

3 D Vermessung von Polymerstäbchen

Entwurf und Umsetzung einer Lösung zur hochpräzisen
Volumenmessung von Polymerstäbchen mit optischer Messtechnik
und Bildverarbeitung

vorgelegt von

Kerstin Bernecker, geb. Boochs

Genehmigte Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Naturwissenschaften (Dr. rer. nat.)

Fachbereich 4: Informatik
Universität Koblenz-Landau

Vorsitzender des Promotionsausschusses: Prof. Dr. Jan Jürjens
Vorsitzender der Promotionskommission: Prof. Dr. Matthias Gouthier
Berichterstatter und Betreuer: Prof. Dr. Dietrich Paulus
Weitere Berichterstatter: Prof. Dr. Carsten Steger

Datum der wissenschaftlichen Aussprache: 08.05.2020

Kurzfassung

Das Hauptziel der vorliegenden Arbeit ist die Absicherung der Qualität eines pharmazeutischen Produktionsprozesses durch die Überprüfung des Volumens mikroskopischer Polymerstäbchen mit einem hochgenauen 3D Messverfahren.

Die Polymerstäbchen werden für pharmazeutische Anwendungen hergestellt. Aus Gründen der Qualitätssicherung muss das Istgewicht überprüft werden. Derzeit werden die Polymerstäbchen stichprobenartig mit einer hochpräzisen Waage gewogen. Für die nächste Generation von Polymeren wird angenommen, dass die Produktabmessungen weiter reduziert werden sollen und die Produktionstoleranzen auf 2,5% gesenkt werden. Die daraus resultierenden Genauigkeitsanforderungen übersteigen jedoch die Möglichkeiten der Wiegetechnik.

Bei homogenen Materialien ist die Masse proportional zum Volumen. Aus diesem Grund kommt dessen Bestimmung als Alternative in Frage. Dies verschafft Zugang zu optischen Messverfahren und deren Flexibilität und Genauigkeitspotenzial. Für den Entwurf eines auf die Fragestellung angepassten Messkonzeptes sind weiterhin von Bedeutung, dass das Objekt kontaktlos, mit einer Taktzeit von maximal fünf Sekunden vermessen und das Volumen approximiert wird. Die Querschnitte der Polymerstäbchen sind etwa kreisförmig. Aufgrund der Herstellung der Fragmente kann nicht davon ausgegangen werden, dass die Anlageflächen orthogonal zur Symmetrieachse des Objektes sind. Daher muss analysiert werden, wie sich kleine Abweichungen von kreisförmigen Querschnitten sowie die nicht idealen Anlageflächen auswirken. Die maximale Standardabweichung für das Volumen, die nicht überschritten werden sollte, beträgt 2,5%. Dies entspricht einer maximalen Abweichung der Querschnittsfläche um $1106 \mu\text{m}^2$ (Fehlerfortpflanzung). Als Bewertungskriterium wird der Korrelationskoeffizient zwischen den gemessenen Volumina und den Massen bestimmt. Ein ideales Ergebnis wäre 100%. Die Messung zielt auf einen Koeffizienten von 98% ab. Um dies zu erreichen, ist ein präzises Messverfahren für Volumen erforderlich.

Basierend auf dem aktuellen Stand der Technik können die vorhandenen optischen Messverfahren nicht verwendet werden. Das Polymerstäbchen wird von einer Kamera im Durchlicht beobachtet. Daher sind der Durchmesser und die Länge sichtbar. Das Objekt wird mittels einer mechanischen Vorrichtung um die Längsachse gedreht. So können Bilder von allen Seiten aufgenommen werden. Der Durchmesser

und die Länge werden mit der Bildverarbeitung berechnet. Das neue Konzept vereint die Vorteile der Verfahren: Es ist unempfindlich gegen Farb-/Helligkeitsänderungen und die Bilder können in beliebiger Anzahl aufgenommen werden. Außerdem sind die Erfassung und Auswertung wesentlich schneller.

Es wird ein Entwurf und die Umsetzung einer Lösung zur hochpräzisen Volumenmessung von Polymerstäbchen mit optischer Messtechnik und Bildverarbeitung ausgearbeitet. Diese spezielle Prozesslösung in der Prozesslinie (inline) sollte eine 100%ige Qualitätskontrolle während der Produktion garantieren. Die Zykluszeiten des Systems sollte fünf Sekunden pro Polymerstäbchen nicht überschreiten.

Die Rahmenbedingungen für den Prozess sind durch die Materialeigenschaften des Objekts, die geringe Objektgröße (Breite = $199\ \mu\text{m}$, Länge = $935\ \mu\text{m}$ bis $1683\ \mu\text{m}$) und die undefinierte Querschnittsform (durch den Trocknungsprozess) vorgegeben. Darüber hinaus sollten die Kosten für den Prozess nicht zu hoch sein. Der Messaufbau sollte klein sein und ohne Sicherheitsvorkehrungen oder Abschirmungen arbeiten.

Das entstandene System nimmt die Objekte in verschiedenen Winkelschritten auf, wertet mit Hilfe der Bildverarbeitung die Aufnahmen aus und approximiert das Volumen. Der Korrelationskoeffizient zwischen Volumen und Gewicht beträgt für 77 Polymerstäbchen mit einem Gewicht von $37\ \mu\text{g}$ bis $80\ \mu\text{g}$ $99,87\%$. Mit Hilfe eines Referenzsystems kann die Genauigkeit der Messung bestimmt werden. Die Standardabweichung sollte maximal $2,5\%$ betragen. Das entstandene System erzielt eine maximale Volumenabweichung von $1,7\%$. Die Volumenvermessung erfüllt alle Anforderungen und kann somit als Alternative für die Waage verwendet werden.

Abstract

The main objective of the present work is to assure the quality of a pharmaceutical production process by checking the volume of microscopical polymer rods using a high-precision 3D measurement method.

The polymer rods are manufactured for pharmaceutical applications. For quality assurance reasons, the existing weight must be checked. Currently the polymer rods are randomly weighed using a high-precision balance. For the next generation of polymers, it is assumed that product dimensions will be further reduced and production tolerances will be reduced to 2,5%. Thus, the resulting accuracy requirements exceed the capabilities of weighing technology.

For homogeneous materials, the mass is proportional to the volume. For this reason, its determination can be considered as an alternative to mass testing. This allows to apply optical measurement methods and to use their flexibility and accuracy potential. Important additional aspects for the design of a solution are also that the object is measured contactless, with a maximum cycle time of five seconds and that the volume is approximated. In general, cross-sections of the polymer rods can be approximated as circles. However, due to the production of the fragments, it cannot be assumed that the contact surfaces are orthogonal to the axis of symmetry of the object. Therefore, the objects have to be analyzed in detail in order to detect small shape deviations from ideal circular cylinders. The maximum standard deviation for the volume should not exceed 2,5%. For the actual object sizes this corresponds to a tolerance of the area for a cross section of 1106 μm (error propagation). In order to document the suitability to substitute mass by volume the correlation coefficient between both values should be equal or greater than 98%. Accordingly a precise measuring method is required.

Looking at the actual state of the art, existing optical measurement methods don't provide all necessary criterion. Instead a new solution is developed observing the polymer rods in a transmitted light situation. This allows to observe diameter and length for an individual situation and to determine these values through image processing. In order to observe the whole surface the object is rotated around its longitudinal axis by means of a mechanical device. This allows images to be taken from all sides. The new concept combines many advantages: It is insensitive to chan-

ges in color/brightness, any number of images can be taken and the whole process is very fast.

All in all a solution for high-precision volume measurement of polymer rods will be designed, developed and tested. The solution is based on optical measurement technology and image processing allowing an inline process integration and providing 100 % quality control during production. The cycle time of the system does not exceed five seconds per polymer rod. The frame given for the solution is set by the material properties of the object, the object size (width = 199 μm , length = 935 μm to 1683 μm) and undefined shape (caused by drying process). In addition, the costs have to be kept in low limits, together with a small size for the setup which has to function without safety precautions or shielding.

The developed system observes the objects in different angular steps, determines necessary parameter values from each image and derives the volume based on the set of all values. The results show a correlation coefficient for volume and weight of 99,87 % for 77 polymer rods with a weight of 37 μg to 80 μg . The accuracy of the measurement is documented through a reference system giving a standard deviation of 1,7 % for the volume, what fits to the given limits of 2,5 %. Thus, the volume measurement fulfills all requirements and can substitute the mass calculation through a balance.

Erklärung

Ich versichere, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe und dass die Arbeit in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegen hat und von dieser als Teil einer Prüfungsleistung angenommen wurde.

Alle Ausführungen, die wörtlich oder sinngemäß übernommen wurden, sind als solche gekennzeichnet.

Die Vereinbarung der Arbeitsgruppe für Studien- und Abschlussarbeiten habe ich gelesen und anerkannt, insbesondere die Regelung des Nutzungsrechts.

Mit der Einstellung dieser Arbeit in die Bibliothek bin ich einverstanden. ja nein

Der Veröffentlichung dieser Arbeit im Internet stimme ich zu. ja nein

Koblenz, den 26. November 2020



Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	13
1.1	Wissenschaftliche Fragestellung	13
1.2	Einordnung der Arbeit	17
1.3	Gliederung der Arbeit	18
1.4	Wissenschaftlicher Beitrag	19
2	Messverfahren zur Volumen- und Massenbestimmung	21
2.1	Massenbestimmung	21
2.1.1	Allgemeine Betrachtung	22
2.1.2	Waage	22
2.2	Volumenbestimmung	23
2.2.1	2 D - Kamera-System	24
2.2.2	2.5 D - Fokusvariation	25
2.2.3	2.5 D - Konfokalmikroskop	26
2.2.4	3 D - Triangulationsverfahren	28
2.2.5	3 D - Computertomographie	32
3	Präzisierung der Fragestellung	35
3.1	Anforderungen an das System	35
3.2	Bewertung der betrachteten Messverfahren	36
3.3	Erläuterung des gewählten Messkonzepts	37
3.4	Fehlereinflüsse	39
4	Untersuchung relevanter Einflussgrößen	41
4.1	Einflussgrößen im Messprozess	41
4.1.1	Optischer Aufbau	42
4.1.2	Bildauswertung	52
4.1.3	Objekt	57
4.1.4	Volumenberechnung	64
4.2	Einflüsse auf die Beziehung Masse:Volumen	76
4.2.1	Waage	76
4.2.2	Dichte	78

4.2.3	Bewertungskriterium - Korrelationskoeffizient	83
4.3	Ermittlung eines Volumens mit übergeordneter Genauigkeit	85
4.3.1	Anforderungen	86
4.3.2	Grundprinzip der Röntgentomographie	87
4.3.3	Physikalische Besonderheiten	90
4.3.4	Verwendetes System	92
4.3.5	Erforderliche Genauigkeiten Referenzsystem	93
4.3.6	Oberflächenanalyse	93
5	Technisches Konzept Volumen-inline System	99
5.1	Konzeptherleitung	99
5.2	Berechnungsprozess	103
5.2.1	Querschnittsfläche	105
5.2.2	Volumen	106
5.2.3	Kantendefinition	107
5.2.4	Unterteilung des Objektes	111
5.3	Technischer Aufbau	119
5.3.1	Kamera	119
5.3.2	Beleuchtung	120
5.3.3	Handhabungssystem	121
5.3.4	Optik	127
6	Bewertung techn. Konzept VI-System	135
6.1	Risikobewertung Hardware	135
6.1.1	Objektiv	135
6.2	Risikobewertung Verarbeitungsschritte	152
6.2.1	Bildauswertung	152
6.2.2	Objekt	160
6.2.3	Volumenberechnung	163
6.2.4	Objektivbewertung	172
7	Systemtests an realen Objekten	177
7.1	Einflussgrößen im Messprozess	177
7.1.1	Wiederholungsmessung Volumen-inline System	178
7.1.2	Taktzeit Volumen-inline System	180
7.1.3	Volumenvergleich	182
7.1.4	Korrelationskoeffizient Volumen-Gewicht	186
7.2	Ermittlung eines Volumens mit übergeordneter Genauigkeit	188
7.2.1	Messprozess	189
7.2.2	Wiederholungsmessung opt. Referenzsystem	192
7.2.3	Oberflächenanalyse	193

7.2.4	Rundheit	198
7.2.5	Qualifizierung Volumen-inline System	200
8	Diskussion der Ergebnisse	205
8.1	Zusammenfassung der Ergebnisse	205
8.2	Verbesserungsansätze	207
8.3	Ausblick	208
A	Anhang	211
A.1	Datenblatt zur Berechnung des Objektivs <i>TC23004</i>	212
A.2	3 D-Rekonstruktion CT Messung: Querschnitte eines Polymerstäbchens	213
A.3	Nicht funktionierende Volumen-inline Ansätze	214
A.4	Datenauszug (15 von 95 Querschnitten)	216
A.5	Strahlenverlauf verschiedener Objektivarten	217
A.6	Messmittelfähigkeit - Prüfstift 96 TPI, Winkelschritt 9°	219
A.6.1	tVerteilung [47][S. 7]	220
A.7	Berechnungsfolge zur Fehlerberechnung der einzelnen Parameter im Volumen	221
	Literaturverzeichnis	223
	Tabellenverzeichnis	229
	Abbildungsverzeichnis	232

1. Einleitung

1.1. Wissenschaftliche Fragestellung

In der Herstellung pharmazeutischer Produkte fallen Produktionsschritte an, die eine optische Vermessung erfordern bzw. nahelegen. Es gibt Standardlösungen vor allem für den makroskopischen Bereich. Werden die Objekte bzw. Produkte deutlich kleiner (mikroskopischer Bereich), die geprüft werden sollen, sind Speziallösungen erforderlich. Die vorliegende wissenschaftliche Arbeit erstellt eine Lösung zur Kontrolle von Produkten im mikroskopischen Bereich.

An pharmazeutische Herstellungsprozesse wird ein hoher Qualitätsanspruch gestellt, weshalb unterschiedliche Kontrollaufgaben anfallen. Dazu zählt die Überprüfung von Verpackungen, aber insbesondere auch die Kontrolle der Qualität. Für viele Aufgaben in der Pharmaindustrie gibt es Lösungen (beispielsweise Tablettenanwesenheitskontrolle, Qualitätskontrolle von Tabletten, Anwesenheitskontrolle in Blister, Nadelkontrolle, u.v.m.), die auf optischer Messtechnik basieren. Jedoch für sehr kleine Objekte (mikroskopischer Bereich) gibt es kaum optische, automatisierte Kontrollen, insbesondere wenn sie im Produktionsprozess eingesetzt werden sollen. Häufig werden Produkte nur stichprobenartig geprüft und dazu aus dem Produktionsprozess entnommen. Die Kontrolle wird von Mitarbeitern durchgeführt, teilweise unter einem Mikroskop und ohne genaue Spezifikationen. Der Nachteil dieses Vorgehens ist, dass bei einer schlechten Stichprobe bspw. eine komplette Charge entsorgt werden muss, da nicht sichergestellt werden kann, wie viele der Produkte nicht der Spezifikation entsprechen. Weiterhin muss für diese Probe teilweise der Prozess angehalten werden. Dadurch entstehen hohe Kosten für den Produzenten, die vermieden werden können, wenn seine Produkte bspw. während dem Prozess geprüft werden. Eine weitere Einschränkung stellt die Prozesszeit der Prüfung da. Es gibt Messverfahren, die Objekte im mikroskopischen Bereich vermessen können. Jedoch sind diese mit einer sehr langer Messzeit verbunden und dadurch nicht in einen Produktionszyklus integrierbar.

Es gibt Automatisierungsprozesse, die eine Produktionslinie vom Rohmaterialien, bzw. vorbereiteten Materialien Zuführung, alle Schritte bis zum eingepackten und gelabelten Produkt enthalten. Jeder Prozessschritt muss den Anforderungen ent-

sprechen und die Kontrolle sollte im Prozess durchgeführt werden. Dadurch können z.B. beschädigte Produkte oder Produkte, die den Spezifikationen nicht entsprechen, zu einem frühen Zeitpunkt aussortiert werden. Somit können die Kosten für den Produzenten geringer gehalten werden. Denn je später ein Fehler im Produkt auffällt, desto teurer ist dieser. Weiterhin erreicht durch die automatisierte Qualitätskontrolle den Endkunden ein Produkt mit immer derselben hohen Qualität.

Die skizzierte Aufgabenstellung steht in direkten Zusammenhang mit einem konkreten Entwicklungsauftrag an die IMSTec GmbH und beinhaltet die dreidimensionale Rekonstruktion von Polymerstäbchen. Zur Wahrung des rechtlichen Eigentums des Industriepartners dürfen keine Originalmessergebnisse verwendet werden. Aus diesem Grund werden die Ergebnisse maßstäblich verändert. Diese Anpassung hat jedoch keinen Einfluss auf die Anforderung an den Messprozess, so dass die benutzten Zahlenwerte repräsentativ für die erzielte Qualität sind.

Bei den hier zu untersuchenden Objekten handelt es sich um Polymerstäbchen, die eine bestimmte Konzentration eines Wirkstoffes enthalten. Für die korrekte Therapie mit diesem Wirkstoff ist entscheidend, dass die Objekte exakt die vorgesehene Wirkstoffdosis enthalten. In diesem Zusammenhang spielt auch das Mischungsverhältnis zwischen dem Wirkstoff und dem Bindemittel eine wichtige Rolle. Ist in dem Objekt zu wenig Bindemittel wird das Medikament zu schnell freigesetzt und umgekehrt. In der Abbildung 1.1.1 ist ein Prüfobjekt neben einem handelsüblichen Reiskorn dargestellt.

Ein Extruder fertigt aus dem Pulver-Gemisch einen Strang (extrudiert durch eine Kreisöffnung) mit ca. 250 mm Länge. Dieser Strang wird Filament genannt. Nach einer Trocknungsphase wird ein Filament in kleine Stäbchen (Polymerstäbchen) geschnitten (siehe Abbildung 1.1.2).



Abbildung 1.1.1.: Graphische Darstellung des Polymerstäbchens neben einem Reiskorn

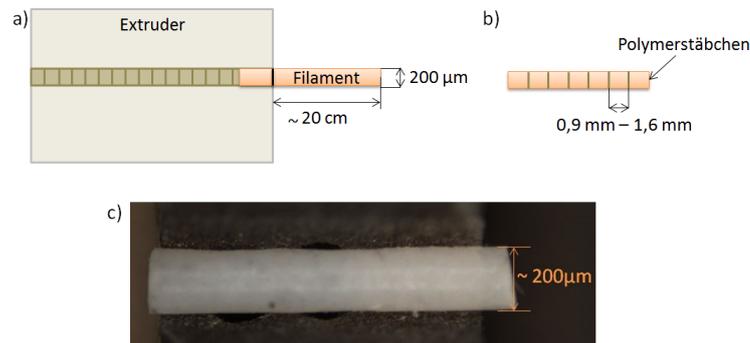


Abbildung 1.1.2.: a) Der Extruder fertigt aus dem Wirkstoff-Pulver-Gemisch einen Strang (= Filament); b) Das Filament wird in Polymerstäbchen geteilt; c) Ein Polymerstäbchen nach dem Schneiden.

Während des Trocknungsprozesses kann sich die Querschnittsform durch Krafteinwirkungen (z.B. Schwerkraft) ändern, sodass das Objekt im Querschnitt nicht mehr exakt einem Kreis ähnelt. Zusätzlich sind die Objekte spröde. Dadurch kann nicht davon ausgegangen werden, dass die Schnittkanten nach dem Schneiden orthogonal zur Symmetrieachse des Polymerstäbchens sind und die Form der eines Kreiszylinders entspricht.

Nachdem durch die Auflagen des Auftraggebers keine dem Original entsprechenden Größenangaben benutzt werden dürfen, beziehen sich die Untersuchungen auf die nachfolgend aufgeführten Maße.

Nominale Breite:	199,16 µm
Längenbereich:	935 µm bis 1683 µm
Winkel Schnittkante:	max. $\pm 15^\circ$
Masse:	45 µg bis 90 µg

Zurzeit wird die Masse der Objekte mit einer Waage erfasst. Die Polymerstäbchen müssen gewogen werden, da ihre Masse den Wirkstoffgehalt bestimmt. Ist die Masse z.B. zu gering, bekommt der Patient weniger Wirkstoff zugeführt. Für die Anwendung ist die Dosierung wichtig, die nicht zu hoch oder zu gering sein darf.

Es werden derzeit drei Millionen Polymerstäbchen pro Jahr in einer Produktionsstätte hergestellt. Es wird jedoch nicht jedes Polymerstäbchen vermessen, sondern lediglich eine Stichprobe von 5%. Aktuell benötigt das Wiegen pro Objekt mindestens 40 Sekunden. In Zukunft soll jedes Objekt geprüft werden. Für eine Einzelmessung stehen dann nur noch 5 Sekunden zur Verfügung. Weiterhin wird die Herstellertoleranz von $\pm 5\%$ auf $\pm 2,5\%$ gesenkt. Die momentan verwendete Waa-

ge gehört zu der Familie der Präzisionswaagen. Die Grenzen der Wägetechnologie werden jedoch mit dieser Messaufgabe erreicht. Die nächste Generation der Objekte wird in der Breite noch geringer und somit sinkt die Masse auf unter $30\ \mu\text{g}$. Die geforderte Genauigkeit und die Prozesszeit können mit der nächsten Generation des Produktes nicht eingehalten werden. Dementsprechend kann die Waage für die kommende Produktion nicht mehr eingesetzt werden. Eine Wägetechnologie, welche sowohl die Geschwindigkeit als auch die geforderte Genauigkeit erreicht, ist aktuell nicht auf dem Markt verfügbar. Die Abbildung 1.1.3 zeigt drei Generationen des

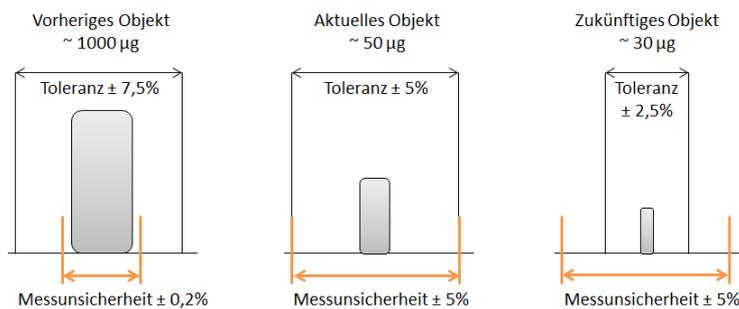


Abbildung 1.1.3.: Darstellung von drei Generationen der Polymerstäbchen mit unterschiedlichen Massen und Toleranzen (schwarz). Zusätzlich sind die Messunsicherheiten in den Größenbereich der aktuell eingesetzten Waage eingezeichnet (orange).

Polymerstäbchens mit seinen unterschiedlichen Massen, Toleranzen und die dazugehörige Messunsicherheit der Wägetechnologie. Es ist erkennbar, dass beim aktuellen Objekt die Werte für die Toleranz und die Messunsicherheit der Waage identisch sind und die Wägetechnologie bei der vorliegenden Messaufgabe an ihre Grenzen kommt. Die nächste Generation der Polymerstäbchen können bei den geplanten Toleranzen nicht mehr mit der Waage quantifiziert werden.

Im Rahmen der Arbeit soll als Alternative ein Lösungsansatz zur Bestimmung des Volumens mittels eines optischen Messsystems entwickelt und praktisch erprobt werden, der die oben genannten Rahmenbedingungen erfüllt. Für die Gegenüberstellung zwischen dem Gewicht und dem Volumen wird der Korrelationskoeffizient berechnet. Der Industriepartner hat festgelegt, dass dieser mindestens 98% betragen muss. Zusätzlich muss das Volumen absolut kontaktlos ermittelt werden, da evtl. Maßnahmen zur Verbesserung der Messfähigkeit (z.B. durch Besprühen) die Objekte kontaminiert und sie damit nicht mehr verwendbar wären.

1.2. Einordnung der Arbeit

Das Ziel ist die Entwicklung eines alternativen Messsystem zur momentan verwendeten Waage und inline Messungen zu ermöglichen. Dafür wird, unter der Annahme ausreichender Homogenität des Materials, die Messung der Masse durch eine Volumenmessung ersetzt. Diese muss die durch das Objekt und den industriellen Prozess gesetzten Rahmenbedingungen erfüllen. Dazu zählen folgende Punkte:

- kontaktlose Messung, um eine Kontamination des Objektes zu vermeiden
- Messung kleinster Objekte (Volumen zwischen $0,03 \text{ mm}^3$ und $0,05 \text{ mm}^3$)
- Messung von Objekten mit kontrastlosen Oberflächen
- Messung mit einer Genauigkeit, die die vorgegebenen Toleranzen erfüllt. Mit Blick auf die zu untersuchenden Objekte bedeutet dies die Einhaltung einer Toleranz von ca. $(0,7 \text{ bis } 1,3) \cdot 10^{-3} \text{ mm}^3$. Dies entspricht in etwa einer Längenmessgenauigkeit von $2 - 3 \mu\text{m}$)
- Absicherung der für einen industriellen Prozess notwendigen Robustheit. Das erfordert die Erkennung, Bewertung und Kompensation aller relevanten Fehler- und Einflussgrößen
- kurze Messzeit zur Absicherung der inline Fähigkeit.

Angeichts der Forderung nach einer kontaktlosen Ermittlung des Volumens kommen nur optische Verfahren in Frage, mit denen das Volumen von Objekten ermittelt werden kann. Als typisches Messverfahren für Volumina und damit als erste Option zur Beantwortung der Fragestellung steht die Computertomographie zur Verfügung. Mit ihrer Hilfe könnte das Prüfobjekt vollständig hochpräzise erfasst (Voxelauflösung = 680 nm) und nach der 3 D-Rekonstruktion das Volumen berechnet werden. Ein großer Vorteil für diese Messung ist das Darstellen der Dichte innerhalb des Objektes. Mit den Aufnahmen ist somit eine komplette Qualifizierung der Polymerstäbchens möglich: Volumenbestimmung, Dichteverteilung, Einschlüsse- oder Lunkerdetektion. Jedoch sind Aufnahmen mit einem CT-System für ein inline Messsystem zu zeitaufwändig (ca. 2 Stunden/Objekt) und kommt aus diesem Grund nicht in Frage. Das Volumen kann auch aus der vollständigen Oberfläche abgeleitet werden. Jedoch kann das 3 D-Volumen nicht in einem Schritt erfasst werden, sondern es werden pro Messung nur Ausschnitte aufgenommen (2.5 D-Volumen). Diese Ausschnitte können in einem nächsten Schritt zu einem 3 D-Volumen zusammengesetzt werden. Dies kann bspw. mit einem Konfokalmikroskop realisiert werden. Dafür müssen in kleinen Winkelschritten alle Objektseiten detektiert und anschließend die einzelnen Punktwolken kombiniert werden. Jedoch ist auch dieses Verfahren zu zeitaufwändig.

