Blendenzahl k definiert werden. [Luhmann, 2018, S.144]

$$k = \frac{f'}{d'} \tag{2.3}$$

Sie bildet eine Grundlage für die Betrachtung der Schärfentiefe im Objektraum.

2.2.2 Schärfentiefe im Objektraum

Eine gängige Abschätzung, ob ein Bereich als scharf betrachtet werden kann, liefert die Auflösungsgrenze des menschlichen Auges $\Delta \alpha \approx 0.03^{\circ}$. Unter der Annahme, dass der Betrachtungsabstand gleich der betrachteten Bilddiagonale s' ist, ergibt sich daraus eine Auflösungsgrenze von ≈ 2000 Punkten in der Bilddiagonale [Luhmann, 2018, S.145]. Die Auflösungsgrenze kann über die Definition eines Unschärfekreisdurchmesser u' auf die verwendeten Kamera übertragen werden. Dieser bestimmt sich zu

$$u' = f' + \Delta \alpha \approx \frac{1}{2000} s' \tag{2.4}$$

Die Anwendung des Unschärfekreises auf den in Abbildung 2.2 gezeigten Punkt P' resultiert im Schärfentiefenbereich t. Alle Punkte, die in ihrer Entfernung innerhalb von t liegen, können als scharf angesehen werden. Dabei bezeichnet a_v den Abstand zum Schärfepunkt der dem Objektiv am Nächsten liegt, und a_h den Abstand des am weit entferntesten Schärfepunktes [Luhmann, 2018, S.146].

$$a_{v} = \frac{a}{1+K} \qquad a_{h} = \frac{a}{1-K}$$
mit
$$K = \frac{k(a-f)u'}{f'^{2}}$$

$$t = a_{h} - a_{v} \qquad (2.6)$$

Nach 2.5 und 2.6 ist die Schärfentiefe somit abhängig vom fokussierten Abstand a, dem Unschärfekreisdurchmesser u', der Blendenzahl k und der bildseitigen Brennweite f'.

2.2.3 Sichtfeld der Kamera

Das Sichtfeld der Kamera ist abhängig von der Brennweite f und der Größe des Bildsensors (s_h, s_v) . Üblicherweise wird das Sichtfeld über den horizontalen Bildwinkel α_h und den vertikalen Bildwinkel α_v beschrieben. Diese berechnen sich zu:

$$\alpha_h = 2 \arctan \frac{s_h}{2f} \quad \alpha_v = 2 \arctan \frac{s_v}{2f}$$
(2.7)

Eine Vergrößerung des Sichtfelds kann dementsprechend durch eine kleineren Brennweite oder ein größeres Sensorformat erreicht werden.

2.3 Grundlagen der Bildmessung

2.3.1 Koordinatensysteme und Kameraorientierung

Bildinformationen können unter der Kenntnis von *innerer* und *äußerer* Orientierung der verwendeten Kameras in den 3D-Objektraum umgerechnet werden. Um eine konsistente Darstellung in weiterer Folge zu ermöglichen, werden nach [Luhmann, 2018, S.48 ff] folgende Koordinatensysteme definiert:

- Objektkoordinatensystem (XYZ) übergeordnetes, räumlich kartesisches Koordinatensystem; festgelegt durch Bezugspunkte des Objektes
- Modellkoordinatensystem (xyz) räumlich kartesisches Koordinatensystem; relative Lage zweier oder mehrerer Bilder mit üblichem Ursprung im Projektionszentrum eines Bildes
- Bildkoordinatensystem (x', y', (z'))

ebenes kartesisches Koordinatensystem; eindeutiger Bezug zwischen Bildsensor und digitalem Bild vorausgesetzt; Ursprung definiert in der Bildmitte

• Sensorkoordinatensystem (u,v)

ein aus Zeilen und Spalten bestehendes Koordinatensystem; definiert als linkshändiges System mit Ursprung im oberen linken Element

Das an sich ebene Bildkoordinatensystem kann dabei in Bezug zum räumlichen Kameramodell gestellt werden. Hierfür wird die x'y'-Ebene um die z'-Achse erweitert, dessen Richtung näherungsweise in Richtung Projektionszentrum O' verläuft. Der Ursprung des räumlichen Bildkoordinatensystems liegt im Projektionszentrum O' mit dem lotrechten Abstand der Kamerakonstante c zum Ursprung des ebenen Bildkoordinatensystems. Die resultierende Bildlage entspricht der physikalischen Negativlage und ist in Abbildung 2.3 als Bildlage B_1 visualisiert [Luhmann, 2018, S.49].

Die Beziehung zwischen dem Objektkoordinatensystem und dem räumlichen Kamerasystem wird durch die $\ddot{a}u\beta ere$ Orientierung der Kamera beschrieben. Respektive beschreibt die *innere* Orientierung der Kamera die Beziehung zwischen dem räumlichen Kamerasystem und dem Sensorkoordinatensystem [Stachniss und Förstner, 2015].



Abbildung 2.3: Äußere Orientierung und projektive Abbildung verändert nach [Luhmann, 2018]

Die Parameter der inneren Orientierung lauten:

- Bildhauptpunkt $H'(x'_0, y'_0)$
- Kamerakonstante \boldsymbol{c}
- Verzeichnisparameter $\Delta \mathbf{x}'$

Des Weiteren die Parameter der äußeren Orientierung:

- Lage des Projektionszentrums $\mathbf{X}_{\mathbf{0}}$ (X_0, Y_0, Z_0)
- Rotationsmatrix der räumlichen Ausrichtung
 ${\bf R}~(\omega,\varphi,\kappa)$

Die Parameter der *inneren* Orientierung beinhalten demnach einerseits die Lage des Projektionszentrums (H', c) und andererseits die Abweichungen vom zentralperspektivischen Modell $\Delta \mathbf{x}'$. [Luhmann, 2018, S.49]

Üblicherweise wird die Bestimmung der inneren Orientierung in der Photogrammetrie als *Kalibrierung* bezeichnet.

2.3.2 Kollinearitätsgleichungen

Mit der Einführung der inneren und äußeren Orientierung kann der Zusammenhang zwischen den Bildinformationen und dem gewünschten Objektvektor \mathbf{X} hergestellt werden (Abb. 2.3). Der benötigte Vektor \mathbf{X}^* kann hierfür nicht direkt formuliert werden und wird nach [Luhmann, 2018, S.274] über die Transformation von \mathbf{x}' gebildet. Die Transformation erfolgt dabei mittels der Rotationsmatrix \mathbf{R} und dem Maßstabsfaktor m. Es folgt für die Abbildung des Bildpunktes in dem Objektraum:

$$\mathbf{X} = \mathbf{X}_{\mathbf{0}} + m \cdot \mathbf{R} \cdot x' \tag{2.8}$$

Durch Erweiterung der Gleichung 2.8 mit den Parametern der inneren Orientierung und durch Elimination des Maßstabsfaktors mittels geschickter Umformung können die *Grundgleichungen der Photogrammetrie* 2.9 gebildet werden. Diese werden auch *Kollinearitätsgleichungen* genannt [Luhmann, 2018, S.275].

$$x'_{P} = x'_{0} - c' \frac{r_{11}(X - X_{0}) + r_{21}(Y - Y_{0}) + r_{31}(Z - Z_{0})}{r_{13}(X - X_{0}) + r_{23}(Y - Y_{0}) + r_{33}(Z - Z_{0})}$$

$$y'_{P} = y'_{0} - c' \frac{r_{12}(X - X_{0}) + r_{22}(Y - Y_{0}) + r_{32}(Z - Z_{0})}{r_{13}(X - X_{0}) + r_{23}(Y - Y_{0}) + r_{33}(Z - Z_{0})}$$
(2.9)

Im Bezug auf die *Kollinearitätsgleichungen* ist erwähnenswert, dass diese auf Grund ihrer Beschaffenheit die Bildkoordinaten als Funktion der unbekannten Parameter darstellen. Dies macht sie direkt verwendbar als Beobachtungsgleichung für die in dieser Arbeit verwendete Bündelausgleichung [Luhmann, 2018, S.276].

Die rechnerische Bestimmung der äußeren Orientierung eines Kamerabildes kann unter anderem auf Grundlage der Gleichungen 2.9 erfolgen. Sie wird als *räumlicher Rückwärts-schritt* bezeichnet.

2.3.3 Grundlagen der Epipolargeometrie

Die Epipolargeometrie beschreibt die Beziehung zwischen zwei unterschiedlichen Bildern in denen ein identisches Objekt aufgenommen wurde. Sie ist ausschließlich von der inneren Orientierung und der relativen Position der beiden Kameras zueinander abhängig [Hartley und Zisserman, 2004, S.239].

Der Zusammenhang für ein konvergentes Bildpaar wird in Abbildung 2.4 dargestellt. P bezeichnet dabei einen Objektpunkt mit dessen korrespondierenden Bildpunkten P' und P''.

Durch die Epipolargeometrie wird die Suche korrespondierender Bildpunkte stark vereinfacht. Ausgehend von der aufgespannten Ebene aus den beiden Raumstrahlen r', r'' und



Abbildung 2.4: Epipolarlinien bei konvergentem Aufbau nach [Luhmann, 2018]

des Kamera-Basisabstandes b kann gezeigt werden, dass sich korrespondierende Bildpunkte in dieser *Epipolarebene* befinden. Aus dem Schnitt der Epipolarebene mit der jeweiligen Bildebene resultieren für den Suchbereich die beiden *Epipolarlinien k'* und k''. Bei bekannter Orientierung kann die zugehöre Epipolarlinie k'' zum Bildpunkt P' berechnet werden (bzw. k' zu P''). Dies wird für die Zuordnung korrespondierender Punkte ausgenutzt [Luhmann, 2018, S.312].

2.3.4 Genauigkeitsbetrachtung im Stereonormalfall

Die erreichbaren Genauigkeiten im Stereonormalfall können als Abschätzung für die Planung von Aufnahmekonstellationen herangezogen werden. Wie in Kapitel 2.1 bereits erwähnt, kann der Abbildungsmaßstab hierfür als erste Näherung verwendet werden. Die Messunsicherheit im Bildraum wird dabei mittels Bildmaßstabes in den Objektraum übertragen.

Nach [Luhmann, 2018, S.170] folgt für die Genauigkeit im Objektraum:

$$dX = m \cdot dx' \tag{2.10}$$

Im Stereonormalfall unterscheidet sich in der Regel die Genauigkeit in Aufnahmerichtung von der Genauigkeit parallel zur Bildebene. Durch Anwendung des Fehlerfortpflanzungsgesetzes und Unterscheidung der Genauigkeit in Aufnahmerichtung (Z) zur Genauigkeit parallel zur Bildebene (XY) lassen sich die Zusammenhänge 2.11 formulieren.

$$s_X = s_Y = m \cdot s_{x'} \qquad s_Z = m \cdot \frac{h}{b} \cdot s_{px'} \tag{2.11}$$

Dabei beschreibt b den Basisabstand zwischen den beiden Aufnahmestandorten und $s_{px'}$ die Bildmessgenauigkeit der x-Parallaxe [Luhmann, 2018, S.170].

In 2.11 zeigt sich auch der Einfluss des *Höhen-Basis-Verhältnisses* $\frac{h}{b}$ auf die Genauigkeit in Aufnahmerichtung. Handelt es sich um einen hohen Wert (b < h), wirkt sich das negativ auf die Schnittgeometrie der Punktbestimmung aus (schleifender Strahlenschnitt). Im Gegensatz dazu kann es beim Verhältnis b >> h dazu kommen, dass die Objektüberlappung im Bildbereich zu klein wird.

Die Wahl des *Höhen-Basis-Verhältnisses* ist dadurch ein essentieller Bestandteil der Planung einer photogrammetrischen Messung.

2.4 Mehrbildausgleichung mittels Bündeltriangulation

Die Einführung des Abbildungsstrahles eines Bildpunktes über das Projektionszentrum der zugehörigen Kamera zum korrespondierenden Objektpunkt erfolgte bereits in Abschnitt 2.1. Bei der Betrachtung sämtlicher Bildpunkte eines Bildes kann dieses somit als *Strahlenbündel* aufgefasst werden.

Ausgehend von einer grundsätzlich beliebigen Anzahl von Bildern beschreibt die Bündeltriangulation (oder Bündelausgleichung) ein Verfahren zur rechnerischen Einpassung dieser Strahlenbündel. Die Verknüpfung erfolgt dabei durch die Zuordnung identischer Objektpunkte aus verschiedenen Bildern. Dabei gilt die Forderung, dass korrespondierende Bildstrahlen sich in diesem Objektpunkt optimal schneiden [Luhmann, 2018, S.340]. Objektpunkte, die für diese Art der Zuordnung geeignet sind, werden in dieser Arbeit als *Verknüpfungspunkte* bezeichnet (Abbildung 2.5).



Abbildung 2.5: Strahlenbündel mehrerer Kameras(schwarz) mit Verknüpfungspunkten(blau), verändert nach [Förstner und Wrobel, 2016]

Die Bündeltriangulation kann als Erweiterung des *räumlichen Rückwärtsschnittes* angesehen werden, da die *innere* Orientierung der beteiligten Kameras mitbestimmbar ist (siehe 2.3.2). Dieser Vorgang wird mit *Simultankalibrierung* bezeichnet.

Im realen Bildverband wird das mathematisch zugrundeliegende Modell der Zentralperspektive normalerweise nicht exakt erfüllt. Im Zuge der Simultankalibrierung können weitere Parameter eingeführt werden, um die Abweichung vom idealen Modell zu kompensieren [Albertz und Wiggenhagen, 2009, S. 260].

Ein wesentlicher Vorteil der Bündelausgleichung besteht in der Möglichkeit, zusätzliche Informationen in das Ausgleichungsverfahren miteinzubeziehen. So können unter anderem Strecken, Winkel und gemessene Punktkoordinaten über Beobachtungsgleichungen formuliert und direkt in den Ausgleichungsprozess integriert werden.

Eine Besonderheit stellt dabei das Hinzufügen von *Passpunkten* dar. Hierbei handelt es sich um Punkte aus dem übergeordneten Objektkoordinatensystem, deren Position mit übergeordneter Genauigkeit bekannt ist. Mit Hilfe von mindestens drei bekannten Passpunkten kann ein Objektkoordinatensystem festgelegt werden (Minimalkonfiguration). Des Weiteren können Maßstabsinformationen durch bekannte Abstände zwischen Passpunkten definiert werden [Luhmann, 2018, S.359].

2.4.1 Mathematisches Modell der Bündelausgleichung

Die Bündelausgleichung ist ein klassisches Ausgleichungsverfahren basierend auf der Methode der kleinsten Quadrate. Der funktionale Zusammenhang wird über die nichtlinearen Kollinearitätsgleichungen 2.9 formuliert.

Die Methode der kleinsten Quadrate setzt allerdings ein lineares funktionales Modell voraus [Neumann, 2014]. Für die geforderte Linearisierung findet eine Taylorreihenentwicklung statt. Diese erfordert für alle Parameter der rechten Seite in Gleichung 2.9 $(X_0, Y_0, Z_0, \omega, \varphi, \kappa, x'_0, y'_0, c', \Delta x', \Delta y', X, Y, Z)$ bereitgestellte Näherungswerte. Die erforderlichen Ableitungen für das Erstellen des funktionalen Modells können entweder explizit oder numerisch berechnet werden. Eine detaillierte Auflistung und Herleitung sämtlicher Ableitungen kann in [Luhmann, 2018, S.345 ff] eingesehen werden.

Das klassische Modell der Ausgleichung (lineares Gauß-Markov-Modell) kann folgendermaßen zusammengefasst werden:

Die Beobachtungsgleichung wird über den Beobachtungsvektor \mathbf{l} , die Verbesserungen \mathbf{v} und den Unbekanntenvektor \mathbf{x} gebildet. Die *Designmatrix* \mathbf{A} entsteht dabei durch die partiellen Ableitungen der Beobachtungen nach den Unbekannten. (Funktionaler Zusammenhang)

$$\mathbf{l} + \mathbf{v} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{x} \tag{2.12}$$

Über die Varianz der Gewichtseinheit \hat{s}_0^2 wird die Kofaktormatrix der Beobachtungen $\mathbf{Q}_{\mathbf{ll}}$ bestimmt. (Stochastischer Zusammenhang)

$$\boldsymbol{\Sigma}_{ll} = \hat{\mathbf{s}}_0^2 \cdot \mathbf{Q}_{ll} \tag{2.13}$$

Anschließend lässt sich der Unbekanntenvektor ${\bf x}$ bestimmen.

$$\mathbf{P} = \mathbf{Q}_{ll}^{-1}$$

$$\mathbf{N} \cdot \hat{\mathbf{x}} - \mathbf{n} = \mathbf{0}$$

$$\mathbf{N} = \mathbf{A}^T \cdot \mathbf{P} \cdot \mathbf{A} \quad \mathbf{n} = \mathbf{A}^T \cdot \mathbf{P} \cdot \mathbf{l}$$

$$\mathbf{Q} = \mathbf{N}^{-1}$$

$$\hat{\mathbf{x}} = \mathbf{Q} \cdot \mathbf{n} = (\mathbf{A}^T \cdot \mathbf{P} \cdot \mathbf{A})^{-1} \cdot \mathbf{A}^T \cdot \mathbf{P} \cdot \mathbf{l}$$
(2.14)

[Niemeier, 2008, S.132 ff] & [Neumann, 2014, S.4 ff]

Dabei beschreibt \mathbf{Q} die Kofaktormatrix der Unbekannten. Weitere Details zum Gauß-Markov-Modell können einschlägiger Literatur entnommen werden.

2.4.2 Qualität der Bündelausgleichung

Bei der Bündelausgleichung muss für die Qualitätsbeurteilung der Ausgleichung zwischen der Genauigkeit der Beobachtungen (Bildkoordinaten) und der Genauigkeit der Unbekannten (Objektkoordinaten) unterschieden werden. Zusammen bilden sie die Qualitätsparameter der *inneren Genauigkeit*.

Als erster Qualitätsindex wird ein statistischer Globaltest durchgeführt. Er beschreibt den Vergleich der Standardabweichung der Gewichtseinheit \hat{s}_0 nach der Ausgleichung (a posteriori) mit der theoretischen Standardabweichung s_0 vor der Ausgleichung (a priori). Signifikate Unterschiede im Globaltest resultieren durch grobe Ausreißer, ein unvollständiges funktionales Modell oder ein fehlerhaftes stochastisches Modell [Niemeier, 2008]. Des Weiteren wird mit \hat{s}_0 und den Hauptdiagonalelementen q_{ll} der Matrix Q_{ll} (siehe 2.13) die Genauigkeit der Beobachtungen bestimmt.

$$\hat{s}_j = \hat{s}_0 \sqrt{q_{jj}} \tag{2.15}$$

Zur Vermeidung systematischer Einflüsse sollten dabei die Standardabweichungen der gemessenen Bildkoordinaten in x'- und y'- Richtung identisch sein.

Für die Genauigkeit der Unbekannten wird die nach der Ausgleichung erhaltene mittlere Standardabweichung sämtlicher Objektpunkte \hat{s}_{XYZ} betrachtet. Diese bilden sich zu

$$RMS_X = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \hat{s}_{X_i}^2} \qquad RMS_Y = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \hat{s}_{Y_i}^2} \qquad RMS_Z = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \hat{s}_{Z_i}^2} \qquad (2.16)$$

[Luhmann, 2018, S.630]

Die Standardabweichungen sind dabei von der Lage der Punkte im Objektkoordinaten-

system abhängig (datumsabhängig). Mit ihnen wird die Beziehung zur Genauigkeitsabschätzung 2.11 überprüft [Luhmann, 2018, S.377].