Zusätzlich wird für das Zusammensetzen der Punktwolken eine starke Oberflächenstruktur benötigt. Jedoch hat das Objekt zu wenige Informationen in der Morphologie, sodass beim Zusammenfügen der einzelnen Punktwolken die Rekonstruktion stark fehlerbehaftet wäre. Eine weitere Möglichkeit wäre die Verwendung einer hochpräzisen Rotationseinheit, die das Objekt in kleinen Winkelschritten dreht. Dies würde jedoch die geforderte Prozesszeit nicht einhalten. Ein weiteres Verfahren zur Ermittlung des 2.5 D-Volumens ist das *Shape from Motion* Verfahren. Dieses kommt für die Polymerstäbchen nicht in Betracht, da bei diesem Verfahren die Messobjekte eine markante Oberflächenstruktur haben müssen. Dasselbe gilt für die Musterprojektion. Das Objekt hat eine symmetrische Geometrie mit geringer Struktur und somit nicht die Merkmale, die die Systeme zur Rekonstruktion benötigen.

Für den Fall, dass die direkte Antastung der Oberfläche ausscheidet, können unter bestimmten Voraussetzungen auch Konturverfahren in Frage kommen. Die Voraussetzung ist ein konvexes Objekt, das aus ausreichend vielen Ansichten betrachtet wird. Der Modellierungsweg sollte aus der Kontur auf die Oberfläche schließen können. Dafür muss das Objekt gedreht werden. Es kann für beliebige konvexe Formen das Objekt vermessen werden. Es muss aus genügend Blickwinkeln aufgenommen werden und somit bspw. die Breiten und Längen für das Objekt bestimmen zu können. Da das Polymerstäbchen konvex ist und sehr wahrscheinlich im Querschnitt einem Kreis oder einer Ellipse ähnelt, kann dadurch die mathematische Rekonstruktion vereinfacht werden. In [D W14] wird ein Berechnungsansatz anhand von Stützfunktionen beschrieben. Dieser kann jedoch nicht angewendet werden, da der Drehmittelpunkt starr sein muss und zu viele Aufnahmen des Objekts benötigt werden (18 bis 37 Aufnahmen). Ein fixer Drehmittelpunkt würde aufwendige Ausrichtungsprozeduren zur Folge haben, was in der Produktion nicht realisierbar ist. Diese müssten nach jeder Reinigung der Anlage durchgeführt werden. Dieser Ansatz zur Auswertung des Konturverfahrens würde die Prozesszeit nicht einhalten können.

Der in dieser Arbeit vorgestellte technische Lösungsansatz bietet ein Handhabungssystem, welches die Objekte in beliebigen Winkelschritten der Kamera präsentiert und die Durchmesser und Länge an vielen Punkten bestimmt. Zusätzlich liegt die Taktzeit im vorgegebenen Bereich für eine inline-Produktion.

1.3. Gliederung der Arbeit

Im zweiten Kapitel dieser Arbeit wird der Stand der Technik für Messverfahren zur Volumen- und Massenbestimmung beschrieben. Im nächsten Schritt wird die Fragestellung präzisiert und anschließend die relevanten Einflussgrößen untersucht, wie beispielsweise die Einflussgrößen im Messprozess, die Einflüsse auf die Beziehung

von Masse und Volumen und die Ermittlung eines Volumens mit übergeordneter Genauigkeit.

Das technische Konzept des entstandenen Systems wird im nächsten Kapitel ausführlich beschrieben und anschließend bewertet. Dabei wird eine Risikobewertung bezüglich der Hardware und der Verarbeitungsschritte durchgeführt. Im letzten Schritt wird ein Systemtest an realen Objekten durchgeführt und das System mit Hilfe eines weiteren Systems, das Volumina mit einer übergeordneten Genauigkeit vermessen kann, qualifiziert.

Kapitel 8 diskutiert die Ergebnisse und gibt einen Ausblick zur Integration des Systems in eine Produktionsanlage.

1.4. Wissenschaftlicher Beitrag

Der wissenschaftliche Mehrwert der vorliegenden Arbeit liegt in dem gleichzeitigen Erfüllen von allen Merkmalen. Kontaktlose Messungen, die das Volumen kleinster Objekte vermessen, sind vorhanden. Systeme, die Objekte ohne kontrastreiche Oberfläche aufnehmen können, werden eingesetzt und Messsysteme, die in einer Produktionslinie eingesetzt werden und somit eine geringe Taktzeit haben, gibt es vielfältig. Ein System, das alle Merkmale in einem System kombiniert, gibt es jedoch auf dem aktuellen Markt nicht.

Der vorherige Abschnitt zeigt, dass Verfahren, die direkt die Oberfläche messen, nicht in Frage kommen. Die Oberflächenstruktur des zu prüfenden Objektes weist keine markanten Merkmale auf, die für eine Rekonstruktion der Oberfläche wichtig sind. Stattdessen wird die Volumenvermessung mit einem Konturverfahren realisiert. Da es sich um ein konvexes Objekt handelt, dessen Querschnittsfläche einem Kreis oder einer Ellipse ähnelt, können Vereinfachungen vorgenommen werden. Somit muss die Winkelschrittweite nicht sehr klein sein und die Berechnung des Volumens kann vereinfacht werden. Es können bspw. weniger Aufnahmen verwendet werden, als für die Berechnung der Stützfunktion nach [D W14]. Durch Wiederholungsmessungen und einem Vergleich mit einem höher auflösenden System wird sichergestellt, dass das Gesamtkonzept alle genannten Merkmale erfüllt. Dazu werden Nachweise erbracht, indem alle Faktoren, die das Messergebnis beeinflussen können, theoretisch untersucht und praktisch bewertet werden. Das Erfüllen der Genauigkeitsanforderung wird mit einem Verfahren der übergeordneten Genauigkeit (CT) überprüft. Die Zulässigkeit der Volumenmessung als Alternative zur Massenbestimmung wird anhand der Gegenüberstellung von Masse und Volumen und der daraus ermittelten Korrelation nachgewiesen. Neben dem optischen Aufbau und der Berechnung

des Volumens wird mit dieser Arbeit ein Handhabungssystem für kleinste Objekte konstruiert und getestet. Mit diesem System ist es möglich, die nötigen optischen Einzelmessungen durchzuführen. Dies kann auf beliebige andere Objekte und Branchen übertragen werden.

Es liegt ein optisches 3D-Messverfahren vor, das im Kleinstmaßstab mit hoher Genauigkeit Volumina ermitteln kann und gleichzeitig unter Produktionsbedingungen funktioniert. Es erreicht eine höhere Auflösung, wie z.B. ein Streifenprojektionsverfahren [Ter10] oder die Fokusvariante [46] und stellt somit für den Stand der Technik eine Leistungssteigerung dar. Es kombiniert alle Anforderungen in einem System und öffnet somit die Qualitätskontrolle für Produkte im mikroskopischen Bereich, die während der Produktion kontrolliert werden können.

2. Messverfahren zur Volumen- und Massenbestimmung

Es wird ein Verfahren benötigt, das die Volumina von Polymerstäbchen präzise vermessen kann. Entscheidend sind dabei die zu erfassende Größe (Breite, Länge) und die generelle Anforderungen unter Beachtung der praktischen Messsituation. Bei den generellen Anforderungen spielen die Genauigkeit und die Materialeigenschaften eine große Rolle.

Im Folgenden werden Verfahren bewertet, im Hinblick darauf, ob sie für die Messung verwendet werden könnten. Es sollte nicht nur eine Seite des Polymerstäbchens betrachtet werden. Dies ist sehr wichtig, da nicht davon ausgegangen werden kann, dass es sich um einen Kreisquerschnitt handelt und für die Querschnittbestimmung mehr als eine Seitenbetrachtung benötigt wird. Das System sollte integrierbar in eine Anlage sein (Baugröße gering) und keine besonderen Sicherheitsvorkehrungen wie z.B. Strahlenschutz o.ä. voraussetzen. Weiterhin sollte die Prozesszeit gering sein und anschließend das Ergebnis in Form des Objektvolumens vorliegen. Das Verfahren darf in keinsten Weise das Objekt kontaminieren. Aus diesem Grund kann für die Volumenbestimmung ein Elektronenrastermikroskop nicht in Betracht gezogen werden. Für diese Messungen müssen die Objekte beispielsweise mit Platin bedampft werden, damit diese sich nicht statisch aufladen können [39]. Somit wären die Objekte kontaminiert und unbrauchbar für die Anwendung am Patienten.

Es wird unterschieden zwischen Verfahren, die die Masse (Waage) und die das Volumen (2D, 2.5D, 3D, vollräumlich) ermitteln. Jedes Verfahren wird hinsichtlich der Genauigkeiten, vollständiger Vermessung der Objekte, Taktzeit, Baugröße, sowie der Sicherheitsvorkehrungen betrachtet. Weiterhin werden die Vor- und Nachteile der Systeme dargelegt. Mehr Informationen zur optischen 3D Messtechnik können in [Sac14] nachgelesen werden.

2.1. Massenbestimmung

Es gibt unterschiedliche Varianten um die Masse eines Objektes zu bestimmen. Dabei kommt es vor allem darauf an, in welchem Größenbereich das Objekt liegt. Im Folgenden wird die Massenbestimmung zuerst allgemein betrachtet und anschließend die Mikrowaage genauer erläutert.

2.1.1. Allgemeine Betrachtung

Die verschiedenen Messsysteme lassen sich in unterschiedliche Kategorien aufteilen: Verfahren zur Bestimmung der trägen Masse; zur Bestimmung der schweren Masse; Hydrostatische Massenbestimmung; Wägezellen-Prinzipien [48]. Weiterhin können Massen auch durch Volumenverdrängung bestimmt werden (Prinzip von Archimedes zur Dichte- und Volumenbestimmung [**VolumenWasser**]). Diese Art an Verfahren kann jedoch nicht verwendet werden, da das Objekt in keinsten Weise kontaminiert werden darf. Dies wäre jedoch der Fall, wenn das Objekt in eine Flüssigkeit getaucht wird. Für die Bestimmung der Masse mit Hilfe eines Massenspektrometers muss die Probe im Vakuum verdampft und ionisiert werden [67]. Dies ist ein Ausschlusskriterium. Weiterhin sind viele Wägeprinzipien zu ungenau und für kleinste Objekte nicht geeignet (bspw. Federwaagen, Massenbestimmung über Auftriebskräfte, uvm.). Aus diesem Grund kommt nur eine Mikrowaage in Betracht. Das Prinzip dieser Waage wird im folgenden Abschnitt erläutert.

2.1.2. Waage

Waagen, deren Teilung bei $1\ \mu\text{g}$ oder kleiner liegen, werden Mikrowaagen genannt [50]. Teilweise handelt es sich dabei um Quarzkristall-Mikrowaagen oder um das Prinzip der elektromagnetischen Kraftkompensation (EMFC).

In der Abbildung 2.1.2.1 ist das Prinzip einer EMFC Waage dargestellt.

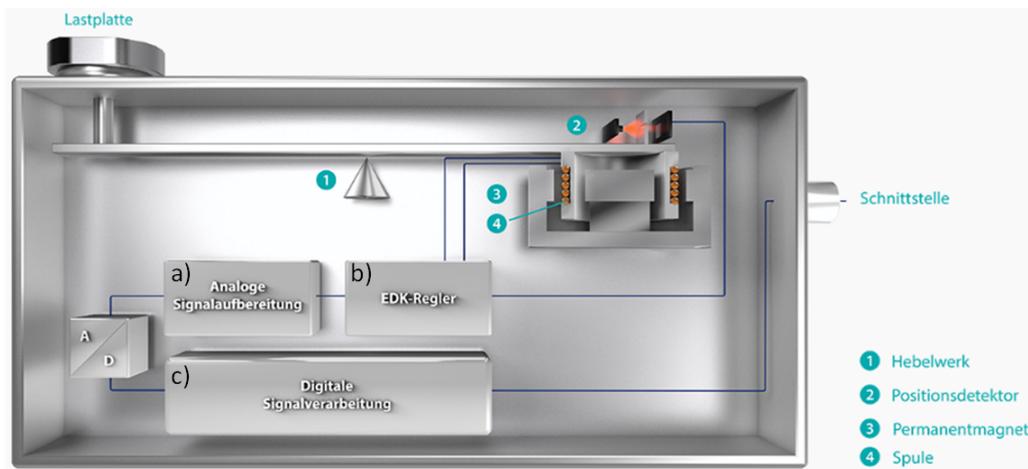


Abbildung 2.1.2.1.: Prinzip einer EMFC Waage; a) Analoge Signalaufbereitung; b) EDK-Regler; c) Digitale Signalverarbeitung [EMFC19]

Ein Objekt wird auf der Waagschale positioniert. Durch die Gewichtskraft wird die Spule aus einem Magnetfeld herausgedrückt. Ein optisches Positionierungssystem

Anwendungsbeispiele	Chemieindustrie (Pulver wiegen), Pharmaindustrie
Genauigkeit	$\pm 5\%$ ¹
Objekt vollständig vermessen	ja
Taktzeit	zur groß (~ 40 s)
Baugröße	integrierbar
Sicherheitsvorkehrungen	keine besonderen
Vorteile	- ohne weitere Verarbeitung ist das Ergebnis vorhanden - es ist nicht relevant, wie das Objekt liegt - Dichteschwankungen im Material werden berücksichtigt
Nachteile	- Auflösungsgrenze ist erreicht ($\pm 5\%$ Toleranz) - die Waage muss abgeschirmt sein, da ansonsten das Ergebnis verfälscht werden kann

Tabelle 2.1.2.1.: Charakterisierung einer Waage

erfasst kleinste Verschiebungen der Spule. Diese werden an ein hochpräzises Kontrollsystem weitergeleitet. Dieses justiert den Kompensationsstrom neu. Dadurch wird das Gleichgewicht der Waage wiederhergestellt. Der Kompensationsstrom wird über einen Präzisionswiderstand gemessen und von einem Mikroprozessorsystem zur Ausgabe als digitaler Gewichtswert weiterverarbeitet [70].

Für die Messungen in dieser Arbeit wird die Waage *XP2U* von Mettler Toledo verwendet. Sie erreicht eine Genauigkeit, die im Zehntel Mikrogramm liegt und eine Wiederholgenauigkeit laut Datenblatt von $0,1 \mu\text{g}$. Die maximale Kapazität liegt bei $2,1 \text{ g}$ [63]. Die Tabelle 2.1.2.1 zeigt einen Überblick über die oben genannten Parameter in Bezug auf die Waage.

2.2. Volumenbestimmung

Für die Volumenbestimmung gibt es unterschiedliche Möglichkeiten, die in verschiedenen Dimensionen angesiedelt sind (2D, 2.5D und 3D). Alle Verfahren dürfen das Objekt nicht kontaminieren. Jedoch ist es erlaubt, wenn das Objekt beispielsweise

¹Höchstlast von 2100 mg

mit einer Nadel bzw. Pinzette berührt wird. Da die Produktionsanlage sich in einem Reinraum befinden wird, können durch Sicherheits- und Reinigungsvorgaben die Objekte, die mit dem Polymerstäbchen in Kontakt treten, steril gehalten werden. Mit Hilfe von 2D-Messungen können Fragestellungen in einer Ebene realisiert werden. Es wird von 2.5D-Messungen gesprochen, wenn bei Datenmodellen die dritte Dimension nicht vollwertig im Bezug auf die 2D-Lageinformation gespeichert wird. Die dritte Dimension ist in diesem Fall ein Attribut und wird u.a. bei Geoinformationssystemen verwendet. Mit Hilfe einer 3D-Messung können Körper räumlich dargestellt werden. Jeder Punkt des Objektes und dessen Position im Raum kann durch einen Vektor abgebildet werden. Der Unterschied zwischen einer 2.5D und einer 3D Messung liegt in der Art der Höhe (2.5D = Attribut; 3D = Koordinate). Weiterhin kann es bei 2.5D Messungen zu unerwarteten optischen Effekten kommen, da die Verschneidung der Linien mathematisch-geometrisch nicht klar definiert sind [D F96], [60].

Im Folgenden wird zuerst eine 2D Variante zur Volumenbestimmung beschrieben, anschließend Verfahren zur 2.5D Vermessung, Verfahren zur 3D und anschließend vollräumlichen Vermessung erläutert.

2.2.1. 2D - Kamera-System

Ein Kamera-System besteht meistens aus einer Kamera, einem Objektiv, einer Beleuchtung und evtl. einem Handhabungssystem für die Objekte. Mit Abbildungen aus diesem System können beispielsweise beliebige Größen (Breite, Länge, Winkel, u.v.m.) ermittelt werden. Jedoch arbeitet ein einfaches 2D-Kamera-System erstmal nicht im drei-dimensionalen Raum. Die Vergrößerung und Auflösung des Systems ist in den physikalischen Grenzen frei wählbar. Weiterhin kann ein Objekt mit unterschiedlichen Beleuchtungsarten aufgenommen werden (Auflicht, Durchlicht, Dunkellicht, u.v.m.).

Die Aufnahme des Objektes wird mit einer beliebigen Bildverarbeitungskette ausgewertet. Das Volumen könnte durch eine Approximation über Durchmesser und Länge berechnet werden. Die Tabelle 2.2.1.1 zeigt einen Überblick über die oben genannten Parameter in Bezug auf ein 2D-Kamera-System.

Anwendungsbeispiele	Automobilindustrie, Lebensmittelindustrie
Genauigkeit	hängt vom optischen Aufbau (Kamera, Objektiv) ab
Objekt vollständig vermessen	nein
Taktzeit	abhängig von Bildverarbeitungsroutine und Anzahl der Bilder
Baugröße	integrierbar
Sicherheitsvorkehrungen	keine besonderen
Vorteile	- berührungslose Messung - Auflösung und Aufbau ist frei wählbar - Messung an bewegten Objekten möglich
Nachteile	- nur 2D-Messung

Tabelle 2.2.1.1.: Charakterisierung eines Kamera-Systems

2.2.2. 2.5 D - Fokusvariation

Für die *Depth from focus*-Methode (DfF) werden mehrere Bilder in unterschiedlichen Abständen zum Bauteil mit einer Kamera aufgenommen. Bei diesem Verfahren wird eine Bildreihe mit unterschiedlichen Blendenöffnungen oder unterschiedlichen Abständen zum Objekt aufgenommen. Aus dem Vergleich der Unschärfe in den einzelnen Bildern kann die Tiefe direkt rekonstruiert werden [P G95]. Anhand der Fokuswerte im Bild wird eine Höhenkarte des Bauteils berechnet. Mit diesem Verfahren wird ein 2.5D Modell des Objektes erstellt. Dabei müssen Optiken mit einer geringen Tiefenschärfe verwendet werden. Der Einsatz von Mikroskopen eignet sich bei diesem Verfahren besonders gut. Die Tabelle 2.2.2.1 zeigt einen Überblick über die oben genannten Parameter in Bezug auf eine Fokusvariation.

²Mikroskop Aufnahme (2x2 Megapixel Bildauflösung)

Anwendungsbeispiele	Mikroskopie; Konzentrationsbestimmung kleiner Teilchen
Genauigkeit	5 μm (z-Richtung) ²
Objekt vollständig vermessen	nein
Taktzeit	abhängig wie fein die Abstände gewählt werden; jedoch $\gg 5$ s aufwändig, da viele Bilder aufgenommen und ausgewertet werden müssen
Baugröße	integrierbar
Sicherheitsvorkehrungen	abhängig von Lichtquelle
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> - berührungslose Messung - nur eine Kamera wird benötigt; Korrespondenz- und Verdeckungsproblem entfallen [46, S. 5f] - Genauigkeit hängt von Anzahl der Bilder ab [46, S. 5f]
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> - Objektive mit geringer Tiefenschärfe müssen verwendet werden - Unschärfe im Bild kann sowohl von der Defokussierung als auch vom Objekt selbst, wie z.B. langsame Helligkeitsänderungen an den Objektkanten, bewirkt werden [P G95]

Tabelle 2.2.2.1.: Charakterisierung eines DfF

2.2.3. 2.5 D - Konfokalmikroskop

In einem einfachen Lichtmikroskop werden alle Objektpunkte gleichzeitig abgebildet. Bei einem konfokalen Lichtmikroskop wird das Objekt punktweise abgetastet. Die Lichtquelle (Laserstrahl) wird über das Objekt bewegt, um dieses vollständig darstellen zu können. Dabei ist das *Pinhole* (Blende) entscheidend. Es wird nur das Licht detektiert, das durch die Blende verläuft [62][S. 3].

Ein Konfokalmikroskop beleuchtet ein Objekt nicht flächenhaft, sondern das Objekt wird von einem Lichtpunkt abgetastet und der Messkopf in Z-Richtung verfahren. Die Lichtpunkte werden auf einem Detektor abgebildet. Alle Lichtstrahlen, die nicht im Fokus liegen, werden durch das *Pinhole* ausgeblendet. Es wird die optimale Fokussierung der einzelnen Objektpunkte ermittelt. Die Abbildung 2.2.3.1 zeigt das Prinzip des Mikroskops. Die korrekte Fokussierung eines Objektpunktes spiegelt sich mit einem Maximum im Detektor wider. Auf der *Pinhole*-Scheibe sind

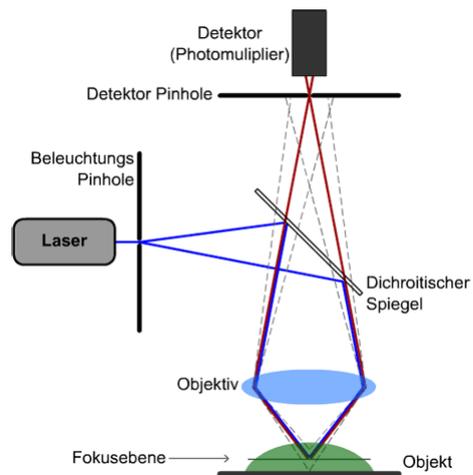


Abbildung 2.2.3.1.: Aufbau eines konfokalen Mikroskops mit dem Flureszenzlicht aus der Fokusebene (roter Strahlengang) und dem „Out of Focus“-Licht (gestrichelter Strahlengang) [66]

Pinholes unterschiedlicher Größe spiralförmig angeordnet. Für die Beleuchtung werden typischerweise eine Bogenlampe oder Leuchtdioden verwendet [65]. Die Tabelle 2.2.3.1 zeigt einen Überblick über die oben genannten Parameter in Bezug auf ein Konfokalmikroskop.

Anwendungsbeispiele	Mikrokopie
Genauigkeit	vom Design des Mikroskops abhängig
Objekt vollständig vermessen	nein
Taktzeit	aufwändig, da Objekt von vielen Seiten aufgenommen werden muss
Baugröße	integrierbar
Sicherheitsvorkehrungen	abhängig von Lichtquelle
Vorteile	- berührungslose Messung
Nachteile	- einzelne Punktwolken müssen kombiniert werden, Vorgang sehr fehleranfällig, da Oberflächenstruktur nicht markant genug - Stirnflächen durch Schräge nicht sauber abbildbar

Tabelle 2.2.3.1.: Charakterisierung eines Konfokalmikroskops

2.2.4. 3 D - Triangulationsverfahren

Die 3 D-Messtechnik kann in zwei Bereiche eingeteilt werden: koaxiale Antastung und Triangulation. Die Triangulation wird in aktive (strukturierte Beleuchtung) und passiv (Photogrammetrie) messende Verfahren unterteilt [Not07, S. 215].

Passive Verfahren brauchen keine besonderen Beleuchtungseinheiten. Es werden mehrere 2D-Kameras mit bekannter Orientierung, eine selbstkalibrierende 2D-Kamera oder mehrere selbst kalibrierend Kameras verwendet [Not07, S. 215]. Die Informationen über das Messobjekt werden dabei durch die Auswertung von Pixelpositionen der Objektpunkte in der Bildebene einer Bildaufnahmeeinheit ermittelt. Aktive Verfahren brauchen hingegen eine spezielle Beleuchtung für das Objekt.

Die **aktiven Verfahren** unterteilen sich noch einmal in drei Untergruppen: ein-, zwei- und dreidimensional [**aktiveVerfahrenPapa**]. Bei einem eindimensionalen Verfahren wird ein Lichtpunkt (z. B. ein Laser) auf das Objekt projiziert. Mit einem zweidimensionalen Verfahren kann ein Objekt flächenhaft aufgenommen werden. Das hierfür verwendete Verfahren wird Lichtschnittverfahren genannt. Es wird ein Lichtband auf das Objekt projiziert. Eine Kamera nimmt dieses auf und wertet es aus. Das dreidimensionale Verfahren ist die Streifenprojektion. Dies ist die flächenhafte Projektion von strukturiertem Licht auf das Objekt [Not07, S. 216f].

Lichtschnittverfahren

Das Lichtschnittverfahren wird zur optischen Formerfassung verwendet. Der Aufbau besteht aus einem Laser und einer Kamera. Die Lichtquelle bestrahlt das Objekt unter einem bekannten Winkel. Die Kamera nimmt die Profillinie auf. Diese erscheint je nach Blickwinkel mehr oder weniger gekrümmt. Da die Geometrie zwischen Laser und Kamera bekannt ist, kann nach dem Triangulationsprinzip das Höhenprofil des Objektes berechnet werden [CT]. Die Abbildung 2.2.4.1 zeigt den Aufbau und das

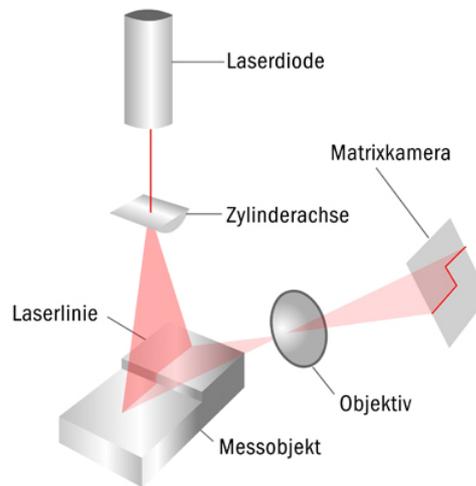


Abbildung 2.2.4.1.: Aufbau eines Lichtschnittsensors [36]

Messprinzip eines Lichtschnittsensors. Damit das Objekt vollständig erfasst werden kann, muss das Objekt oder der Sensor bewegt werden. Dabei kann ein Messfehler entstehen, wenn das Objekt und der Sensor nicht genau zueinander ausgerichtet bzw. die Positioniergenauigkeit der Bewegungsachse nicht präzise genug sind [Not07, S. 217]. Die Tabelle 2.2.4.1 zeigt einen Überblick über die oben genannten Parameter in Bezug auf ein Lichtschnittverfahren.

³550 μm bei einer Diagonalen durch das Messvolumen von etwa 40cm [LSV2]

Anwendungsbeispiele	Lage- und Anwesenheitskontrolle von geometrischen Merkmalen, Teileerkennung, Positionsprüfung von Teilen bei der Montage und Prüfung der Querschnittsgeometrie von Walz- bzw. Strangpressprofilen
Genauigkeit	µm-Bereich ³ ; vom Design des Aufbaus abhängig
Objekt vollständig vermessen	nein
Taktzeit	abhängig vom Design des Aufbaus
Baugröße	nicht integrierbar
Sicherheitsvorkehrungen	abhängig von der verwendeten Lichtquelle
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> - berührungslose Messung - Messung an bewegten Objekten möglich - unempfindlich gegen Farb- und Helligkeitsänderungen - dichte Datenmenge möglich [Not07, S. 232, Tab.1]
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> - nur eine Linie des Objektes wird vermessen (ergibt danach $\frac{1}{3}$ des Volumens) - Einschränkung durch die Oberflächenstruktur. Riefenstruktur können große lokale Messfehler verursachen; bei spiegelnden Oberflächen können hohe Dynamikunterschiede in der Bildhelligkeit auftreten; Volumenstreuer (manche Kunststoffe, Keramik, medizinische Präparate) können durch Besprühen mit einer dünnen Streuschicht präpariert werden [Not07, S. 221] - Specklerauschen: Beleuchtung einer rauen Oberfläche mit kohärentem Licht erscheint diese nicht gleichmäßig hell, sondern körnig (Speckle) [Not07, S. 220]

Tabelle 2.2.4.1.: Charakterisierung eines Lichtschnittverfahren

Streifenprojektion

Seit Anfang der 90er Jahre werden Streifenlichtprojektoren eingesetzt. Sie werden für die 3D-Objekterfassung verwendet. Der Projektor projiziert ein Streifenmuster auf ein Objekt. Dieses Muster wird in Abhängigkeit von der Form des Objektes deformiert. Mindestens eine Kamera nimmt eine Folge flächenhafter binärer Streifenmuster auf. Die Abbildung 2.2.4.2 zeigt den Aufbau mit einer Streifenlichtprojektion. Die Frequenzen der Muster verdoppeln sich dabei von Aufnahme zu Aufnahme.

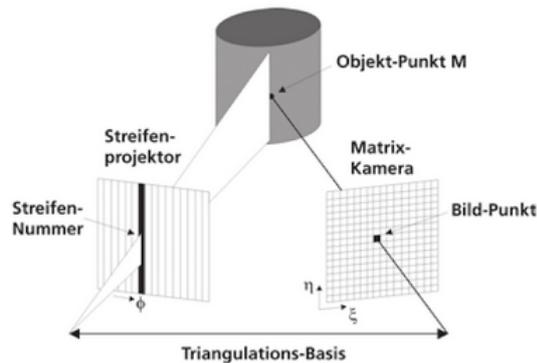


Abbildung 2.2.4.2.: Aufbau mit einer Streifenlichtprojektion [Not07, S. 220]

Durch die Abfolge heller und dunkler Grauwerte kann für jedes Pixel die korrespondierende Lichtebeine eindeutig bestimmt werden. Damit eine hohe Genauigkeit erreicht werden kann, muss die Berechnung der Punkte subpixelgenau erfolgen. Damit lässt sich eine Messgenauigkeit im Submillimeterbereich erreichen [32].

Als Projektionen können phasenverschobene Gittersequenzen mit sinusförmiger Intensitätstransmission in Verbindung mit Gray-Code-Sequenzen oder farbkodierte Muster verwendet werden [Not07, S. 220f]. Die Tabelle 2.2.4.2 zeigt einen Überblick über die oben genannten Parameter in Bezug auf ein Streifenprojektionsverfahren.

⁴Field of view = 10 cm - 1 m

Anwendungsbeispiele	geprägte Zellstofftücher, geprägte Schrift auf Metallzylinder [Ima12], Dermatologie, Orthopädie, Face Scanning [Ter10]
Genauigkeit	lateral: (0,1 - 1) mm; Tiefe: 10 μm ⁴
Objekt vollständig vermessen	nein
Taktzeit	abhängig vom Design des Aufbaus
Baugröße	nicht integrierbar
Sicherheitsvorkehrungen	abhängig von der verwendeten Lichtquelle
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> - berührungslose Messung - Entkopplung von Beleuchtungs-Problemen - bei Objekten mit geringem Kontrast oder variierenden Lichtverhältnissen effizientere und robustere Prüfungsverfahren gewährleistet [68] - geringe Schwingungs- und Störempfindlichkeit [Not07, S. 232, Tab.1]
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> - Tiefe Löcher oder Hinterschneidungen am Objekt sind nur bedingt messbar - nur ein Teil des Objektes wird vermessen

Tabelle 2.2.4.2.: Charakterisierung eines Streifenlichtprojektors

2.2.5. 3 D - Computertomographie

Die Computertomographie (CT) wird für die Gewinnung von Volumendatensätze verwendet. Die Datensätze zeigen die räumliche Verteilung der Materialdichte innerhalb eines Prüfobjektes. Ausgehend von einer Punktquelle durchdringt die Strahlung das Objekt und wird je nach der inneren Struktur geschwächt. Das entstandene Schattenbild wird vergrößert abgebildet [**VisionHandbuch2**].

Mit der Computertomographie werden Objekte zerstörungsfrei z.B. auf Fehler untersucht. Es werden Materialeigenschaften und der geometrische Aufbau erfasst. Die Tabelle 2.2.5.1 zeigt einen Überblick über die oben genannten Parameter in Bezug auf die Computertomographie.

⁵z.B. bei der Überprüfung von Spritzlochdurchmesser an Diesel-Einspritzdüsen [**CTWerth**]

Anwendungsbeispiele	Zuckerrübensamen, Automobilindustrie, Kunststoffteile [Not07, S. 317f]
Genauigkeit	5 μm^5
Objekt vollständig vermessen	ja
Taktzeit	zu groß (> 2 Stunde/Objekt)
Baugröße	nicht integrierbar
Sicherheitsvorkehrungen	notwendig
Vorteile	- berührungslose Messung - teilweise mehrere Objekte auf einmal vermessen
Nachteile	- ist zu zeitaufwändig

Tabelle 2.2.5.1.: Charakterisierung eines CTs

3. Präzisierung der Fragestellung

Das Hauptziel der Arbeit ist die präzise räumliche Vermessung von Polymerstäbchen.

Damit der Patient die richtige Menge an Wirkstoff erhält, müssen die Polymerstäbchen, bevor sie in einer Anlage weiter verarbeitet werden, vermessen werden. Dazu dient momentan noch eine Waage. Diese ist jedoch zu zeitintensiv (40 Sekunden/Objekt) und die Polymerstäbchen können daher nur stichprobenartig geprüft werden. Die inline-Lösung sollte eine 100 %-Kontrolle während der Produktion garantieren. Die Taktzeit der Anlage liegt bei fünf Sekunden pro Polymerstäbchen.

Die Anforderungen an ein System zur Bestimmung der Masse sind zu hoch und können von den aktuellen Waagen nicht mehr geleistet werden. Eine Alternative zur Kontrolle der Polymerstäbchen ist das Volumen. Die Voraussetzung zur Bestimmung des Volumens ist die Annahme, dass die Dichte homogen im Objekt verteilt ist. Dass dies gerechtfertigt ist, wird anhand von Messungen mit zwei unterschiedlichen Messverfahren geprüft (Terahertz-Spektroskopie, Mikro-CT). Das Kriterium zur Prüfung der Übereinstimmung zwischen den Volumina und den Massen ist der Korrelationskoeffizient. Ein ideales Ergebnis wäre 100 %. Es wird mit den Messungen ein Koeffizient von 98 % angestrebt (Anforderung des Industriepartners). Damit dies erreicht werden kann, wird ein präzises Messverfahren für das Volumen benötigt.

3.1. Anforderungen an das System

Im Abschnitt 1.2, Seite 17, sind die Anforderungen an das System aufgelistet. Die Messung muss kontaktlos sein, damit eine Kontamination des Objektes vermieden wird. Bei den Objekten handelt es sich um Produkte aus dem mikroskopischen Bereich (Volumen zwischen $0,03 \text{ mm}^3$ und $0,05 \text{ mm}^3$), die eine kontrastlose Oberfläche haben und somit das Messen dieser erschweren. Das Volumen soll mit einer Toleranz von 2,5 % gemessen werden. Wenn das Volumen eine maximale Standardabweichung von 2,5 % haben darf, bedeutet dies eine maximale Abweichung der Querschnittsfläche um $1106 \mu\text{m}^2$ (Fehlerfortpflanzung)[Ku66]. Weiterhin muss der Aufbau für die Robustheit in einem industriellen Prozess abgesichert sein. Dies erfordert die Erkennung, Bewertung und Kompensation aller relevanten Fehler- und Einflussgrößen. Zusätzlich muss eine kurze Messzeit für die inline-Fähigkeit abgesichert sein.

Alle Anforderungen sind mit dem Stand der Technik realisiert, jedoch nur die einzelnen Punkte an sich. Die Herausforderung für das entstehende System ist die Kombination aller Anforderungen in einem System.

3.2. Bewertung der betrachteten Messverfahren

Die Randbedingungen für das Verfahren sind die materiellen Eigenschaften des Objektes, die geringe Objektgröße und die undefinierte Querschnittsform (gegeben durch den Trocknungsprozess). Weiterhin sollten die Kosten für das Verfahren gering sein. Die gerätetechnische Umsetzung des Messprinzips sollte eine geringe Baugröße haben und ohne Sicherheitsvorkehrungen bzw. aufwendige Abschirmungen arbeiten. Im Kapitel 2 „Messverfahren zur Volumen- und Massenbestimmung“ wurden einige Verfahren vorgestellt. Diese wurden bezüglich der oben genannten Merkmale untersucht. Die Tabelle 3.2.0.1 zeigt die Verfahren mit einer Entscheidungsmatrix für die wichtigsten Eigenschaften.

	Taktzeit <5 s	Genauigkeit ausreichend	Ergebnis Volumen	Geringe Kosten	Geringe Baugröße	Ohne Sicherheitsvorkehrungen
Waage	-	-	-	-	+	+
2 D-Kamera-System	+	o	-	+	+	+
DfF	-	-	-	-	-	o
Lichtschnittverfahren	o	o	-	-	-	o
Streifenlichtverfahren	o	o	-	-	-	o
Konfokalmikroskop	-	-	-	-	+	o
CT	-	o	-	-	-	-

Tabelle 3.2.0.1.: Übersicht unterschiedlicher Messverfahren und welche Eigenschaften erfüllt werden (+ Merkmal erfüllt; o unter bestimmten Bedingungen erfüllt; - Merkmal nicht erfüllt)

Die Waage hat eine geringe Baugröße und benötigt keine Sicherheitsvorkehrungen für eine Verwendung in einer Produktionsanlage. Jedoch liegt die Messzeit deutlich über der gewünschten Taktzeit und die Auflösungsgrenze der Waage ist erreicht. Somit kann die Genauigkeit der gemessenen Massen nicht mehr gewährleistet werden.

Mit Hilfe des DfF kann leider weder die Taktzeit noch die Genauigkeit erreicht werden. Zusätzlich sind die Kosten hoch und die Baugröße eignet sich nicht für eine Produktionslinie. Genauso verhält es sich mit einem Lichtschnittverfahren und einem Streifenlichtprojektor. Abhängig welche Lichtquelle für ein Konfokalmikroskop verwendet wird, könnte dieses nur mit Sicherheitsvorkehrungen in eine Anlage integriert werden. Ein CT müsste auf jeden Fall gesichert werden.

Es zeigt sich, dass die oben genannten Verfahren nicht verwendet werden können. Es kommt nur ein optisches Kamera-System in Frage, welches bezüglich des Handhabungssystems der Objekte eine Neuentwicklung benötigt.

Wie oben erwähnt, kann nicht davon ausgegangen werden, dass die Querschnittsfläche ein Kreis ist. Aus diesem Grund muss das Objekt von mehreren Seiten (in unterschiedlichen Winkelschritten) betrachtet werden. Der optische Aufbau und das benötigte Handhabungssystem werden im nächsten Abschnitt erläutert.

3.3. Erläuterung des gewählten Messkonzepts

Der optische Aufbau besteht aus einer Kamera, einem Objektiv, einer Beleuchtungseinheit und einem Handhabungssystem. Es wird ein telezentrisches Objektiv verwendet, um eine gleichmäßige Vergrößerung ohne eine perspektivische Verzerrung zu erreichen. Das System wird *Volumen-inline System* genannt und im Folgenden mit VI abgekürzt. Die Abbildung 3.3.0.1 zeigt eine Konstruktionszeichnung des Aufbaus. Das Objekt-Handhabungssystem ermöglicht Aufnahmen des Polymerstäb-

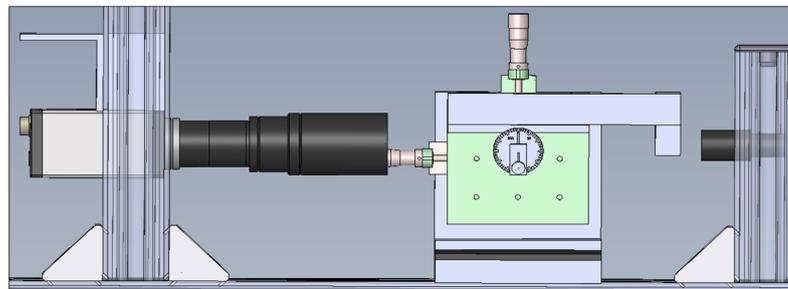


Abbildung 3.3.0.1.: Konstruktionszeichnung des optischen Aufbaus, mit einer Kamera, einem Objektiv, dem Handhabungssystems und der Beleuchtung (von links nach rechts)

chens während es um 360° um seine Symmetrieachse gedreht wird. Dazu wird das Objekt mit Vakuum an einer Nadel gehalten. Die Nadel ist an einer Drehvorrichtung befestigt und dreht das Polymerstäbchen um seine Längsachse. Der Drehmittelpunkt liegt dabei an der Nadelspitze. Somit kann das Objekt in beliebigen Winkelschritten der Kamera präsentiert werden und verändert seine Position entlang der optischen

3. Präzisierung der Fragestellung

Achse nur minimal. In der Abbildung 3.3.0.2 ist das Handhabungssystem dargestellt. Die Kontur des Objektes wird mit einer Durchlichteinheit beleuchtet und über das

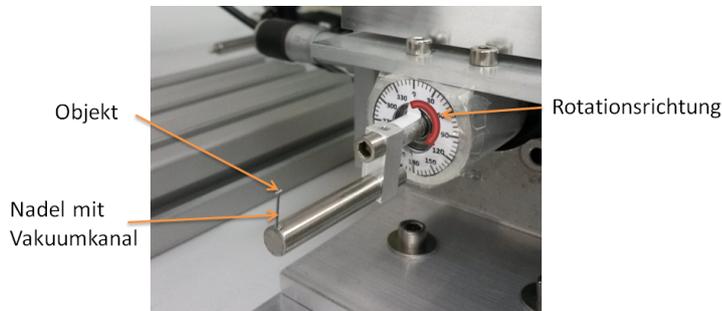


Abbildung 3.3.0.2.: Graphische Darstellung des Handhabungssystems, das das Objekt an einer Nadel mit Vakuum hält und mit Hilfe eines Motors um die Längsachse des Objektes gedreht wird

Objektiv auf dem Kamerachip abgebildet. Die Breite und die Länge kann für jeden Winkelschritt gemessen werden. Die Abbildung 3.3.0.3 zeigt ein Beispiel für ein Polymerstäbchen und die gemessenen Parameter. Da nicht davon ausgegangen wer-



Abbildung 3.3.0.3.: Graphische Darstellung einer Objektaufnahme mit markierter Breiten- und Längenmessung

den kann, dass es sich beim Querschnitt um eine ideale Kreisfläche handelt, werden Untersuchungen durchgeführt, welche Querschnittsannahme die besten Ergebnisse liefert (Kreis, Ellipse, numerische Berechnung). Mit Hilfe der Breite, der Länge und der genannten Approximationen kann das Volumen für die Objekte bestimmt werden.

Aufgrund der Herstellung der Objekte (siehe oben) kann nicht davon ausgegangen werden, dass die Schnittkanten orthogonal zur Symmetrieachse des Polymerstäbchens verlaufen. Daher muss analysiert werden, welche Auswirkungen die nicht idealen Schnittkanten im Volumen haben.

3.4. Fehlereinflüsse

Es gibt innere¹ und äußere² Genauigkeiten, die die unterschiedlichen Variationen im System spezifizieren, die das Ergebnis beeinflussen. Die innere Genauigkeit definiert Auswirkungen, die durch das Objekt entstehen, die Volumenberechnung, das Messsystem und die optischen Fehler des Objektivs. Diese Bereiche werden im Kapitel 4 mit folgenden Untersuchungen qualifiziert:

- Einflussgrößen im Messprozess:
Kamerasensor; Beleuchtung; Objektiv; mechanische Komponenten
- Bildauswertung:
Pixelauflösung; benötigte Anzahl der Aufnahmen; Abschätzung Kantenbreite
- Auswirkungen des Objektes:
Auswirkungen höherer Fehlerordnungen; Gewichtung der Faktoren; Abweichungen der erwarteten Kontur
- Volumenberechnung:
Fehler der einzelnen Parameter im Volumen; Querschnittsfläche; Variation Winkelschritte

Durch theoretische Berechnungen, Fehlerfortpflanzungen und Wiederholungsmessungen können die Punkte der inneren Genauigkeit bestimmt werden.

Zur äußeren Genauigkeit gehört die Waage. Für den Korrelationskoeffizienten wird das berechnete Volumen mit der Masse der Polymerstäbchen verglichen. Jedoch ist die Waage ein Messgerät und mit dem VI wird eine physikalische Methode realisiert. Dies bedeutet, dass beide Systeme nicht in derselben Messkategorie arbeiten. Es wird ein Messsystem benötigt, welches als Referenz für das VI System genutzt werden kann und idealerweise ebenfalls ein optisches System darstellt. Mit dem Vergleich wird gezeigt, mit welcher Genauigkeit das optische Verfahren die Volumen vermessen kann. Das Referenzsystem sollte in derselben Messdomäne arbeiten (Volumen) und eine drei Mal höhere Genauigkeit haben als das VI. Dabei sind die oben genannten Randbedingungen wie Baugröße, Messzeit und Sicherheitsvorkehrungen nicht relevant. Mit dem Referenzsystem soll eine hinreichende Anzahl an Polymerstäbchen aufgenommen und mit der Auswertung des VI verglichen werden. Somit kann die äußere Genauigkeit des VI bestimmt werden.

¹Identisch mit dem Begriff Präzision [**InnenAussen**].

²Die äußere Genauigkeit berücksichtigt die systematischen Abweichungen (accuracy) [**InnenAussen**].

Diese Arbeit liefert Erkenntnisse über die Kapazität von inline-Aufbauten zur Messung des Volumens kleiner Objekte mit einer Genauigkeit von bis zu hundertstel Kubikmillimeter. Es wird ein optisches 3D-Messverfahren für kleine Maßstäbe mit einer hohen Genauigkeit geben, welches das Volumen bestimmen und gleichzeitig unter Produktionsbedingungen arbeiten kann.

4. Untersuchung relevanter Einflussgrößen

Messprozesse sind typischerweise fehlerhaft. Die möglichen Fehlerquellen müssen identifiziert und beachtet werden, damit ihre Wirkung auf das Messergebnis abgeschätzt werden kann. Das verwendete Messverfahren liefert nicht direkt die benötigte Messgröße, sondern die Messgröße wird durch eine andere Größe substituiert. Die Beziehung zwischen den beiden Größen Masse und Volumen muss genauer betrachtet werden. Nur so kann eine Aussage getroffen werden, wie gut die gemessene Größe (Volumen) die vorher verwendete (Masse) repräsentiert.

Damit das Messergebnis abgesichert werden kann, wird eine Referenz benötigt. Diese wird anhand eines Mikro-CTs realisiert.

Nachdem die genannten Aspekte betrachtet sind, kann eine objektive Aussage zur erwarteten Qualität gemacht werden. Weiterhin kann bewertet werden, inwieweit der Ansatz die gestellten Anforderungen grundsätzlich erfüllt.

Im Folgenden werden Punkte, die das Ergebnis beeinflussen können, erläutert und ihr Fehleranteil benannt: zuerst die Einflussgrößen im Messprozess, dazu gehören die Abweichungen durch den optischen Aufbau, die Bildauswertung, das Objekt und die Volumenberechnung; anschließend die Einflüsse auf die Beziehung zwischen der Masse und dem Volumen (Waage, Dichte, Bewertungskriterium). Zum Abschluss des Kapitels wird die Ermittlung eines Volumens mit übergeordneter Genauigkeit beschrieben (optisches Referenzsystem).

4.1. Einflussgrößen im Messprozess

Zur inneren Genauigkeit zählen Auswirkungen, die durch das Objekt, die Volumenberechnung, das Messsystem und durch die optischen Fehler des Objektivs entstehen. Jeder Punkt ist in weitere Fehlereinflüsse untergliedert. Zu den Fehlereinflüssen des optischen Aufbaus gehören

- der Kamerasensor,
- die Beleuchtung,

- das Objektiv,
- die mechanischen Komponenten.

Die Bildauswertung wird unter anderem durch

- die Pixelauflösung,
- die benötigte Anzahl an Aufnahmen,
- die Abschätzung der Kantenbreite

definiert. Zur Auswirkung des Objektes gehören

- die Auswirkungen höherer Fehlerordnungen,
- die Gewichtung der Faktoren,
- die Abweichungen der erwarteten Kontur.

Zur Volumenberechnung zählen

- die Fehler der einzelnen Parameter im Volumen,
- die Querschnittsfläche,
- die Variation der Winkelschritte.

Alle Fehlereinflüsse werden im Folgenden erklärt und ihr Einfluss berechnet.

4.1.1. Optischer Aufbau

Der Einfluss im Messprozess wird unter anderem durch Komponenten des optischen Aufbaus beeinflusst. Das Objekt kann nicht taktil gemessen werden. Aus diesem Grund wird eine Abbildung zur Vermessung verwendet (optische Abtastung). Diese sollte idealerweise dem Original, abgesehen von einem Maßstab, entsprechen. Jedoch ist dies üblicherweise nicht so, sondern wird von Faktoren beeinflusst, die an dem optischen System beteiligt sind. Alle diese Faktoren müssen betrachtet und ihr Einfluss auf den Messprozess bewertet werden.

Im Folgenden wird ein Verfahren zur Bestimmung der Verzeichnung erläutert und die Fehler durch weitere Komponenten im Aufbau, wie den Kamerasensor, die Beleuchtung und mechanische Komponenten aufgezeigt.

Kamerasensor

Bei der Auswahl des Kamerasensors sollte beachtet werden, dass größere Sensoren mit größeren Pixeln technisch gesehen meistens die bessere Wahl sind. Benötigt die Applikation möglichst rauscharme Bilder und präzise Messergebnisse, sollten große Pixel gewählt werden. Kleinere Pixelgrößen haben sehr oft ein extrem starkes Sensorrauschen, wenn die Lichtverhältnisse nicht optimal sind [37].

Für die Kamera wird die *Full well Kapazität* angegeben. Diese beinhaltet, wie viele Elektronen ein Pixel-Element aufnehmen kann, bevor es vollständig gesättigt ist. Je größer diese Kapazität des Sensors ist, desto besser ist das maximale Signal-Rausch-Verhältnis [58][S. 38]. Ein $5,5 \mu\text{m}$ Pixel kann beispielsweise bis zu 20.000 Elektronen aufnehmen. Ein $1,7 \mu\text{m}$ Pixel hingegen nur 1.000 Elektronen.

Weiterhin verringert sich die Dynamik des Sensors¹ bei kleineren Pixelgrößen.

Beleuchtung

Die Beleuchtung kann in einer Abbildung die wichtigen Objektdetails hervorheben und einen Kontrast erzeugen und somit das Objekt deutlich gegenüber dem Hintergrund hervorheben. Dabei spielt die Wahl der Beleuchtungsart eine entscheidende Rolle. Es stehen unterschiedliche Lichtquellen und Beleuchtungsarten zur Verfügung, je nachdem welche Objektdetails besonders wichtig sind.

Zu den Lichtquellen gehören beispielsweise LED-, Laser-Beleuchtungen oder Halogen-glühlampen. Zu den Beleuchtungsarten zählen das diffuse Auflicht, die diffuse Hellfeld-, die diffuse Dunkelfeld-, die Dunkelfeld-Beleuchtung und das Durchlichtverfahren. Die Abbildung 4.1.1.1 zeigt einen Überblick über die verschiedenen Beleuchtungsarten. Für diese Fragestellung ist die Durchlichtbeleuchtung die beste Wahl. Mit Hilfe der Hintergrundbeleuchtung können die Kanten des Objektes deutlich hervorgehoben werden. Weiterhin interessieren bei der Auswertung nur die Außenmaße des Polymerstäbchens und nicht zum Beispiel wie die Oberfläche aussieht. Da ein telezentrisches Objektiv verwendet wird, sollte auch die Beleuchtung telezentrisch sein. Dies bedeutet, dass die Strahlen der Beleuchtung kollimiert² sind. Ansonsten kann es zu unscharfen Kanten durch Reflexion / Streuung an der Oberfläche kommen [53][S. 24].

Die Auswirkungen von unscharfen Kanten werden im Abschnitt 4.1.2 erläutert.

¹Der Dynamikumfang zeigt wie gut sehr helle und sehr dunkle Bildbereiche noch korrekt in einem Bild dargestellt werden können.

²annähernd parallele Strahlen

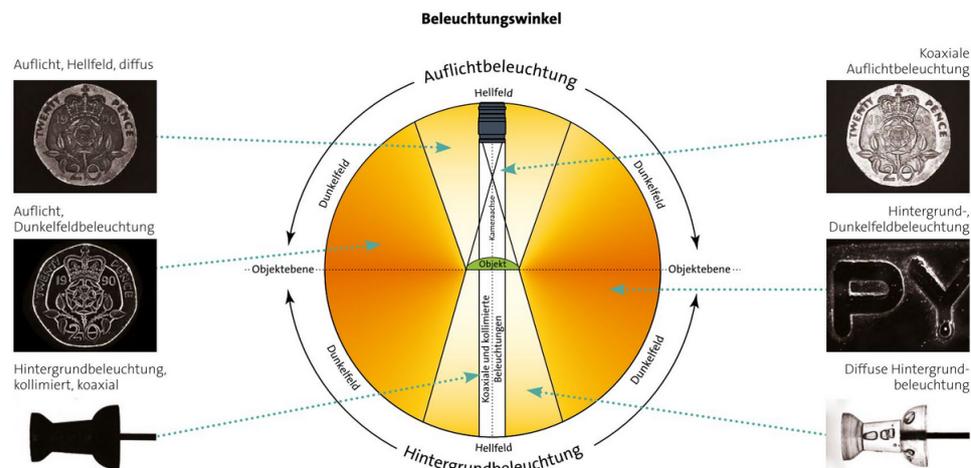


Abbildung 4.1.1.1.: Graphische Darstellung unterschiedlicher Beleuchtungsarten [45][S. 49]

Objektiv

Objektive können unterschiedliche Fehlerquellen aufweisen, durch die die Messergebnisse verfälscht werden können, wie zum Beispiel Abbildungsfehler. Mit Hilfe einer Kalibrierung lassen sich solche Fehler weitgehend herausrechnen. Weiterhin kann ein Objektiv durch die Modulationsübertragungsfunktion qualifiziert werden. Beide Punkte werden im Folgenden näher erläutert.