Die äußere Genauigkeit ist ohne externe Referenzen nicht überprüfbar. Dies erfolgt durch die Überprüfung unabhängiger Referenzpunkte oder unabhängiger Referenzlängen. Ein standardisiertes Verfahren wurde mit der Richtlinie VDI/VDE 2634-1 eingeführt. Neben Empfehlungen zu Aufnahmekonfigurationen beinhaltet diese die Definition von Längenmessabweichungen als Überprüfung unabhängiger Referenzlängen. Eine detaillierte Beschreibung der Richtlinie findet sich in [VDI/VDE, 2002].

Häufig ist die erreichte äußere Genauigkeit das entscheidendste Qualitätsmerkmal der Bündelausgleichung.

2.5 Structure-from-Motion

Durch Kombination von Bildverarbeitung und Bildmessung können je nach Anwendungsbedarf Oberflächenmodelle, Punktwolken, Texturmodelle oder Ähnliches erstellt werden. Eine dieser Verarbeitungspipelines wird als *Structure-from-Motion* bezeichnet. Das Grundgerüst vom Structure-from-Motion Prozess wird in Abbildung 2.6 dargestellt und anschließend besprochen. Auf eine explizit nähere Betrachtung einzelner Elemente wird verzichtet. Eine Optimierung oder Veränderung dieser Elemente im Zuge dieser Arbeit findet nicht statt. Vertiefende Literatur kann unter anderem in [Carrivick u. a., 2016] gefunden werden.



Abbildung 2.6: Structure-from-Motion Pipeline verändert nach [Luhmann, 2018]

Zunächst werden Merkmale der aufgenommenen Bilder mit Hilfe eines Interest-Operator extrahiert. Mittels Matching und einem RANSAC-Algorithmus dienen anschließend diese Merkmale als Grundlage für eine erste relative Orientierung eines Bildpaares. Die restlichen Bilder werden danach hinzugefügt und ebenso vor-orientiert. Die Orientierung des gesamten Bildverbandes erfolgt anschließend über eine Bündelausgleichung. Als Ergebnis entsteht die dünn besetzte Punktwolke. Für eine dicht besetzte Punktwolke müssen weitere Stereopaare hinzugefügt und mittels Stereomatching verarbeitet werden. Sämtliche dabei entstehenden Punktwolken werden des Weiteren zu einem Oberflächenmodell fusioniert. [Luhmann, 2018, S.491]

Der Bezug zwischen den erstellten Bildern und dem in späterem Verlauf verwendeten Oberflächenmodell wird durch diesen Prozess beschrieben. Die in dieser Arbeit verwendete Auswertungssoftware, *Agisoft Metashape*, basiert auf der Structure-from-motion Pipeline.

2.6 Grundlagen Beton

Beton ist ein als Suspension angemischter Baustoff. Die wichtigsten Inhaltsstoffe von Beton sind Zement, Gesteinskörnung, Wasser und optionale Betonzusätze. Betonzusätze verändern durch chemische oder physikalische Einwirkung die Betoneigenschaften (Verflüssiger, Fließmittel, Beschleuniger uvm.) [Lohmeyer, 2013, S.23]. Neben dem Mischverhältnis der genannten Inhaltsstoffe variieren Betoneigenschaften je nach Erhärtungszustand. Grob wird hierbei zwischen Frischbeton (unmittelbar bei der Herstellung), junger Beton (im Aushärteprozess) und Festbeton (ausgehärtet) unterschieden [Wietek, 2019, S.5]. Der Fokus dieser Arbeit liegt auf der Auswertung von Frischbeton.

Eine Möglichkeit Frischbeton zu klassifizieren, besteht in der Definition einer Betonkennung. Diese ist vor allem für Vergleiche nützlich, da Teile der Inhaltsstoffe auf einen Blick erkennbar sind. Ein Beispiel für die in dieser Arbeit verwendete Betonkennung wird in Abbildung 2.7 gezeigt.



Abbildung 2.7: Beispiel-Kennung eines Frischbetons

Unter $Grö\beta tkorn$ wird dabei das größte in der Gesteinskörnung vorkommende Korn bezeichnet. Der Leimgehalt bildet sich über Zement, Wasser, ggf. Betonzusatzmittel und Betonzusatzstoffe. Umso mehr Leimgehalt ein Frischbeton vorweist, desto weniger vom Größtkorn kann auf der Oberfläche liegen.

Der Verarbeitbarkeit von Frischbeton fällt hinsichtlich der Anwendung eine entscheidende Rolle zu. Sie ist abhängig vom Fließvermögen, der Verformbarkeit und Verdichtbarkeit des Betons. Durch den vermischten Einfluss dieser Eigenschaften kann keine rein physikalische Definition der Verarbeitbarkeit erfolgen. Zur quantitativen Beurteilung wird hierfür der Oberbegriff *Konsistenz* verwendet und je nach Verarbeitbarkeit Konsistenzbereiche definiert [Wesche, 1993, S.175]. Die Konsistenzbereiche und deren Prüfung werden in den Normen DIN 1045 bzw. DIN EN 206-1 beschrieben. Die Prüfung der Konsistenz von Frischbeton kann entweder durch einen Ausbreitversuch oder Verdichtungsversuch erfolgen. Details zum Letzten können der Theorie in [Wesche, 1993, S.433] entnommen werden und sind kein weiterer Teil dieser Arbeit.

2.6.1 Konsistenzprüfung durch den Ausbreitversuch

Ziel des Ausbreitversuchs ist die Bestimmung des Konsistenzbereichs eines zu prüfenden Betons.

Der Aufbau des Ausbreitversuches ist in Abbildung 2.8 visualisiert. Ein genormter Setztrichter wird dabei mittig auf dem Ausbreittisch aufgestellt. Dieser besteht aus einer quadratischen Plattform mit einer Seitenlänge von 70 cm und ist mit Scharnieren klappfähig an einer Unterkonstruktion befestigt. Die maximale Klappöffnung beträgt im Bereich des Griffes 4 cm und ist mit einem Anschlag begrenzt. Die positionierte Form wird anschließend mit zwei Schichten Beton aufgefüllt und mit einem Stahllineal bündig abgezogen. Nach dem Entfernen der Form durch senkrechtes Hochziehen wird die Plattform am vorderen Griff 15 mal bis zum Anschlag hochgehoben und wieder frei fallengelassen. Der mittlere Durchmesser des resultierenden Betonkuchens ergibt das entsprechende Ausbreitmaß. [Vollenschaar, 2004, S.434]



Abbildung 2.8: links Ausbreitversuch verändert nach [Vollenschaar, 2004]; rechts Ausbreittisch mit Setztrichter nach [Form+Test, 2020]

Je nach Ausbreitmaß wird dem getesteten Beton eine Konsistenzklasse zugeordnet. Die Verknüpfungen sind in Tabelle 2.1 zusammengefasst.

Konsistenzbeschreibung	Ausbreitmaß [mm]	Konsistenzklasse
steif	≤ 340	F1
plastisch	350 - 410	F2
weich	420 - 480	F3
sehr weich	490 - 550	F4
fließfähig	560 - 620	F5
sehr fließfähig	630 - 700	F6

Tabelle 2.1: Konsistenzbereiche für Frischbeton nach DIN 1045 / EN 206-1

Die Konsistenzprüfung erlaubt keine detaillieren Aussagen zur Betononberfläche. Oberflächenrauheit, verwendetes Größtkorn oder andere weiterführende Parameter können nicht analysiert werden. Hierfür wird auf die Oberflächenanalyse nach EN-ISO-25178 zurückgegriffen.

2.6.2 Oberflächenanalyse nach EN-ISO-25178

Die EN-ISO-25178 hat ihren Ursprung in dem EU-Projekt Development of Methods for the Characterisation of Roughness in Three Dimensions [Stout u. a., 2002]. Sie beschäftigt sich mit der Spezifikation von 3D-Oberflächentexturen. Begriffe und Oberflächen-Kenngrößen für die Rauheitsauswertung werden hauptsächlich in Teil 2 der EN-ISO-25178 zusammengefasst [ISO 25178-2, 2012].

Unter der Vielzahl an Parametern wird in dieser Arbeit ausschließlich auf die Parameter Vmc, Sk und Sdr eingegangen.

Mit Vmc wird das Kernmaterialvolumen bezeichnet. Dieses ist in der Regel definiert als das Materialvolumen zwischen 10% und 80% des flächenhaften Materialanteils. Vmc ist in Abbildung 2.9 links visualisiert.

Die Kernhöhe Sk bezeichnet einen flächenhaften Materialanteil. In einigen Industriezweigen dient dieser als Maß für die Belastbarkeit der Oberfläche im Kernbereich. Sk wird durch den Schnittpunkt der maximalen Höhe der Kernoberfläche und den Schnittpunkt der minimalen Höhe der Kernoberfläche begrenzt. Die Kernhöhe ist in Abbildung 2.9 rechts visualisiert.

Sdr bezeichnet das Verhältnis der wahren zu einer vollständig planaren Oberfläche. Es ist ein Maß für die Rauheit der Oberfläche und aus diesem Grund von Interesse für eine Betrachtung [Wiehr und Seewig, 2002].



Abbildung 2.9: Beispielhafte Oberflächenparameter Vmc (links) und Sk (rechts) eines F3-Frischbetons

Vmc, Sk und Sdr werden im weiteren Verlauf der Arbeit aus den rekonstruierten Modellen extrahiert und verglichen.

3 Aufnahme- und Auswertungskonzepte

In diesem Kapitel wird die entwickelte Methode für die photogrammetrische Rekonstruktion von Frischbeton-Oberflächen beschrieben. Diese teilt sich in ein Aufnahme- und Auswertungskonzept.

Das Aufnahmekonzept beschreibt sämtliche Elemente, die für die Entstehung und den Inhalt der zu analysierenden Bilder relevant sind. So wird zunächst in Abschnitt 3.1 eine geeignete Aufnahmekonfiguration vorgestellt. In 3.1.1 erfolgt der Bezug der Aufnahmekonfiguration zum Versuchsaufbau des Ausbreittisches. Das Konzept für eine prinzipielle Realisierung wird in 3.1.2 beschrieben. Abschließend erfolgen in 3.1.3 und 3.1.4 notwendige Vorbereitungen für den Objektraum.

In Abschnitt 3.2 werden Kriterien für eine Reduktion des benötigten Bildmaterials eingeführt. Diese werden einerseits über den Stereonormallfall (3.2.1) und andererseits über die Epipolargeometrie (3.2.2) hergeleitet.

Den Beginn des Auswertungskonzepts stellen die in Abschnitt 3.3 vorgestellten Beurteilungskriterien dar. Des Weiteren erfolgt die Beschreibung von Messstäben für die Betrachtung der äußeren Genauigkeit in 3.3.1 und 3.3.2. Abschließend wird 3.3.3 ein Maß für Lücken im 3D-Modell eingeführt. Dieses basiert auf der Analyse des ebenfalls vorgestellten Digitalen Höhenmodells.

3.1 Wahl der Aufnahmekonfiguration

Referenzdaten sind für Vergleiche und die Betrachtung erreichbarer Genauigkeiten unerlässlich. Da kein übergeordnetes Referenzsystem vorliegt, werden diese durch die Verwendung einer möglichst optimalen Aufnahmekonfiguration gewonnen. Optimal beinhaltet hierbei die Forderung an homogene Genauigkeitsverhältnisse in jede Raumrichtung und eine hohe Redundanz für jeden aufgenommenen Objektpunkt.

Um beide Eigenschaften verlässlich zu erfüllen, wird die Konfiguration eines *Rundum-Verbands* verwendet. Die Aufnahmen erfolgen dabei halbkugelförmig um das gesamte Objekt [Rautenberg und Wiggenhagen, 2006].

Abbildung 3.1 zeigt beispielhaft den in der *VDI/VDE 2634* Richtlinie vorgeschlagenen 16-8-8-4 Rundum-Verband. Die einzelnen Zahlen stehen dabei für die Bildanzahl in der betreffenden Horizontallage. Die Anzahl und Anordnung der Bilder ist dabei theoretisch beliebig [Luhmann, 2018, S.166].



Abbildung 3.1: 16-8-8-4 Rundum-Verband mit zwei selektierten Teilverbänden (grün/blau), verändert nach [Rautenberg und Wiggenhagen, 2006]

Durch geeignete Wahl der Aufnahmestandorte werden Teile der Referenzdaten für reduzierte Aufnahmeverbände herangezogen. Hierfür benötigte Auswahlkriterien werden in Abschnitt 3.2 näher besprochen.

Die symmetrische Anordnung der Projektionszentren im Rundum-Verband ist dabei nicht zwingend erforderlich, bringt jedoch Vorteile für die Auswertung von Teilverbänden. Durch eine symmetrische Aufnahme spiegelt sich der geometrische Zusammenhang eines Teilverbandes in anderen Teilverbänden wider. So entsprechen beispielsweise die geometrischen Beziehungen des grünen Teilverbandes denen des blauen Teilverbandes in Abbildung 3.1. Dies wird für eine Verifikation einer gewählten Konstellation genutzt. Dadurch entfallen zusätzlich benötigte Aufnahmen.

3.1.1 Bezug zwischen Aufnahmekonfiguration und Objektraum

Die halbkugelförmige Aufnahmekonfiguration des Rundum-Verbandes ermöglicht einen einfachen Bezug zwischen den zu planenden Kamerastandorten und dem Objekt. Bei dem Objekt handelt es sich um den in Kapitel 2.6.1 vorgestellten Ausbreittisch. Das Objektkoordinatensystem sei mit dem Ursprung im Tischmittelpunkt definiert. In Abbildung 3.2 ist der Zusammenhang der geplanten Kamerastandorte mit dem Objektkoordinatensystem visualisiert. Der erste Index der Kameras $C_{0...j,0...i}$ steht für die Horizontallage der Kamera. Der zweite Index beschreibt innerhalb der Horizontallage die Position der Kamera im Uhrzeigersinn. Der Abstand h zwischen Projektionszentrum und Objektkoordinatenursprung ist für alle Kameras konstant.

Die Position jeder Kamera C kann im Objektkoordinatensystem mit den Koordinaten (X_C, Y_C, Z_C) und den dazugehörigen Drehwinkeln $(\omega_C, \varphi_C, \kappa_C)$ beschrieben werden. Eine

Drehung der Kameras entlang der Längsachse ist dabei nicht erwünscht. Daraus resultiert die zusätzliche Forderung $\omega_C = 0^{\circ}$.



Abbildung 3.2: Rundum-Verband im Bezug zum Ausbreittisch

3.1.2 Konzeptionelle Umsetzung

Die Aufnahmekonstruktion wird mit einem drehbar gelagerten Objekt, zwei Linearführungen und einer auf einem Drehgelenk befestigten Kamera geplant. Der prinzipielle Aufbau ist in Abbildung 3.3 visualisiert. Bewegliche Achsen sind darin mit Pfeilen dargestellt. Die X- und Z- Koordinate der Kamera wird über die beiden Linearführungen eingestellt. Die Drehung des Objektes liefert den in Abbildung 3.2 eingezeichneten Gier-Winkel κ und damit verbunden die Y-Koordinate der Kamera. Der Nick-Winkel φ wird als letzte Komponente über das Drehgelenk eingestellt.

Resultierend aus der geplanten Konstruktion verändert sich innerhalb einer Kamera-Horizontallage des Verbandes lediglich der Objektbereich. Der Bereich im Hintergrund bleibt in den Bildern weitgehend konstant. Gleichbleibende Merkmale des Hintergrunds korrelieren dadurch mit veränderten Merkmalen im Objektbereich. Dies führt zu einer fehlerhaften ersten Orientierung und zu einer nicht erfolgreich durchführbaren Bündelausgleichung.

Abhilfe schafft die Maskierung des Objektbereiches. Der für die Merkmale zuständige Interest-Operator (siehe Abschnitt 2.5) wird auf den Objektbereich beschränkt. Die gleichbleibenden Merkmale des Hintergrunds werden dadurch verworfen.



Abbildung 3.3: Prinzipielle Aufnahme-Konstruktion

3.1.3 Maskierung im Objektbereich

Die Maskierung des Objektbereiches kann automatisch oder manuell erfolgen. Durch die zu erwartende hohe Anzahl an Bildern mehrerer Rundum-Verbände ist eine automatische Auswertung zu bevorzugen.

Eine einfach zu automatisierende Methode bietet die Auswertung eines künstlich markierten Objektbereiches. Das Hinzufügen von künstlichen Markierungen wird im Allgemeinen mit *Signalisierung* bezeichnet [Luhmann und Maas, 2016, S. 10]. Auf Details zur Signalisierung wird in Abschnitt 3.1.4 näher eingegangen.

Abbildung 3.4 stellt die entwickelte Auswertungskette für eine Maskierung eines künstlich signalisierten Objektbereiches dar. Für eine erfolgreiche Maskierung werden mindestens vier in allen Bildern erkennbare Eckmarker benötigt.



Abbildung 3.4: Ablauf - Maskierung durch künstliche Signalisierung eines Bildes mit der Bildgröße $(n \ge m)$

Ein Nachteil dieser Methode ist die zwangsläufige Maskierung nicht zum Objekt zugehöriger Bereiche. In einzelnen Anwendungen ist eine genauere Maskierung erforderlich (z.B.: Analyse Merkmalsextraktion in 5.1). Abhilfe schaffen Segmentierungsverfahren der digitalen Bildverarbeitung. Das Vorwissen über die Homogenität und eingeschränkte Position des Objektes kann hierfür verwendet werden. Abbildung 3.5 stellt eine mögliche Auswertungskette vor. Als Segmentierungsverfahren dient ein Region-Growing-Algorithmus.



Abbildung 3.5: Ablauf - Maskierung eines Bildes mit der Bildgröße $(n \ge m)$ durch Methoden der digitalen Bildverarbeitung

Die Wahl des notwendigen Seed-Pixels kann konstruktionsbedingt auf den Bildmittelpunkt fallen. Als Maske resultieren hierbei nur Bereiche, die dem Homogenitätskriterium genügen. Bei geeigneter Optimierung entspricht dies ausschließlich dem Objekt. Details zu Region-Growing-Algorithmen und der Nachbearbeitung durch morphologische Filter können beispielsweise [Nischwitz und Haberäcker, 2013] entnommen werden.

3.1.4 Signalisierung im Objektbereich

Die Signalisierung im Objektbereich erfolgt durch Hinzunahme von künstlichen Zielmarkern. Diese verkörpern möglichst exakt bestimmbare Messpunkte.

Auf Grund ihres radial-symmetrischen Aufbaus und der damit verbundenen Stabilität bei auftretenden Blickwinkelveränderungen empfehlen sich kreisförmige Marker-Formen. Der eigentliche Messpunkt entspricht dem Marker-Zentrum und kann durch Verfahren der digitalen Punktmessung automatisch erkannt werden. Die Größe der Zielmarker kann über den Aufnahmeabstand und die Bildgröße abgeschätzt werden. Nach [Luhmann, 2018, S.255] sollte der Durchmesser des Zielmarkers im Bildraum 4-5 Pixel nicht unterschreiten.

Die Codierung der kreisförmigen Zielmarker stellt eine sinnvolle Erweiterung dar. Jedem Zielmarker wird ein eindeutig identifizierbarer Code zugewiesen (i.d.R. in Form einer natürlichen Zahl). Dies ermöglicht eine automatisierte Zuordnung unabhängig von der Position des Markers. Beispiele sind in Abbildung 3.6 dargestellt.

Ein Algorithmus zur automatischen Detektion für kreisförmig codierte Zielmarker wird in [Sanches u. a., 2013, S.222] vorgestellt. Nach [Luhmann, 2018, S.491] erfolgt die erreichbare Genauigkeit der automatischen Messpunktbestimmung in hoher Subpixelgenauigkeit.