Abbildungsfehler

Im Idealfall werden mit einer perfekten Optik alle Lichtstrahlen, die den Sensor erreichen von einem einzigen Punkt der Objektebene auf einen einzelnen Punkt der Bildebene fokussiert. Ist dies nicht der Fall, entstehen Abbildungsfehler [G S07][S. 42]. Diese werden in verschiedene Kategorien unterteilt:

- **Chromatische Abweichungen**
Verschiedene Wellenlängen werden unterschiedlich gebrochen. Dadurch können Abbildungen Farbsäume bekommen [Kuc07]. Da für den optischen Aufbau eine LED-Beleuchtung verwendet wird, diese ist näherungsweise monochromatisch (Bandbreite ca. 10 nm), kann dieser Abbildungsfehler vernachlässigt werden.
- **Sphärische Abweichungen**
Sie entstehen durch die Linsenform. Durch die Form eines Kugelschnittes erfahren das Licht, das durch die Mitte der Linse fällt, und das Licht, das auf die Kante trifft, unterschiedliche Vergrößerungen. Dies hat zur Folge, dass jeder Strahl einen anderen Brennpunkt hat und somit zeigen die Bilder zu den Kanten hin mehr Unschärfe auf. Dies kann verhindert werden, indem die Linsen so geschliffen werden, dass die Vergrößerung über die ganze Linse gleich bleibt.

- **Koma**
Es handelt sich um einen unsymmetrischen Öffnungsfehler. Es entstehen störende Zerstreuungsflecken statt einer kreisförmigen Bildscheibe [G S07][S. 85]. Koma ergibt einen kometenschweifähnliche Bildfehler [F P05][S. 128]. Die Blendeneinstellung kann das Verhalten stark beeinflussen.
- **Astigmatismus und Bildfeldwölbung**
Astigmatismus tritt auf, wenn das gesamte Bündel zum Objektpunkt keinen einheitlichen Bildpunkt liefert. Es entstehen an zwei getrennten Bildorten anstelle von Bildpunkten Bildlinien [G S07][S. 84]. Es ergeben sich für kreisförmige oder radiale Elemente eine scharfe Abbildung in zwei unterschiedlichen Bildflächen [F P05][S. 131].
- **Verzeichnung**
Es handelt sich um einen rotationssymmetrischen Bildfehler, der von der Bildmitte zum Bildrand hin zu- oder abnimmt. Dadurch entsteht eine lokale Veränderung des Abbildungsmaßstabes. Dies kann bei der Vermessung des Objektes zu größeren Fehlern führen. Es gibt zwei Arten von Verzeichnung: tonnenförmig und kissenförmig (Vergrößerung nimmt zu den Bildfeldrändern zu). Die Abbildung 4.1.1.2 zeigt die Verzeichnungen in einem Beispiel.



Abbildung 4.1.1.2.: Graphische Darstellung der Verzeichnung [45][S. 161]

Für die Anwendung wird ein telezentrisches oder ein bi-telezentrisches Objektiv diskutiert. Bei dieser Art von Objektiven fallen nur achsenparallele Lichtstrahlbündel in das Objektiv. Somit wird eine gleichmäßige Vergrößerung ohne perspektivische

Verzerrung erreicht. Um dies jedoch zu überprüfen, kann mit dem optischen Aufbau ein Strichgitter aufgenommen werden. Ist das Objektiv abbildungsfehlerfrei gibt es keine Verzeichnung und die Abstände der Linien sind an jeder Position im Bild identisch. Ist dies nicht der Fall, kann dieser Abbildungsfehler die Messergebnisse stark beeinflussen und muss mit einer Korrekturmatrix verrechnet (kalibriert) werden.

Modulationsübertragungsfunktion

Das Auflösungsvermögen eines Objektivs kann mit der Modulationsübertragungsfunktion (MTF)³ angegeben werden. Die MTF beschreibt die Güte, das optische Auflösungsvermögen, eines optischen Systems [Jah03][S. 56f]. Sie berücksichtigt alle Abbildungsfehler. Zur Bestimmung werden Linien mit unterschiedlichen Abständen abgebildet. Die Ortsfrequenzen werden in Linienpaare pro Millimeter angegeben. Für jede Ortsfrequenz wird der Kontrast ermittelt und in einem Graphen dargestellt. Der Kontrast über die Frequenzen wird MTF-Kurve genannt. Je mehr Linienpaare pro Millimeter erkannt werden, desto besser ist die Auflösung des Objektivs.

Der Kontrast kann abhängig von der Richtung der Linien schwanken, wenn das Objektiv einen Bildfehler hat (Astigmatismus). Aus diesem Grund gibt es auf den MTF Testplatten die Linienpaare in sagittaler und tangentialer Richtung und werden im Graphen mit zwei Funktionen dargestellt. In der Abbildung 4.1.1.3 ist die Aufnahme eines MTF-Targets skizziert [45][S. 161].

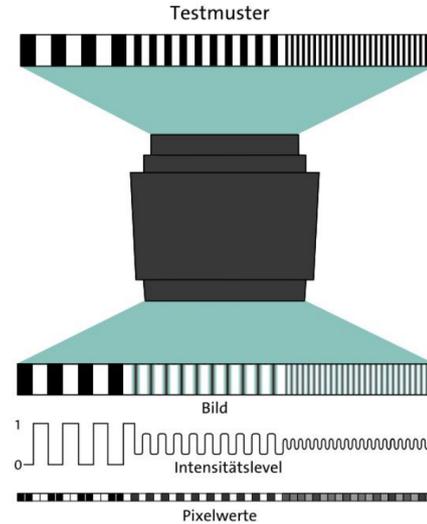


Abbildung 4.1.1.3.: Graphische Darstellung der Auswirkung einer MTF einer Optik auf die Abbildung [45][S. 161]

³Kontrastverhältnis zwischen Objekt und Bild [Jah03][S. 47f]

Bei der Auswahl der Kamera und des Objektivs sollte beachtet werden, dass beides aufeinander abgestimmt ist (z.B. Sensorgröße). Das Auflösungsvermögen des Objektivs muss deutlich besser sein, je kleiner die Sensorpixel sind. Es sollte beachtet werden, dass die MTF auch durch die Blendeneinstellung beeinflusst wird. Dies muss zum Beispiel beim Vergleich von unterschiedlichen Objektiven berücksichtigt werden.

Für die Berechnung der MTF werden USAF Targets verwendet. Die optische Grenzauflösung des Systems zeigt sich, sobald die Gruppierung nicht mehr voneinander getrennt werden können. Die Abbildung 4.1.1.4 zeigt beispielhaft ein USAF Target. Die

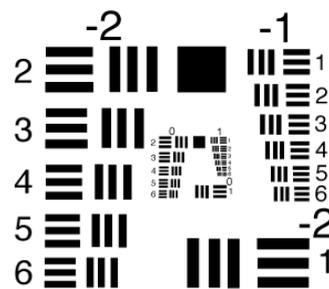


Abbildung 4.1.1.4.: Graphische Darstellung eines USAF Targets [54]

Modulation bzw. der Kontrast wird mit Hilfe der *Michelson-Contrast-Modulation* für jedes Linienpaar pro Millimeter berechnet [AT 97][S. 50].

$$M = \frac{C_{max} - C_{min}}{C_{max} + C_{min}}, \quad (4.1)$$

wobei M für den Modulationskontrast, C_{min} für den minimalen und C_{max} für den maximalen Grauwert steht.

Anschließend werden die ermittelten Werte über den Linienpaaren pro Millimeter in einem Graphen dargestellt. Die Abbildung 4.1.1.5 zeigt beispielhaft eine MTF. In der Abbildung 4.1.1.5 zeigt die blaue MTF ein optisches System mit dem schlechtesten Auflösungsvermögen der drei Darstellungen. Jedoch hat die grüne MTF die niedrigste Grenzfrequenz (näherungsweise 58 LP/mm).

Die Grenze des Auflösungsvermögens ist definiert durch das Rayleigh-Kriterium. Ist der Winkel zwischen zwei Punktobjekten hinreichend groß, können beide Punkte aufgelöst werden. Werden die beiden Punkte näher zusammen geführt, beginnen sich die Beugungsbilder zu überschneiden und die Unterscheidung der Objektpunkte wird immer schwieriger. Das Rayleigh-Kriterium definiert als Auflösungsgrenze

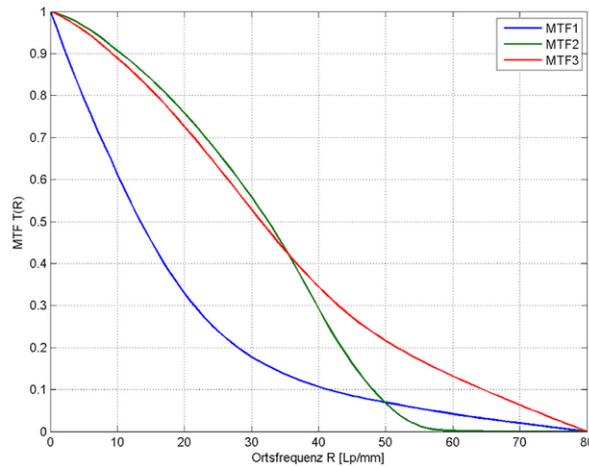


Abbildung 4.1.1.5.: Graphische Darstellung von drei unterschiedlichen MTF-Charakteristiken [H N14][S. 398]

den Winkelabstand ω_{min} zwischen den beiden Beugungsbildern [F P05][S. 475].

$$\omega_{min} = 1,22 \frac{\lambda}{D}, \quad (4.2)$$

wobei λ für die Wellenlänge der Beleuchtung und D für die Aperturblende steht. Es ist besser, je höher die Auflösungsgrenze des Objektivs für den optischen Aufbau ist. Somit kann abgeschätzt werden, wo die wellenoptisch bedingte Leistungsgrenze liegt. Wenn optische Systeme so gut korrigiert sind, dass ihre Auflösung dem Kriterium entspricht, wird das System beugungsbegrenzt genannt [G S07][S. 187].

Kalibrierung telezentrischer Objektive

Für eine hohe Messgenauigkeit ist eine Kalibrierung sehr wichtig. Die Kalibrierung ist die Bestimmung von Parametern, die die Abbildung der Kamera beschreiben. Es werden die internen⁴ und externen⁵ Parameter der Kamera bestimmt. Zusätzlich können Abbildungsfehler korrigiert werden. Normalerweise liegt die Verzeichnung von telezentrischen Objektiven bei $\sim 0,1\%$. Diese geringe Abweichung darf jedoch für die Messaufgaben zu keinen ungenauen Ergebnissen führen [44].

Die internen Parameter setzen sich zusammen aus:

- Brennweite f
- Verzerrungskoeffizient k für die radiale Verzerrung

⁴Geometrie der Kamera

⁵optisches Zentrum der Kamera in Bezug auf das Referenzkoordinatensystem

- Skalierungsfaktor s
- Koordinaten des Zentrums der Verzerrung.

In [D L13] wird eine zwei-Schritte Kalibrierung für telezentrische Objektive beschrieben. Eine normale Kalibrierung, die auf der Grundlage des Lochkamera-Modells beruht, kann für telezentrische Objektive nicht verwendet werden. Dazu gehören beispielsweise die Methoden nach Hall und Faugeras-Toscani, Tsai, Weng oder Zhang. [D L13] Zhu entwickelte ein System zur Entzerrung von telezentrischen Objektiven, die auf einer linearen Anpassung basiert. Jedoch werden mit diesem Ansatz nur die internen und nicht die externen Parameter bestimmt. Die Methode, die in der Veröffentlichung [D L13] vorgestellt wird, basiert auf orthographischer Projektion, wobei die Hauptquellen der Objektivverzerrung berücksichtigt werden (radial, dezentrierend, dünne Prismenverzeichnung). Die erste Verzeichnungsart wird durch eine unvollkommene Form der Linse hervorgerufen. Die anderen beiden Arten entstehen durch unsachgemäße Objektiv- und Kameramontage und erzeugen sowohl tangentiale wie auch radiale Fehler.

Im ersten Schritt wird bei der Kalibrierung von Li und Tian die extrinsischen und intrinsischen Parameter auf Basis eines verzerrungsfreien Kameramodells geschätzt. Im nächsten Schritt werden die Parameter verfeinert und verschiedene Arten von Verzerrungen berücksichtigt.

Bei telezentrischen Objektiven gibt es 5 extrinsische Parameter: Eulerwinkel (θ), Steigung (pitch φ), Kippwinkel (tilt ψ) und Translationswinkel (t_1, t_2). Die intrinsischen Parameter bestehen aus 6 Parametern: effektive Vergrößerung m und die Linsenverzeichnungskoeffizienten (k_1, h_1, h_2, s_1, s_2) sowie dem Hauptpunkt (Durchstoßpunkt der optischen Achse in der Bildebene). Das Problem liegt in der Bestimmung der optimalen Werte für die intrinsischen und extrinsischen Parameter auf der Basis von einer Anzahl an Punkten und den dazugehörigen Pixel-Standort. Jedoch muss die z-Achse nicht kalibriert werden, da die Objektive die Eigenschaft einer konstanten Vergrößerung über einen bestimmten Bereich von Objektabständen haben. Die Experimente aus [D L13] zeigen, dass mit Hilfe einer Punktmaske als Kalibriertarget die Messgenauigkeit deutlich verbessert wird. Die Verzerrung wird unter Berücksichtigung der radialen Verzeichnung um das 14-fache und unter Berücksichtigung der radialen und dünnen Prismenverzeichnung um das 26-fache reduziert.

Es gibt nur wenige Methoden zur genauen Kalibrierung von telezentrischen Objektiven. *Opto Engineering* bietet jedoch eine telezentrische Objektivkalibrierungssoftware *CVTClib* auf der Basis des oben beschriebenen Verfahrens an. Mit Hilfe dieser Software kann die maximale Verzeichnung um das 14-fache reduziert werden (nach Angaben von *Opto Engineering*).

Mechanische Komponenten

Zu den Einflussgrößen im Messprozess gehören auch die Abweichungen, die durch den optischen Aufbau die Messung beeinflussen. Dazu gehören das Handhabungssystem für die Objekte und der Motor, der das System ansteuert. Im Folgenden werden die Komponenten näher betrachtet.

Handhabungssystem

Die Mechanik für das Handhabungssystem darf keine signifikanten Positionsschwankungen haben, da ansonsten die Optik einen deutlich höheren Tiefenschärfe benötigt, damit das Objekt an jeder Position scharf abgebildet werden kann.

Das Polymerstäbchen wird mit Hilfe von Vakuum an einer Nadel am Handhabungssystem gehalten. Dadurch ist ein Drehen um 360° möglich, ohne dass das Objekt herunter fallen kann. Die Positionierung des Objektes auf der Nadelspitze ist stark vom Bediener abhängig. Wenn die Nadel an der Spitze nahezu plan ist, kann das Objekt an verschiedenen Positionen platziert werden. Dies ist in der Abbildung 4.1.1.6 skizziert.

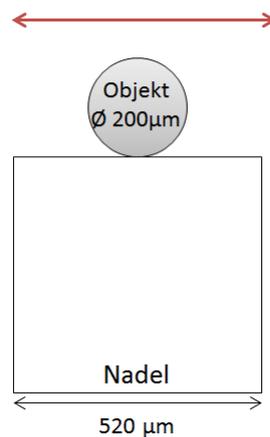


Abbildung 4.1.1.6.: Graphische Darstellung der Nadelspitze mit Objekt. Der rote Pfeil symbolisiert, dass die Position variieren kann

Dadurch hat das Objekt eine undefinierte Position und kann verdreht bzw. am vorderen oder hinteren Rand der Nadel positioniert sein. Dies kann dazu führen, dass der Arbeitsabstand für jedes Objekt nachgestellt werden muss, da der Schärfentiefbereich kleiner sein wird (bei telezentrischen Objektiven) als der Nadeldurchmesser. Weiterhin würde die Messung verfälscht werden, wenn das Objekt nicht orthogonal zur optischen Achse ausgerichtet ist.

Die Abbildung 4.1.1.7 zeigt ein optimal ausgerichtetes Objekt und ein Objekt, das um einen Winkel α verkippt ist.

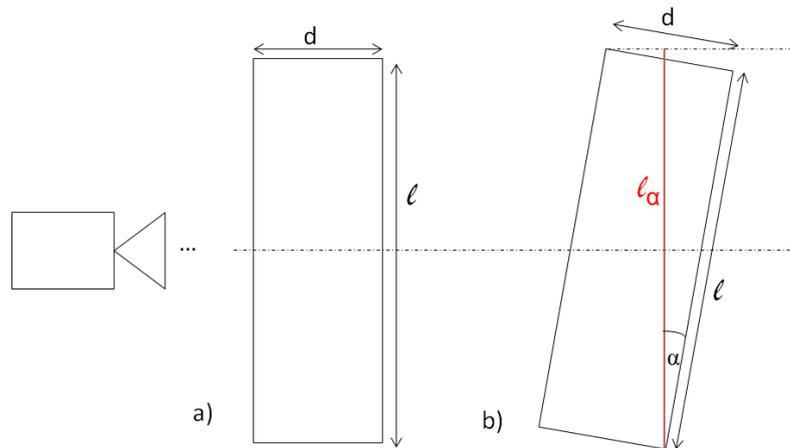


Abbildung 4.1.1.7.: Graphische Darstellung eines optimal ausgerichteten Objekts (a) und einem um einen Winkel α verkippten Objektes (b)

Die eigentliche Länge ℓ ändert sich abhängig vom Winkel α . In der Abbildung 4.1.1.7 entspricht die Länge ℓ_α der gemessenen Länge im Bild.

$$\ell_2 = \frac{\ell}{\cos(\alpha)} + \sin(\alpha)(d - \tan(\alpha)\ell)$$

Die Abweichung A zwischen der eigentlichen Länge und der gemessenen Länge lässt sich mit

$$A = 1 - \frac{\ell}{\ell_\alpha}$$

berechnen. Ist das Objekt beispielsweise um $\alpha = 10^\circ$ verkippt, würde die Länge um 2,13% größer gemessen werden, bei einer eigentlichen Länge von $\ell = 935 \mu\text{m}$. Aus diesen Gründen wird eine V-Nut in die Nadelspitze erodiert. Das Ergebnis ist in der Abbildung 4.1.1.8 anhand einer Skizze dargestellt. Somit ist die Objektposition auf der Nadel stärker begrenzt. Das Objekt liegt bei jeder Messung in derselben Ebene (entlang der optischen Achse) und kann sich nicht verkippen (liegt orthogonal zur optischen Achse).

Motor

Das Handhabungssystem ist mit einem Motor verbunden, der mit Hilfe eines inkrementalen Drehgebers (Encoder) über den PC bedient wird. Die Basis des Encoders ist eine Rotation (mechanische Bewegung), die in ein elektrisches Ausgangssignal umgewandelt wird. Durch die benötigte Auslösung wird die Anzahl der Impulse pro Umdrehung bestimmt.

$$\text{Auflösung} = \frac{\text{Umfang}}{\text{AnzahlPulse}}, \quad (4.3)$$

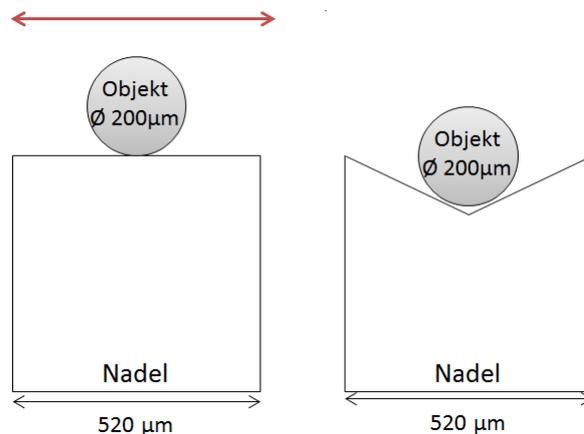


Abbildung 4.1.1.8.: Graphische Darstellung der Nadelspitze ohne V-Nut (links) und mit V-Nut und Objekt (rechts)

wobei der Umfang dem Umfang des Wellenrads entspricht.

Wird der Quotient von $\frac{360^\circ}{\text{Auflösung}}$ ermittelt, ergibt sich die minimale Winkelschrittweite, die der Encoder auflösen kann.

Im Abschnitt 4.1.2 wird erläutert, dass wenn die Querschnittsform unbekannt ist, mindestens 23 Aufnahmen gemacht werden sollten ($0^\circ - 180^\circ$). Dies entspricht einem Winkelschritt w von $7,8^\circ$. Aus dieser Angabe kann darauf zurück geschlossen werden, welche Auflösung der Encoder minimal haben muss.

$$w = \frac{360^\circ}{\text{Auflösung}}$$

$$\text{Auflösung} = \frac{360^\circ}{7,8^\circ}$$

Der Encoder sollte eine minimale Impulszahl pro Umdrehung von 46 haben.

4.1.2. Bildauswertung

Die Einflussgrößen im Messprozess werden durch die Bildauswertung und ihre Abweichungen beschrieben. Dazu gehört die Pixelauflösung, die benötigte Anzahl der Aufnahmen und die Abschätzung der Kantenbreite. Diese Faktoren werden in diesem Abschnitt näher erläutert und ihre Fehleranteile aufgezeigt.

Pixelauflösung

Eine Einflussgröße im Messprozess beinhaltet die Auflösung des optischen Systems. Mit den theoretischen Angaben kann ermittelt werden, welche Pixelauflösung mindestens benötigt wird, damit das Ziel theoretisch erreicht wird.

Die Pixelauflösung hat einen direkten Einfluss auf die Messgenauigkeit am Objekt. Daher muss sie so gewählt werden, dass die geforderten Toleranzen eingehalten werden. Für stabile Kontrollprozesse hat sich in der Praxis bewährt, einen Wert von 10 % der Zieltoleranz zu wählen.

Die Breite des Polymerstäbchens hat eine Toleranz von $\pm 4,8 \mu\text{m}$. Dies bedeutet, dass das optische System eine Auflösung von $0,96 \mu\text{m}$ oder besser haben sollte. Um den Prozess beurteilen zu können, wird die Messmittelfähigkeit berechnet.

Es wird überprüft, ob das verwendete Messsystem den Anforderungen gerecht wird. Damit fehlerhafte Interpretationen vermieden werden, sollten die gemessenen Werte den realen Sachverhalt ausreichend sicher wiedergeben. Die Analyse sollte generell vor der Inbetriebnahme durchgeführt werden. Außerdem wenn das System an einem anderen Ort neu aufgestellt wird, es wesentliche konstruktive Änderungen am Aufbau gibt oder beeinflussende Komponenten getauscht werden. Zur Berechnung der Fähigkeit werden der c_{gk} und c_g Wert ermittelt. Dafür werden Normale/Prüfstifte aufgenommen und ausgewertet. Weiterhin wird die Toleranz des Objektmerkmals, das vermessen wird, benötigt. Es sollten mindestens 20 Messungen an einem Normal durchgeführt werden. Über diese Messungen werden der Mittelwert und die Standardabweichung bestimmt. Mit der Formel 4.4 und 4.5 kann der c_{gk} und c_g Wert berechnet werden [61].

$$C_g = \frac{0,2 \cdot T}{6\sigma} \quad (4.4)$$

$$C_{gk} = \frac{0,1 \cdot T - BI}{3\sigma}, \quad (4.5)$$

wobei T der Toleranz des Merkmals, σ der Standardabweichung und BI gleich $|\bar{x} - \text{Nominal}|$ entspricht.

Das Messsystem ist fähig, wenn c_{gk} und c_g beide größer oder gleich 1,33 sind. Liegen die Werte unterhalb 1,33, ist der Prozess nicht fähig [61].

Für das optische System kann mit Hilfe eines Prüfpins oder eines Kalibriertargets die Auflösung ($\mu\text{m}/\text{PxI}$) bestimmt werden. Mit der Standardabweichung der Breitenmessung, die aus Versuchen ermittelt wird, kann daraufhin geprüft werden, ob

- die gewünschte Auflösung erreicht wird.
- die gewünschte theoretische Standardabweichung nicht überschritten wird.
- mit den erzielten Werten weiterhin ein stabiler Prozess möglich ist.

Benötigte Anzahl der Aufnahmen

Die benötigte Anzahl der Bildaufnahmen hängt von der Anzahl der zu bestimmenden Parametern des Querschnittes ab. In einer Aufnahme können zwei Parameter bestimmt werden. Um einen Kreis-Querschnitt genau bestimmen zu können, werden drei Parameter benötigt. Dies hat zur Folge, dass für einen Kreis mindestens zwei Aufnahmen gemacht werden sollten, damit dieser erfolgreich definiert werden kann.

In der Tabelle 4.1.2.1 sind die Anzahl der zu bestimmenden Parameter und die dazugehörigen Aufnahmeanzahlen aufgelistet.

	Anzahl zu bestimmender Parameter	Anzahl Aufnahmen
Kreis	3	2
Ellipse	5	3
3.-Ordnung	9	10
4.-Ordnung	12	6
	[...]	
15.-Ordnung	45	23

Tabelle 4.1.2.1.: Benötigte Anzahl der Aufnahmen für die Bestimmung aller Parameter

Für die Bestimmung einer Ellipse sind drei Aufnahmen ausreichend. Im besten Fall nähert sich die Berechnung einer beliebigen Ordnung einem Kreis. Somit könnten Abweichungen vom Kreis besser detektiert werden. Damit diese Ordnung bestimmt werden kann, wird für jede Querschnittsvariante die Fläche berechnet. Anschließend wird der Quotient zwischen der Fläche der Querschnittsvariante und der Kreisfläche ermittelt. Wenn dieser Quotient 99 % erreicht, kann diese Querschnittsvariante als Ziel angenommen werden.

Dieses Ziel wird bei der 15ten-Ordnung erreicht (99,12 %). Sollte die Querschnittsfläche mit dem Ansatz aus dem Abschnitt 4.1.3 berechnet werden, sollten 23 Aufnahmen zur Bestimmung der Fläche aufgenommen werden. Kann belegt werden, dass der Querschnitt einer Ellipse entspricht, kann die Anzahl der Aufnahmen reduziert werden. Jedoch sollten die Anzahl nicht zu gering gewählt werden. Die Darlegung im Abschnitt 4.1.4 zeigt, dass die Annäherung an das richtige Ergebnis besser wird, je mehr Aufnahmen zur Auswertung zur Verfügung stehen.

Abschätzung Kantenbreite

Für beste Inspektionsergebnisse sind Abbildungen mit optimaler Schärfe eine Voraussetzung. Kann das Objekt nicht scharf abgebildet werden, könnte beispielsweise die Breite des Objektes nicht fehlerfrei ermittelt werden, da der hell-dunkel Übergang zu breit ist.

Eine Abbildung mit optimaler Schärfe ist abhängig von der richtigen Fokussierung der Optik, der optischen Qualität des Objektivs (wenig optische Fehler), dem Kamerasensor mit einem hohen Auflösungsvermögen und einer großen Bilddynamik. Durch die Beleuchtung kann der Objektkontrast weiter optimiert werden. Die Ab-

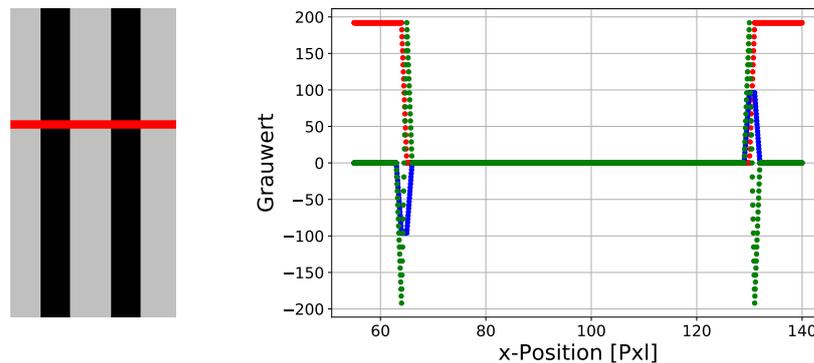


Abbildung 4.1.2.1.: Links: Graphische Darstellung eines optimalen Kantenübergangs. Rechts: Graphische Darstellung der Grauwerte der optimalen Kante entlang der x-Achse (rot), sowie die erste (blau) und zweite Ableitung (grün) der Messwerte.

bildung 4.1.2.1, links, zeigt einen optimalen Kantenverlauf. Die Grauwerte innerhalb der ROI⁶ werden über die x-Achse aufgetragen (siehe Abbildung 4.1.2.1, rechts) und die erste und zweite Ableitung der Messwerte bestimmt.

Je weniger Pixel die Änderung von Hell nach Dunkel darstellen, desto größer ist die Steigung des Helligkeitsprofils (Abbildung 4.1.2.1, grün). Der Kantenverlauf hat eine Steigung von 192.

Zum Vergleich werden die Kanten der Abbildung 4.1.2.1, links mit einem Gaußfilter bearbeitet. Die Abbildung 4.1.2.2, links, zeigt die unscharfen Kanten und die ROI. Dieser Kantenverlauf wird in einem Graphen dargestellt, sowie die erste und zweite Ableitung der Messdaten (Abbildung 4.1.2.2, rechts).

Der Kantenverlauf hat im Vergleich zur optimalen Abbildung eine deutlich geringere Steigung (12,8) und einen breiteren Niveauübergang. Besonders sichtbar wird der Unterschied, wenn die zweite Ableitung der beiden Kantenverläufe verglichen wird. Der Verlauf der optimalen Kante ist scharf und die Funktion hat hohe Ex-

⁶Region of Interest

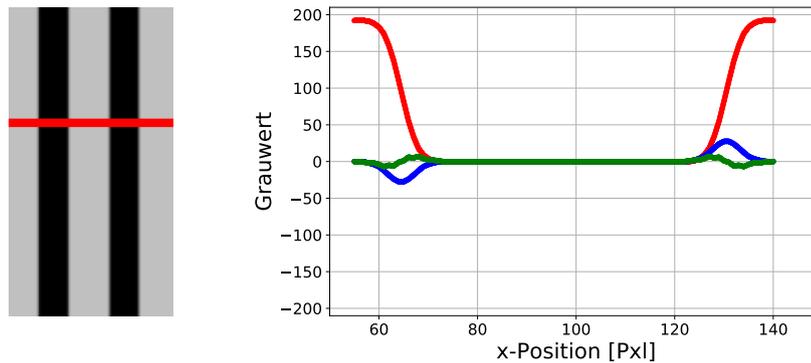


Abbildung 4.1.2.2.: Links: Graphische Darstellung eines unscharfen Kantenübergangs. Rechts: Graphische Darstellung der Grauwerte der unscharfen Kante entlang der x-Achse (rot), sowie die erste (blau) und zweite Ableitung (grün) der Messwerte.

trennpunkte. Die unscharfe Kante hingegen hat im Vergleich nur kleine Ausschläge in der zweiten Ableitung und einen deutlich breiteren Verlauf.

Für beide Kanten werden im nächsten Schritt die Wendepunkte der Hell-Dunkel- und Dunkel-Hell-Übergänge bestimmt und anschließend für die Kantenbreite der Abstand der Wendepunkte berechnet (Abbildung 4.1.2.3). Die Wendepunkte sind:

scharfe Kante:	[64,5 Pxl 96 Pxl]
	[130,5 Pxl 96 Pxl]
unscharfe Kante:	[64,26 Pxl 92,45 Pxl]
	[130,43 Pxl 96,21 Pxl]

Die Breiten b der Kanten lassen sich mit

$$b = \sqrt{(x[0] - x[1])^2 + (y[0] - y[1])^2}$$

berechnen.

Die Breite der scharfen Kante beträgt 66 Pxl und für die unscharfen Kante 66,28 Pxl. Dies ist ein Unterschied von 0,42%. Bezogen auf den nominale Breite des Polymerstäbchens von 200 μm entspricht dies einer Abweichung von 0,84 μm und einen Fehler in der Fläche von 0,84%.

Diese Betrachtung zeigt, dass eine optimale Abbildung mit einer großen Steigung des Helligkeitsprofils sehr wichtig für die Auswertung ist. Wird auf die Qualität der Abbildung nicht geachtet, kann es nur durch einem unscharfen Kantenverlauf die Fläche schon um fast 1% falsch berechnet werden.

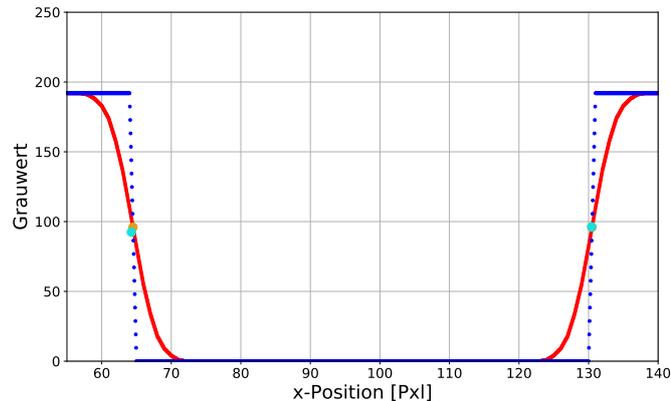


Abbildung 4.1.2.3.: Graphische Darstellung der Grauwerte der scharfen (blau) und unscharfen Kante (rot) entlang der x-Achse, sowie die Wendepunkte beider Kanten (scharfe Kante Wendepunkte türkis; unscharfe Kante Wendepunkte orange)

4.1.3. Objekt

Die innere Genauigkeit des Objektes wird beschrieben durch die Auswirkungen der höheren Fehlerordnungen, der Gewichtung der unterschiedlichen Faktoren zur Volumenberechnung und die Abweichungen der erwarteten Kontur. Diese werden im folgenden Abschnitt näher erläutert und ihr Fehleranteil aufgezeigt.

Auswirkungen höherer Fehlerordnungen

In diesem Abschnitt wird untersucht, welche Auswirkungen höhere Fehlerordnungen auf das Volumen haben. Im ersten Schritt geht die Berechnung von einem Kreis-Zylinder als Querschnittsgrundlage aus. Das Volumen V_K wird mit

$$V_K = \pi r^2 l, \quad (4.6)$$

wobei r für den Radius und l für die Länge steht, berechnet. Beim Herstellungsprozess wird das Polymer durch eine kreisförmige Düse extrudiert. Durch die Trocknungsphase kann der Querschnitt sich jedoch noch ändern. Die folgende Berechnung soll zeigen, wie hoch der Fehler werden kann, wenn die Berechnung von einem Kreis-Zylinder ausgeht, aber der Querschnitt einer Ellipse oder einer Form n -ter Ordnung ähnelt.

Das Volumen mit einem Ellipsen-Zylinder ist definiert mit

$$V_E = ab\pi l, \quad (4.7)$$

wobei a und b den Halbachsen der Ellipse entsprechen.

Um einen Querschnitt n-ter Ordnung zu erstellen, wird ein Kreis

$$r(t) = R$$

$$\iint_0^R r \, dr d\varphi = \int_0^{2\pi} \frac{1}{2} R^2 \, d\varphi = \pi R^2$$

mit einer Sinusfunktion überlagert. Dadurch kann ein Querschnitt einer beliebigen Ordnung erstellen mit $k, n \in \mathbb{N}$ erstellt werden

$$r(t) + k \sin(nt)$$

$$\iint_0^R r + k \sin(n\varphi) \, dr d\varphi = \iint_0^R r \, dr d\varphi + \iint_0^R k \sin(n\varphi) \, dr d\varphi$$

$$= \int_0^{2\pi} \frac{1}{2} R^2 \, d\varphi + k \int_0^{2\pi} -\frac{1}{2n} R^2 \cos(n\varphi) \, d\varphi$$

$$= \pi R^2 - \frac{k}{2n} R^2 \cos(2\pi n),$$

wobei k für die Amplitude und n für die Periodenlänge steht.

Für das Volumen V_n muss der Querschnitt mit der Länge l multipliziert werden.

$$V_n = (\pi R^2 - \frac{k}{2n} R^2 \cos(2\pi n)) l$$

$$V_n = \frac{1}{4} d^2 l (\pi - \frac{k}{2n} \cos(2\pi n))$$

Die Abbildung 4.1.3.1 zeigt einen minimalen und maximalen Kreis, sowie Querschnitte der Ordnung 1,3 und 5: Je geringer die Amplitude k und je höher die Periodenlänge n gewählt wird, desto besser wird ein Kreis angenähert.

Es soll geprüft werden, wie groß der Fehler wird, wenn die Berechnung von einem Kreis-Zylinder ausgeht, der Querschnitt des Objektes aber davon abweicht. Dazu werden für den Kreis-Zylinder mit der mittleren Breite sowie für Querschnitte unterschiedlicher Ordnungen die Volumina berechnet. Jedes Volumen wird durch das Volumen des Kreis-Zylinders geteilt und in Prozent angegeben. Die Übereinstimmung wird über der Periodenlänge n aufgetragen (siehe Abbildung 4.1.3.2). In der Abbildung 4.1.3.1 wird deutlich, dass die Abweichungen zwischen den Querschnitten größer werden, wenn die Sinusamplitude steigt und die Periodenlänge sinkt. Dies zeigt auch eindeutig der Graph in der Abbildung 4.1.3.2. Die Volumenübereinstim-

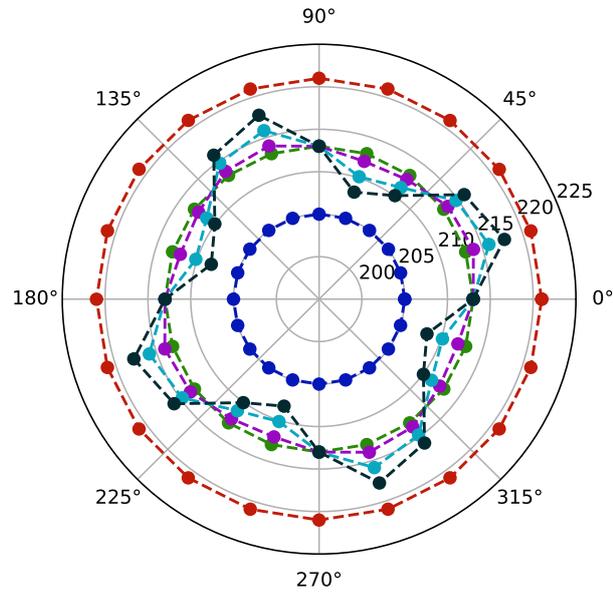


Abbildung 4.1.3.1.: Graphische Darstellung eines Kreisquerschnittes mit maximaler (rot), minimaler (blau) und mittlerer Breite (grün), sowie mit Überlagerungen einer Sinusfunktion der 1., 2. und 5. Ordnung (violett, türkis, schwarz)

Die Übereinstimmung zwischen einem Kreis-Zylinder und einem Querschnitt mit $k = 1$ und $n = 9$ liegt bei 98,5 % und zwischen einem Kreis-Zylinder und einem Querschnitt mit $k = 5$ und $n = 1$ bei 20,42 %.

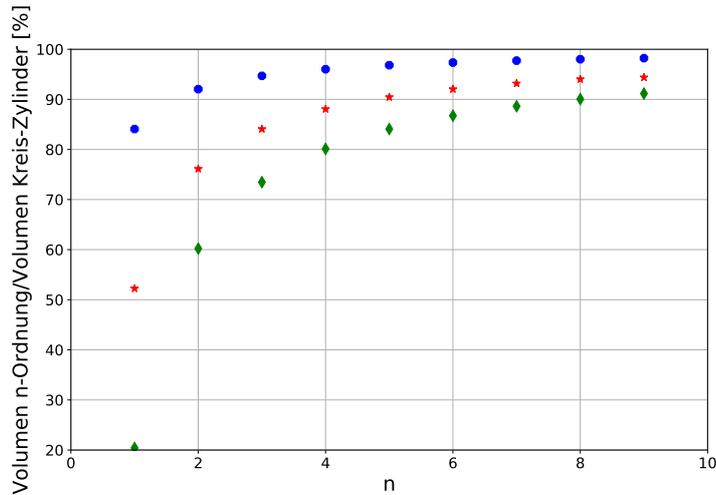


Abbildung 4.1.3.2.: Graphische Darstellung des Verhältnisses zwischen dem Volumen der Querschnitte mit der überlagerten Sinusfunktion und dem Volumen des Kreis-Querschnittes aufgetragen über die Periodenlänge n ($k = 1$ (blau, Kreis); $k = 3$ (rot, Stern); $k = 5$ (grün, Raute))

Dies zeigt, dass ein großer Fehler in die Berechnung eingeht, wenn die angenommene Querschnittsform sich von der wahren Form des Querschnittes unterscheidet. Anhand weiterer Untersuchungen (z.B. Exzentrizität der Querschnitte) kann eine Aussage darüber getroffen werden, wie der Querschnitt der Polymerstäbchen aussieht.

Gewichtung der Faktoren

Das Volumen kann mit Hilfe von zwei Parametern (Breite und Länge) ermittelt werden. Für die folgende Berechnung wird die Annahme getroffen, dass die Schnittkanten des Polymerstäbchens gerade sind.

Handelt es sich bei Berechnungen um Produkte, addieren sich die einzelnen relativen Fehler.

$$\Delta V = V \left(\frac{\Delta x}{x} + \frac{\Delta y}{y} + \frac{\Delta z}{z} \right) \quad (4.8)$$

In der Fehlerrechnung lässt sich der Differenzquotient $\frac{\Delta x}{x}$ durch den entsprechenden Differentialquotienten annähern:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta x}{x} &\approx \frac{dx}{x} = f'(x) \\ \Delta X &\approx f'(x) \Delta x. \end{aligned}$$

Gibt es eine Abhängigkeit von mehreren Variablen wird der o.g. Ausdruck durch die partielle Ableitungen erweitert.

Für den maximalen Fehler ergibt sich für die Fehlerfortpflanzung:

$$\Delta X = \left| \frac{\partial X}{\partial x} \right| + \left| \frac{\partial X}{\partial y} \right| + \left| \frac{\partial X}{\partial z} \right|.$$

Dies gilt nur unter der Annahme, dass die Messfehler $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ voneinander unabhängig sind.

Für einen Kreis-, Ellipsen- und 3.te-Ordnung Querschnitt ergeben sich folgende relative Fehler:

Kreis-Zylinder	$\Delta V_K = \frac{1}{4} \pi d^2 l (2 \cdot \frac{\Delta d}{d} + \frac{\Delta l}{l})$
Ellipsen-Zylinder	$\Delta V_E = \frac{1}{4} \pi a b l (\frac{\Delta a}{a} + \frac{\Delta b}{b} + \frac{\Delta l}{l})$
3.te-Ordnung (n =3, k=5)	$\Delta V_n = \frac{1}{4} d^2 l (\pi + \frac{5}{6}) (2 \cdot \frac{\Delta d}{d} + \frac{\Delta l}{l})$

Mit der spezifischen Breite und der mittleren Länge lauten die Formeln:

Kreis-Zylinder	$\Delta V_K = 0,0408 \text{ mm}^3 (2 \cdot \frac{\Delta d}{0,19916 \text{ mm}} + \frac{\Delta l}{1,31 \text{ mm}})$
Ellipsen-Zylinder	$\Delta V_E = 0,0407 \text{ mm}^3 (\frac{\Delta a}{0,186 \text{ mm}} + \frac{\Delta b}{0,212 \text{ mm}} + \frac{\Delta l}{1,31 \text{ mm}})$
3.te-Ordnung (n =3, k=5)	$\Delta V_n = 0,02998 \text{ mm}^3 (2 \cdot \frac{\Delta d}{0,19916 \text{ mm}} + \frac{\Delta l}{1,31 \text{ mm}})$

Im nächsten Schritt kann die Summe der Faktoren und der Anteil der Breite und der Länge berechnet werden.

	$\Sigma \text{Faktoren}$	$\frac{\text{Faktor} \Delta d}{\Sigma \text{Faktoren}}$	$\frac{\text{Faktoren} \Delta l}{\Sigma \text{Faktoren}}$
Kreis-Zylinder	0,441	92,97 %	7,03 %
Ellipsen-Zylinder	0,4406	$\Delta a = 48,80 \%$ $\Delta b = 44,17 \%$	7,04 %
3.te-Ordnung (n =3, k=5)	0,3239	92,96 %	7,07 %

Die Anteile werden in einem Balkendiagramm dargestellt.

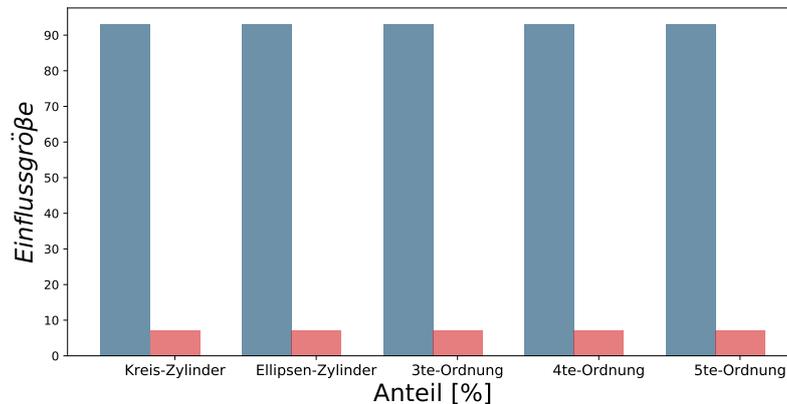


Abbildung 4.1.3.3.: Graphische Darstellung des Balkendiagramms der Fehleranteile für die Breite und der Länge, abhängig von der Querschnittsfläche

Die Abbildung 4.1.3.3 zeigt, dass die Breite und die Länge sich immer gleich auswirken, unabhängig von der Querschnittsfläche. Die Breite hat immer den größten Anteil im Volumen dies ist in der Fehlerfortpflanzung schon erkennbar, da die Breite auf Grund der Ableitung doppelt eingeht. Dies hat zur Folge, dass diese deutlich genauer gemessen werden muss als die Länge.

Abweichungen der erwarteten Kontur

Die erste Annahme für die Form des Polymerstäbchens ist ein Zylinder. Wird jedoch mit dieser Modellannahme das Volumen berechnet, kommt es zu einem Fehler. Die Schnittkanten sind durch den Produktionsprozess nicht senkrecht zur Längsachse des Objektes und können einen Winkel aufweisen bzw. nicht homogen verlaufen. Aus diesem Grund muss der Fehlereinfluss dieser Schnittkanten auf das Gesamtvolumen betrachtet werden, wenn die Kanten nicht explizit berücksichtigt werden. Es würde ansonsten zu einem Widerspruch zwischen der mathematischen Annahme und der Realität führen.

Für die Betrachtung wird angenommen, dass der Querschnitt der Objekte ein Kreis ist. Im idealen Fall hat das Objekt senkrechte Schnittkanten und das Volumen V_{opt} kann mit

$$V_{opt} = \frac{\pi}{4} b^2 \ell, \quad (4.9)$$

wobei ℓ der Länge und b der gemessenen Breite entspricht, berechnet werden.

Die Spezifikation gibt an, dass der Schnittkantenwinkel auf jeder Seite maximal 15° betragen darf. Sobald eine Schnittkante diesen Wert übersteigt, wird das Objekt

ausgeschleust. Im extremen Fall hat das Objekt an beiden Enden Schnittkanten von 15° mit entgegengesetzter Neigung. Dieser Fall ist in der Abbildung 4.1.3.4 skizziert.



Abbildung 4.1.3.4.: Skizze eines Objektes mit 15° -Schnittkantenwinkeln auf beiden Seiten

Das Volumen V_{fK} des fehlenden Bereiches kann mit folgender Formel ermittelt werden.

$$V_{fK} = \frac{1}{2} \frac{\pi}{4} b^2 x, \quad (4.10)$$

wobei x für die Länge der fehlenden Schnittkante steht.

Werden die Schnittflächen nicht separat betrachtet, sondern immer ein voller Zylinder den Berechnungen zugrunde gelegt, entsteht ein Fehler in der Volumenberechnung. Die relative Abweichung D zwischen den Volumina kann berechnet werden, indem die Anzahl der nicht optimalen Schnittkanten ($n = 0, 1$ oder 2) mit dem Volumen der fehlenden Schnittfläche multipliziert und ins Verhältnis mit dem optimalen Volumen V_{opt} gesetzt wird.

$$D = \frac{nV_{fK}}{V_{opt}} \quad (4.11)$$

Abhängig von der Objektlänge ergeben sich Abweichungen, die in der Tabelle 4.1.3.1 aufgelistet sind.

n	$\ell = 0,935 \text{ mm}$	$\ell = 1,683 \text{ mm}$
1	2,85 %	1,59 %
2	5,70 %	3,17 %

Tabelle 4.1.3.1.: Die Abweichung D in Abhängigkeit der Schnittflächenanzahl n mit jeweils 15° Facettenwinkel und der Objektlänge ℓ

Im ungünstigen Fall kann das Volumen durch die nicht separate Behandlung der Schnittkanten um 5,70 % falsch berechnet werden.

Aus dieser Betrachtung ist klar erkennbar, dass die Schnittkantenbetrachtung ein wichtiger Bestandteil der Messung sein muss. Es darf nicht nur in der Mitte der Breiten gemessen und mit einer mittleren Länge multipliziert werden. Die Schnittkanten sollten genauso fein abgetastet werden, wie der mittlere Bereich des Polymerstäbchens und in die Volumenberechnung mit eingehen.

4.1.4. Volumenberechnung

Die innere Genauigkeit wird durch die Abweichungen in der Volumenberechnung beschrieben. Dazu gehören die Fehler der einzelnen Parameter, die Querschnittfläche und die Anzahl der Winkelschritte. Diese Faktoren werden in diesem Abschnitt näher erläutert und ihr Fehleranteil aufgezeigt.

Fehler der einzelnen Parameter im Volumen

Das Ziel dieser Betrachtung ist, die Unsicherheit der Volumenberechnung zu ermitteln. Zunächst wird nach der Darstellung oben der Vergleich zwischen den beiden System (Waage und VI) auf die Querschnittfläche reduziert. Mit Hilfe der Fehlerfortpflanzung [Ku66] wird ermittelt, welche Werte die Standardabweichungen der Breite und der Länge maximal erreichen dürfen, damit die Vorgabe von 2,5 % Toleranz noch erreicht wird.

Das Volumen V wird mit der Formel 4.9, Seite 62, berechnet.

Die allgemeine Formel der Fehlerfortpflanzung für eine Funktion $y = f(a, b, \dots)$ lautet

$$\Delta y = \sqrt{\left(\frac{\partial y}{\partial a} \Delta a\right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial b} \Delta b\right)^2 + \dots} \quad (4.12)$$

Dies gilt jedoch nur, wenn die Parameter a, b, \dots statistisch unabhängig sind. Die Fehlerfortpflanzung wird auf die Formel 4.9 angewendet.

$$d_V = \frac{\pi}{4}(2b\ell db + b^2 d\ell) \quad (4.13)$$

$$\tau_V = \frac{\pi}{4} \sqrt{4b^2 \ell^2 \tau_b + b^4 \tau_\ell} \quad (4.14)$$

$$\begin{aligned} &= \frac{\pi b}{4} \sqrt{4\ell^2 \tau_b^2 + b^2 \tau_\ell^2} \\ \frac{\tau_V}{V} &= \frac{\frac{\pi b}{4} \sqrt{4\ell^2 \tau_b^2 + b^2 \tau_\ell^2}}{\frac{\pi b^2 \ell}{4}} \\ &= \frac{1}{b\ell} \sqrt{4\ell^2 \tau_b^2 + b^2 \tau_\ell^2} \\ &= \sqrt{\frac{4\ell^2}{b\ell^2} \tau_b^2 + \frac{b^2}{b^2 \ell^2} \tau_\ell^2} \\ &= \sqrt{\frac{4}{b^2} \tau_b^2 + \frac{1}{\ell^2} \tau_\ell^2} \end{aligned}$$

$$= \sqrt{4\left(\frac{\tau_b}{b}\right)^2 + \left(\frac{\tau_\ell}{\ell}\right)^2},$$

wobei d_V für die Standardabweichung des Volumens, τ_V für die Volumenvarianz, τ_b für die Breitenvarianz und τ_ℓ für die Längenvarianz steht.

Für die Frage, welche Werte nicht überschritten werden dürfen, wird die Annahme getroffen, dass immer ein Parameter fehlerfrei ist. Mit der nominellen Breite von $199,16 \mu\text{m}$, der mittleren Länge von $1,3 \text{ mm}$ und der Toleranz von $2,5 \%$ ergeben sich die Standardabweichungen von:

$$\begin{aligned} &\text{mit } \tau_\ell = 0 \\ 2,5\% &= \sqrt{4\left(\frac{\tau_b}{b}\right)^2} \\ \tau_b &= \mathbf{2,5 \mu\text{m}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\text{mit } \tau_b = 0 \\ 2,5\% &= \sqrt{\left(\frac{\tau_\ell}{\ell}\right)^2} \\ \tau_\ell &= \mathbf{32,5 \mu\text{m}}. \end{aligned}$$

Diese Standardabweichungen dürfen nicht überschritten werden. In der Abbildung 4.1.4.1 ist der graphische Zusammenhang zwischen den Standardabweichungen τ_b und τ_ℓ dargestellt. Die Standardabweichung für den Durchmesser ist um das 13-

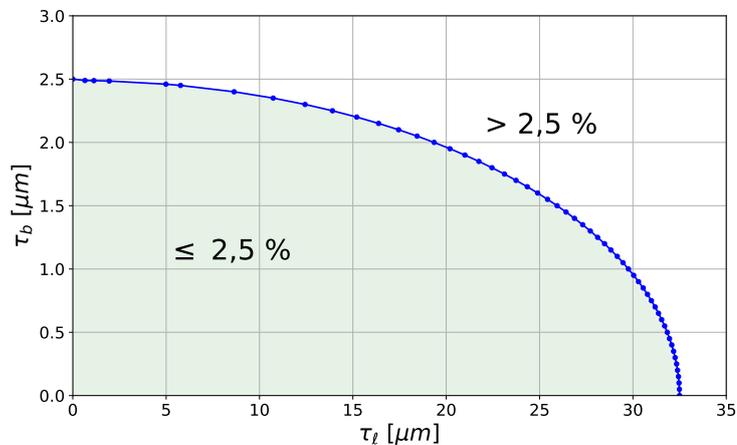


Abbildung 4.1.4.1.: Graphische Zusammenhang zwischen den Standardabweichungen τ_b und τ_ℓ für eine maximale Volumenabweichung von $2,5 \%$

fache geringer, als für die Länge. Dies bestätigt die Aussage aus dem vorherigen Abschnitt, dass die Breite viel genauer gemessen werden muss, als die Länge.

Mit Hilfe der Fehlerfortpflanzung kann berechnet werden, welche Standardabweichung für die Fläche σ_F benötigt wird. Das σ_F berechnet sich mit Hilfe der Fehlerfortpflanzung wie folgt:

$$\sigma_F = \frac{1}{\sqrt{2}} b \pi \sigma_b. \quad (4.15)$$

Mit der nominalen Breite und der vorher berechneten Standardabweichung der Breite kann das σ_F ermittelt werden:

$$\sigma_F = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot 199,16 \mu\text{m} \cdot \pi \cdot 2,5 \mu\text{m}$$

$$\sigma_F = 1106 \mu\text{m}^2.$$

Die Standardabweichung für die Fläche darf maximal $1106 \mu\text{m}^2$ betragen.