Abbildung 3.6: Kreisförmig codierte Zielmarker nach [Agisoft, 2020b]

3.2 Reduktion von benötigten Projektionszentren

Ein Aspekt dieser Arbeit besteht in der Genauigkeitsbetrachtung rekonstruierter Objekte in Abhängigkeit einer minimalen Anzahl an benötigten Projektionszentren. Von besonderem Interesse sind die Konfigurationen von Drei- und Vierbildverbänden.

In diesem Abschnitt werden Ansätze für eine Beurteilung und Konstruktion von Aufnahmegeometrien formuliert. Die Analyse des hinlänglich bekannten Stereonormalfalls stellt dabei eine ideale Ausgangslage für Beurteilungskriterien dar.

3.2.1 Ansatz durch Betrachtung im Stereonormalfall

Der Maßstab und das Höhen-Basis-Verhältnis sind nach Abschnitt 2.3.4 zwei maßgebliche Einflüsse für erreichbare Genauigkeiten im Stereobereich. Das Höhen-Basis-Verhältnis ist entscheidend für die erreichbare Tiefengenauigkeit. Dies resultiert durch dessen direkten Einfluss auf die Schnittbedingungen der Bildstrahlen. Im Idealfall schneiden sich diese unter einem Winkel von $90^{\circ} - 100^{\circ}$. Bei einer ausreichenden Anzahl von Bildern genügt in der Praxis der erweiterte Bereich von $45^{\circ} - 120^{\circ}$ [Luhmann, 2018, S. 617]. Homogene Genauigkeitsverhältnisse resultieren nur bei geeignetem Höhen-Basis-Verhältnis.

Ein optimales Höhen-Basis-Verhältnis kann allerdings Probleme bei der Zuordnung von Bildern auslösen. Der große Abstand der Kameras erschwert die Zuordnung von extrahierten Merkmalen. Im Stereonormalfall ergibt sich eine zu geringe Überlappung im Bildbereich. Das Ergebnis ist eine ungenaue Rekonstruktion auf Grund der zu geringen Netzdichte der Stahlenbündel.

Zusammenfassend eignen sich folgende Parameter aus der Betrachtung des Stereonormalfalls für die Planung und theoretische Beurteilung von Aufnahmekonfigurationen:

- Höhen-Basis-Verhältnisse der beteiligten Kameras (Kapitel 2.3.4)
- Netzdichte der Strahlenbündel (Kapitel 2.4)

Beide Einflussfaktoren genügen nicht als allgemeingültiges Auswahlkriterium bei der Planung einer Aufnahmekonfiguration. Direkte Rückschlüsse auf vorteilhafte AufnahmeGeometrien können aus ihnen nicht gezogen werden. Ein geeignetes Mittel zur Betrachtung geometrischer Zusammenhänge erfolgt durch Grundlagen der Epipolargeometrie aus Abschnitt 2.3.3.

3.2.2 Geometrien im Mehrbildverband

In [Maas, 1992] wird die Wahrscheinlichkeit von Mehrdeutigkeiten bei der Zuordnung im epipolaren Suchbereich beschrieben. Ähnliche aus der Oberfläche extrahierte Merkmale führen zu Fehlkorrelationen bei der Merkmalszuordnung. Im Bezug auf Frischbeton-Oberflächen muss durch die relativ homogene Oberflächenbeschaffenheit mit diesen Mehrdeutigkeiten gerechnet werden. Allgemein vergrößert sich die Wahrscheinlichkeit von Mehrdeutigkeiten mit der Anzahl der Punkte im Bildraum und der Länge der Basis. In einer Zweibildkonfiguration können diese nicht alleine durch geometrische Kriterien gelöst werden [Maas, 1997, S.6]. Eine Verringerung der Wahrscheinlichkeit kann durch merkmalsbasierte Zuordnungen erfolgen. Ein weiterer Ansatz betrifft die Hinzunahme weiterer Kameras, um eine zusätzliche Reduktion des Suchbereiches zu erreichen.

Durch Hinzunahme eines dritten Bildes resultiert im epipolaren Suchbereich ein Schnitt von Epipolarlinien und somit eine wesentliche Reduktion des Suchbereiches. Eine analytisch vollständige Betrachtung kann in [Maas, 1997] nachgelesen werden.

Für den Dreibildverband resultieren drei geometrische Kameraanordnungen:

- symmetrisch kollineare Anordnung / Abbildung 3.7 (a)
- asymmetrisch kollinare Anordnung / Abbildung 3.7 (b)
- gleichverteilte Anordnung / Abbildung 3.7 (c)



Abbildung 3.7: Aufnahmekonfigurationen verändert nach [Maas, 1997]

Der symmetrische Aufbau liefert dabei die minimale Anzahl nicht lösbarer Punktzuordnungen im Bildraum. Der asymmetrische Aufbau reduziert durch die Einführung einer kurzen Basis die Anzahl an Mehrdeutigkeiten, während die lange Basis die Forderung nach einer guten Bestimmbarkeit der Tiefenkoordinate erfüllt. Die Anordnung im Dreieck erlaubt ebenso eine gute Anzahl nicht lösbarer Mehrdeutigkeiten und wird zusätzlich als in den meisten Fällen am geeignetsten beschrieben [Maas, 1997, S.12]. Für weitere Redundanz können zu den Anordnungen zusätzliche Bilder hinzugefügt werden. Eine erwähnenswerte Erweiterung stellt dabei das Quadrat im Vierbildverband dar. Durch die stark ansteigende Komplexität ist eine analytische Lösung für mehr als vier Bilder nicht zielführend. Die Flexibilität der Bündelausgleichung erlaubt die Betrachtung des Informationsgewinnes durch zusätzliche Vergrößerung der Bildverbände.

Durch die beiden Bewertungskriterien aus dem Stereonormalfall und den beschriebenen geometrischen Anordnungen sind genügend Grundlagen für eine geeignete Versuchsplanung gegeben. Die Umsetzung und Analyse erfolgt in Kapitel 5.

3.3 Beurteilungskriterien für Aufnahmekonfigurationen

Beurteilungskriterien sind notwendig, um die Qualität der rekonstruierten Oberflächen zu beurteilen. In diesem Abschnitt liegt der Fokus auf der äußeren Genauigkeit und der Vollständigkeit der jeweiligen Rekonstruktion. Qualitätskriterien für die innere Genauigkeit können der Theorie in Abschnitt 2.4.2 entnommen werden.

Für die Beurteilung der äußeren Genauigkeit werden externe Referenzen benötigt. Diese können nach VDI/VDE in Form von Längenmaßstäben realisiert werden.

3.3.1 Konstruktion von Längenmaßstäben

Für die Konstruktion von Längenmaßstäben wird eine beliebige Anzahl von Markern auf einem oder mehreren Träger befestigt. Das Trägermaterial sollte möglichst stabil und unempfindlich gegenüber äußeren Einflüssen (Temperatur, Luftfeuchtigkeit usw.) sein. Die Einmessung erfolgt anschließend durch photogrammetrische Messmethoden. Als Voraussetzung wird ein vorab eingemessener Präzisionsmaßstab benötigt. Die bestimmbare Genauigkeit des Präzisionsmaßstabs sollte dabei eine Dimension höher liegen als die gewünschte Genauigkeit der einzumessenden Stäbe. Die Einmessung erfolgt durch Aufnahmen des Trägers mit dem Präzisionsmaßstab in einem geeigneten Verband (z.B. Rundum-Verband).

Die Abstände zwischen den Markern können nach erfolgreicher Ausgleichung bestimmt werden. Koordinatensysteme werden durch ähnliche Art automatisiert im Objektraum definiert. In Abbildung 3.8 sind die Längenmessstäbe $\Delta l_1, \Delta l_2, \Delta l_3$ und ein zweidimensionales Koordinatensystem dargestellt.



Abbildung 3.8: Zwei Längenmessstäbe und ein 2D-Koordinatensystem für den Objektraum

Die Definition des 2D-Koordinatensystems über die Längen $\Delta l_a, \Delta l_b, \Delta l_c$ erfolgt über die Gleichungen des euklidischen Abstands zwischen den Punkten P_1, P_2 und P_3 . Der Ursprung des Koordinatensystems sei dabei im Punkt P1 = (0|0|0) definiert. Die Koordinaten des Punktes P_2 werden durch $P_2 = (\Delta l_a|0|0)$ gebildet. Die Koordinaten des Punktes $P_3 = (P_{3X}|P_{3Y}|0)$ werden durch die Gleichung 3.1 berechnet.

$$P_{3X} = \frac{\Delta l_a^2 + \Delta l_b^2 - \Delta l_c^2}{2\Delta l_a}$$

$$P_{3Y} = \sqrt{\Delta l_b^2 - \frac{(\Delta l_a^2 + \Delta l_b^2 - \Delta l_c^2)^2}{4\Delta l_a^2}}$$

$$(3.1)$$

Die Länge und optimale Anzahl von Messstäben wird in der VDI/VDE 2634 Richtlinie beschrieben. Die größte Testlänge (in Abbildung 3.8 entsprechend Δl_1) sollte mindestens 2/3 der Länge der Raumdiagonalen des Messvolumens entsprechen [VDI/VDE, 2002].

3.3.2 Konstruktion von Höhenmaßstäben

Als Höhenmaßstäbe werden idealerweise in Aufnahmerichtung positionierte und eingemessene Längenmaßstäbe verwendet. Für die Sichtbarkeit aus vielen verschiedenen Blickwinkeln führt dies jedoch zu einem wesentlich erhöhtem Konstruktionsaufwand.

Alternativ wird auf Hochpunkte im Objektraum zurückgegriffen. Um diese als Höhenmaßstäbe zu verwenden, wird eine definierte Ebene im Raum benötigt. Diese kann beispielsweise durch die Punkte P_1 , P_2 und P_3 des in Abschnitt 3.3.1 eingeführten 2D-Koordinatensystems definiert werden. Die Berechnung einer Ebene E aus 3 Punktkoordinaten wird in [Papula, 2018, S.119] beschrieben und hergeleitet.

Liegt das Koordinatensystem in einer Ebene mit den Hochpunkten, so kann der Abstand dieser Hochpunkte zur resultierenden Ebene als Höhenmaßstab herangezogen werden. Das Prinzip für zwei Höhenmaßstäbe Δh_1 und Δh_2 wird in Abbildung 3.9 dargestellt.


Abbildung 3.9: Höhenmaßstäbe, definiert über eine Ebene E im Raum.

3.3.3 Lücken im 3D Modell

Genauigkeiten von photogrammetrisch bestimmten Punkten genügen nicht als alleinstehendes Qualitätskriterium einer 3D-Rekonstruktion. Aussagen über die Vollständigkeit des rekonstruierten Objektes lassen sich durch sie nicht treffen. Objektbereiche, in denen keine Punkte vorliegen, können nicht korrekt rekonstruiert werden. Mögliche Einflussfaktoren für fehlende Punkte sind:

- Verdeckungen
- Spiegelungen
- fehlende Oberflächentextur

Das Ergebnis sind Lücken im rekonstruierten Modell. Insbesondere bei der Aufnahme von Frischbeton sind diese Effekte durch die noch feuchte und damit glänzende Oberfläche zu erwarten. Der Anteil an Lücken kann indirekt nach der Ausgleichung durch die Verwendung des Digitalen Höhenmodells berechnet werden.

Analyse Digitaler Höhenmodelle

Beim Digitalem Höhenmodell (DHM) handelt es sich um ein zweidimensionales Rasterbild. Die Pixelposition wird über eine definierte Ebene im Raum bestimmt. Dessen Pixelwert entspricht dem korrespondierenden orthogonalen Höhenwert. Die Rastergröße wird je nach Modellauflösung gewählt. Fehlende Teile im Rasterbild können durch Interpolation gefüllt werden. Der nötige Ablauf zur Entstehung des Digitalen Höhenmodells wird in 2.5 beschrieben.

Abbildung 3.10 zeigt ein Modell eines aufgenommenen Frischbetons mit interpoliertem und nicht interpoliertem DHM. Ein Bereich mit auftretenden Lücken ist vergrößert dargestellt.



Abbildung 3.10: 3D-Modell mit interpoliertem und nicht interpoliertem DHM

Durch den Vergleich des interpolierten und nicht interpolierten DHM's werden auftretende Lücken extrahiert. Über die definierte Rastergröße wird anschließend der zugehörige Grundflächenanteil berechnet. Dieser wird prozentual zur Gesamtfläche des Objektes angegeben. Dadurch entsteht ein abschätzendes Maß für die fehlende Grundfläche eines rekonstruierten Modells.

4 Realisierung

Dieses Kapitel beschreibt alle Aspekte, die für den realen Versuchsaufbau benötigt werden. Hierfür fließen die Erkenntnisse der Theorie (Kapitel 2) und die Konzepte der Methodik (Kapitel 3) in die Realisierung ein.

Zunächst werden in Abschnitt 4.1 praktische Voraussetzungen und Anforderungen an den Messaufbau formuliert.

Alle kameraspezifischen Themen sind Teil des Abschnittes 4.2, welcher mit der Beschreibung der verwendeten Kameras beginnt. Anschließend erfolgt in Abschnitt 4.2.1 die Berechnung der benötigten Schärfentiefe und die daraus resultierenden Kameraeinstellungen. 4.2.2 beschreibt die Belichtungszeit und damit die letzten notwendigen Kameraeinstellungen.

In Abschnitt 4.3 erfolgt die Umsetzung des Aufnahmekonzeptes aus Kapitel 3. Neben dem Aufnahmesystem wird die Umsetzung der Objekt-Signalisierung (4.3.1) und Objekt-Maskierung (4.3.2) beschrieben.

In Abschnitt 4.4 wird kurz auf das verwendete Auswertungssystem eingegangen. Eine Zuordnung der verwendeten Software zu den einzelnen Kapiteln erfolgt ebenfalls in diesem Abschnitt.

4.1 Anforderungen an den Messaufbau

Ziel des Messaufbaues ist die Aufnahme von Bildmaterial für die photogrammetrische Rekonstruktion von Frischbeton-Oberflächen. Die Realisierung erfolgt durch die Aufnahme des in Kapitel 2.6.1 vorgestellten Ausbreitversuches. Der zu betrachtende Objektbereich kann dadurch direkt definiert werden. Das Koordinatensystem wurde hierfür bereits in 3.1 eingeführt. Die Dimension des Objektbereiches wird in Tabelle 4.1 zusammengefasst.

	maximale Ausdehnung	gültiger Wertebereich
X - Richtung	0.7 [m]	[-0.35, 0.35]
Y - Richtung	0.7 [m]	[-0.35, 0.35]
Z - Richtung	0.05 [m]	[0, 0.05]

Tabelle 4.1: Maximale Objektausdehnungen und deren Definitionsbereiche

Die mit 0.05[m] geringe maximale Ausdehnung in Z-Richtung resultiert aus der verwendeten Betonmenge des Ausbreitversuches. Selbst bei sehr steifen Betonarten wird diese Schwelle in der Regel nicht überschritten.

Hinsichtlich möglicher Kamerastandorte und erreichbaren Genauigkeiten müssen für die Planung Kompromisse eingegangen werden. Diese richten sich hauptsächlich nach praktischen Vorgaben. Die praktische Anwendbarkeit ist ein Bestandteil dieser Arbeit. Die Anforderungen für die Messkonfiguration sind in Tabelle 4.2 zusammengefasst.

Beschreibung	Wertebereich	Anmerkung
Max. Aufnahmeabstand	1.2 [m]	Bezogen auf den Koordinatenursprung
Min. Aufnahmewinkel φ Max. Aufnahmewinkel φ	30[°] 80[°]	Bezogen auf den Koordinatenursprung Bezogen auf den Koordinatenursprung
Min. XY-Genauigkeit Min. Z-Genauigkeit	$1 \ [mm] 1 \ [mm]$	Parallel zur Bildebene In Aufnahmerichtung

Tabelle 4.2: Anforderungen an den Messaufbau

Der Winkel φ ist in Abbildung 3.2 dargestellt. Bei den angegebenen Genauigkeiten handelt es sich um vorgegebene Richtwerte. In ihnen steckt die Forderung von homogenen Genauigkeitsverhältnissen in alle Raumrichtungen.

4.2 Kamerasystem und Kameraeinstellungen

Als Aufnahmekamera wird die in Abbildung 4.1 gezeigte EOS 1100D verwendet. Hierbei handelt es sich um eine Einsteiger-Spiegelreflexkamera der Marke Canon. Verbaut ist ein APS-C-CMOS Sensor mit 12,2 Megapixel und einer maximalen Bildauflösung von 4272 x 2848 Pixel. Die Sensorgröße beträgt 22.2 [mm] x 14.7 [mm] [Haasz, 2012].



Abbildung 4.1: Canon - EOS 1100D [Canon, 2012]

Das verwendete Objektiv der Marke Canon entstammt ebenfalls dem Einsteigersegment. Es handelt sich um ein Vario-Objektiv, dessen Brennweiten-Spektrum von 18[mm] bis 55[mm] reicht.

Die Wahl der Kamera und des Objektives erfolgte hauptsächlich aus praktikablen Gründen. Eine grundsätzliche Einschätzung, ob Vario-Objektive in Kombination mit Einsteigerkameras für die Verwendung in photogrammetrischen Messsystemen geeignet sind, findet sich in [Luhmann, 2010]. Die zu erwartenden Genauigkeitsverluste sind mit den in Abschnitt 4.1 geforderten Genauigkeitsanforderungen vereinbar.

4.2.1 Schärfentiefe, Blende, Brennweite

Die theoretische Betrachtung der Schärfentiefe findet in Kapitel 2.2.2 statt. Für die Berechnung des Schärfentiefebereichs sind bekannte Abstände zwischen möglichen Kamerastandorten und Objektpunkten notwendig. Hierbei genügt der Minimalabstand a'_v und der Maximalabstand a'_h .

Es gilt die Forderung, dass in jedem aufgenommenen Bild der gesamte Objektbereich scharf dargestellt werden muss. a'_v und a'_h können folglich analytisch durch den Abstand der geplanten Kamerastandorte zu den Objektraumgrenzen berechnet werden. In Abbildung 4.2 sind die Grenzen des Objektbereiches blau gekennzeichnet. Durch die Rotationsbewegung des Ausbreittisches beschreibt die Objektgrenze die Form eines Zylinders. Unter Einhaltung der Anforderungen aus Abschnitt 4.1 resultieren die maximalen Werte $a'_v = 0.79[m]$ und $a'_h = 1.65[m]$.



Abbildung 4.2: Objektraumgrenzen (blau) durch Roation des Ausbreittisches

Ausgehend vom Schärfentiefebereich werden die Kameraeinstellungen abgeschätzt. Hierfür wird zusätzlich der tolerierbare Unschärfekreisdurchmesser der Kamera benötigt. Dieser wird über die Formel 2.4 berechnet und ergibt sich für die Canon 1100D zu u' = 0.0133[mm]. Der Zusammenhang zwischen den Kameraeinstellungen (Brennweite, Blende, Fokus) und der Schärfentiefe wird in Gleichung 2.5 beschrieben. Vor der Berechnung der Kameraeinstellungen können diese in sinnvolle Bereiche eingeschränkt werden. Qualitäts- bzw. Genauigkeitsverluste durch diese Einschränkungen sind nicht zu erwarten. Die Wertebereiche werden in Tabelle 4.3 zusammengefasst.