Querschnittsfläche

Das Volumen der Polymerstäbchen soll bestimmt werden. Der wichtige Anteil zur Berechnung ist die Querschnittsfläche. Dies bedeutet, dass das Problem der Bestimmung des Volumens für die erste Betrachtung auf die Bestimmung der Flächeninhalte reduziert werden kann. Das Volumen wird in die Summe (Integrale) über alle Querschnitte zerlegt und die Fläche der Querschnitte berechnet, die als Regelfläche angenommen werden kann.

Für die Bestimmung der Querschnittsflächen kann ein Kreis oder eine Ellipse als Grundlage verwendet werden. Dabei werden viele Querschnitte entlang der Objektachse betrachtet und die mittlere Breite (Fläche = Kreis) oder die minimale und maximale Breite (Fläche = Ellipse) ermittelt. Daraus werden die Einzelflächen berechnet und über alle Querschnitte entlang des Polymerstäbchens gemittelt.

Ist die Fläche symmetrisch und konvex, kann die Fläche jedoch auch numerisch berechnet werden. Dabei wird die Breite für diskrete Richtungen

$$\vartheta_i = i\pi/n,$$

wobei n der Anzahl der Messungen und ϑ dem Winkelabstand (0 bis π) entspricht, gemessen.

Die Fläche für symmetrisch konvexe Flächen berechnen sich mit

$$F = \frac{1}{4} \int_0^\pi (b^2(\vartheta) - \dot{b}^2(\vartheta)) d\vartheta, \quad (4.16)$$

wobei b der Breite und $db/d\vartheta$ der ersten Ableitung von $b(\vartheta)$ nach ϑ entspricht.

Wenn die Funktion stetig ist, ähnelt der Flächeninhalt unter dem Graphen der

Stammfunktion der Funktion. Der Flächeninhalt eines Streifens kann durch ein Rechteck mit der Seitenlänge ε und $f(x)$ für kleine ε approximiert werden.

$$A(x + \varepsilon) - A(x) \approx \varepsilon f(x) \quad (4.17)$$

Die Näherungsformel wird umso genauer, je kleiner ε wird. Im nächsten Schritt werden beide Seiten durch ε dividiert und der Grenzwert für $\varepsilon \rightarrow 0$ bestimmt.

$$\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{A(x+\varepsilon)-A(x)}{\varepsilon} = f(x)$$

Der Grenzwert der Funktion entspricht der Ableitung von $A(x)$.

$$A'(x) = f(x)$$

Ist die Funktion f stetig, dann ist die Flächenfunktion A eine Stammfunktion von f .

Somit ergibt sich für b' aus (4.16)

$$\frac{\lim_{h \rightarrow 0} (f(x+h)-f(x))}{h}$$

mit $h \approx \Delta\vartheta$

$$b' = \frac{(b_{i+1}-b_i)^2}{\Delta\vartheta^2}.$$

Daraus ergibt sich für die Formel (4.16)

$$F \approx \frac{\Delta\vartheta}{4} \sum_{i=0}^{n-1} b_i^2 - \frac{(b_{i+1}-b_i)^2}{\Delta\vartheta^2}$$

$$F = \frac{1}{4\Delta\vartheta} \sum_{i=0}^{n-1} b_i^2 (\Delta\vartheta^2 - 1) + b_{i+1} (2b_i - b_{i+1}).$$

Es wird eine Linearinterpolation zwischen den Stützstellen verwendet. Die Genauigkeit der Schätzwerten für den Flächeninhalt hängt von der Anzahl n der Messungen und der Genauigkeit der Messungen ab.

Es werden drei Ansätze für die Berechnung der Querschnittsfläche analysiert: Kreis, Ellipse und die numerische Flächenberechnung.

Für einen direkten Vergleich wird angenommen, dass der Objektquerschnitt eine Ellipse ist, mit Halbachsen der Länge $100 \mu\text{m}$ und $110 \mu\text{m}$. Es werden die Breiten für eine unterschiedliche Anzahl an Winkelschritten angenommen (30° , 15° , 10° , 5° Winkelschrittweite) und mit diesen Breiten die Querschnittsfläche mit einem Kreis, einer Ellipse und dem numerischen Ansatz berechnet. In der Abbildung 4.1.4.2 und 4.1.4.3 ist die Grundellipse (blau), sowie für die unterschiedlichen Winkelanzahlen die verwendeten Breiten dargestellt.

4. Untersuchung relevanter Einflussgrößen

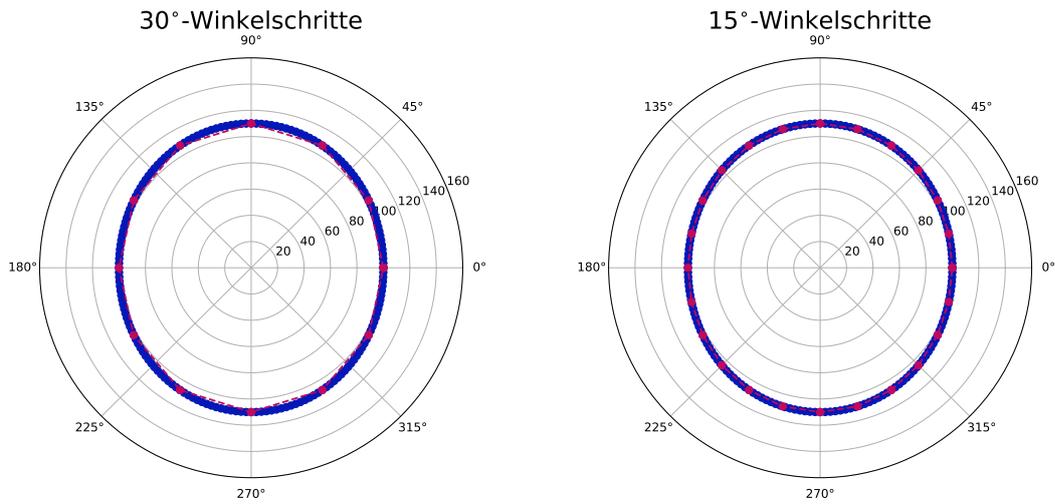


Abbildung 4.1.4.2.: Graphische Darstellung des Querschnittes einer Ellipse mit den Halbachsen 100 μm und 110 μm (blau), sowie die Messpunkte bei den Aufnahmen mit 30°-Winkelschritten (links) und mit 15°-Winkelschritten (rechts)

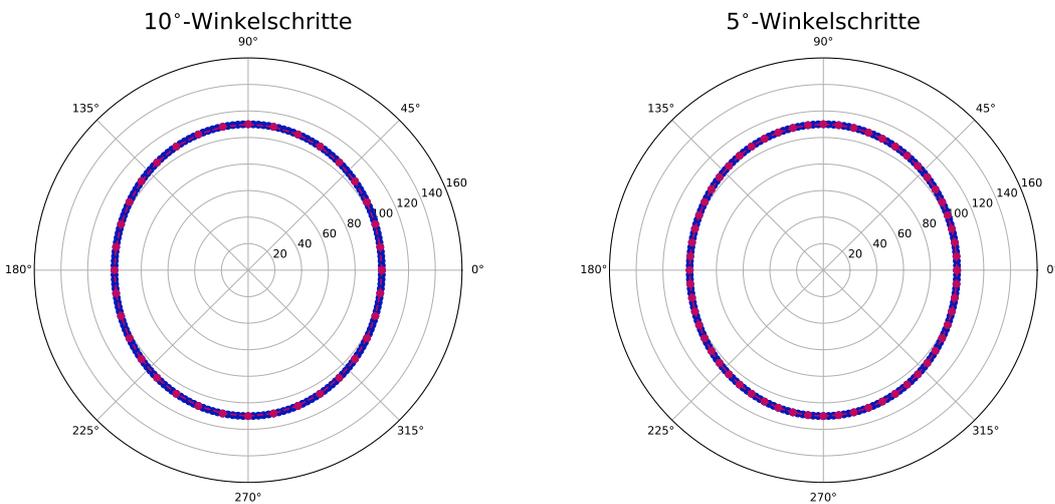


Abbildung 4.1.4.3.: Graphische Darstellung des Querschnittes einer Ellipse mit den Halbachsen 100 μm und 110 μm (blau), sowie die Messpunkte bei den Aufnahmen mit 10°-Winkelschritten (links) und mit 5°-Winkelschritten (rechts)

Weniger Winkelschritte bedeuten gleichzeitig, dass das Objekt weniger dicht abgetastet wird, wodurch Abweichungen entstehen können. Die Tabelle 4.1.4.1 zeigt die Flächen für die unterschiedlichen Winkelschritte.

Winkelschrittweite	Querschnittsfläche [μm^2]		
	Kreis	Ellipse	num. Berechnung
30°	34675,3	34557,5	34571,4
15°	34675,3	34557,5	34561,1
10°	34675,3	34557,5	34559,1
5°	34675,3	34557,5	34557,9

Tabelle 4.1.4.1.: Berechnung der Flächen mit der Grundlage eines Kreises, einer Ellipse und der numerischen Berechnung

Die berechneten Flächen werden über den Winkelschrittweiten aufgetragen, sowie die theoretische Fläche, mit den oben angenommenen Breiten (siehe Abbildung 4.1.4.4). Die Flächen mit der Grundlage eines Kreises werden deutlich zu groß berechnet. Die mittlere Breite, die für die Kreisflächenberechnung verwendet wird, hängt stark von dem Unterschied der Halbachsen der Ellipse ab. Ist der Unterschied minimal, nahezu ein Kreis, wird die Kreisfläche sehr nahe dem theoretischen Wert liegen. Ist die Ellipse hingegen deutlicher ausgeprägt und die Halbachsen haben z.B. wie hier einen Unterschied von 10 μm , beträgt der Flächenunterschied 0,34 %. Die numerische Berechnung der Fläche nähert sich der theoretischen Fläche immer mehr an, je kleiner die Winkelschrittweiten werden. Sind die Winkelschritte kleiner 5° gibt es keinen sichtbaren Unterschied mehr. Die Abbildung 4.1.4.4 zeigt den Zusammenhang zwischen der Winkelschrittweite und der Fläche. Im nächsten Schritt werden die berechneten Flächen mit dem optimalen Flächeninhalt der angenommenen Ellipse 34557,52 μm^2 verglichen. Dazu werden die Flächen mit dem optimalen Flächeninhalt ins Verhältnis gesetzt $\frac{F_x}{34557,52 \mu\text{m}^2}$ und die Differenz zu 100 % gebildet.

Winkelschrittweite	1 - (Form / μm^2)		
	Kreis [%]	Ellipse [%]	num. [%]
30°	0,34	0,00	0,04
15°	0,34	0,00	0,01
10°	0,34	0,00	0,01
5°	0,34	0,00	0,00

Tabelle 4.1.4.2.: Abweichungen der Flächen in Bezug auf die vorgegebene Ellipsenfläche von 34557,52 μm^2

4. Untersuchung relevanter Einflussgrößen

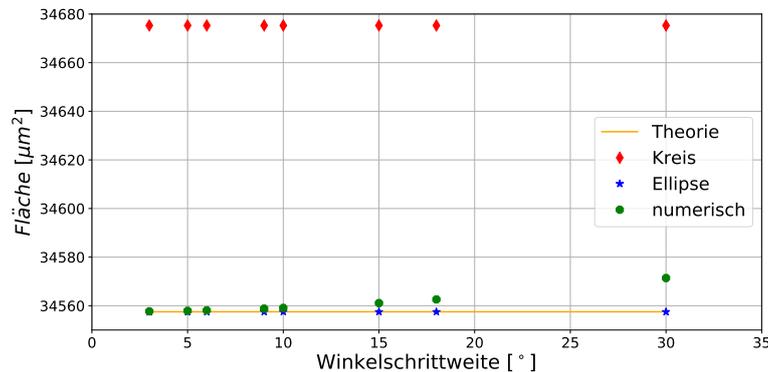


Abbildung 4.1.4.4.: Graphische Darstellung des Zusammenhangs der Fläche zur Anzahl der Winkelschritte mit der festgelegten Ellipsenfläche (gelb), der Grundlage für einen Kreis (rot, Raute), Ellipse (blau, Stern) und der numerischen Berechnung (grün, Kreis)

Die Tabelle 4.1.4.2 zeigt, dass die Grundlage einer Kreisfläche bei jeder Winkelschrittweite um 0,34% zu groß gemessen wird.

Mit der numerischen Flächenberechnung wird der Unterschied geringer, je kleiner die Winkelschrittgröße gewählt wird. Jedoch muss beachtet werden, dass die Berechnung abhängig von den Halbachsen der Ellipse ist. Je geringer der Unterschied zwischen den Halbachsen ist, umso geringer ist auch die Abweichung zur theoretischen Fläche bei großen Winkelschrittweiten. Dies zeigt die Abbildung 4.1.4.5.

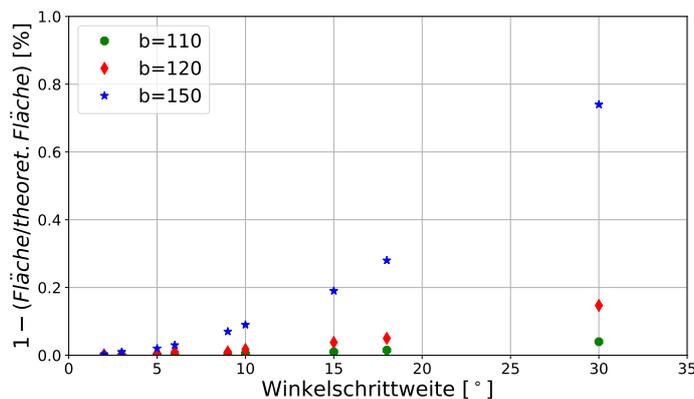


Abbildung 4.1.4.5.: Graphische Darstellung des Zusammenhangs der Abweichung zur theoretischen Fläche mit unterschiedlichen Halbachsen ($b=110 \mu\text{m}$ (grün, Kreis); $b=120 \mu\text{m}$ (rot, Raute); $b=150 \mu\text{m}$ (blau, Stern))

Dies zeigt, dass die numerische Flächenberechnung als Grundlage verwendet werden kann, wenn eine große Anzahl an Winkelschritten vermessen werden. Dies widerspricht jedoch der Vorgabe, dass die Messung pro Objekt nur fünf Sekunden dauern sollte. Es sollten so wenige Bilder wie nötig aufgenommen werden. Jedoch müsste für die numerische Berechnung die Winkelschrittweite kleiner 5° betragen.

Variation Winkelschritte

Mit dem optischen Aufbau können die Polymerstäbchen in beliebigen Winkelabständen gedreht und aufgenommen werden. Für die folgenden Untersuchungen wird ein Objekt in unterschiedlichen Winkelabständen aufgenommen, ausgewertet und die Ergebnisse verglichen. Die Tabelle 4.1.4.3 zeigt die verwendeten Winkelschrittweiten. Ziel dieser Untersuchung ist, die richtige Winkelanzahl zu definieren, mit denen

Schrittzahl	Winkelweite [°]
4	45,0
5	36,0
10	18,0
20	9,0
30	6,0
40	4,5
50	3,6
100	1,8

Tabelle 4.1.4.3.: Durchführung mit unterschiedlichen Winkelschritten

das Volumen am sichersten approximiert werden kann. Jedoch sollte die Anzahl auch nicht die maximale Prozesszeit von fünf Sekunden pro Objekt übersteigen.

Es soll geprüft werden, ob die Winkelanzahl eine Auswirkung auf die Breiten- und Längenermittlung hat. Weiterhin soll geprüft werden, ob die Berechnung des Volumens mit dem Ansatz aus dem Abschnitt 4.1.4 abhängig von den Winkelgrößen ist.

Für die Verifizierung werden drei Prüfstifte von der Firma *Vermont Gage* verwendet. Diese werden normalerweise eingesetzt um schnell und unkompliziert genaue Messungen von Teilkreisdurchmessern von Außengewinden durchzuführen. Die Toleranz des Durchmessers beträgt $\pm 0,00020''$ ($\hat{=} \pm 0,51 \mu\text{m}$) [38].

4. Untersuchung relevanter Einflussgrößen

Es werden folgende Bezeichnungen verwendet:

Bezeichnung	Durchmesser [inch]	Durchmesser (nom.B) [μm]
96 TPI	0,006020	152,91
72 TPI	0,008007	203,38
56 TPI	0,010324	262,23

Für die folgenden Untersuchungen werden alle in unterschiedlichen Winkelabständen aufgenommen, ausgewertet und die Ergebnisse verglichen.

Für alle Schrittweiten werden die Breiten und die Längen berechnet und die Abweichungen für die unterschiedlichen Schrittzahlen betrachtet. Die Tabelle 4.1.4.4 zeigt beispielhaft die minimale, maximale und mittlere Breite, sowie die Standardabweichung über alle Breiten pro Winkelschritt für den Prüfstift 72 TPI:

	Breite								
	Winkelabstand [°]								
	45	30	22,5	18	9	6	4,5	3,6	1,8
min [μm]	206,6	206,6	206,6	206,5	206,5	206,5	206,6	206,6	206,5
max [μm]	207,6	208,0	208,2	207,9	207,1	208,2	208,2	208,2	208,2
mean [μm]	206,9	207,0	207,0	206,9	206,7	207,0	207,0	207,0	207,0
σ [μm]	0,4	0,4	0,5	0,3	0,1	0,5	0,5	0,5	0,5
$\frac{\min}{\max}$ [%]	99,5	99,3	99,2	99,4	99,7	99,2	99,2	99,2	99,2
$\frac{\sigma}{\text{mean}}$ [%]	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2

Tabelle 4.1.4.4.: Auswertung der Breiten über unterschiedliche Winkelschrittweiten für den Prüfstift 72TPI

Die Standardabweichungen und die normierte Standardabweichung ($\frac{\sigma}{\text{mean}}$) sind bei allen Schrittweiten vergleichbar. Die Abbildung 4.1.4.6 zeigt die Standardabweichungen für alle drei Prüfstifte über die unterschiedlichen Winkelabstände. Die Auswertung zeigt, dass alle Abweichungen deutlich unter dem maximalen theoretischen Wert von $2,5 \mu m$ liegen. Wird als Winkelschrittweite 9° verwendet, haben die Standardabweichungen zwischen den Prüfstiften den geringsten Unterschied.

Im nächsten Schritt wird die Längendetektion für die unterschiedlichen Winkelschritte betrachtet (siehe Tabelle 4.1.4.5).

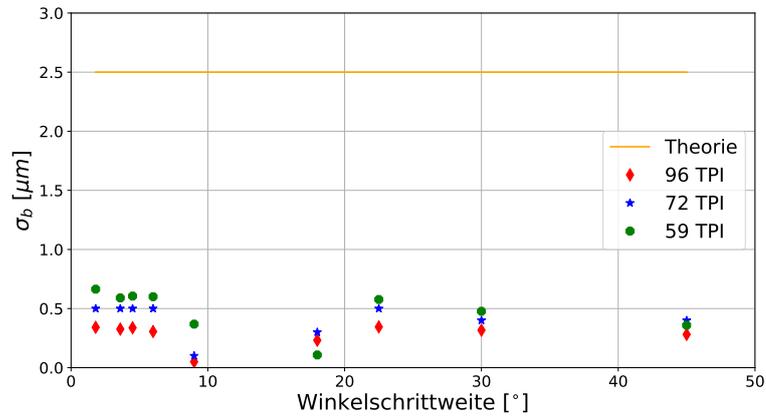


Abbildung 4.1.4.6.: Graphische Darstellung der Standardabweichungen der Breiten über unterschiedliche Winkelschritte für die drei Prüfstifte (96TPI = rot, Raute; 72TPI = blau, Stern; 56TPI = grün, Kreis)

Länge

	Winkelabstand [°]								
	45	30	22,5	18	9	6	4,5	3,6	1,8
min [μm]	3004	3004	3003	3003	3003	3003	3002	3003	3002
max [μm]	3019	3019	3019	3019	3019	3019	3019	3020	3019
mean [μm]	3013	3010	3010	3008	3010	3010	3010	3010	3010
σ [μm]	6,5	5,4	5,4	5,2	5,4	5,1	5,1	5,0	4,9
$\frac{\min}{\max}$ [%]	99,5	99,5	99,5	99,5	99,5	99,5	99,5	99,4	99,4
$\frac{\sigma}{\text{mean}}$ [%]	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2

Tabelle 4.1.4.5.: Auswertung der Länge über unterschiedliche Winkelschrittweiten für den Prüfstift 72TPI

Die Standardabweichung und die normierte Standardabweichung sind näherungsweise gleich für die verschiedenen Winkelschritte.

Die Abbildung 4.1.4.7 zeigt die Standardabweichung für alle drei Prüfstifte über die unterschiedlichen Winkelschritte.

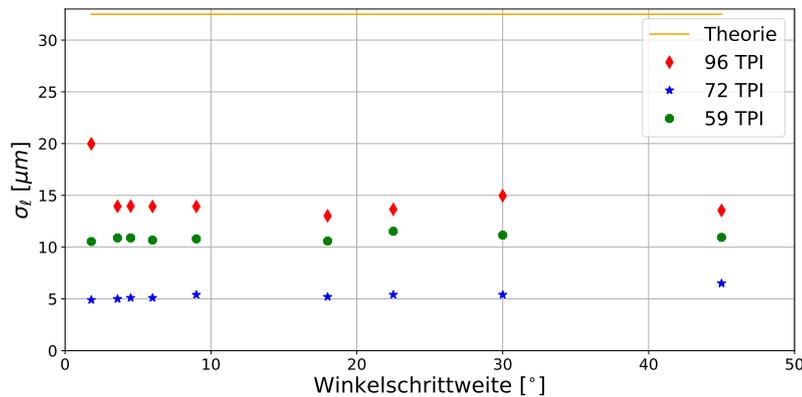


Abbildung 4.1.4.7.: Graphische Darstellung der Standardabweichungen der Länge über unterschiedliche Winkelschritte für die drei Prüfstifte (96TPI = rot, Raute; 72TPI = blau, Stern; 56TPI = grün, Kreis)

Die Abweichung für den Prüfstift 72TPI liegt deutlich unter dem theoretischen Wert von 32,5 μm . Die Abweichung des 56TPI befindet sich an der Grenze und der dritte Prüfstift liegt über dem theoretischen Wert. Die Prüfstifte wurden mit der Hand gekürzt und haben daher keine saubere Schnittkante. Daher kommen die starken Unterschiede zwischen den Prüfstiften zustande. Die Abweichungen für einen Prüfstift über unterschiedliche Winkelschritte bleiben näherungsweise konstant.

Im nächsten Schritt wird der Querschnitt der Prüfstifte am Beispiel des 72TPI betrachtet. In der Abbildung 4.1.4.8 ist erkennbar, dass die Querschnittsform leichte Abweichungen von einem Kreis hat. Diese werden mit der Ellipsenberechnung berücksichtigt. Weiterhin ist kein signifikanter Unterschied zu erkennen, ob 50 und nur 20 Winkelschritte verwendet werden.

Die Auswertungen haben gezeigt, dass es für die Länge nicht relevant ist, mehr oder weniger Winkelschritte aufzunehmen. Die Breitenmessung hat die geringste Abweichung bei dem Winkelabstand von 9°. Die Abweichungen bei einem Winkelabstand von 18° sind am zweit geringsten. Da es bei der Messung einerseits um die Genauigkeit, andererseits um die Zykluszeit geht, wird festgelegt, dass für die kommenden Messungen der Winkelabstand von 18° verwendet wird. Dadurch werden pro Objekt anstatt 20 Aufnahmen nur 10 Aufnahmen benötigt.

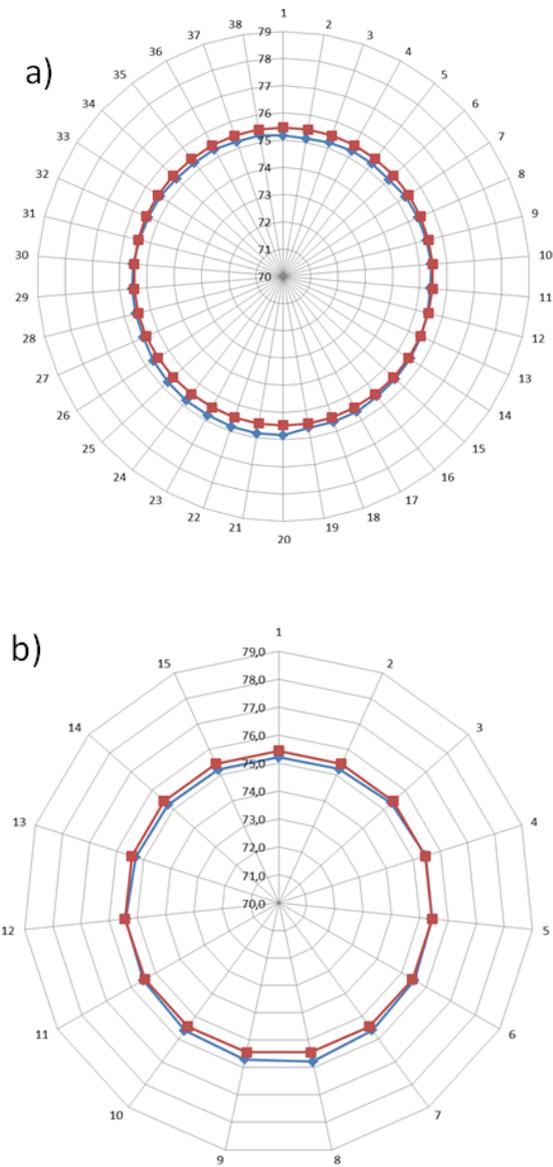


Abbildung 4.1.4.8.: Graphische Darstellung des Querschnittes des Prüfstiftes 72TPI mit einer Winkelschrittenanzahl von 50 ($= 3,6^\circ$; a) und von 20 ($= 9^\circ$; b). Die blaue Markierung entspricht der gemessenen Breite und die rote einem optimalen Kreis.

4.2. Einflüsse auf die Beziehung Masse:Volumen

Zum Einfluss auf die Beziehung zwischen der Masse und dem Volumen gehören die Abweichungen der Waage, die Dichte des Objektes und das Bewertungskriterium des Zusammenhangs (Korrelationskoeffizient).

4.2.1. Waage

Der Einfluss auf die Beziehung zwischen den beiden Messdomänen wird durch die Genauigkeit der Waage beschrieben. Es wird die Mikrowaage *XP2U* von Mettler Toledo verwendet. Die Auflösung liegt bei einem Zehntel Mikrogramm. Auch Proben unter 1 mg werden mit den angegebenen Toleranzen gewogen. Weiterhin hat die Waage eine sehr gute Reproduzierbarkeit, die für Messungen in diesem Größenbereich sehr wichtig ist. Damit das Ergebnis stabil ermittelt werden kann, ist die Waagschale mit einem automatischen Windschutz umgeben. Die weiteren Eigenschaften der Waage sind in der Tabelle 4.2.1.1 aufgelistet [64]. Da die Waage nicht

	XP2U
max. Kapazität	2,1 g
Lesbarkeit	0,0001 mg
Linearität	0,001 mg
Empfindlichkeitstemperatur	0,0001 %/°C
Wiederholgenauigkeit	0,00015 mg
min. Gewicht	0,45 mg

Tabelle 4.2.1.1.: Technische Daten der Waage *XP2U* von Mettler Toledo [64]

direkt aus dem Werk kommt und schon einige Produktionsjahre verwendet wird, ist es wichtig, dass die aktuelle Wiederholbarkeit festgestellt wird. Dazu werden vor Ort Wiederholungsmessungen durchgeführt. Dafür wird zuerst ein Nominalmaß von Mettler Toledo verwendet (1 mg, Dichte = $8000 \pm 30 \text{ kg/m}^3$) und ein Polymerstäbchen. Beide Objekte werden fünfzig Mal mit der Waage vermessen und die jeweilige Standardabweichung bestimmt (nominales Maß = Abbildung 4.2.1.1; Polymerstäbchen = Abbildung 4.2.1.2). Mit diesen Messungen wird geprüft, wie die Wiederholgenauigkeit an diesem Standort bei den vorhandenen Umgebungsbedingungen (kein Reinraum höherer Klasse) ist. Weiterhin wird mit Hilfe des Polymerstäbchens geprüft, ob die Waage in unterschiedlichen Gewichtsklassen dieselbe Wiederholgenauigkeit erreicht.

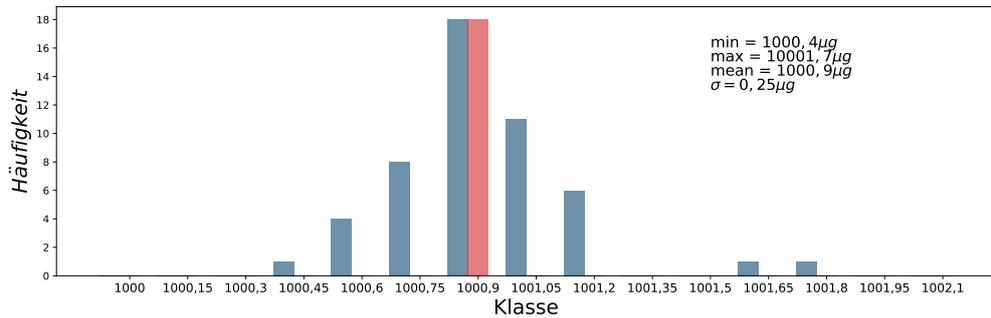


Abbildung 4.2.1.1.: Graphische Darstellung der Häufigkeitsverteilung für das Gewicht des nominalen Maßes bei 50 Messungen (blau). Das Minimalgewicht beträgt $1000,4 \mu\text{g}$ (rot), das Maximalgewicht $1001,7 \mu\text{g}$, das mittlere Gewicht $1000,9 \mu\text{g}$ und die Standardabweichung über die 50 Wiederholungen $0,23 \mu\text{g}$.

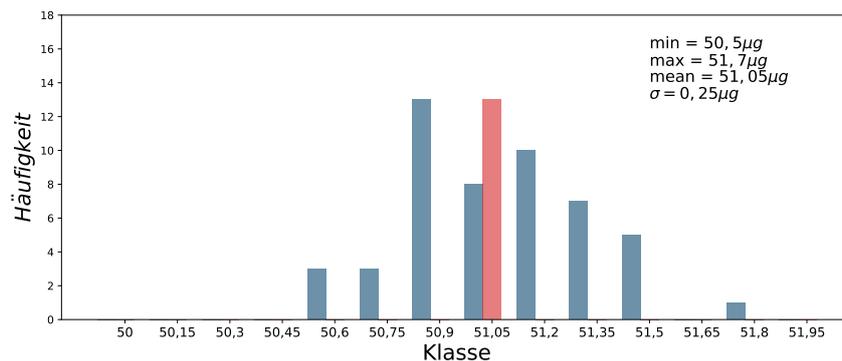


Abbildung 4.2.1.2.: Graphische Darstellung der Häufigkeitsverteilung für das Gewicht eines Polymerstäbchens bei 50 Messungen (blau). Das Minimalgewicht beträgt $50,5 \mu\text{g}$, das Maximalgewicht $51,7 \mu\text{g}$, das mittlere Gewicht $51,05 \mu\text{g}$ und die Standardabweichung über die 50 Wiederholungen $0,25 \mu\text{g}$.

Die Standardabweichungen über die 50 Wiederholungen ist bei beiden Messungen annähernd gleich (Nominalmaß = $0,23 \mu\text{g}$, Polymerstäbchen = $0,25 \mu\text{g}$). Im Vergleich zur Angabe aus dem Datenblatt ist die Standardabweichung höher. Die Hersteller geben häufig die ermittelte Standardabweichung unter den besten Laborbe-

dingungen an. Mit welchem Gewicht und mit wie vielen Wiederholungen die Abweichung aus dem Datenblatt ermittelt wurde, ist nicht ausgewiesen.

Für die weitere Messung wird aus diesem Grund die Standardabweichung verwendet, die mit dem Polymerstäbchen ermittelt wurde. Die Wiederholunsicherheit, die durch die Waage die Berechnung beeinflusst ist somit 0,25 µg bzw. 0,5 %.

4.2.2. Dichte

Das Ziel der Dichtemessung ist die Überprüfung, ob die Dichte entlang des Polymerstäbchens konstant ist. Eine qualitative Aussage, ob es eine Dichteänderung über die Länge gibt, würde ausreichen. Es werden keine genauen Werte benötigt, sondern lediglich eine Aussage, ob es eine Dichteänderung innerhalb des Filamentes gibt.

Für die Berechnung des Volumens muss davon ausgegangen werden, dass die Dichte entlang der Polymerstäbchen und im Querschnitt homogen verteilt ist. Wäre dies nicht der Fall, könnte die Volumenmessung nicht als Ersatz für die Waage eingeführt werden. Um entlang des Filamentes die Dichte zu messen, wird die Dichte an unterschiedlichen Positionen verglichen. Für den Querschnitt wird ein 3D-Verfahren benötigt, damit die Dichteverteilung pro Querschnitt betrachtet werden kann.

Es stehen nur Objekte mit einer voraussichtlich konstanten Dichteverteilung zur Verfügung. Die einzelnen Komponenten des Polymergemisches bzw. Objekte mit unterschiedlicher Zusammensetzung sind nicht vorhanden. Aus diesem Grund kann keine Aussage darüber getroffen werden, wie sich die Messung mit inhomogenen Dichteverteilungen im Objekt verhält, bzw. welche Dichte die einzelnen chemischen Komponenten haben.

Zur Sicherstellung, wie die Dichte verteilt ist, wird eine Messung mit dem Terahertz-Spektroskopie-System vom *Fraunhofer ITWM, Kaiserslautern* und mit dem Mikro-CT *FF20* der Firma *YXlon International* durchgeführt. Die Ergebnisse der beiden Messungen werden im Folgenden erläutert.

Terahertz-Spektroskopie

Für die Messung mit dem Terahertz-Spektroskopie-System werden Filamente verwendet (Länge ca. 20 cm). Mit Hilfe des Systems wird die Laufzeit der Strahlung durch das Objekt gemessen. Jedoch kann mit diesem System nur eine quantitative Aussage entlang des Filamentes getroffen werden und nicht für unterschiedliche Querschnitte. Die Objekte werden einzeln unter den Aufbau (Skizze siehe Abbildung 4.2.2.1) positioniert. Eine Veränderung im Signal, bei gleichbleibendem Volumen, korreliert 1:1 mit der Dichteänderung. Wenn die Laufzeit über die Länge des Polymers homogen ist bzw. keine große Variation aufweist, und die Breite konstant ist, kann davon ausgegangen werden, dass die Dichte homogen verteilt ist. Das optische System scannt den Filament-Bereich zwischen den Halterungen ab (Abstand 6,4 cm). Dazu wird das optische System in Ein-Millimeter-Schritten über das Fila-

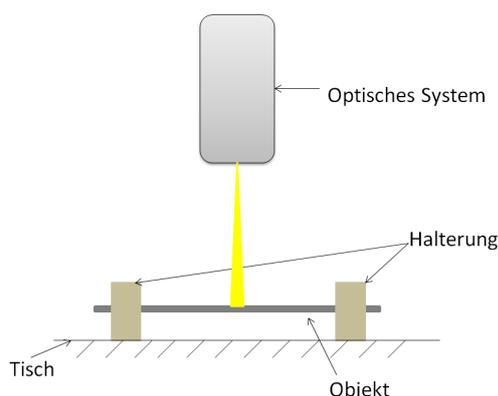


Abbildung 4.2.2.1.: Graphische Darstellung des Messaufbaus mit dem Terahertz-Spektroskopie-System vom *Fraunhofer ITWM, Kaiserslautern*

ment verschoben und das Signal über eine Sekunde gemittelt. An jeder Stelle wird die Laufzeit gemessen. Die Abbildung 4.2.2.2 zeigt die Laufzeit an einer Stelle auf dem Filament. Die Amplitude ist über der Laufzeit aufgetragen. Das Signal wird

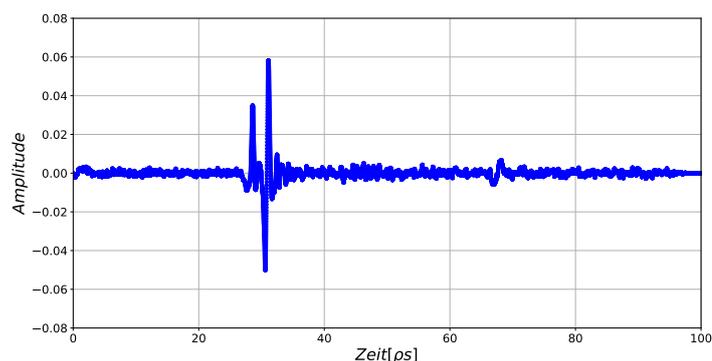


Abbildung 4.2.2.2.: Graphische Darstellung der Laufzeitmessung an einer Position. Aufgetragen ist dabei die Amplitude über der Zeit in Pikosekunden

in der Abbildung 4.2.2.3 genauer betrachtet. Es ist erkennbar, dass es zuerst eine positive und anschließend eine negative Amplitude gibt. Beide Ausschläge entstehen durch das Objekt: zuerst ist es die Reflexion der oberen Objektkante, danach die Reflexion der unteren Objektkante. Die dritte Amplitude im Signal ist die Reflexion vom Tisch.

Die Laufzeit wird aus dem zeitlichen Abstand zwischen der ersten und der zweiten Amplitude berechnet. Diese beträgt in diesem Beispiel $2,0 \text{ ps}$. Mit Hilfe der Breiten an den gemessenen Stellen kann die Brechzahl des Objektes an dieser Stelle be-

4. Untersuchung relevanter Einflussgrößen

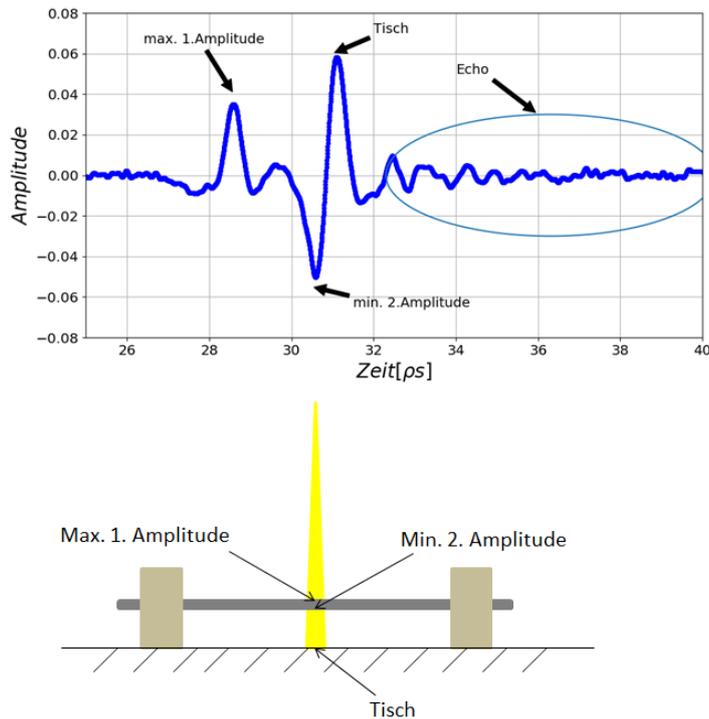


Abbildung 4.2.2.3.: Graphische Darstellung des Terahertz-Signals mit maximaler, minimaler Amplitude und der Amplitude, die durch den Tisch ausgelöst wird (oben). Zusätzliche Darstellung der Position der Amplituden im Aufbau (unten).

stimmt werden. Die Breiten werden mit Hilfe des VI-Systems berechnet. Zuerst wird die Geschwindigkeit im Objekt c_P bestimmt.

$$c_P = \frac{2b}{t}, \quad (4.18)$$

wobei t der Laufzeit und b der Breite entspricht.

Anschließend kann die Brechzahl n_P ermittelt werden.

$$n_P = \frac{c_{\text{Vakuum}} n_{\text{Vakuum}}}{c_P}, \quad (4.19)$$

wobei c_{Vakuum} 299.792 km/s beträgt und n_{Vakuum} 1.

Die Berechnung wird für jedes Signal (für jede Messposition) durchgeführt. Die Breite hat eine Variation über 65 Messpunkte von $\sigma = 2,6 \mu\text{m}$. Die Brechzahl hat

eine Standardabweichung von 0,031. Die einzelnen Werte entlang des Filaments sind in der Abbildung 4.2.2.4 dargestellt.

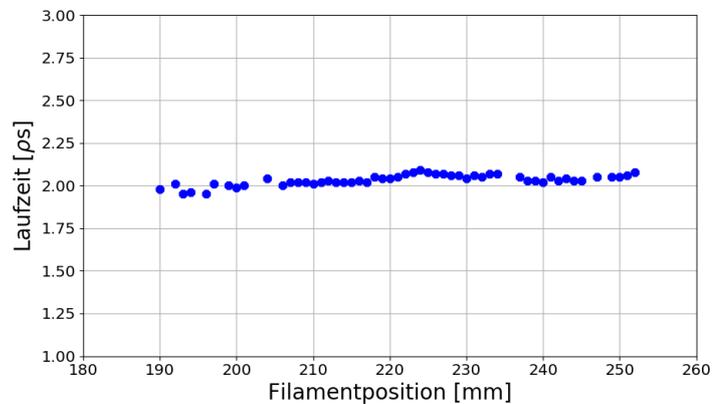


Abbildung 4.2.2.4.: Graphische Darstellung der Laufzeit entlang des Filaments

Ein großes Problem bei der Messung ist die Montage und Justage der Objekte. Das Filament muss parallel und in einem Abstand x über dem Tisch positioniert werden und an jedem Punkt denselben Abstand haben. Dies kann nicht über die komplette Länge mit dem Aufbau garantiert werden. Die Messungen zeigen, dass ein Reflex an der Vorder- und Rückseite zeitlich getrennt und somit ablesbar ist. Es kann nachgewiesen werden, dass die Brechzahlen entlang eines Polymerstäbchens nur wenig schwanken. Dies ist ein Indiz dafür, dass die Dichte entlang des Filaments sich nicht ändert und eine Volumenmessung mit der konstanten Dichte angenommen werden kann.

Mikro-CT

Die 3D-Rekonstruktion besteht aus vielen einzelnen Schnittbildern, die zusammengefügt werden. Jeder Grauwert zeigt den Schwächungskoeffizienten an diesem Punkt durch das Material an. Über einen Schwellwert kann das Objekt vom Hintergrund abgegrenzt werden. Die eingestellte Spannung der Röntgenröhre, die Vorfilterung und die Eigenschaften des Detektors wirken sich auf den dargestellten Materialunterschied und somit auf den Kontrast aus. [Dr 11a]

Die Abbildung 4.2.2.5 zeigt das Histogramm der Grauwertverteilung eines aufgenommenen Polymerstäbchens. Es ist erkennbar, dass der Dichteunterschied zwischen Luft, dem Material, in dem das Objekt positioniert wird (Mosy, Steckschaum) und dem Objekt sehr gering ist. Aus diesem Grund kann keine qualitative Aussage darüber getroffen werden, in welchem Wertebereich ein Dichteunterschied im Objekt vorliegt, dafür müssten alle Komponenten eindeutig in den Grauwerten voneinander getrennt werden. Jedoch können die einzelnen Querschnitte der Polymerstäb-

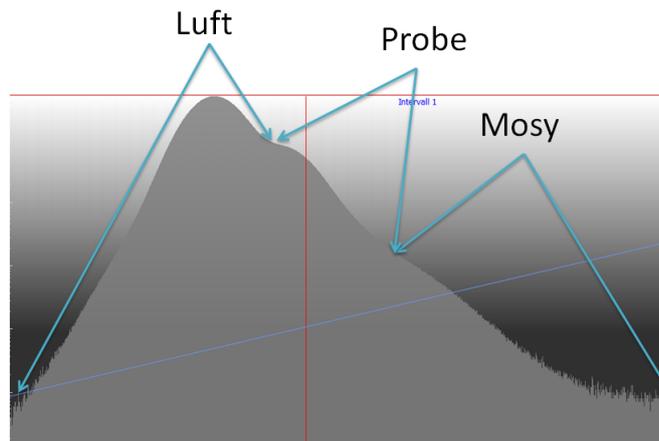


Abbildung 4.2.2.5.: Ausschnitt des Grauwertverlaufs einer CT-Aufnahme eines Polymerstäbchens

chen betrachtet werden, um somit eine quantitative Aussage treffen zu können, ob ein Dichteunterschied erkennbar ist. Diese würden sich durch deutlich hellere oder dunklere Bereiche im Objekt bemerkbar machen.

Die Abbildung 4.2.2.6 zeigt einen Querschnitt und die Abbildung 4.2.2.7 einen Längsschnitt eines Polymerstäbchens. Es ist erkennbar, dass die Grauwerte homo-

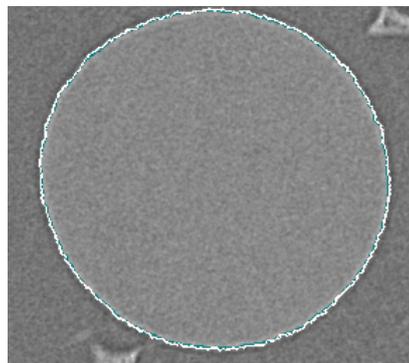


Abbildung 4.2.2.6.: Ausschnitt eines Querschnittes nach der 3 D-CT-Rekonstruktion eines Polymerstäbchens

gen verteilt sind. Im Anhang A.2, Seite 213, sind für dieses Polymerstäbchen die Querschnitte in 100 μm Abständen dargestellt. Es sind keine großen Auffälligkeiten erkennbar.

Durch den zweifachen Extrudierprozess kann es passieren, dass beim zweiten Durchgang nicht das ganze Material noch einmal aufgeschmolzen wird. Dadurch entstehen kleinste Bereiche mit sehr kompaktem Material. Dies ist dadurch in den CT-Messungen erkennbar, dass es sehr kleine Bereiche gibt mit höheren Grauwerten was

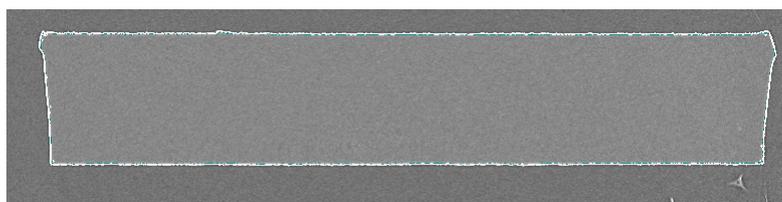


Abbildung 4.2.2.7.: Ausschnitt eines Längsschnittes nach der 3 D-CT-Rekonstruktion eines Polymerstäbchens

bedeutet, dass dort die Dichte höher liegt (siehe Abbildung 4.2.2.8). Die Bereiche

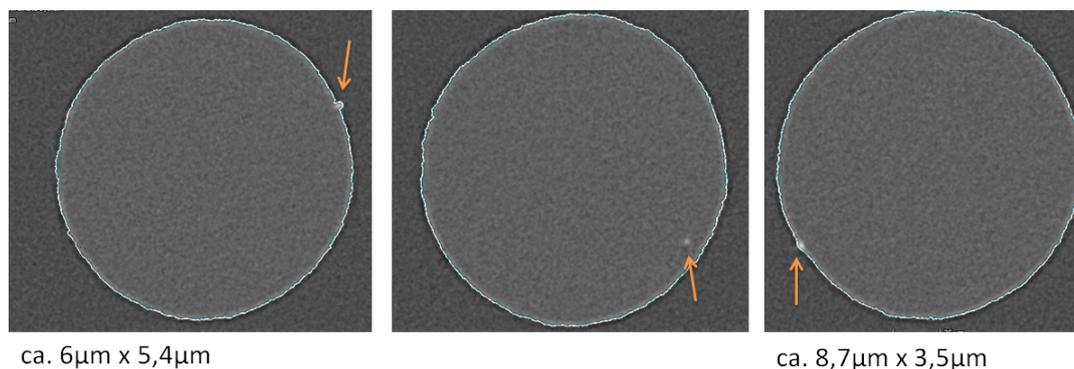


Abbildung 4.2.2.8.: Ausschnitt nach der 3 D-CT-Rekonstruktion eines Polymerstäbchens an verschiedenen Positionen entlang der Längsachse mit kompakten Material

mit kompakten Material sind jedoch so gering, dass sie das Gewicht und die Dichte des Objektes nicht verändern.

Anhand der CT-Aufnahmen kann gezeigt werden, dass die Dichte in den Polymerstäbchen homogen verteilt ist und somit das Volumen als Ersatz für das Gewicht verwendet werden kann.

4.2.3. Bewertungskriterium - Korrelationskoeffizient

Der Korrelationskoeffizient ist ein Maß für den statistischen Zusammenhang zwischen zwei Datensätzen. Mit Hilfe dieser Auswertung kann die lineare Abhängigkeit zwischen zwei Variablen, hier dem Volumen und dem Gewicht, quantifiziert werden. Zur Messung des Grads wird der Korrelationskoeffizient r_{xy} und das Bestimmtheitsmaß B_{xy} verwendet.

Der Korrelationskoeffizient spiegelt die Straffheit des linearen Zusammenhangs zwischen den beiden Variablen wieder. Er kann Werte zwischen +1 und -1 annehmen. Beträgt der Wert kleiner Null, wird dies als negative Korrelation definiert. Sind die

Werte größer Null handelt es sich um eine positive Korrelation. Je größer der Korrelationswert ist, desto straffer ist die Abhängigkeit zwischen den beiden Variablen. Eine vollständige positive bzw. negative Korrelation ist erreicht, wenn $r_{xy} = +1$ bzw. $r_{xy} = -1$. Sollte die Korrelation null betragen, sind die Variablen stochastisch unabhängig [Sto92][S. 384f].

Die Berechnung der Korrelationskoeffizienten erfolgt mit Hilfe der Standardabweichungen der beiden Variablen, sowie der Kovarianz.

Standardabweichung Variable X ([Sto92][S. 385]):

$$s_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum (x_i - \bar{x})^2} \quad (4.20)$$

Standardabweichung Variable Y ([Sto92][S. 385]):

$$s_y = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum (y_i - \bar{y})^2} \quad (4.21)$$

Kovarianz [Sto92][S. 385, Formel (3.100)]:

$$s_{xy} = \frac{1}{n-1} \left[\sum (x_i y_i) - \frac{\sum (x_i) \sum (y_i)}{n} \right] \quad (4.22)$$

Korrelationskoeffizient ([Sto92][S. 385, Formel (3.99c)]:

$$r_{xy} = \frac{s_{xy}}{s_x \cdot s_y} \quad (4.23)$$

Statt des Korrelationskoeffizienten wird oft das Bestimmtheitsmaß angegeben. Dieser ist festgelegt mit

$$B_{xy} = r_{xy}^2. \quad (4.24)$$

Das Bestimmtheitsmaß kann die Werte zwischen 0 und 1 annehmen. Wird der Wert 1 erreicht, liegen alle Punkte auf der Regressionsgeraden. Je größer die Abweichungen der Punkte zur Gerade sind, desto geringer wird das Bestimmtheitsmaß [Sto92][S. 385f].

Die Stichprobengröße hat einen signifikanten Einfluss auf das Ergebnis. Wird eine zu kleine Anzahl verwendet, oder auch nur ein zu kleiner Bereich aus dem möglichen Wertebereich untersucht, ist der Korrelationskoeffizient nicht aussagekräftig.

Mit Hilfe einer t-Statistik kann die Signifikanz der Korrelation überprüft werden.

Dafür wird folgende Formel angewendet [Sto92][S. 399, Formel (3.112a)]:

$$|t| = \frac{|r|\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}} > t(n-2, \alpha), \quad (4.25)$$

wobei r für den Korrelationskoeffizient, n für die Anzahl der Datenpaare, r^2 für das Bestimmtheitsmaß und α für die Wahrscheinlichkeit von 99 % steht.

Ist die Formel erfüllt, können die beiden Variablen voneinander unabhängig aufgefasst werden und das Bestimmtheitsmaß wird dadurch bestätigt.

Die Messung bzw. die Abhängigkeit der beiden Variablen ist umso vertrauenswürdiger, umso größer der Korrelationskoeffizient und das Bestimmtheitsmaß sind. Je kleiner die Werte sind, umso mehr überlagern Fehler bzw. Streuungen die Abhängigkeit. Einzelne Messungen können bei einem geringen Korrelationskoeffizienten nicht mehr sicher auf das Gewicht bezogen werden.

Der Korrelationswert sinkt bei Fehlern z.B. in der Berechnung oder wenn die Waage eine zu hohe Streuung hat. Liegt jedoch im optischen Aufbau beispielsweise ein systematischer Fehler vor, kann trotzdem ein hoher Korrelationswert erreicht werden. Nur die Steigung der Ausgleichsgerade durch alle Werte wird sich im Vergleich zu einer Auswertung ohne systematischen Fehler ändern. Weiterhin ist das Ergebnis optimal, wenn beide Werte, der Korrelationskoeffizient und das Bestimmtheitsmaß, hohe Werte erzielen.

4.3. Ermittlung eines Volumens mit übergeordneter Genauigkeit

Zur Ermittlung des Volumens mit einer übergeordneten Genauigkeit wird ein Referenzsystem benötigt, bei dem die Dauer der Messung nicht relevant ist. Im Abschnitt 2, Seite 21, sind unterschiedliche Verfahren beschrieben. Das System sollte die Oberfläche von allen Seiten antasten und dreidimensional rekonstruieren können. Die Punktwolken/Daten dürfen von dem System nicht mit Filtern oder ähnlichem bearbeitet werden, wie z.B. Medianfilter zur Rauschunterdrückung. Es werden die Rohdaten benötigt.

Das Referenzsystem soll in derselben Messkategorie arbeiten wie das VI. Somit kann einerseits eine Aussage getroffen werden mit welcher Genauigkeit das Volumen mit dem VI berechnet wird, andererseits kann die Unsicherheit in der Betrachtung beseitigt werden, die durch den Vergleich zwischen zwei unterschiedlichen Messmethoden (Masse vs. Volumen) zustande kommt. Das Referenzsystem soll $\frac{1}{3}$ der geforderten VI Unsicherheit nicht überschreiten, damit es als Referenz verwendet werden kann.