Kameraeinstellung	Wertebereich	Anmerkung
Brennweite	18[mm] ; 24[mm]	Kameraabstand für Brennweiten über 24 [mm] zu gering
Blendenzahl	8.0;11.0	Werte unter 8.0 sind nicht zu erwarten; zu geringe Helligkeit für Werte über 11
Fokus	0[m] - $1.2[m]$	wurde diskretisiert in 50[mm] Schritte

Tabelle 4.3: Wertebereich möglicher Kameraeinstellungen

Mögliche Einstellungskombinationen werden iterativ berechnet. Für jeweils eine Blende, eine Brennweite und einen Fokus werden mittels 2.5 die Schärfepunkte a_v und a_h berechnet. Anschließend werden diese mit den vorgegeben Werten a'_v und a'_h verglichen. Gilt $a_v < a'_v$ und $a_h > a'_h$, kann die Einstellung verwendet werden. Das Kriterium des Schärfentiefebereichs ist dadurch erfüllt.

Für den maximal zulässigen Bereich sind alle gültigen Einstellungen in Tabelle 4.4 zusammengefasst. Eine Realisierung mit geringerer Blendenzahl bzw. größerer Brennweite ist ohne Schärfeverlust nicht möglich.

	Brennweite[mm]	Blendenzahl	Fokus[mm]	a_v [mm]	a_h [mm]
01	18	11.0	1000	692	1801
02	18	11.0	1050	715	1972
03	18	11.0	1100	738	2157
04	18	11.0	1150	760	2359
05	18	11.0	1200	782	2583

Tabelle 4.4: Resultierende Kameraeinstellungen bei Kamera-Ursprungsabstand von 1.2[m]

Eine wesentliche Reduzierung der Kameraentfernungen wird durch das Sichtfeld der Kamera verhindert (Berechnung siehe Formel 2.7). Die Wahl der Aufnahmekonfiguration fällt aufgrund des am günstigsten verteilten Schärfentiefenbereichs auf die Variante 01 aus Tabelle 4.4.

4.2.2 Belichtungszeit und Lichtempfindlichkeit

Weitere Einflussfaktoren der Bildqualität sind Belichtungszeit und Lichtempfindlichkeit. Die Belichtungszeit wird so gewählt, dass eine ausreichend helle Aufnahme gewährleistet ist. Eine Unschärfe durch Verwackeln muss konstruktionsbedingt kaum berücksichtigt werden.

Die Lichtempfindlichkeit wird über die ISO-Zahl eingestellt. Bei zu hohen ISO-Werten ersteht das in Abbildung 4.3 gezeigte Bildrauschen. Eine robuste Merkmalsextraktion ist mit einem zu großen Rauschanteil nicht möglich. Der ISO-Wert der Aufnahmen wurde dementsprechend auf den geringen Wert ISO = 200 festgelegt.



Abbildung 4.3: Bildrauschen in Abhängigkeit der ISO-Zahl; schwarz mit vorhandener Oberflächen-Textur; gelb ohne vorhandene Oberflächen-Textur

4.3 Aufnahmesystem

Das Aufnahmesystem wird nach dem Konzept 3.1.2 realisiert. Beim Verbindungsmaterial handelt es sich um das Bosch Strebenprofil 45x45L. Das aus Aluminium gefertigte Profil ist hochbelastbar und verwindugssteif. Technische Daten können dem Datenblatt [Rexroth, 2019] entnommen werden. Als Kameraaufnahme und Winkelelement wird der bewegliche Gelenkverbinder *Support* der selben Produktlinie verwendet. Dieser verfügt über eine eingravierte Winkelskala.

Ziel der Realisierung ist eine flexible Aufnahmemöglichkeit innerhalb eines definierten Objektbereiches. Die maximale Entfernung zwischen Objektmittelpunkt und Kameraposition beträgt nach dem Aufbau 1.3[m]. Somit genügt diese den in Abschnitt 4.1 beschriebenen Voraussetzungen. Der realisierte Aufbau wird in Abbildung 4.4 dargestellt.



Abbildung 4.4: Aufnahmesystem mit Drehteller und Steuerung - links seitliche Ansicht, rechts Frontalansicht

Als Lichtquellen stehen zwei Tageslichtlampen mit einer Farbtemperatur von 5400 Kelvin zur Verfügung. Diese speziell für Fotografien konzipierten Lampen erzeugen ein diffuses Licht mit einer Gesamtleistung von je 245 Watt. Die Positionierung erfolgt jeweils seitlich des Aufnahmesystems. Durch das diffuse Licht konnten Schatteneffekte und Spiegelungen auf ein Minimum begrenzt werden.

4.3.1 Realisierung der Objektsignalisierung

Die Objektsignalisierung findet nach dem in Kapitel 3.1.4 vorgestellten Schema statt. An den Trägern angebrachte Marker wurden photogrammetrisch eingemessen. Die zu erwartende Genauigkeit liegt bei 0.1[mm]. Die Träger-Befestigung im Objektbereich erfolgt magnetisch.

Position und Aufgabe der verwendeten Marker sind in Abbildung 4.5 visualisiert und werden folgendermaßen beschrieben:

Rote Marker werden für die Maskierung des Objektbereiches verwendet. Sie nehmen keinen weiteren Einfluss auf die Berechnung.

Blaue Marker definieren das in 3.3.1 eingeführte 2D-Koordinatensystem. Sie werden zum gegenseitigen Ausrichten mehrerer Modelle verwendet.

Orange Marker werden als Skalierung eingeführt. Die Länge wurde größer als 2/3 der zu erwartenden Raumdiagonalen des Messvolumens gewählt (siehe Abschnitt 3.3.1). Abstände zwischen **lila Markern** werden als Längenmaßstäbe eingeführt. Betreffen diese einen der beiden Hochpunkte, so werden sie in weiterer Folge als *Höhenmaßstäbe* bezeichnet. Längen- und Höhenmaßstäbe werden hauptsächlich als Maß der erreichten Genauigkeiten herangezogen.



Abbildung 4.5: Marker-Schema am Ausbreittisch; coloriert nach Eigenschaften

4.3.2 Realisierung der Objektmaskierung

Abbildung 4.6 zeigt die Anwendung der in Kapitel 3.1.3 beschriebenen Maskierungsverfahren. Die Kontur des Beton-Kuchens wurde erfolgreich mittels Region-Growing-Algorithmus extrahiert. Je nach Aufnahmestandort und Oberflächenbeschaffenheit können jedoch Lücken bei der Extraktion entstehen. Ein Nachbearbeitungsschritt wird dadurch erforderlich.

Für die Marker basierende Maskierung müssen alle Eckmarker im Bild korrekt identifiziert werden. Eine Nachbearbeitung ist dann nicht notwendig.



Abbildung 4.6: Maskierung des Objektbereiches (blau eingefärbt); links Region Growing; rechts Marker basierend

4.4 Auswertungssystem

Berechnungen, Maskierungen und notwendige Datenverarbeitungen werden über die Programmiersprache Python 3 gelöst. Die automatisierte Steuerung der Software Metashape und die Auswertung dieser Ergebnisse werden ebenso mit Python realisiert.

Die Extraktion von Verknüpfungspunkten und Berechnung der Bündelausgleichung findet durch die von Agisoft entwickelte Software *Metashape Professional 2019* statt (siehe [Agisoft, 2020a]). Die Erzeugung der dicht besetzten Punktwolke, des digitalen Geländemodells und der 3D Modelle erfolgen ebenso durch Metashape.

Als Auswertungssystem steht ein Windows Computer zur Verfügung. Die technischen Daten sind in Tabelle 4.5 zusammengefasst.

Auswertungssystem

Betriebssystem	Windows 10 - 64Bit
Prozessor	i7-4790k 4.00 GHz
Grafikkarte	Nvidia GeForce GTX 980-Ti
Arbeitsspeicher	16 GB

 Tabelle 4.5:
 Technische Daten - Auswertungssystem

Die Steuerung der Kamera erfolgt über einen *Raspberry Pi* Mini-PC. Zusätzlich zum Bildtrigger steuert dieser die beschriebenen Einstellungen der Kamera. Die technischen Daten des Raspberry können dem Datenblatt [RaspberryPi, 2019] entnommen werden.

5 Versuchsdurchführung und Evaluation

Dieses Kapitel befasst sich mit der Beschreibung und Auswertung der durchgeführten Versuche.

Zunächst wird in Kapitel 5.1 die Eignung photogrammetrischer Messmethoden für die Charakterisierung von Frischbeton-Oberflächen untersucht. Dafür werden exemplarisch Veränderungen der Konsistenzklasse (5.1.1) und der Zusammensetzung des Betons (5.1.2) vorgenommen. Das aufgenommene Bildmaterial wird anschließend auf verknüpfbare Merkmale untersucht. Eine Evaluation der Ergebnisse erfolgt in 5.1.3.

Abschnitt 5.2 befasst sich mit der Beschreibung und Beurteilung der Referenzdaten. Hierbei handelt es sich um die Ergebnisse der bestmöglichen realisierten Aufnahmekonfiguration.

In Abschnitt 5.3 werden Genauigkeiten in Abhängigkeit der Anzahl verwendeter Projektionszentren betrachtet. Als Konfiguration wird zwischen einer gleichverteilten Basis in 5.3.1 und einer asymmetrisch verteilten Basis in 5.3.2 unterschieden. Ein kurzer Exkurs in einen vor-kalibrierten Messaufbau erfolgt in Abschnitt 5.3.3.

Im letzten Abschnitt 5.4 erfolgt die Anwendung ausgewählter Konfigurationen auf eine Oberflächenanalyse. Extrahierbare Betonparameter werden dabei betrachtet.

5.1 Extraktion von Oberflächenmerkmalen

In diesem Abschnitt wird die mögliche Anwendung von photogrammetrischen Messmethoden auf Frischbeton-Oberflächen unter optimalen Umgebungseinflüssen untersucht. Optimale Umgebungseinflüsse bezeichnen hierbei weitestgehend konstante Licht-, Temperaturund Luftfeuchtigkeitsverhältnisse. Spiegelungen und Schatteneffekte werden ebenso auf ein Minimum reduziert.

Für die Untersuchung erfolgt die Auswertung aufgenommener Bilderverbände von unterschiedlichen Frischbetonarten. Eine prinzipielle Eignung liegt vor, wenn ausreichend Verknüpfungspunkte in der Oberfläche gefunden werden.

Die Zusammensetzung des Frischbetons wird jeweils über dessen Konsistenzklasse oder Betonkennung beschrieben. Beide werden in Kapitel 2.6 näher erläutert. Der Fokus liegt dabei auf der Konsistenzklasse, da diese praxisnahe Kombinationen von Mischverhältnissen beschreibt. Einzelne auffällige Oberflächentexturen werden anschließend zusätzlich geprüft. Neben der Oberflächenbeschaffenheit beeinflussen noch weitere Faktoren die Menge extrahierbarer Verknüpfungspunkte. Dazu zählen unter anderem:

- Aufnahmegeometrie
- Basisabstand der beteiligten Kameras
- Maßstab der Aufnahme
- Auswertungsmethoden
- Kameraeinstellungen

Falls nicht anders erwähnt, werden Kameraeinstellungen, Aufnahmegeometrie, Maßstab und Auswertungsmethoden für alle Auswertungen konstant gehalten. Der Basis-Abstand wird als zusätzlicher Faktor betrachtet.

5.1.1 Einfluss von Konsistenzklassen

Die Eignungsprüfung erfolgt für die Konsistenzklassen F2 bis F5. Für diese werden zunächst Bildverbände aufgenommen und anschließend ausgewertet. Abbildung 5.1 zeigt eine Übersicht der resultierenden Frischbeton-Oberflächen. Auffallend sind bei steigender Konsistenzklasse die zunehmenden Spiegelungen. Dieser Effekt entsteht durch den höheren Leimgehalt, der unter anderem für das Erreichen des größeren Ausbreitmaßes verantwortlich ist.



Abbildung 5.1: Frischbeton-Oberflächen unterschiedlicher Konstistenzklassen (a) F2-plastisch (b) F3-weich (c) F4-sehr weich (d) F5-fließfähig

Die Anzahl extrahierter Verknüpfungspunkte wird in Bezug zum Basisabstand der betreffenden Kameras angegeben. Bei allen ausgewerteten Frischbeton-Oberflächen wird das Größtkorn 16[mm] gewählt. Die Ergebnisse werden in Abbildung 5.2 präsentiert.



Abbildung 5.2: Extrahierte Verknüpfungspunkte in Abhängigkeit der Frischbeton-Konsistenz

Die deutliche Verringerung der Verknüpfungspunkte bei zunehmendem Basisabstand ist aufgrund des immer stärker abweichenden Bildbereiches zu erwarten. Im Mittel ist die Abweichung zwischen den Konsistenzklassen erstaunlich gering. Eine mögliche Erklärung liefert der je nach Konsistenzklasse größer werdende Objektbereich. So ist beispielsweise die Grundfläche eines F5-Frischbetons ca. 30 Prozent größer als die eines F4-Frischbetons. Bei gleichbleibender Aufnahmekonfiguration kann sich dieser Effekt positiv auf die Anzahl extrahierbarer Verknüpfungspunkte auswirken.

5.1.2 Einfluss von Gesteinskörnung und Betonzusätze

Sowohl verschiedene Gesteinskörnungen als auch das Hinzufügen von Betonzusätzen verändern die Oberfläche des Frischbetons. Ob diese Veränderungen problematisch für photogrammetrische Messungen sind, wurde exemplarisch untersucht.

Als Einfluss der Gesteinskörnung wurde das Größtkorn zweier sonst identischer Betonarten verändert und anschließend ausgewertet. Die Oberflächen dieser Frischbetons sind in Abbildung 5.3 dargestellt.



Abbildung 5.3: Frischbeton-Oberflächen mit unterschiedlichem Größtkorn

Als Betonzusatz wird ein oft eingesetztes Fließmittel verwendet. Für die Untersuchung wurde ein F3-Frischbeton mit Fließmittel versetzt. Die resultierenden Oberflächen werden in Abbildung 5.4 gezeigt.



Abbildung 5.4: 16er Größtkorn Frischbeton (li) mit Fließmittel verflüssigt (re)

Das Ergebnis beider Vergleiche wird in Abbildung 5.5 zusammengefasst dargestellt.



Abbildung 5.5: Extrahierte Verknüpfungspunkte in Abhängigkeit abweichender Gesteinskörnung und Betonzusätze

Bei der Veränderung des Größtkorns von 16[mm] auf 32[mm] wird kein nennenswerter Einfluss festgestellt. Lediglich bei größeren Basis-Abständen ist das 32er-Größtkorn leicht im Nachteil. Ein möglicher Grund dafür sind die größeren Verdeckungen. Diese können sich vor allem bei schrägen Aufnahmen negativ auswirken.

Ähnlich wie bei der Untersuchung der Konsistenzklassen ergab die Hinzugabe von Fließmittel keine negativen Effekte bei der Merkmalsextraktion. Im Gegenteil: Es konnten teilweise mehr Verknüpfungspunkte nach dem Verflüssigen extrahiert werden. Der Grundflächenzuwachs durch das Fließmittel betrug ca. 22 Prozent und kann auch hier als positiver Faktor gedient haben.

5.1.3 Evalutation der Merkmalsextraktion

Durch die Untersuchungen wurde gezeigt, dass Frischbeton-Oberflächen für photogrammetrische Messungen geeignet sind. Ausreichend Verknüpfungspunkte wurden bei allen getesteten Oberflächen gefunden. Wie entscheidend die Wahl des Basisabstandes im Bezug auf die Netzdichte der Auswertung von Betonoberflächen ist, geht ebenso aus den Ergebnissen hervor.

Abhängigkeiten der Verknüpfungspunkte zu den verwendeten Betonzusammensetzungen konnten des Weiteren gezeigt werden. Welche Zusammensetzungen hierbei grundsätzlich vorteilhafter sind, muss weiter untersucht werden. Diese Untersuchungen sind jedoch innerhalb des Rahmens dieser Arbeit nicht möglich und für die photogrammetrische Betrachtung vorerst von geringerem Interesse.

5.2 Beurteilung der Referenzdaten

In diesem Abschnitt wird die Aufnahme und Untersuchung der für weitere Versuche notwendigen Referenzdaten beschrieben. Zur Reduktion des Umfangs beschränkt sich die Auswertung der Frischbeton-Oberflächen auf die Konsistenzklassen F3, F4 und F5. Für jede dieser Konsistenzklassen werden Bildmaterialien eines Ausbreitversuches aufgenommen.

Als Aufnahmegeometrie dient der in 3.1 vorgestellte Rundum-Verband. Die Anordnung der Projektionszentren innerhalb des Verbandes erfolgt symmetrisch. Eine deutliche Überbestimmung des Ausgleichungssystems wird angestrebt, da als Kalibrierungsverfahren eine Simultankalibrierung verwendet wird.

Tabelle 5.1 fasst die Aufnahmekonfiguration der Referenzdaten mit der in Abbildung 3.2 eingeführten Notation zusammen. Die Anforderungen an den Messaufbau aus Kapitel 4.1 werden ebenso berücksichtigt.

Aufnahmekonfiguration (nach Abb. 3.2)	15-15-15-15-15-15
Anzahl Projektionszentren	105
Anzahl horizontaler Ringe j	7
Projektionszentren je horizontalem Ring	15
Vertikale Aufnahmewinkel $[\varphi_0\varphi_j]$	$[30^{\circ}, 38^{\circ}, 46^{\circ}, 54^{\circ}, 61^{\circ}, 69^{\circ}, 77^{\circ}]$
Horizontaler Aufnahmewinkel κ_i	24°
Aufnahmeabstand zum Objektmittelpunkt	1.1[m]
Kameraeinstellungen (siehe 4.2)	
Brennweite	18[mm]
Blendenzahl	11
Fokus	1000[mm]
Auswertungskonfiguration (siehe 4.3)	
Anzahl Marker	19
Anzahl Längenmaßstäbe	4
Anzahl Höhenmaßstäbe	2

 Tabelle 5.1: Zusammenfassung der Aufnahmekonfiguration der Referenzdaten, mit Bezug zur betreffenden Definition

Um zu überprüfen, ob die in Abschnitt 4.1 geforderte Genauigkeit durch diesen Aufbau erreichbar ist, erfolgt eine theoretische Abschätzung über den Stereonormalfall. Diese besitzt im Allgemeinen zwar keine Gültigkeit für die Bündelausgleichung, kann jedoch als grober Richtwert verwendet werden. Als Höhenwert wird der mittlere Aufnahmeabstand zum Koordinatenursprung verwendet. Des Weiteren wird als Basisabstand die mittlere Basis aller Kameras $b_m = 0.87[m]$ verwendet. Angewandt in der Formel 2.11 resultiert die theoretische Lage- und Höhengenauigkeit zu:

$$s_X = s_Y = m \cdot s_{x'} = 0.32[mm]$$
 $s_Z = m \cdot \frac{h}{b} \cdot s_{px'} = 0.40[mm]$ (5.1)

Die in Abschnitt 4.1 geforderten Genauigkeiten werden durch diese Richtwerte deutlich erfüllt.

Abbildung 5.6 zeigt beispielhaft die berechnete dünn besetzte und dicht besetzte Punktwolke der Referenz eines F3- Frischbetons.

In der dichten Punktwolke ist die Struktur und Oberfläche des Frischbetons visuell einwandfrei zu erkennen. Die Beurteilung der Berechnungsqualität erfolgt nach den in Kapitel 2.4.2 formulierten Kenngrößen.



Abbildung 5.6: links dünn besetzte und rechts dicht besetzte Punktwolke eines F3-Frischbetons

Ein Bewertungskriterium der inneren Genauigkeit liefern die Standardabweichungen der Objektkoordinaten. Hierfür wird die mittlere Standardabweichung aller Objektkoordinaten in jede Raumrichtung angegeben. Diese werden nach 2.16 mit RMS_X , RMS_Y und RMS_Z bezeichnet. Da diese RMS-Werte allgemein datumsabhängig sind, beziehen sie sich auf das in 3.2 definierte Koordinatensystem. Des Weiteren wird der mittlere Rückprojektionsfehler RMS_{RP} angegeben.

Die Ergebnisse sind in Tabelle 5.2 zusammengefasst.

	$RMS_X[mm]$	$RMS_{Y}[mm]$	$RMS_Z[mm]$	$RMS_{RP}[px]$
F3-weich	0.347	0.353	0.638	0.51
F4-sehr weich	0.425	0.432	0.749	0.55
F5-fließfähig	0.648	0.664	0.853	0.52

Tabelle 5.2: Messabweichungen der Referenzdaten je nach Konsistenzklasse

Die Werte von RMS_X und RMS_Y sind dabei erwartungsgemäß ähnlich. Sie genügen auch den vorab bestimmten theoretischen Werten $s_X = s_Y = 0.32[mm]$. Die RMS_Z -Werte weichen teilweise deutlich von der theoretischen Betrachtung ab ($s_Z = 0.40[mm]$). Dessen Auswirkung auf das Gesamtergebnis muss über die äußere Genauigkeit betrachtet werden.

Für die Betrachtung der äußeren Genauigkeit werden externe Referenzmessstäbe verwendet. Anordnung und Form können Abschnitt 4.3 entnommen werden. Die extrahierten Messabweichungen sind in Tabelle 5.3 zusammengefasst.

	$\Delta l_1[mm]$	$\Delta l_2[mm]$	$\Delta l_3[mm]$	$\Delta l_4[mm]$	$\Delta h_1[mm]$	$\Delta h_2[mm]$
F3-weich	0.007	0.006	0.01	0.064	0.115	0.082
F4-sehr weich	0.03	0.007	0.051	0.082	0.041	0.036
F5-fließfähig	0.012	0.001	0.028	0.083	0.016	0.021

Tabelle 5.3: Messabweichungen der Referenzdaten je nach Konsistenzklasse

Die durch die Referenzmessstäbe prüfbare Genauigkeit von 0.1[mm] wurde nur bei einer Höhenmessabweichung (F3-Frischbeton) überschritten. Diese überschreitet den Wert mit 0.02[mm]. Die insgesamt erreichte äußere Genauigkeit ist somit ca. eine Größenordnung genauer als die Vorgaben des Messaufbaus. Sie ist allgemein stärker zu gewichten als die bestimmte Genauigkeit der Ausgleichung.

Für alle Verbände konnte somit eine Eignung als Referenz festgestellt werden. Die Ergebnisse zeigen die hohen erreichbaren Genauigkeiten selbst bei Verwendung einer Simultankalibrierung.

5.3 Genauigkeit in Abhängigkeit der Anzahl an Projektionszentren

Bis zu diesem Abschnitt wurden Frischbeton-Oberflächen erfolgreich durch überbestimmte Rundum-Verbände photogrammetrisch ausgewertet. Die erreichten Genauigkeiten übertreffen dabei die praktischen Vorgaben um ein Vielfaches. Das weitere Ziel besteht in einer Annäherung an diese Genauigkeiten trotz wesentlicher Reduktion an verwendetem Bildmaterial. Aus praktischer Sicht soll die Kalibrierung weiterhin über eine Simultankalibrierung erfolgen. Besonders Drei- und Vierbildverbände sind dabei von Interesse. Der mögliche Gewinn durch das Hinzufügen weiterer Bilder wird zusätzlich untersucht.

Die Beurteilung der Genauigkeit erfolgt durch photogrammetrisch eingemessene Messstäbe. Die hierfür verwendeten Marker wurden bereits in Abbildung 4.3 visualisiert. Insgesamt werden für die Prüfung 7 Längen- und 4 Höhenmaßstäbe verwendet.

Neben der ausreichenden Genauigkeit wird die Vollständigkeit der rekonstruierten Oberflächen gefordert. Die Überprüfung findet durch das in Abschnitt 3.3.3 definierte Lücken-Maß statt.

Die Anzahl gefundener Verknüpfungspunkte (VP) wird als weiterer Kennwert betrachtet. Um eine Vergleichbarkeit zwischen Verbänden und Konfigurationen zu erreichen, wird diese im Bezug zur Oberfläche der zugehörigen Referenz in VP/cm^2 angegeben. Die Oberfläche wird hierfür über ein hochauflösendes Triangulations-Mesh abgeschätzt. Für die Referenzdaten ergeben sich daraus die Oberflächenwerte in Tabelle 5.4.

	Grundfläche	Oberfläche	Lücken [%]	VP pro cm^2
	(bezogen auf XY-Ebene)		(bezogen auf Grundfläche)	(bezogen auf Oberfläche)
F3-weich F4-sehr weich	$\begin{array}{c} 1344 \ cm^2 \\ 1634 \ cm^2 \end{array}$	$\begin{array}{c} 1744 \ cm^2 \\ 1987 \ cm^2 \end{array}$	0% 0%	$ \begin{vmatrix} 157.27 \text{ VP}/[cm^2] \\ 182.37 \text{ VP}/[cm^2] \end{vmatrix} $
F5-fließfähig	$2203 \ cm^2$	$1678 \ cm^2$	0%	$119.23 \text{ VP}/[cm^2]$

Tabelle 5.4: Oberflächenwerte der Referenzdaten

Das Bildmaterial der Versuche entspricht dem des jeweiligen Referenzverbandes. Zusätzliche Aufnahmen sind einerseits im Rahmen dieser Arbeit nicht realisierbar und andererseits nicht zwingend erforderlich. Die Verifizierung ausgewählter Konfigurationen erfolgt dank des symmetrisch geplanten Rundum-Verbandes direkt im Verband (siehe Abschnitt 3.1). Es sind beispielsweise für jede Dreibildkonfiguration theoretisch mindestens 13 weitere äquivalente Konfigurationen in dem realisierten Referenzverband verfügbar. Die praktischen Abweichungen, welche aus der Aufnahmekonstruktion resultieren, werden über die Standardabweichungen der Basisabstände modelliert. Dadurch können zu stark abweichende Konfigurationen aus dem Verifizierungsprozess ausgeschlossen werden.

5.3.1 Gleichverteilte Basis

Nach der Bewertung möglicher Aufnahmegeometrien in Kapitel 3.2.2 besteht ein vielversprechender Ansatz in der Geometrie einer gleichverteilten Basis. Für den Dreibildverband bedeutet dies eine Kameraanordnung in der Form eines gleichseitigen Dreiecks. Bei der Vierbildkonfiguration resultiert dementsprechend die Kameraanordnung im Quadrat. Die Kameras können dabei parallel oder frei zum Objekt orientiert sein (parallel bezieht sich hierbei auf die Hauptausdehnungsrichtung des Objektes). Nach [Maas, 1997] ist die

parallele Anordnung zu bevorzugen.

Theoretisch optimale Schnittbedingungen werden durch einen Stereo-Basisabstand von 1.1[m] erreicht (entspricht der mittleren Höhe \rightarrow bestes Höhen-Basis-Verhältnis). Eine Bündelausgleichung konnte mit dieser Basis nicht durchgeführt werden. Die Anzahl extrahierbarer Merkmale ist dafür nicht ausreichend, da der Bildbereich mit zunehmendem Abstand stärker voneinander abweicht. Durch eine Reduktion der Basis zeigt sich die aus dieser Geometrie resultierende Stabilität. Die größer werdende Überlappung erlaubte eine problemlos durchgeführte Bündelausgleichung.

In Abbildung 5.7 sind die Messabweichungen für Drei- und Vierbildverbände in Abhängigkeit von realisierbaren Basisabständen dargestellt. Die Abbildung beinhaltet die Daten von 5 Verifikationen je Konfiguration. Zusätzlich erfolgte die Auswertung von frei orientierte Dreiecksanordnungen im Raum. Diese kann bei Interesse dem Anhang A.1 entnommen werden.



Abbildung 5.7: Längen- und Höhenmessabweichungen von Drei- und Vierbildverbänden, bei gleichverteilten Projektionszentren

Im Mittel liegen die Längenmessabweichungen unter der in Abschnitt 4.1 geforderten Genauigkeit und erfüllen demnach die Voraussetzungen. Durch die dabei aufgetretene Streuung müssen Ausreißer jedoch beachtet werden.

In der Höhenmessabweichung zeigt sich deutlich der vorab theoretisch erörterte Einfluss des Basisabstandes. Eine zu geringe Basis führt zu starker Abweichung der Höhenkomponente. Der größte getestete Basisabstand erreichte in der Höhenmessabweichung im Mittel ebenso die geforderte Genauigkeit. Das Hinzufügen eines weiteren Bildes hat weder in der Längen- noch in der Höhenmessabweichung zu einer nennenswerten Verbesserung geführt.

In Anbetracht der Tatsache, dass eine Simultankalibrierung bei über 95% reduziertem Bildmaterial verwendet wurde, handelt es sich um ein durchaus positives Ergebnis. Ob dieses auch für eine erfolgreiche Oberflächenrekonstruktion genügt, wird über die Ergebnisse der Oberflächenwerte in Tabelle 5.5 beurteilt.

Konfiguration		3 - 52	3 - 79	4 - 47	4 - 71
		[F3/F4/F5]	[F3/F4/F5]	[F3/F4/F5]	[F3/F4/F5]
VP / Fläche	$[VP/cm^2]$	0.1/0.13/0.09	0.07/0.08/0.07	0.2/0.28/0.18	0.13/0.17/0.13
Fehlende Grundfläche	[%]	13.3/5.4/12.7	48.2/16.7/47.1	5.43/2.45/4.01	12.50/6.02/8.48

 $\label{eq:tabelle} {\bf Tabelle 5.5: } Oberflächenwerte - drei bzw. vier gleichverteilte Projektionszentren in Abhängigkeit des Basisabstandes und der Konsistenzklasse F3/F4/F5$

In Tabelle 5.5 handelt es sich um einen repräsentativen Auszug. Die vollständige Liste ist aus Übersichtsgründen dem Anhang A.1 beigefügt.

Aus den Ergebnissen resultiert, dass eine vollständige Rekonstruktion der Oberfläche durch diese Konfigurationen nicht möglich ist. Beispielsweise fehlt von der Grundfläche des F3-Frischbetons in der Dreibildkonfiguration min. 13% und in der Vierbildkonfiguration min 5%. Ein offensichtlicher Grund liegt in der extrem niedrigen Anzahl von extrahierbaren Verknüpfungspunkten. Durch das Hinzufügen eines 4ten Bildes verdoppelt sich diese zwar im Schnitt, liegt aber mit 0.1-0.3 VP/ cm^2 in einem extrem schlechten Bereich. Eine gute Detailauflösung ist mit diesen Werten nicht zu erwarten.

Um die Netzdichte zu erhöhen, werden Projektionszentren mit geringeren Basisabständen und dadurch größerem Überlappungsbereich gefordert. Wesentliche Einbußen in der Höhengenauigkeit sollten vermieden werden. Dies erfolgt durch die zusätzliche Einführung einer lange Basis. Diese Konfiguration entspricht der in [Maas, 1997] beschriebenen asymmetrischen Anordnung (siehe 3.2.2).

5.3.2 Asymmetrisch verteilte Basis

Zur Realisierung von asymmetrischen Dreibildverbänden sind entweder rein horizontale oder horizontale und vertikale Basisabstände zwischen den Projektionszentren möglich. Die rein horizontalen Basisabstände bringen aus der theoretischen Betrachtung der Schnittbereiche keinen Vorteil. Vor allem bezogen auf die Höhengenauigkeit kann eine Verbesserung durch die vertikale Basis erwartet werden. Für einzelne Ringe wurden zur Überprüfung dieser Theorie rein horizontale Konstellationen ausgewertet. Die beschriebenen Nachteile wurden dadurch bestätigt. Da eine genauere Betrachtung dieser Konstellationen für diese Arbeit keinen Mehrwert darstellt, wird hierbei auf die zusammengefassten Ergebnisse in Anhang A.1 verwiesen.

Für eine Mischkonstellation von vertikalen und horizontalen Basiabständen ergaben sich die Messabweichungen aus Abbildung 5.8. Der Dreibildverband wurde dabei nach möglichst optimalen Basis- und Schnittbedingungen ausgewählt. Zur Bewertung einer möglichen Verbesserung wurden sukzessiv weitere Bilder zum Verband hinzugefügt. Die Daten beinhalten jeweils 10 Verifikationen für jede Konfiguration.



Abbildung 5.8: Längen- und Höhenmessabweichungen bei asymmetrisch verteilten Projektionszentren in Abhängigkeit der Anzahl an Projektionszentren

Besonders deutlich zeigt sich in den Ergebnissen der Einfluss der Strahlenschnittbedingungen auf die Messabweichungen. Beim sukzessiven Hinzufügen von Projektionszentren erfolgt eine stetige Verbesserung bis zu sechs Projektionszentren. Anschließend verschlechtern sich die Ergebnisse vor allem in der Höhenkomponente wieder. Dies ist das zu erwartende Ergebnis schleifender Strahlenschnitte. Alle Projektionszentren liegen in dieser Konstellation innerhalb einer Ebene. Wird deren Anzahl zu groß, überwiegen viele kleine Basisabstände mit schlechten Strahlenschnittwinkeln. Das Ergebnis ist die schlechter werdende Genauigkeit in Aufnahmerichtung (siehe 2.3.4). Das alleinige Hinzufügen von Bildern nach der oft praktizierten Methode "viel hilft viel" resultiert folglich nicht automatisch in der Verbesserung der erreichbaren Genauigkeit. Eine weitere Verbesserung durch das Hinzufügen von Bildern kann nur über veränderte Konstellationen von Projektionszentren erreicht werden.

Im Bezug auf die auftretenden Messabweichungen genügen die 4-, 5- oder 6- Bildkonfigurationen im Mittel deutlich den vorausgesetzten Anforderungen. Ausreißer müssen dennoch für Längen- und Höhenkomponente erwarten werden.

Ein Auszug der zugehörigen Oberflächenwerte ist in Tabelle 5.6 aufgeführt.

Projektionszentren		3	4	5	6
		[F3/F4/F5]	[F3/F4/F5]	[F3/F4/F5]	[F3/F4/F5]
VP / Fläche	$[VP/cm^2]$	1.92/2.71/1.49	3.6/4.89/2.87	3.97/5.43/3.15	5.6/7.6/4.51
Fehlende Grundfläche	[%]	5.5/2.84/3.06	2.29/1.03/1.41	1.65/0.37/0.35	0.62/0.20/0.23

Die Erhöhung der Netzdichte konnte durch den Anteil des kleinen Basisabstandes deutlich erreicht werden. Im Vergleich zur gleichverteilten Konstellation konnten rund 15-mal so viele Verknüpfungspunkte bei gleichbleibender Bildanzahl extrahiert werden. Daraus resultiert auch eine wesentliche Verbesserung der prozentual fehlenden Grundfläche. Die Detailauflösung kann in diesem Fall als hoch genug angenommen werden. Der 4-Bild Verband bietet hierbei die ideale Kombination aus Genauigkeit und Detailauflösung. Bei Verwendung einer Simultankalibrierung sollte dieser als Konstellation in Betracht gezogen werden.

Eine erste Verifizierung, ob diese Detailauflösung für die Auswertung von Betoneigenschaften ausreicht, erfolgt in Abschnitt 5.4.

5.3.3 Asymmetrisch verteilte Basis mit Vorabkalibrierung

Auffallend in beiden bisherigen Konstellationen ist die deutliche Streuung in den Messabweichungen. Eine Annäherung an die Genauigkeit der Referenz-Messergebnisse blieb ebenso weitgehend erfolglos. Beides kann einerseits auf die verwendete Kamera oder andererseits auf die starke Verringerung des Bildmaterials zurückgeführt werden. Dies entspricht allerdings nicht zwingend der Realität. Es ist zwar eine Tatsache, dass die innere Stabilität der Canon 1100D nicht mit professionellen Kameras mithalten kann, dennoch wurden bereits durch Amateur-Kameras deutlich genauere Ergebnisse mit photogrammetrischen Messungen erzielt (z.B. in [Luhmann, 2010]). Auch die Anzahl des Bildmaterials kann nicht als geeigneter Grund dienen. Durch Stereobildpaare wurden ebenso bereits deutlich höhere Messgenauigkeiten erreicht. Der Ursprung dieser Abweichungen liegt also nicht zwingend in diesen beiden Gründen, sondern eher in der fehlenden Vorabkalibrierung der verwendeten Kamera.

Da die Verwendung der Simultankalibrierung ein Teil der praktischen Vorgaben ist, kann dieser Abschnitt als kurzer aber notwendiger Exkurs angesehen werden. Zum Vergleich erfolgt die Auswertung der asymmetrischen Konstellation mit vorab kalibrierten Kameras. Die Kalibrierungsdaten werden direkt aus der Referenz entnommen. Die resultierenden Messabweichungen sind in Abbildung 5.9 dargestellt.



Abbildung 5.9: Längen- und Höhenmessabweichungen bei asymmetrisch verteilten vorkalibrierten Projektionszentren in Abhängigkeit der Anzahl an Projektionszentren

Sowohl die Längen- als auch die Höhenmessabweichungen unterschreiten im Mittel die 0.1[mm] Grenze und somit die mit den Messstäben prüfbare Genauigkeit. Die grundlegende Empfehlung eine vor-kalibrierte Kamera für photogrammetrische Messungen zu verwenden, steht damit außer Frage.

5.4 Praktische Anwendung: Oberflächenanalyse

In diesem Abschnitt wird überprüft, ob Oberflächenkennwerte auch aus reduzierten Bildverbänden extrahierbar sind. Hierfür werden für exemplarisch ausgewählte Bildverbände die in Abschnitt 2.6.2 beschriebenen Oberflächenparameter extrahiert. Zum Vergleich werden zusätzlich zu den reduzierten Bildverbänden auch die Kennwerte ihrer Referenzverbände ausgewertet. Auf eine detaillierte Bewertung der Kennwerte wird verzichtet und auf einschlägige Literatur verwiesen (z.B. [ISO 25178-2, 2012]). Als Auswertungsprogramm wird die für Oberflächenanalysen konzipierte Software *MountainsMap* verwendet.



Für verschiedene Konsistenzklassen ist ein Teil der Ergebnisse in Abbildung 5.10 dargestellt. Die vollständigen Ergebnisse können dem Anhang entnommen werden.

Abbildung 5.10: Extrahierte Oberflächenparameter Vmc, Sk und Sdr (siehe Abschnitt 2.6.2) in Abhängigkeit der Anzahl an Projektionszentren und Konsistenzklasse

Eine Extraktion von Oberflächenkennwerten gelang in allen Verbänden. Auffallend ist das Verhältnis der Anzahl von Verknüpfungspunkten und dementsprechend der Detailauflösung zu den Ergebnissen. Je mehr Verknüpfungspunkte vorhanden waren, desto näher kamen die Ergebnisse des reduzierten Verbandes denen des Referenzverbandes. Dies ist an sich zu erwarten. Wie hoch die Detailauflösung für signifikate Aussagen zu einzelnen Parametern sein muss, erfordert gesonderte Überprüfungen.

6 Fazit und Ausblick

In dieser Arbeit wurde grundlegend die mögliche Anwendung von photogrammetrischen Messmethoden auf Frischbeton-Oberflächen untersucht. Da diese sich in ihrer Oberfläche teilweise deutlich voneinander unterscheiden, wurde bei der Auswertung auf eine breit gefächerte Variation von Frischbeton-Zusammensetzungen Wert gelegt. Die prinzipielle Eignung von programmtechnischen Messmethoden konnte für sämtliche getesteten Oberflächen belegt werden.