Das Konfokalmikroskop, das Lichtschnitt- und Streifenlichtverfahren kommen nicht in Frage. Bei diesen Verfahren wird immer nur die zum System zugewandte Seite aufgenommen und es müssten in einem separaten Schritt alle Punktwolken kombiniert werden. Dies ist zu fehleranfällig, da die Oberfläche zu wenig markante Punkte bietet, um eine sichere Ausrichtung der Punktwolken garantieren zu können.

Für die vorliegende Arbeit wird als Referenzsystem das MikroCT-System *FF35* der Firma *YXLON International* verwendet. Eine genaue Betrachtung, welche Genauigkeiten das System erreicht, wird im Abschnitt 4.3.5, Seite 93 diskutiert.

Im Folgenden werden zuerst die Anforderungen an das Referenzsystem definiert. Anschließend wird das Grundprinzip der Röntgentomographie und dessen physikalisch Besonderheiten erläutert. Im nächsten Abschnitt werden das verwendete System vorgestellt. Zum Abschluss dieses Abschnittes wird eine Oberflächenanalyse der Polymerstäbchen durchgeführt.

4.3.1. Anforderungen

Die Ergebnisse der VI-Messung und die des Referenzsystems sollen verglichen werden, um somit die Genauigkeit des VI-Systems genauer erfassen zu können.

Folgende Anforderungen sind nötig, damit das Referenzsystem zur Qualifizierung des VI verwendet werden kann:

- Die Oberflächenstruktur des Objektes sollte dargestellt werden.
- Die Abweichungen des Systems bzgl. für des Volumens sollte maximal 0,8 % betragen ($\frac{1}{3} \cdot 2,5\%$).
- Es sollte das Volumen gemessen werden, ohne dass das Objekt händisch gedreht werden muss.
- Die Schnittkanten werden genauso betrachtet wie der mittlere Teil des Objektes (keine Abschattungen oder ähnliches durch schräge Schnittkanten).
- Das Volumen wird aus den Messung automatisch berechnet, ohne das eine händische Berechnung/ Zusammenführen der Punktwolken notwendig ist.
- Optimal: Es wird die Querschnittsfläche entlang der Längsachse berechnet.

Es ist sehr wichtig, dass das System automatisch die 3D-Punktwolke des gesamten Objekts erstellt und die Punktwolken nicht händisch zueinander positioniert werden müssen. Die Schnittkanten sollten in derselben Genauigkeit dargestellt werden,

wie das restliche Polymerstäbchen. Dies ist beispielsweise bei Aufnahmen mit einem Konfokalmikroskop nicht möglich. Durch schräge Schnittkanten wird nur ein Bruchteil des Lichtes in das Mikroskop zurück reflektiert. Dies sollte auf jeden Fall vermieden werden. Im optimalen Fall kann das Polymerstäbchen dem Referenzsystem so präsentiert werden, dass keine Halterung Kanten des Objektes verdeckt. Dies wäre z.B. möglich, in dem das Polymerstäbchen in einem Glaszylinder steht und von allen Seiten aufgenommen wird.

4.3.2. Grundprinzip der Röntgentomographie

In [71] werden die Komponenten eines CT-Systems, die Aufnahme und Rekonstruktion erläutert. Eine umfassende Erläuterung der Röntgentomographie in der industriellen Messtechnik kann in [R C12] nachgelesen werden.

Ein CT besteht aus mehreren Komponenten. Dazu gehören unter anderem Manipulator, Röntgenquelle und Röntgendetektor [71]. Eine Röntgenröhre ist folgendermaßen aufgebaut: es werden durch Glühemission freie Elektronen generiert (im Vakuum). Durch ein elektrisches Feld zwischen zwei Elektroden werden die Elektronen beschleunigt. Es entsteht ein Elektronenstrahl. Dieser Elektronenstrahl trifft auf ein Target aus Metall oder mit einer Metallbeschichtung. Haben die Elektronen eine ausreichend hohe Beschleunigungsspannung (= ausreichend hohe kinetische Energie) entsteht beim Auftreffen auf dem Target Röntgenstrahlung (= hochfrequente elektromagnetische Strahlung). Die Abbildung 4.3.2.1 skizziert den Aufbau einer Röntgenröhre.

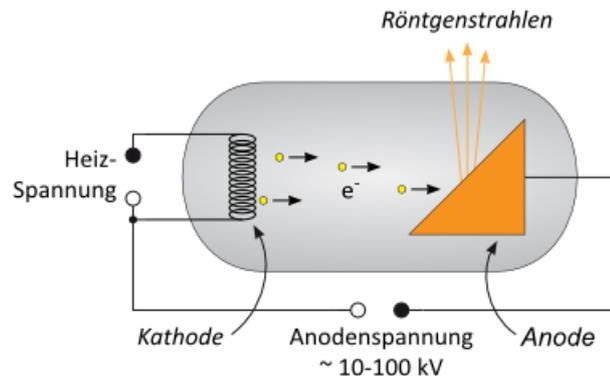


Abbildung 4.3.2.1.: Skizze des Aufbaus einer Röntgenröhre [41]

Das entstehende Frequenzspektrum hängt von der Spannung zwischen Kathode und Anode und vom Trägermaterial ab.

Die Energie eines Photons ist proportional zu seiner Frequenz. Somit kann mit der

elektrischen Spannung an der Röntgenröhre die Frequenz und somit die Energie der Photonen beeinflusst werden.

Es gibt keine universell passende Einzellösung für sämtliche Anwendungen. Folgende Systemparameter sollten für jede Anwendung beachtet und jeweils bestimmt werden:

- Größe und Stabilität des Brennflecks
Die Größe des Brennflecks beeinflusst die Ausgangsleistung des Röntgenstrahls und wie scharf interne Details des Objektes sichtbar gemacht werden können. Wird ein kleinerer Brennfleck gewählt, wird eine stark vergrößernde Bildgebung erzielt und eine Auflösung im Mikrometerbereich. Für größere Brennflecke wird eine viel höhere energetische Röntgenstrahlung benötigt. Diese wird hauptsächlich bei größeren und dichteren Proben eingesetzt.
- Temperaturschwankungen
Hohe Temperaturschwankungen können das CT-System beeinflussen. Diese können zur Dehnung des Röntgenröhrengehäuses führen und somit eine Instabilität des elektrischen Feldes verursachen. Dadurch kann der Brennfleck während der Messung anfangen zu driften, was wiederum im rekonstruierten Bild zu Unschärfe führen kann. Wird das Gehäuse gekühlt, können Temperaturschwankungen und somit Brennfleckwanderungen minimiert werden. Dies führt zu einer erheblichen Verbesserung der Bildqualität.
- Kiloelektronenvolt (keV)
Die Angabe in keV spiegelt das verfügbare Beschleunigungspotential von Elektronen zur Erschaffung von Röntgenquanten wider. Je größer das Energiepotential der Quelle ist, desto stärker ist die Durchdringung der Strahlung durch das Bauteil.
- Milliampere (mA)
Der Target-Strom des Röntgenstrahls wird in mA angegeben. Dieser steht in Zusammenhang mit der Gesamtzahl der vom Zielobjekt ausgesandten Elektronen.
- Röntgendetektor
Es werden Zeilen- oder Flachdetektoren eingesetzt.
- CT-Scantechnik
Es werden vier verschiedene Scantechniken unterschieden:
Fächerstrahl-, Kegelstrahl-, Spiral-CT und Laminographie. Bei einem Fächerstrahl-CT wird der fächerförmige Röntgenstrahl von einem Zeilendetektor erfasst. Ein Flachdetektor detektiert die Strahlung eines kegelförmigen Rönt-

genstrahls (Kegelstrahl-CT). Bei einem Helic-CT (Spiral-CT) beschreibt das Prüfteil gleichzeitig durch Rotation und Senkrechtbewegung relativ zur Strahlquelle eine helixförmige Trajektorie. Die Strahlung wird mit einem Flächendetektor erfasst. Mit der Laminographie wird nur eine Ebene im Prüfteil, die von besonderem Interesse ist, erfasst. Die darüber- und darunterliegenden Bereiche werden ignoriert.

Die digitale Rekonstruktion kann in erster Näherung in drei Bereiche unterteilt werden: Messkreis, vom Pixel zum Voxel und Oberflächenbestimmung. Der Messkreis, oder auch *Field of View* (FoV) genannt, bestimmt wie viel vom gescannten Objekt ins Bild passt. Ist das Objekt nahe am Detektor positioniert, ist der Messkreis am größten. An dieser Position hängt die Sichtbarkeit von Details vor allem von der Pixelgröße des Detektors ab. Die geometrische Vergrößerung wächst, je näher das Objekt an der Strahlquelle positioniert wird. Die Sichtbarkeit von Details hängt dann vor allem von der Größe des Brennflecks ab. Wird der 3D-Scan erstellt erfolgt die Umwandlung von zweidimensionalen Bildelementen (Pixel) in dreidimensionale Bildelemente (Voxel). Sobald das 3D-Volumen erstellt ist, kann eine Oberfläche im CT Volumen definiert werden. Dazu können verschiedene Methoden angewendet werden: ISO-50%⁷, ein örtlicher Schwellwert u.v.m. Ist die Oberfläche bestimmt, werden Punkte, die die innere und äußere Oberfläche identifizieren, als Punktwolke definiert. Diese Punktwolken können als triangulierte Oberfläche in Form einer STL-Datei oder als Punktwolke-datei (in verschiedenen Formaten) abgespeichert werden. Nun ist eine beliebige Auswertung des Objektes möglich (z.B. Volumenbestimmung, Querschnittsfläche, Dichteverteilung, u.v.m.)

Wie lange ein Scan eines Objektes dauert ist abhängig von der Projektionsanzahl (= Winkelschrittweite/360°), Belichtungsdauer und der Anzahl der integrierten Frames (= Rauschunterdrückung).

$$\text{Dauer} = (\text{Anz. Projektionen}) \cdot (\text{Belichtungsdauer}) \cdot (\text{Anz. integr. Frames})$$

Wird beispielsweise ein kleines Plastiksteckergehäuse mit einem Kegelstrahl-CT aufgenommen, werden 720 Projektionen benötigt, mit einer Belichtungszeit von 30 ms und pro Position werden vier Bilder integriert. Der Scan für dieses Objekt würde 14,4 min dauern.

⁷Ein globaler Schwellwert zur Extraktion von Oberflächen, dieser befindet sich in der Mitte der beiden Maxima (Hintergrund und Objekt). Mehr dazu in [U H08] und [Rei11].

4.3.3. Physikalische Besonderheiten

Im Folgenden werden die wichtigsten physikalischen Besonderheiten kurz erläutert und ob sie einen Einfluss auf die Messungen mit den Polymerstäbchen haben könnten. Eine ausführliche Auflistung von möglichen Artefakten kann in [Dr 11a][S. 101f] und [Dr 11b][S. 107ff] nachgelesen werden.

Strahlaufhärtung

Die entstehende Strahlung ist nicht monochromatisch sondern ein kontinuierliches Strahlungsspektrum mit einer bestimmten Bandbreite (Bremsstrahlung). Die Anteile niedrig-frequenter Strahlung (geringere Energie) des Spektrums werden stärker absorbiert als hochfrequente Strahlung. Somit verschiebt sich das Frequenzspektrum während der Durchstrahlung in Richtung höherer Energien. Dies wird Strahlaufhärtung genannt. Artefakte, die durch diese Aufhärtung entstehen, führen zu Messabweichungen. Im Extremfall kann das Objekt nicht gemessen werden, da die Überlagerungspunkte zwischen Luft und Wirkstoff sich nicht bestimmen lassen.

→ Strahlaufhärtung tritt immer auf, aber in niedrig-frequenten Bereichen sind die Auswirkungen deutlich geringer, als bei stärkerer Strahlung. In der Rekonstruktion der Daten können die Strahlaufhärtungs-Artefakte korrigiert werden.

Streustrahlung

Einfallende Röntgenphotonen können durch Elektronen des durchstrahlten Objektes von ihrer ursprünglichen Bewegungsrichtung gestreut werden und unterliegen somit einem Energieverlust (Comptoneffekt). Die Abschwächung der Strahlung in Messrichtung ist erwünscht und gewollt. Jedoch kann eine Aufhellung in anderen Bereichen des Objektes durch den Effekt auftreten. Diese Hintergrundstrahlung durch Mehrfachstreuung kann somit zu Messabweichungen führen (= Streustrahlungsartefakte). Die Größe und Verteilung der Streuung ist vom Objekt und seiner Geometrie abhängig. Somit kann der Effekt nur mit einer werkstückbezogenen Korrektur verringert werden.

→ Da das zu messende Objekt keine hohe Dichte aufweist, ist der Energieverlust, den die Röntgenphotonen erfahren, nicht sehr stark.

Strukturauflösung

Diese Auflösung definiert, wie klein Strukturen im Objekt sein dürfen, um noch detektiert werden zu können. Die Strukturauflösung ist abhängig von der Brennfleckgröße. Um höhere Auflösungen zu erreichen, sollte die elektrische Leistung gering sein.

→ Das Objekt wird sehr nah an der Röntgenquelle aufgenommen, um eine hohe Vergrößerung erzielen zu können. Aus diesem Grund wird die Brennfleckgröße so gering wie möglich gewählt (Nanofokus-Röhre). Weiterhin wird mit sehr geringer Energie

gearbeitet, um den Unterschied zwischen Luft und dem Objekt präzise darstellen zu können.

Ortsauflösung

Die Ortsauflösung definiert, in welcher Schrittweite gemessen werden kann. Sie entspricht der Schrittweite zur Bestimmung eines Übergangspunkts zwischen zwei Materialien. Die Grundlage der Ortsauflösung bildet die Strukturauflösung.

→ Die Ortsauflösung darf nicht zu gering gewählt werden, da das Objekt sonst unterabgetastet wird und es zu Messfehlern kommen kann. Die minimale Schrittweite ist mit 420 Schritten definiert. Jedoch muss beachtet werden, je kleiner die Winkelanzahl ist, desto mehr Zeit wird für die Aufnahme benötigt.

Rauschen der fotoelektrischen Signale

Wird ein Objekt mehrmals vermessen, entsteht durch das Rauschen der fotoelektrischen Signale eine Streuung der Messergebnisse. Dies entsteht beispielsweise durch die Wärme (siehe oben) und da die Röntgenröhren im niedrigen kV-Bereich häufig nicht so stabil laufen, wie im höheren kV-Bereich. Das Rauschen wird umso stärker, je stärker das Signal ist. Das Rauschen kann reduziert werden, indem mehrere Aufnahmen mehrerer Folgen von Durchstrahlungsbildern mit unterschiedlichen Energien und deren Auswertung durchgeführt wird.

→ Zur Vermeidung werden mindestens vier Bilder von einer Position integriert. Somit kann das Rauschen minimiert werden. Dies ist jedoch nur möglich, wenn zwischen den Winkelschritten das Objekt ruht („stop and go“ Scan) und die Aufnahmen nicht während der Drehung („Quickscan“) durchgeführt werden.

Rauschen des Detektors

Die Röntgenstrahlung ist nicht immer konstant und somit kann es passieren, dass nicht jede Aufnahme dieselben Grauwerte auf dem Detektor erreichen und es dadurch zu Abweichungen kommen kann.

→ Aus diesem Grund sollte zwischen zwei Scans immer eine Kalibrierung durchgeführt werden. Somit werden alle Pixel des Detektors „geleert“ und eine Aufnahme mit und ohne Röntgenstrahlung aufgenommen. Dazu muss das Objekt aus dem Bildfeld gefahren werden. Mit Hilfe der Kalibrierung werden Abweichungen/Rauschen bei der Rekonstruktion aus den Aufnahmen gerechnet.

Abdeckplatte vor Detektor

Es gibt eine Abdeckplatte vor dem Detektor. Diese wird verwendet, damit der Detektor beim Probenwechsel nicht berührt werden kann. Die Platte sollte die Röntgenstrahlung nicht abschwächen.

→ Im niedrigen kV-Bereich absorbiert die Platte Strahlung. Aus diesem Grund ist

es sehr wichtig, dass diese für die Messungen entfernt wird. Ansonsten werden die Ergebnisse stark beeinflusst, da weniger Strahlung den Detektor erreicht und das Rauschen verstärkt werden kann.

Für die Aufnahmen der Polymerstäbchen mit dem CT sind das Rauschen des fotoelektrischen Signals und das Detektorrauschen relevant. Beide Abweichungen können durch das Integrieren von Frames und der Kalibrierung zwischen zwei Scans deutlich reduziert werden. Weiterhin ist es sehr wichtig, dass keine Abdeckplatte vor dem Detektor montiert ist.

4.3.4. Verwendetes System

Es wird das *FF35 CT* von *YXLON International GmbH* verwendet. Dies ist ein hochauflösendes industrielles CT-System, das zur Prüfung von kleinen und kleinsten Bauteilen verwendet wird. Es werden 3D-Prüfergebnisse bei einer sehr hohen Auflösung gewährleistet. Mit dem CT ist ein zerstörungsfreies Messen inklusive der inneren Struktur möglich. Es besteht die Möglichkeit feinste Strukturen zu messen und in die Materialproben hinein zuschauen. Es können Defekte sichtbar gemacht, geometrische Messungen durchgeführt und Dichteänderungen oder Dichteabweichungen erkannt werden [71]. Die Tabelle 4.3.4.1 zeigt einen Ausschnitt über die Eigenschaften des CTs. Die Einsatzbereiche sind vielfältig. Gängige CT-Anwendungen

Röntgenkomponenten	
Röhre	Y.FXT 190.61 Transmissionsröhre
Maximale Spannung	190 kV
Maximale Leistung	80 W
Detailerkennbarkeit	150 nm
Wasserkühlung	ja
Detektor	XRD 4343
Field of View	432 mm x 432 mm
Pixel-Matrix	2880 x 2880
Pixelabstand	150 μm^2
Bildfrequenz	bis zu 15 fps

Tabelle 4.3.4.1.: Ausschnitt der Eigenschaften des *FF20*-CTs [72]

der Firma *YXlon* sind [71]:

- Ermittlung von Porosität und Einschlüssen
- Metrologie (Vergleich Soll-Ist-Werte mit CAD-Modellen; dimensionelles Messen innerer Strukturen)

- Strukturanalyse
- Baugruppenanalyse
- Analyse von Verbundwerkstoffen
- Analyse elektronischer Komponenten und Leiterplatten-Anordnung

Es werden alle wichtigen Informationen über die innere und äußere Struktur der Prüfteile dargestellt und somit wird jede Art von Analyse ermöglicht.

Um das Prüfobjekt zu erfassen, kann eine fast unbegrenzte Anzahl von Messpunkten genutzt werden. Ein CT-Scan erzeugt eine Reihe von 1 D- oder 2 D-Projektionsbildern aus verschiedenen Rotationswinkeln. Mit Hilfe einer Software werden diese Bilder schichtweise zu einer 3 D-Projektion zusammengefügt. Durch Ringartefakt- und Strahlaufhärtungskorrekturen kann eine hohe Bildqualität erreicht werden.

Die Grundlage für das CT ist ein Manipulator mit Granitbasis (dadurch gleichbleibende Temperatur) und eine wassergekühlte 190kV Feinfocus Nanofokus-Transmissionsröhre mit einer Detailerkennbarkeit von bis zu 150 nm im 2D.

4.3.5. Erforderliche Genauigkeiten Referenzsystem

Das Referenzsystem sollte, wie oben erwähnt, mindestens dreimal genauer sein als das VI. Im Folgenden werden die Standardabweichungen für das Referenzsystem berechnet, die dieses maximal erreichen darf. Weiterhin kann mit dem CT System geprüft werden, wie die Querschnittsfläche der Polymerstäbchen sich verhalten. Dafür kann die Rundheit an beliebig vielen Stellen berechnet werden, um somit festlegen zu können, ob für die Flächenberechnung eher ein Kreis, eine Ellipse oder die numerischer Berechnung als Grundlage verwendet werden sollte.

Das Referenzsystem sollte maximal eine Volumenabweichung von 1,7% haben, damit dieses zur Qualifizierung des VI-Systems verwendet werden kann.

4.3.6. Oberflächenanalyse

Das Referenzsystem nimmt sehr präzise die Oberflächenstruktur der Objekte auf. Damit ausgeschlossen werden kann, ob die aufgenommene Struktur Artefakte von der Computertomographie oder Fremdmaterial (z.B. Staub) sind, werden zwei Objekte mit einem deutlich höher auflösenden System aufgenommen. Die Messungen werden mit einem „Focused Ionen Beam“ (*FIB*)⁸ am MPI⁹ Mainz durchgeführt. Das

⁸Funktionsweise gleicht einem Rasterelektronenmikroskop (*REM*). Mehr Informationen zum *REM* in [Fra93][S. 167ff]).

⁹Max Planck Institut für Polymerforschung

System erstellt detaillierte Abbildungen von Mikro- und Nanostrukturen mit einer Auflösung von ca. 10 nm. Die Aufnahmen zeigen die Oberflächenstruktur sehr detailscharf und kontrastreich.

Für die Aufnahmen wird das Objekt mit doppelseitigen Klebeband auf einem Objektträger positioniert (siehe Abbildung 4.3.6.1). Dies ist notwendig, damit das Objekt während der Messungen die Position nicht ändert. Aus diesem Grund kann das *FIB* nicht als Referenzsystem verwendet werden. Sobald das Objekt auf dem Objektträger befestigt wurde, ist eine verlustfreie Abnahme vom Träger nicht mehr möglich. Dadurch kann das Objekt nicht von allen Seiten betrachtet werden kann. Zur Vermeidung von Aufladung der Probe beim Vermessen, wird die Probe mit

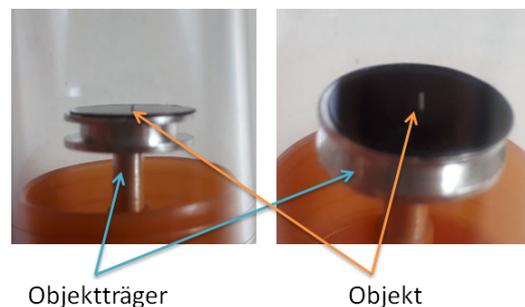


Abbildung 4.3.6.1.: Abbildung des Objektträgers mit dem Objekt für die *FIB*-Messungen

10 nm Platin beschichtet. Dies ist ein weiteres Ausschlusskriterium für die Verwendung als Referenzsystem, da somit das Objekt kontaminiert ist.

Für die Betrachtung werden zwei Objekte verwendet und verglichen. Ein Objekt wird aus einem Glaszylinder aus dem Kühlschranks entnommen (Probe 1). Das zweite Objekt wurde vier Wochen zuvor aus diesem Zylinder herausgeholt und für die ersten Miko-CT Messungen verwendet. Dies ist relevant für die Bewertung der Oberfläche. Somit kann eine Aufnahme mit dem Elektronenmikroskop und mit dem CT verglichen werden (Artefakte) und andererseits kann betrachtet werden, ob die Objekte sich verändern, wenn sie einige Zeit nicht im geschlossenen, gekühlten Glaszylinder waren. Die Abbildung 4.3.6.2 zeigt die Aufnahme des kompletten Objektes mit dem *FIB* (Probe 2).

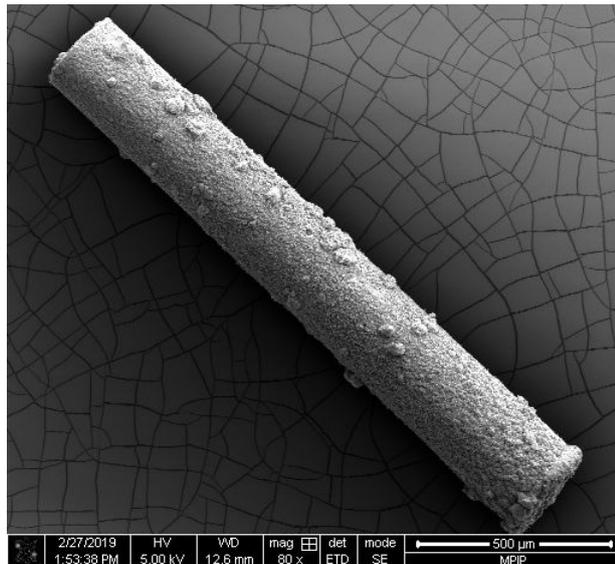


Abbildung 4.3.6.2.: Abbildung der kompletten Probe 2 mit dem FIB

Das Objekt hat einige Ausbuchtungen. Diese gehören zum Objekt und sind aus demselben Material. Dies ist in der Abbildung 4.3.6.3 deutlich erkennbar. Es ist kein Fremdmaterial. Dies ist daran erkennbar, dass das Objekt und die Ausbuchtungen denselben Helligkeitswert und dieselbe Struktur haben. Diese Erkenntnis ist

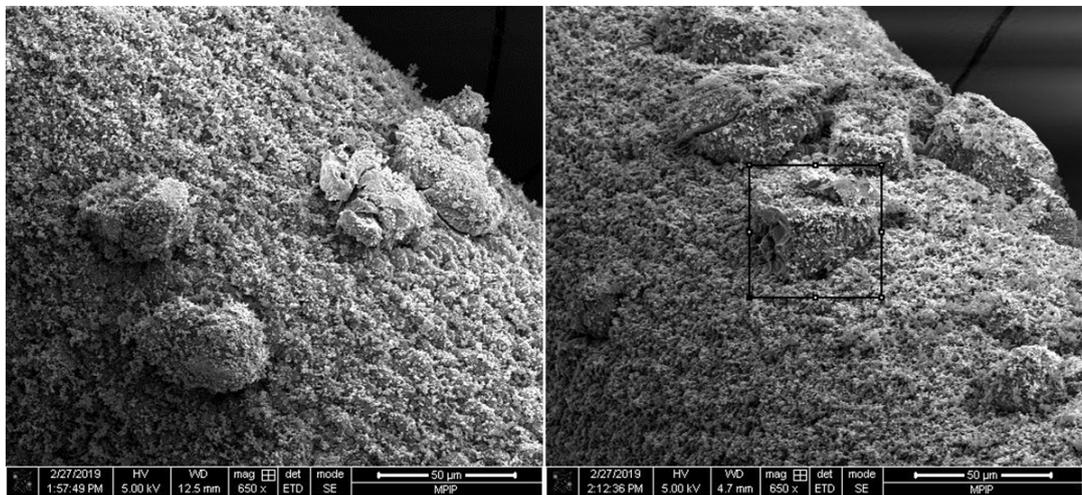


Abbildung 4.3.6.3.: Abbildung eines kleinen Bereiches des Objektes mit einer Vergrößerung von 650 (Probe 2)

sehr wichtig für die Aufnahmen mit dem MikroCT. Die ersten Testaufnahmen mit dem CT haben Ausbuchtungen gezeigt. Mit Hilfe der Messung des FIB kann daraus

4. Untersuchung relevanter Einflussgrößen

geschlossen werden, dass diese Erhebungen kein Fremdmaterial oder Artefakte der Messung sind, sondern zum Objekt gehören. In der Abbildung 4.3.6.4 ist erkennbar, dass die