Für den Transfer der theoretischen Betrachtung zur praktischen Anwendung wurden verschiedene Aufnahmekonstellationen geplant und umgesetzt. Als Referenzaufnahme erfolgte die Auswertung eines möglichst optimalen Bildverbandes. Das Ergebnis sind erreichte Genauigkeiten unter einem Zehntel-Millimeter und Detailauflösungen der dicht besetzten Punktwolke von über 700 Punkten pro cm^2 . Diese Punktwolken sind ebenso für die Extraktion von Oberflächenparametern geeignet. Des Weiteren wurden Prüfberichte für sieben praktikable Konstellationen erstellt. Neben den erreichbaren Genauigkeiten wurde dabei auf die Vollständigkeit der rekonstruierten Oberflächen Wert gelegt. Eine Abhängigkeit der Resultate vom benötigten Bildmaterial wurde ebenfalls untersucht. Die Ergebnisse beschreiben Konstellationen in Abhängigkeit von gewünschtem Aufwand, Bildmaterial und Qualitätsanspruch. Diese können zur Abschätzung und für die Planung weiterführender Untersuchungen herangezogen werden.

Für die Referenzaufnahmen und ausgewählte Kamera-Konstellationen erfolgte des Weiteren eine Extraktion von Oberflächenparametern. Diese konnte erfolgreich für alle Verbände durchgeführt werden. Im Vergleich zur Referenzaufnahme traten bei den Testkonstellationen teilweise deutliche Schwankungen in den Ergebnissen auf. Eine Vermutung betrifft dabei die grundsätzliche Korrelation von Punktdichte und robuster Parameterextraktion. Die Analyse von Oberflächenparametern stellte jedoch keinen Teil dieser Arbeit dar. Für signifikante Aussagen über benötigte Genauigkeiten und Punktdichten im Bezug zu robust extrahierbaren Oberflächenparametern müssen weitere Versuche durchgeführt werden. Die vorab beschriebenen Kamera-Konstellationen können beispielsweise für diese Untersuchungen eingesetzt werden.

Sowohl bei der Planung als auch bei der Umsetzung mussten in dieser Arbeit Kompromisse eingegangen werden. So wurde der Aufnahmebereich und die Aufnahmeentfernung aus praktischen Gründen stark eingeschränkt. Dies ermöglichte nur einen geringen Spielraum in der Kamerapositionierung und resultierend in der Wahl der Kameraparameter. Die Verwendung eines Normalobjektivs war unter diesen Umständen beispielsweise nicht möglich. Die stärker resultierenden Verzeichnungseffekte durch das verwendete Weitwinkel-Objektiv müssen als Störfaktor in Kauf genommen werden. Des Weiteren wurde aus praktischen Gründen auf die Amateur-Kamera Canon EOS 1100D zurückgegriffen. Die im Vergleich zum Profi-Segment geringere innere Stabilität wirkt sich ebenfalls negativ auf die Ergebnisse aus.

Im Bezug auf die Aufnahmekonstellationen erfolgte die Positionierung und Orientierung der Kameras über Linearführungen per Hand. Daraus ergeben sich zwangsläufig Abweichungen zu den geplanten Positionen und in der wiederholten Positionierung. Deutliche Veränderungen in den Ergebnissen sind innerhalb dieser Abweichungen allerdings nicht zu erwarten. Dennoch handelt es sich um einen Einfluss, der gerade bei wiederholten Versuchsdurchführungen betrachtet werden muss. Für weiterführende und vertiefende Untersuchungen empfiehlt sich die Verwendung von gesteuerten Führungen für die Positionierung der Kameras.

Trotz dieser Kamera- und Konstruktionskompromisse wurden Genauigkeiten im Zehntel-Millimeter-Bereich erreicht. Dies spiegelt einerseits das Potential von photogrammetrischen Messmethoden und andererseits deren immer weiter verbesserte Robustheit für äußere Störfaktoren wider.

Die Wahl der Auswertungssoftware auf die kommerzielle Variante Metashape Professional bringt Vor- und Nachteile mit sich. Durch das implementierte Black-Box-Modell können zwangsläufig nicht nachvollziehbare Effekte nach der Auswertung entstehen. In Summe stehen zwar viele Tools zur Analyse der resultierenden Ergebnisse zur Verfügung, auf einzelne Bereiche, wie beispielsweise die Matrizen des Ausgleichungsmodells, kann aber nicht zugegriffen werden. Gerade in wissenschaftlichen Analysen können diese Bereiche von Interesse sein.

Ein zu betrachtender Aspekt bei der Verwendung von optimierten *all-inklusive* Programmen ist die oft suggerierte Meinung, dass keine detaillierte Planung der Aufnahmekonfiguration notwendig sei. Wie stark sich jedoch eine nicht optimale Aufnahmekonfiguration in den Resultaten widerspiegelt, konnte als Nebeneffekt in Abschnitt 5.3.2 gezeigt werden. Positiv an der Auswertungssoftware ist, dass sie eine effiziente und robuste Implementierung für 3D-Rekonstruktionen darstellt. Auf aufwendige Implementierungen von effizienten Auswertungsverfahren konnte vollständig verzichtet werden. Diese hätten im Rahmen dieser Arbeit auch nicht den benötigten Umfang einnehmen können.

Der Einfluss verschiedener Lichtverhältnisse wurde in dieser Arbeit auf Grund des Umfanges nicht untersucht. Eine weiterführende Analyse der Ergebnisse im Bezug auf die Lichtverhältnisse ist vor praxisnahen Anwendungen jedoch zu empfehlen. Gerade im Außenbereich ist mit starken Qualitätsabweichungen durch Lichteffekte zu rechnen. Die in dieser Arbeit analysierten Kamera-Konstellationen können auch für diese weiterführenden Untersuchungen eingesetzt werden.

Durch die Ergebnisse dieser Arbeit wurde gezeigt, dass Bildmessmethoden eine realistische Alternative zu etablierten Messmethoden in Bezug auf Frischbeton darstellen. Sie haben das Potential, aufwendige Laboranalysen zu ersetzen und dadurch direkt an der Baustelle wertvolle Informationen zu gewinnen. Diese Informationen bieten die Möglichkeit, wesentlich präzisiere Qualitätsansprüche zu formulieren. Durch die Anwendung von Bildmessmethoden können diese wiederum direkt auf der Baustelle überprüft werden. Dem geplanten Ziel, der Etablierung photogrammetrischer Messmethoden im Baubereich, konnte somit ein Schritt näher gekommen werden.

Literaturverzeichnis

- [Agisoft 2020a] AGISOFT: Agisoft Metashape User Manual Professional Edition 1.6. 2020. – URL https://www.agisoft.com/pdf/metashape-pro_1_6_en.pdf
- [Agisoft 2020b] AGISOFT, LLC: Coded Targets and Scale Bars. 2020. - URL https://www.agisoft.com/pdf/PS_1.0.0_Tutorial%20(IL)%20-%20Coded% 20Targes%20and%20Scale%20Bars.pdf
- [Albertz 2009] ALBERTZ, Jörg: Tagungsband Photogrammetrie-Fernerkundung-Geoinformation Kapitel: 100 Jahre Deutsche Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation e. V. Berlin, 2009 ISSN 1432-8364
- [Albertz und Wiggenhagen 2009] ALBERTZ, Jörg ; WIGGENHAGEN, Manfred: Taschenbuch zur Photogrammetrie und Fernerkundung. Heidelberg : Wichmann, 2009. – ISBN 978-3-879-07384-9
- [BTB 2019] BTB, Bundesverband der Deutschen Transportbetonindustrie e.: Transportbetonproduktion in Europa - 2019. 2019. – URL https://www.transportbeton. org/branche/wirtschaftsdaten
- [Canon 2012] CANON: EOS 1100D Bedienungsanleitung. 2012. URL https://gdlp01.c-wss.com/gds/0/0300005060/06/EOS_1100D_Instruction_ Manual_DE.pdf
- [Carrivick u. a. 2016] CARRIVICK, Jonathan L. ; SMITH, Mark W. ; QUINCEY, Duncan J.: Structure from Motion in the Geosciences . 1st. New York : Wiley, 2016. – ISBN 978-1-118-89584-9
- [Form+Test 2020] FORM+TEST: Prospekt Frischbetonprüfung / L120.04. 2020. - URL https://www.formtest.de/de-wAssets/docs/Kataloge/L120. 04-de-Frischbetonpruefung-LQ.pdf
- [Förstner und Wrobel 2016] FÖRSTNER, Wolfgang ; WROBEL, Bernhard P.: Photogrammetric Computer Vision - Statistics, Geometry, Orientation and Reconstruction. Berlin, Heidelberg : Springer, 2016. – ISBN 978-3-319-11550-4

- [Fuse und Harada 2016] FUSE, Takashi ; HARADA, R.: DEVELOPMENT OF IMAGE SELECTION METHOD USING GRAPH CUTS. 2016. – URL https://www.researchgate.net/publication/304026296_DEVELOPMENT_OF_ IMAGE_SELECTION_METHOD_USING_GRAPH_CUTS
- [Grzelka u. a. 2011] GRZELKA, Miroslaw ; MAJCHROWSKI, Radomir ; SADOWSKI, Lukasz: INVESTIGATIONS OF CONCRETE SURFACE ROUGHNESS BY MEANS OF 3D SCANNER*). 2011. - URL https://www.researchgate.net/publication/ 281510791_Investigations_of_concrete_surface_roughness_by_means_of_3D_ scanner
- [Haasz 2012] HAASZ, Christian: Profibuch Canon EOS 1100D Kameratechnik und Fotografie Know-how vom Feinsten. Poing : Franzis Verlag, 2012. – ISBN 978-3-645-20121-6
- [Hartley und Zisserman 2004] HARTLEY, Richard ; ZISSERMAN, Andrew: Multiple View Geometry in Computer Vision. 2. Cambridge University Press, 2004. – ISBN 978-0-521-54051-3
- [Heipke 2016] HEIPKE, Christian: Photogrammetrie und Fernerkundung, [Handbuch der Geodäsie, herausgegeben von Willi Freeden und Reiner Rummel]. 1., Auflage. Berlin, Hannover : Heipke, Springer, 2016. – ISBN 978-3-662-47093-0
- [Hosseininaveh u.a. 2012] HOSSEININAVEH, Ali ; SERPICO, Margaret ; ROBSON, Stuart ; HESS, Mona ; BOEHM, Jan ; PRIDDEN, Ivor ; AMATI, Giancarlo: Automatic Image selection in Photogrammetric Multi-view Stereo methods. 2012. – URL https://www.researchgate.net/publication/236669565_Automatic_Image_ Selection_in_Photogrammetric_Multi-view_Stereo_Methods
- [ISO 25178-2 2012] ISO 25178-2, DIN Deutsches Institut f
 ür Normung e.V.: Oberflächenbeschaffenheit: Flächenhaft - Teil 2: Begriffe und Oberflächen-Kenngrössen (ISO 25178-2:2012). 2012
- [Jähne 2012] JÄHNE, Bernd: Digitale Bildverarbeitung und Bildgewinnung. 7., Auflage. Berlin, Heidelberg : Springer, 2012. – ISBN 978-3-642-04951-4
- [Lindstaedt u. a. 2007] LINDSTAEDT, Maren ; KERSTEN, Thomas ; SAUERBIER, Martin ; PETERHANS, Janine ; FUX, Peter: Photogrammetrie-Laserscanning Optische 3D-Messtechnik - Tagungsband 2007 Kapitel: Terrestrisches Laserscanning und digitale Photogrammetrie zur archäologischen Dokumentation der Petroglyphen von Chichictara in Peru. Heidelberg : Wichmann, 2007. – ISBN 978-3879074471
- [Lohmeyer 2013] LOHMEYER, Gottfried C O.: Stahlbetonbau Bemessung, Konstruktion, Ausführung. Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag, 2013. – ISBN 978-3-663-01539-0

- [Lüders und Pohl 2018] LÜDERS, Klaus ; POHL, Robert O.: Pohls Einführung in die Physik - Band 2: Elektrizitätslehre und Optik. Berlin Heidelberg : Springer-Verlag, 2018. – ISBN 978-3-662-54855-4
- [Luhmann 2010] LUHMANN, Thomas: Erweiterte Verfahren zur geometrischen Kamerakalibrierung in der Nahbereichsphotogrammetrie. München : Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften und C H Beck, 2010. – ISBN 978-3-7696-5057-0
- [Luhmann 2018] LUHMANN, Thomas: Nahbereichsphotogrammetrie: Grundlagen Methoden -Beispiele. 4., neu bearbeitete und erweiterte Auflage. Berlin and Offenbach : Wichmann, 2018. – ISBN 978-3-87907-640-6
- [Luhmann und Maas 2016] LUHMANN, Thomas ; MAAS, Hans-Gerd: Handbuch der Geodäsie - Industriephotogrammetrie. 1., Auflage. Berlin, Hannover : Heipke, Springer, 2016. – ISBN 978-3-662-47093-0
- [Maas 1992] MAAS, Hans-Gerd: Digitale Photogrammetrie in der dreidimensionalen Strömungsmesstechnik, ETH Zürich, Dissertation, 1992. – URL https://doi.org/ 10.3929/ethz-a-000627387
- [Maas 1997] MAAS, Hans-Gerd: Habilitation Mehrbildtechniken in der digitalen Photogrammetrie. ETH Hönggerberg, CH-8093 Zürich, ETH Zürich, Dissertation, 1997
- [Neumann 2014] NEUMANN, Ingo: Skriptum Ausgleichsrechnung und Statistik I und Geodätische Schätzverfahren. 2014
- [Niemeier 2008] NIEMEIER, Wolfgang: Ausgleichungsrechnung statistische Auswertemethoden. 2nd. Berlin : Walter de Gruyter, 2008. – ISBN 978-3-110-19055-7
- [Nischwitz und Haberäcker 2013] NISCHWITZ, Alfred ; HABERÄCKER, Peter: Masterkurs Computergrafik und Bildverarbeitung - Alles für Studium und Praxis. Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag, 2013. – ISBN 978-3-322-92916-7
- [Papula 2018] PAPULA, Lothar: Mathematik für Ingenieure und Naturwissenschaftler Band 1 - Ein Lehr- und Arbeitsbuch für das Grundstudium. 15. Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag, 2018. – ISBN 978-3-658-21746-4
- [RaspberryPi 2019] RASPBERRYPI: Raspberry Pi 4 Model B Datasheet. 2019. - URL https://www.raspberrypi.org/documentation/hardware/raspberrypi/ bcm2711/rpi_DATA_2711_1p0_preliminary.pdf
- [Rautenberg und Wiggenhagen 2006] RAUTENBERG, Ulrich ; WIGGENHAGEN, Manfred: Abnahme und Überwachung photogrammetrischer Messsysteme nach VDI 2634, Blatt 1. 2006. – URL https://www.ipi.uni-hannover.de/fileadmin/ipi/publications/ VDI2634_1e.pdf

- [Rexroth 2019] REXROTH, Bosch: Strebenprofile. 2019. URL https: //www.boschrexroth.com/ics/cat/content/assets/Online/do/Strut_profiles_ MGE_14_DE_2019-07_20191202_155700.pdf
- [Sanches u. a. 2013] SANCHES, JOAO M. ; MICO, Luisa ; CARDOSO, Jaime: Pattern Recognition and Image Analysis - 6th Iberian Conference, IbPRIA 2013, Funchal, Madeira, Portugal, June 2013, Proceedings. Berlin, Heidelberg : Springer, 2013. – ISBN 978-3-642-38628-2
- [Stachniss und Förstner 2015] STACHNISS, Cyrill; FÖRSTNER, Wolfgang: *Photogram*metry I and II. 2015. – URL http://www.ipb.uni-bonn.de/photogrammetry-i-ii/
- [Stout u.a. 2002] STOUT, Ken J.; BLUNT, Liam; DONG, W. P.; MAINSAH, E.; LUO, N.; MATHIA, T.; SULLIVAN, P. J.; ZAHOUANI, H.: Development of Methods for Characterisation of Roughness in Three Dimensions. Stanford : Elsevier Science, 2002. – ISBN 978-1-857-18023-7
- [Tuttas 2017] TUTTAS, Sebastian A.: Erfassung von Bauteilen durch photogrammetrische Punktwolken und Abgleich eines 4D-Bauwerkmodells zur Baufortschrittskontrolle. Ingenieurfakultät Bau Geo Umwelt ; Photogrammetrie und Fernerkundung, Technische Universität München, Dissertation, 2017
- [VDI/VDE 2002] VDI/VDE, Verein Deutscher I.: VDI/VDE Richtlinie 2634 Optische 3D Messsysteme Bildgebene Systeme mit punktförmiger Antastung - Blatt 1. 2002
- [Vogler u. a. 2015] VOGLER, Nico ; GLUTH, Gregor ; OPPAT, Klaus ; KÜHNE, Hans-Carsten: Charakterisierung von Bauteiloberflächen mittels Lasertriangulation bei der Instandsetzung. 2015. – URL https://hdl.handle.net/20.500.11970/103403
- [Vollenschaar 2004] VOLLENSCHAAR, Dieter: Wendehorst Baustoffkunde Volume I.
 26. Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag, 2004. ISBN 978-3-663-11830-5
- [Wesche 1993] WESCHE, Karlhans: Baustoffe für tragende Bauteile Band 2: Beton, Mauerwerk (Nichtmetallisch-anorganische Stoffe): Herstellung, Eigenschaften, Verwendung, Dauerhaftigkeit. Berlin, Wiesbaden : Bauverlag GmbH, 1993. – ISBN 978-3-322-80187-6
- [Wiehr und Seewig 2002] WIEHR, Christian ; SEEWIG, Jörg: *3D-Kenngrössen nach ISO-25178.* 2002
- [Wietek 2019] WIETEK, Bernhard: Beton Stahlbeton Faserbeton Eigenschaften und Unterschiede. Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag, 2019. – ISBN 978-3-658-27707-9

A Anhang

A.1 Prüfberichte - Aufnahmekonstellationen

Konstellationsübersicht - Zuordnung

Konstellation	Projektionszentren	
Vertikal Asymmetrisch		φ_{0x} siehe Abb. 3.2 und Tab. 5.1
	3	54°, 54°, 61°
	4	54°, 54°, 61°, 69°
	5	46°, 54°, 54°, 61°, 69°
	6	$46^{\circ}, 54^{\circ}, 54^{\circ}, 61^{\circ}, 69^{\circ}, 69^{\circ}$
	7	$46^{\circ}, 54^{\circ}, 54^{\circ}, 61^{\circ}, 61^{\circ}, 69^{\circ}, 69^{\circ}$
	8	$46^{\circ}, 54^{\circ}, 54^{\circ}, 61^{\circ}, 61^{\circ}, 69^{\circ}, 69^{\circ}, 77^{\circ}$
	9	$46^{\circ}, 54^{\circ}, 54^{\circ}, 61^{\circ}, 61^{\circ}, 69^{\circ}, 69^{\circ}, 77^{\circ}, 77^{\circ}$
	10	$46^{\circ}, 46^{\circ}, 54^{\circ}, 54^{\circ}, 61^{\circ}, 61^{\circ}, 69^{\circ}, 69^{\circ}, 77^{\circ}, 77^{\circ}$
Horizontal Asymmetrisch		κ_{0x} siehe Abb. 3.2 und Tab. 5.1
	3	96°, 240°, 264°
	4	72°, 96°, 240°, 264°
	5	72°, 96°, 240°, 264°, 288°
	6	72°, 96°, 120°, 240°, 264°, 288°
	7	96°, 120°, 240°, 264°, 288°, 312°, 336°
	8	72°, 96°, 120°, 216°, 240°, 264°, 288°, 312°
	9	24°, 48°, 72°, 96°, 196°, 216°, 240°, 264°, 288°
	10	24°, 48°, 72°, 96°, 120°, 196°, 216°, 240°, 264°
		288°
Gleichverteilt parallel		κ_{0x} siehe Abb. 3.2 und Tab. 5.1
	3	0°, 120°, 240°
	4	0°, 96°, 192°, 264°

Aufnahmekonstellation: Vertikal Asymmetrisch - Vor-kalibriert

Beschreibung Asymmetrisch angeordnete Aufnahmekonstellation mit 1.1 [m] Aufnahmeabstand vorab kalibriert

Längen- und Höhenmessabweichungen



Analysierte Parameter

Projektionszentren		3	4	5	6
<i>RMS_{RP}</i> VP / Fläche Fehlende Grundfläche	$[pix]$ $[VP/cm^2]$ $[\%]$	[F3/F4/F5] 0.61/0.35/0.42 1.23/2.78/1.55 4.56/2.32/4.55	[F3/F4/F5] 0.55/0.38/0.49 1.96/5.16/3.07 1.79/0.91/1.80	[F3/F4/F5] 0.52/0.43/0.53 2.43/5.66/3.3 0.45/0.29/0.45	[F3/F4/F5] 0.49/0.47/0.55 3.19/7.92/4.72 0.25/0.14/0.25
Projektionszentren		7	8	9	10
<i>RMS_{RP}</i> VP / Fläche Fehlende Grundfläche	[pix] [VP/cm ²] [%]	[F3/F4/F5] 0.55/0.44/0.55 4.49/12.0/7.21 0.14/0.09/0.14	[F3/F4/F5] 0.57/0.45/0.53 5.3/14.4/8.86 0.09/0.06/0.09	[F3/F4/F5] 0.50/0.46/0.56 6.27/16.9/10.5 0.08/0.05/0.09	[F3/F4/F5] 0.51/0.47/0.58 6.85/18.8/11.6 0.07/0.03/0.08

Aufnahmekonstellation: Horizontal Asymmetrisch - 45°

Beschreibung Asymmetrisch angeordnete Aufnahmekonstellation mit 1.1 [m] Aufnahmeabstand und 45° Neigungswinkel zum Objektmittelpunkt.



Längen- und Höhenmessabweichungen

Analysierte Parameter

Projektionszentren		3	4	5	6
<i>RMS_{RP}</i> VP / Fläche Fehlende Grundfläche	[pix] [VP/cm ²] [%]	[F3/F4/F5] 0.9/0.8/1.09 0.35/0.38/0.21 25.06/11.72/9.6	[F3/F4/F5] 0.87/0.78/1.1 0.66/0.75/0.38 3.14/2.17/2.53	[F3/F4/F5] 0.82/0.83/1.19 0.95/1.07/0.55 2.23/1.53/1.21	[F3/F4/F5] 2.51/0.81/1.21 1.24/1.40/0.70 1.61/1.08/1.35
Projektionszentren		7	8	9	10
RMS_{RP}	[pix]	[F3/F4/F5] 0.78/0.80/1.20	[F3/F4/F5] 0.76/0.81/1.10	[F3/F4/F5] 1.41/0.82/1.04	[F3/F4/F5] 0.92/0.78/1.08

RMS_{RP}	[pix]	0.78/0.80/1.20	0.76/0.81/1.10	1.41/0.82/1.04	0.92/0.78/1.08
VP / Fläche	$[VP/cm^2]$	1.48/1.72/0.86	1.88/2.05/1.01	1.96/2.37/1.18	2.37/2.87/1.35
Fehlende Grundfläche	[%]	2.43/0.79/1.27	0.69/0.54/0.79	0.48/0.35/0.44	0.38/0.27/0.37

Aufnahmekonstellation: Horizontal Asymmetrisch - 54°

Beschreibung Asymmetrisch angeordnete Aufnahmekonstellation mit 1.1 [m] Aufnahmeabstand und 54° Neigungswinkel zum Objektmittelpunkt.

Längen- und Höhenmessabweichungen

Analysierte Parameter

Projektionszentren		3	4	5	6
RMS_{RP} VP / Fläche Fehlende Grundfläche	$[pix]$ $[VP/cm^2]$ $[\%]$	[F3/F4/F5] 0.77/0.77/0.92 0.52/0.63/0.30 9.20/5.12/7.05	[F3/F4/F5] 0.68/0.73/0.93 1.04/1.25/0.59 8.14/1.18/2.31	[F3/F4/F5] 0.72/0.74/0.98 1.46/1.75/0.80 5.43/0.89/1.26	[F3/F4/F5] 0.74/0.75/0.96 1.82/2.21/1.02 4.02/0.73/0.87
Projektionszentren		7	8	9	10
Aufnahmekonstellation: Horizontal Asymmetrisch - 61°

Beschreibung Asymmetrisch angeordnete Aufnahmekonstellation mit 1.1 [m] Aufnahmeabstand und 61° Neigungswinkel zum Objektmittelpunkt.



Längen- und Höhenmessabweichungen

Projektionszentren		3	4	5	6
<i>RMS_{RP}</i> VP / Fläche Fehlende Grundfläche	$[pix]$ $[VP/cm^2]$ $[\%]$	[F3/F4/F5] 0.64/0.64/0.7 0.81/0.97/0.47 3.63/1.86/3.21	[F3/F4/F5] 0.59/0.60/0.68 1.56/1.91/0.90 0.82/13.4/1.42	[F3/F4/F5] 0.63/0.65/0.72 2.17/2.60/1.20 0.84/13.5/1.08	[F3/F4/F5] 0.66/0.66/0.72 2.53/3.22/1.56 0.34/0.47/2.87
Projektionszentren		7	8	9	10

Aufnahmekonstellation: Vertikal Asymmetrisch

Beschreibung Asymmetrisch angeordnete Aufnahmekonstellation mit 1.1 [m] Aufnahmeabstand zum Objektmittelpunkt; Kamerapositionen in einer vertikalen Ebene

Längen- und Höhenmessabweichungen



Projektionszentren		3	4	5	6
RMS_{RP} VP / Fläche	$[pix]$ $[VP/cm^2]$	[F3/F4/F5] 0.36/0.34/0.44 1.92/2.71/1.49	[F3/F4/F5] 0.41/0.37/0.43 3.6/4.89/2.87	[F3/F4/F5] 0.45/0.41/0.52 3.97/5.43/3.15	[F3/F4/F5] 0.47/0.42/0.50 5.6/7.6/4.51
Fehlende Grundfläche	[%]	5.5/2.84/3.06	2.29/1.03/1.41	1.65/0.37/0.35	0.62/0.20/0.23
Projektionszentren		7	8	9	10
		[F3/F4/F5]	[F3/F4/F5]	[F3/F4/F5]	[F3/F4/F5]
RMS_{RP}	[pix]	5.5/2.84/3.06	2.29/1.03/1.41	1.65/0.37/0.35	0.62/0.20/0.23
VP / Fläche	$[VP/cm^2]$	8.57/11.5/6.84	10.6/13.8/8.2	12.7/16.2/10.15	14.2/18.0/11.3
Fehlende Grundfläche	[%]	0.15/0.14/0.19	0.13/0.07/0.10	0.08/0.04/0.08	0.06/0.04/0.05

Aufnahmekonstellation: Gleichverteile Basis 3 Projektionszentren

Beschreibung Gleichverteilte Aufnahmekonstellation mit 1.1 [m] Aufnahmeabstand und variablen Basisabständen; 3 Projektionszentren



Längen- und Höhenmessabweichungen

Projektionszentren		parallel 38	parallel 52	parallel 79	frei 20
<i>RMS_{RP}</i> VP / Fläche Fehlende Grundfläche	$[pix]$ $[VP/cm^2]$ $[\%]$	[F3/F4/F5] 1.14/1.22/0.89 0.12/0.19/0.13 11.5/3.5/8.5	[F3/F4/F5] 1.41/1.49/1.12 0.1/0.13/0.09 13.3/5.4/12.7	[F3/F4/F5] 1.66/1.79/1.45 0.07/0.08/0.07 48.2/16.7/47.1	[F3/F4/F5] 0.61/0.40/0.44 1.54/4.13/2.50 4.79/0.31/0.58
Projektionszentren		frei 30	frei 40	frei 50	frei 60

Aufnahmekonstellation: Gleichverteile Basis 4 Projektionszentren

Beschreibung Gleichverteilte Aufnahmekonstellation mit 1.1 [m] Aufnahmeabstand und variablen Basisabständen; 4 Projektionszentren





Projektionszentren		parallel 23	parallel 47	parallel 71	Parallel 85
		[F3/F4/F5]	[F3/F4/F5]	[F3/F4/F5]	[F3/F4/F5]
RMS_{RP}	[pix]	1.08/1.07/0.93	1.3/1.35/1.32	1.89/1.89/1.64	1.81/1.76/1.94
VP / Fläche	$[VP/cm^2]$	0.27/0.41/0.26	0.2/0.28/0.18	0.13/0.17/0.13	0.07/0.09/0.06
Fehlende Grundfläche	[%]	4.05/1.66/2.4	5.43/2.45/4.01	12.5/6.02/8.48	38.4/59.23/100

A.2 Prüfberichte - Oberflächenanalyse

F3 - weich - Referenz

ISO 2	25178 - Pr	imäroberfl	äche
F: [Ana	lyseablauf] Au	ısgerichtet (LS-	Ebene)
S-Filter	·(λs): Keine		
Funkti	ons-Parame	ter	
Smr	0.000101	%	
Smc	4.660	mm	
Sxp	7.346	mm	
Räuml	iche Parame	ter	
Sal	16.26	mm	
Str	0.7381		
Std	71.25	0	
Hybrid	I-Parameter		
Sdq	1.040		
Sdr	25.84	%	
Funkti	ons-Parame	ter (volumen))
Vm	0.2010	mm ³ /mm ²	
Vv	4.861	mm ³ /mm ²	
Vmp	0.2010	mm ³ /mm ²	
Vmc	3.653	mm ³ /mm ²	
Vvc	4.472	mm ³ /mm ²	
Vvv	0.3885	mm ³ /mm ²	







F3 - weich - 3 - Bild - Asymmetrisch

ISO 25178 - Primäroberfläche							
F: [Ana	alyseablauf] Aus	ger	ichtet (LS-Eb	be.	ne)		
S-Filter	S-Filter (λs): Keine						
Funkti	ons-Paramete	r					
Smr	0.0001732	%)				
Smc	4.287	m	m				
Sxp	8.518	m	m				
Räuml	iche Paramete	er					
Sal	17.21	m	m				
Str	*****						
Std	3.748	0					
Hybrid	l-Parameter						
Sdq	0.5108						
Sdr	11.56	%)				
Funkti	ons-Paramete	r (volumen)				
Vm	0.1221	m	m³/mm²				
Vv	4.409	m	m³/mm²				
Vmp	0.1221	m	m³/mm²				
Vmc	3.432	m	m³/mm²				
Vvc	3.909	m	m³/mm²				
Vvv	0.5002	m	m³/mm²				
Warnh	inweise						
Str: De	r Autokorrelatio	nsl	appen berüh	ırt	die Rände	r. Der längste	
	St	uc	lienobjek	t	-Infos		
	Name	:	Ref_weich_	V	ert_3_8		
	Dateipfad	:	C:\Users\S	cŀ	n\Ref_wei	ch_vert_3_8.stl	
St	udienobjekt-Typ	:	Oberfläche				
Achse	:		х				
	Länge	:	420.7		μm		
	Größe	:	2100		Punkte		
	Schrittabstand	:	0.2004		μm		
	Offset	:	34.19		μm		
Achco		-	v				
Actise	Länge		444.6		um		
	Größe		1097		Punkto		
	Große:		0 2220				
	Offect		-475 3	-	um		
	Uffset: -4/5.3 µm						
Achse			Z	_			
	Schicht-Typ	:	Topographi	le			
	Länge	:	64.87	_	μm		
	Min.	:	-14.91	_	μm		
	Max	:	49.96		μm		
	Größe	:	64869541	_	∠iffern		
	Schrittabstand	:	0.0010		nm		
NM-P	unkte-Verhältnis	:	21.96 % (9	91	6474 Pkte)		





F3 - weich - 4 - Bild - Asymmetrisch

ISO 2	25178 - Pri	märoberfläc	che			
F: [Ana	alyseablauf] Aus	sgerichtet (LS-Eb	nene)			
S-Filter	· (λs): Keine					
Funkti	ons-Paramete	er				
Smr	0.0004512	%				
Smc	4.801	mm				
Sxp	8.802	mm				
Räuml	iche Paramet	er				
Sal	17.70	mm				
Str	0.3398					
Std	85.52	0				
Hybrid	I-Parameter					
Sdq	0.6453					
Sdr	16.32	%				
Funkti	Funktions-Parameter (volumen)					
Vm	0.1598	mm ³ /mm ²				
Vv	4.961	mm ³ /mm ²				
Vmp	0.1598	mm ³ /mm ²				
Vmc	3.658	mm ³ /mm ²				
Vvc	4.409	mm ³ /mm ²				
Vvv	0.5521	mm ³ /mm ²				

Studienobjekt-Infos					
Name:	Ref_weich_vert_4_9				
Dateipfad:	C:\Users\Sch\Ref_weich_vert_4_9.stl				
Studienobjekt-Typ:	Oberfläche				
Achse:	x				
Länge:	420.6	μm			
Größe:	2471	Punkte			
Schrittabstand:	0.1703	μm			
Offset:	34.26	μm			
Achse: Y					
Länge:	444.6	μm			
Größe:	2336	Punkte			
Schrittabstand:	0.1904	μm			
Offset:	-475.3	μm			
Achse:	Z				
Schicht-Typ:	Topographie				
Länge:	68.81	μm			
Min.:	-15.55	μm			
Max:	53.27	μm			
Größe:	68814416	Ziffern			
Schrittabstand:	0.0010	nm			
NM-Punkte-Verhältnis:	21.94 % (12	66477 Pkte)		





F3 - weich - Gleichverteilt

ISO 2	ISO 25178 - Primäroberfläche					
F: [Ana	alyseablauf] Aus	sgerichtet (LS-Ebene)				
S-Filter	· (λs): Keine					
Funkti	ons-Paramete	er				
Smr	0.0006183	%				
Smc	4.536	mm				
Sxp	8.526	mm				
Räuml	iche Paramet	er				
Sal	18.08	mm				
Str	0.3340					
Std	8.990	0				
Hybrid	-Parameter					
Sdq	0.3219					
Sdr	4.946	%				
Funkti	Funktions-Parameter (volumen)					
Vm	0.1091	mm ³ /mm ²				
Vv	4.645	mm ³ /mm ²				
Vmp	0.1091	mm ³ /mm ²				
Vmc	3.211	mm³/mm²				
Vvc	4.144	mm³/mm²				
Vvv	0.5009	mm ³ /mm ²				

Stud	dienobjekt	Infos		
Name:	Ref_weich_G	V_3_1		
Dateipfad:	C:\Users\Sch	a\Ref_weich_@	GV_3_1.stl	
Studienobjekt-Typ:	Oberfläche			
Achse:	x			
Länge:	420.7	μm		
Größe:	1256	Punkte		
Schrittabstand:	0.3352	μm		
Offset:	34.17	μm		
Achse: Y				
Länge:	444.6	μm		
Größe:	1188	Punkte		
Schrittabstand:	0.3746	μm		
Offset:	-475.3	μm		
Achse:	z			
Schicht-Typ:	Topographie			
Länge:	79.51	μm		
Min.:	-25.02	μm		
Max:	54.49	μm		
Größe:	79508237	Ziffern		
Schrittabstand:	0.0010	nm		
NM-Punkte-Verhältnis:	22.03 % (32	3655 Pkte)		





F4 - sehr weich - Referenz

ISO 2	25178 - Pi	rimä	iroberfl	äcł	ıe		
F: [Ana	alyseablauf] A	usgei	richtet (LS-	Ebe	ne)		
S-Filter	S-Filter (λs): Keine						
Funkti	ons-Parame	ter					
Smr	0.00012	%					
Smc	3.820	mm	ı				
Sxp	5.804	mm	ı				
Räum	liche Parame	eter					
Sal	19.97	mm	ı				
Str	*****						
Std	123.0	0					
Hybric	I-Parameter						
Sdq	0.8077						
Sdr	17.10	%					
Funkti	ons-Parame	ter (volumen))			
Vm	0.1058	mm	1 ³ /mm ²				
Vv	3.926	mm	1 ³ /mm ²				
Vmp	0.1058	mm	n ³ /mm ²				
Vmc	2.676	mm	1 ³ /mm ²				
Vvc	3.632	mm	n ³ /mm ²				
Vvv	0.2942	mm	1 ³ /mm ²				
Warnh	inweise						
Str: De	r Autokorrela	tionsl	appen ber	ührt	die Rände	r. Der längste	
	9	Stuc	lienobje	ekt	-Infos		
	Nar	ne:	Ref_sehr	_we	ich		
	Dateipf	ad:	C:\Users	\Sch	nack\\Ref	_sehr_weich.stl	
St	udienobjekt-T	yp:	Oberfläch	ne			
Achse			x				
Achibe	• Län	ue.	470	5	um		
	Grö	ge. Re:	440	 14	Punkte		
	Schrittaheta	nd:	0.104	17	um		
	Offe	nu.	0.10	τ/ 21	um		
	0113	ы.	27.2	-1	μιιι		
Achse	:		Y				
	Län	ge:	482	.5	μm		
	Grö	ße:	438	31	Punkte		
Offset: -513.2 µm							
	Schrittabsta Offs	nd: set:	0.110 -513)2 .2	µm µm		
Achse	Schrittabsta Offs	nd: set:	0.110 -513 Z)2 .2	μm μm		
Achse	Schrittabsta Offs Schicht-T	nd: set: yp:	0.110 -513 Z Topograp)2 .2 ohie	µm µm		
Achse	Schrittabsta Offs Schicht-T Län	nd: set: yp: ge:	0.110 -513 Z Topograp 52.0	02 .2 ohie 51	μm μm		
Achse	Schrittabsta Offs Schicht-T Län M	nd: set: yp: ge: in.:	0.110 -513 Z Topograp 52.0 -6.24	02 .2 ohie 51 18	μm μm μm μm		
Achse	Schrittabsta Offs Schicht-T Län M M	nd: set: yp: ge: in.: ax:	0.110 -513 Z Topograp 52.0 -6.24 46.3	02 .2 ohie 51 48 37	μm μm μm μm μm		
Achse	Schrittabsta Offs Schicht-T Län M Grö	nd: set: yp: ge: in.: ax: ße:	0.110 -513 Z Topograp 52.0 -6.2 46.3 5261304	02 .2 ohie 51 48 37 47	μm μm μm μm μm Ziffern		
Achse	Schrittabsta Offe Schicht-T Län M Grö Schrittabsta	nd: set: yp: ge: in.: ax: ße: nd:	0.110 -513 Z Topograp 52.0 -6.24 46.3 5261304)2 .2 bhie 51 48 37 47 10	μm μm μm μm μm Ziffern nm		





F4 - sehr weich - 3 - Bild - Asymmetrisch

ISO 2	25178 - Priı	märoberflä	che		
F: [Ana	alyseablauf] Aus	gerichtet (LS-E	bene)		
S-Filter	· (λs): Keine				
Funkti	ions-Paramete	er			
Smr	0.0002736	%			
Smc	3.412	mm			
Sxp	4.965	mm			
Räum	liche Paramet	er			
Sal	22.02	mm			
Str	****				
Std	85.27	0			
Hybric	I-Parameter				
Sdq	0.4244				
Sdr	8.211	%			
Funkti	ions-Paramete	er (volumen)			
Vm	0.07555	mm ³ /mm ²			
Vv	3.487	mm³/mm²			
Vmp	0.07555	mm ³ /mm ²			
Vmc	2.468	mm ³ /mm ²			
Vvc	3.229	mm ³ /mm ²			
Vvv	0.2588	mm ³ /mm ²			
Warnh	ninweise				
Str: De	er Autokorrelatio	onslappen berü	hrt di	e Rände	er. Der längste
	St	udienobje	kt-Ir	nfos	
	Name	e: Ref_sehr_	weich	_vert_3	_0
	Dateipfac	: C:\Users.	.\Ref_	sehr_we	eich_vert_3_0.stl
St	udienobjekt-Typ	: Oberfläch	e		
Achee	•	Y			
Actibe	Länge	× 470	5	m	
	Größe	2. 470.	5 µ 5 D	unkto	
	Schrittahstand	. 210 I· 0.217	4 11	m	
	Offee	1. 0.217 H 24.2	η μ Ο μ	m	
	Olise	27.2	υμ		
Achse	•	Y			I
	Länge	482.	4 µ	m	
	Größe	211	1 P	unkte	
	Schrittabstand	l: 0.228	6μ	m	
	Offse	t: -513.	1 µ	m	
Achse	:	Z			
	Schicht-Typ	: Topograp	nie		
	Länge	e: 56.9	1 μ	m	
	Min	.: -15.0	1 μ	m	
	Max	c: 41.9	1 μ	m	
1					1
	Größe	e: 5691133	7 Z	iffern	
	Größe Schrittabstand	e: 5691133 d: 0.001	7 Z 0 n	iffern m	





0.01821

mm³/mm²

MountainsMap® Expert 8.1.9369

Sa2

F4 -	\mathbf{sehr}	weich	-	4 -	Bild -	Asymmetrisch
------	-----------------	-------	---	-----	--------	--------------

130 2	ISO 25178 - Primäroberfläche					
F: [Ana	lyseablauf] Aus	gerichtet (LS-E	bene)			
S-Filter	(λs): Keine					
Funkti	ons-Paramete	er				
Smr	0.0004248	%				
Smc	3.591	mm				
Sxp	4.831	mm				
Räuml	iche Paramet	er				
Sal	19.32	mm				
Str	****					
Std	176.0	0				
Hybrid	-Parameter					
Sdq	0.5166					
Sdr	11.56	%				
Funkti	ons-Paramete	er (volumen)				
Vm	0.09571	mm ³ /mm ²				
Vv	3.686	mm ³ /mm ²				
Vmp	0.09571	mm ³ /mm ²				
Vmc	2.589	mm ³ /mm ²				
Vvc	3.423	mm ³ /mm ²				
Vvv	0.2633	mm ³ /mm ²				
Warnh	inweise					
Str: De	r Autokorrelatio	nslappen berül	nrt die I	Rände	r. Der längste	
Studienobjekt-Infos						
				03		
	Name	: Ref_sehr_	weich_v	ert_4	_8	
	Name Dateipfad	e: Ref_sehr_v	weich_v \Ref_se	ert_4_ hr_we	_8 eich_vert_4_8.stl	
Stu	Name Dateipfad udienobjekt-Typ	:: Ref_sehr_v l: C:\Users o: Oberfläche	weich_v \Ref_se	ert_4_ hr_we	_8 eich_vert_4_8.stl	
Stu Achse:	Name Dateipfad udienobjekt-Typ	Ref_sehr_v C:\Users Oberflächer	weich_v \Ref_se	ert_4_ hr_we	_8 eich_vert_4_8.stl	
Stu Achse:	Name Dateipfad udienobjekt-Typ Länge	Ref_sehr_v I: C:\Users Oberfläche X I: 470.4	weich_v \Ref_se	ert_4_ hr_we	_8 eich_vert_4_8.stl	
Stu Achse:	Name Dateipfad udienobjekt-Typ Länge Größe	Ref_sehr_v I: C:\Users V: Oberfläche X I: 470.4 I: 2474	weich_v \Ref_se	ert_4_ hr_we	_8 eich_vert_4_8.stl	
Stu Achse:	Name Dateipfad udienobjekt-Typ Länge Größe Schrittabstand	Ref_sehr_v I: C:\Users V: Oberflächer X 2470.4 I: 2474 I: 0.1902	weich_v \Ref_se	ert_4_ hr_we	.8 eich_vert_4_8.stl	
Stu Achse:	Name Dateipfad udienobjekt-Typ Länge Größe Schrittabstand Offsel	Ref_sehr_1 I: C:\Users Oberfläche X I: 2470.4 I: 0.1902 I: 24.27	veich_v \Ref_se	ert_4_ hr_we	.8 eich_vert_4_8.stl	
Stu Achse:	Name Dateipfad udienobjekt-Typ Länge Größe Schrittabstand Offset	 Ref_sehr(C:\Users Oberfläche 470.4 2474 0.1902 24.27 Y 	veich_v \Ref_se	ert_4_ hr_we	8 eich_vert_4_8.stl	
Stu Achse:	Name Dateipfad udienobjekt-Typ Länge Größe Schrittabstand Offset	:: Ref_sehr_1 :: C:\Users :: Oberfläche X :: 470.4 :: 2474 :: 0.1902 :: 24.27 Y :: 482.5	weich_v \Ref_se μ μm μ Pun μ μm γ μm	ert_4_ hr_we	8 sich_vert_4_8.stl	
Stu Achse: Achse:	Name Dateipfad udienobjekt-Typ Länge Größe Schrittabstand Offset	:: Ref_sehri :: C:\Users :: Oberfläche X :: 470.4 :: 2472 :: 24.27 Y :: 482.5 : 2411	weich_v \Ref_se	ert_4_ hr_we kte	8 eich_vert_4_8.stl	
Stu Achse: Achse:	Name Dateipfad udienobjekt-Typ Länge Größe Schrittabstand Offset Länge Größe Schrittabstand	:: Ref_sehri :: C:\Users :: Oberfläche X :: 470.4 :: 2472 :: 24472 :: 24.27 Y :: 482.5 :: 24111 :: 0.2002	weich_v \Ref_se	kte	8 eich_vert_4_8.stl	
Stu Achse: Achse:	Name Dateipfad udienobjekt-Typ Länge Größe Schrittabstand Offset Länge Größe Schrittabstand Offset	:: Ref_sehri :: C:\Users :: Oberfläche X :: 470.4 :: 2472 :: 24472 :: 24425 :: 24411 :: 0.2002 :: -513.2	weich_v \Ref_se μm μm μm μm μm μm μm μm μm μm	kte	8 eich_vert_4_8.stl	
Stu Achse: Achse:	Name Dateipfad udienobjekt-Typ Länge Größe Schrittabstand Offset Schrittabstand Offset	 Ref_sehr_1 C:\Users Oberfläche X 470.4 2470.4 0.1902 24.27 Y 482.5 2411 0.2002 -513.2 	weich_v \Ref_se	kte	8 eich_vert_4_8.stl	
Achse:	Name Dateipfad udienobjekt-Typ Länge Größe Schrittabstand Offset Schrittabstand Offset	:: Ref_sehr_j :: C:\Users :: Oberfläche X :: 470.4 :: 2472 :: 2447 :: 2447 :: 2442.5 :: 2411 :: 0.2002 :: -513.2 Z :: Topograph	weich_v \Ref_se μ μm μ Pun μ μm μ μm μ μm μ μm μ μm μ μm μ μm	kte	8 eich_vert_4_8.stl	
Stu Achse: Achse:	Name Dateipfad udienobjekt-Typ Länge Größe Schrittabstand Offset Schrittabstand Offset	:: Ref_sehr1 :: C:\Users :: Oberfläche X :: 470.4 :: 2474 :: 2474 :: 2472 :: 2442.5 :: 2411 :: 0.2002 :: -513.2 Z :: Topograph :: Topograph	weich_v \Ref_se	kte	8 eich_vert_4_8.stl	
Stu Achse: Achse:	Name Dateipfad udienobjekt-Typ Länge Größe Schrittabstand Offset Schrittabstand Offset	:: Ref_sehr_' :: C:\Users :: Oberfläche X :: 470.4 :: 2474 :: 2474 :: 2472 :: 24474 :: 24747 :: 24777 :: 24777 :: 24777 :: 24777 :: 24777 :: 24777 :: 24777 :: 24777 :: 24777 :: 247777 :: 2477777 :: 2477777 :: 2477777 :: 24777777 :: 2477777777777777777777777777777777777	k weich_v k Ref_se	kte	8 eich_vert_4_8.stl	
Stu Achse: Achse:	Name Dateipfad udienobjekt-Typ Länge Größe Schrittabstand Größe Schrittabstand Offset	:: Ref_sehr_' :: C:\Users :: Oberfläche X :: 470.4 :: 2474 :: 2474 :: 2472 :: 2472	<pre>weich_v \Ref_se</pre>	kte	8 eich_vert_4_8.stl	
Stu Achse: Achse:	Name Dateipfad Jdienobjekt-Typ Länge Größe Schrittabstand Offset Schrittabstand Offset Schrittabstand Offset Schicht-Typ Länge Min Max	:: Ref.sehr_1 :: Ref.sehr_1 :: C:\Users :: Oberfläche X :: 470.4 :: 2474 :: 2474 :: 2474 :: 2472 Y :: 482.5 :: 2411 :: 0.2002 :: -513.2 Z :: Topograph :: 58.10312 :: 40.35 :: 58.10312	 weich_v \Ref_se µm µm	kte	8 eich_vert_4_8.stl	
Stu Achse: Achse:	Name Dateipfad Jdienobjekt-Typ Länge Größe Schrittabstanc Offset Länge Größe Schrittabstanc Offset Schicht-Typ Länge Min. Mas Größe	:: Ref.sehr_1 :: Ref.sehr_1 :: C:\Users :: Oberfläche :: 2474 :: 3474 :: 34744 :: 3474 :: 34744 :: 347444 :: 34744 :: 34744 :: 34744 :: 34744 :: 34744 :: 34744 :: 347444 :: 3474444 :: 3474444 :: 34744444 :: 34744444444	<pre>kweich_v kkef_se kweich_v kkef_se kweich_v kkef_se kweich_v kef kef kef kef kef kef kef kef kef kef</pre>	kte	8 eich_vert_4_8.stl	





F4 - sehr weich - Gleichverteilt

ISO 25178 - Primäroberfläche						
F: [Ana	alyseablauf] Aus	geri	chtet (LS-Ei	be	ne)	
S-Filter	· (λs): Keine					
Funkti	ons-Paramete	er				
Smr	0.0004631	%				
Smc	2.906	m	n			
Sxp	4.452	m	n			
Räum	liche Paramet	er				
Sal	17.71	m	n			
Str	****					
Std	175.5	0				
Hybric	I-Parameter					
Sdq	0.3408					
Sdr	5.459	%				
Funkti	ons-Paramete	er (v	volumen)			
Vm	0.06881	m	m ³ /mm ²			
Vv	2.975	m	m ³ /mm ²			
Vmp	0.06881	m	m³/mm²			
Vmc	2.154	m	m³/mm²			
Vvc	2.721	m	m³/mm²			
Vvv	0.2544	m	m³/mm²			
Warnh	ninweise					
Str: De	r Autokorrelatio	nsla	appen berüh	nrt	die Rände	r. Der längste
	St	ud	ienobjek	đ	-Infos	
	Name	:	Ref_sehr_v	ve	eich_GV_3_0	0
	Dateipfad	:	C:\Users\.	\	Ref_sehr_w	eich_GV_3_0.stl
St	udienobjekt-Typ	:	Oberfläche			
Achse	•		x			
	Länge	:	470.5	;	μm	
	Größe	:	1980)	Punkte	
	Schrittabstand	I:	0.2377	,	μm	
	Offset	:	24.23	;	μm	
Achse			Y			
Achise	Länge		482.5		um	
	Größe		1930	,	Punkte	
	Schrittabstand		0.2501		um	
	Offset		-513.1		um	
	0150		-		P	
Achse	Calcine T		2			
	Schicht-Typ		ropograph	ie		
	Lange	+	/0.26	,	μιι	
	Man		-27.87		μm	
	Max		42.40	,	μm 7:66 a.ma	
	Große		/0264883		∠imern	
	Schrittabstand		0.0010	70		
NM-P	NM-Punkte-Verhältnis: 20.61 % (787729 Pkte)					





F5 - fließfähig - Referenz

ISO 2	ISO 25178 - Primäroberfläche					
F: [Ana	F: [Analyseablauf] Ausgerichtet (LS-Ebene)					
S-Filter	· (λs): Keine					
Funkti	ons-Parame	ter				
Smr	0.00028	%				
Smc	2.642	mm				
Sxp	3.894	mm				
Räum	liche Parame	eter				
Sal	14.97	mm				
Str	0.3498					
Std	94.24	0				
Hybric	I-Parameter					
Sdq	0.4449					
Sdr	8.820	%				
Funkti	ons-Parame	ter (volumen)				
Vm	0.09159	mm ³ /mm ²				
Vv	2.734	mm ³ /mm ²				
Vmp	0.09159	mm ³ /mm ²				
Vmc	1.834	mm ³ /mm ²				
Vvc	2.510	mm ³ /mm ²				
Vvv	0.2233	mm ³ /mm ²				

Stu	Studienobjekt-Infos					
Name:	Name: Ref_fliessfaehig					
Dateipfad:	C:\Users\Schack\D\Ref_fliessfaehig.stl					
Studienobjekt-Typ:	Oberfläche					
Achse:	x					
Länge:	441.4	μm				
Größe:	3934	Punkte				
Schrittabstand:	0.1122	μm				
Offset:	26.52	μm				
Achse: Y						
Länge:	447.8	μm				
Größe:	3877	Punkte				
Schrittabstand:	0.1155	μm				
Offset:	-476.2	μm				
Achse:	z					
Schicht-Typ:	Topographie					
Länge:	57.14	μm				
Min.:	-6.207	μm				
Max:	50.93	μm				
Größe:	57139059	Ziffern				
Schrittabstand:	0.0010	nm				
NM-Punkte-Verhältnis: 21.79 % (3323640 Pkte)						





F5 - fließfähig - 3 - Bild - Asymmetrisch

ISO 2	ISO 25178 - Primäroberfläche				
F: [Ana	F: [Analyseablauf] Ausgerichtet (LS-Ebene)				
S-Filter	·(λs): Keine				
Funkti	ons-Paramete	er			
Smr	0.0005648	%			
Smc	2.259	mm			
Sxp	3.207	mm			
Räuml	iche Paramet	er			
Sal	19.84	mm			
Str	0.5473				
Std	94.26	0			
Hybrid	I-Parameter				
Sdq	0.3220				
Sdr	4.911	%			
Funkti	ons-Paramete	er (volumen)			
Vm	0.08291	mm ³ /mm ²			
Vv	2.342	mm ³ /mm ²			
Vmp	0.08291	mm ³ /mm ²			
Vmc	1.610	mm ³ /mm ²			
Vvc	2.169	mm ³ /mm ²			
Vvv	0.1732	mm ³ /mm ²			

Studienobjekt-Infos					
Name:	Ref_fliessfaehig_vert_3_1				
Dateipfad:	C:\Users\R	.ef_fliessfae	hig_vert_3_1.stl		
Studienobjekt-Typ:	Oberfläche				
Achse:	X				
Länge:	441.3	μm			
Größe:	2286	Punkte			
Schrittabstand:	0.1931	μm			
Offset:	26.58	μm			
Achse:	Achse: Y				
Länge:	447.8	μm			
Größe:	2253	Punkte			
Schrittabstand:	0.1988	μm			
Offset:	-476.2	μm			
Achse:	Z				
Schicht-Typ:	Topographie				
Länge:	57.86	μm			
Min.:	-10.66	μm			
Max:	47.19	μm			
Größe:	57856732	Ziffern			
Schrittabstand:	0.0010	nm			
NM-Punkte-Verhältnis:	21.80 % (11	22654 Pkte)		





F5 - fließfähig - 4 - Bild - Asymmetrisch

ISO 2	ISO 25178 - Primäroberfläche				
F: [Ana	F: [Analyseablauf] Ausgerichtet (LS-Ebene)				
S-Filter	· (λs): Keine				
Funkti	ons-Paramet	er			
Smr	0.0004138	%			
Smc	2.351	mm			
Sxp	3.294	mm			
Räum	liche Paramet	er			
Sal	21.14	mm			
Str	0.7317				
Std	94.49	0			
Hybrid	I-Parameter				
Sdq	0.3545				
Sdr	5.872	%			
Funkti	ons-Paramet	er (volumen)			
Vm	0.08375	mm ³ /mm ²			
Vv	2.435	mm ³ /mm ²			
Vmp	0.08375	mm ³ /mm ²			
Vmc	1.701	mm ³ /mm ²			
Vvc	2.253	mm ³ /mm ²			
Vvv	0.1820	mm ³ /mm ²			

Studienobjekt-Infos						
Name:	Name: Ref_fliessfaehig_vert_4_7					
Dateipfad:	C:\Users\Ref_fliessfaehig_vert_4_7.stl					
Studienobjekt-Typ:	Oberfläche					
Achse:	X					
Länge:	441.4	μm				
Größe:	2618	Punkte				
Schrittabstand:	0.1687	μm				
Offset:	26.54	μm				
Achse:	Y					
Länge:	447.8	μm				
Größe:	2580	Punkte				
Schrittabstand:	0.1736	μm				
Offset:	-476.2	μm				
Achse:	Z					
Schicht-Typ:	Topographie					
Länge:	62.36	μm				
Min.:	-16.29	μm				
Max:	46.07	μm				
Größe:	62357615	Ziffern				
Schrittabstand:	0.0010	nm				
NM-Punkte-Verhältnis: 21.81 % (1472873 Pkte)						





F5 - fließfähig - Gleichverteilt

ISO 2	25178 - Pri	märoberfläche				
F: [Ana	F: [Analyseablauf] Ausgerichtet (LS-Ebene)					
S-Filter	·(λs): Keine					
Funkti	ons-Paramete	er				
Smr	0.0006901	%				
Smc	2.517	mm				
Sxp	3.586	mm				
Räuml	iche Paramet	er				
Sal	21.21	mm				
Str	0.6119					
Std	121.2	0				
Hybrid	-Parameter					
Sdq	0.2343					
Sdr	2.672	%				
Funkti	ons-Paramete	er (volumen)				
Vm	0.05645	mm ³ /mm ²				
Vv	2.573	mm ³ /mm ²				
Vmp	0.05645	mm ³ /mm ²				
Vmc	1.786	mm³/mm²				
Vvc	2.368	mm³/mm²				
Vvv	0.2057	mm ³ /mm ²				

Studienobjekt-Infos					
Name:	Ref_fliessfaehig_GV_3_3				
Dateipfad:	C:\Users\\	Ref_fliessfa	ehig_GV_3_3.stl		
Studienobjekt-Typ:	Oberfläche				
Achse:	x				
Länge:	441.3	μm			
Größe:	1607	Punkte			
Schrittabstand:	0.2748	μm			
Offset:	26.60	μm			
Achse:	Achse: Y				
Länge:	447.7	μm			
Größe:	1584	Punkte			
Schrittabstand:	0.2828	μm			
Offset:	-476.2	μm			
Achse:	Z				
Schicht-Typ:	Topographie				
Länge:	71.59	μm			
Min.:	-23.83	μm			
Max:	47.75	μm			
Größe:	71586668	Ziffern			
Schrittabstand:	0.0010	nm			
NM-Punkte-Verhältnis:	21.82 % (55	5359 Pkte)			



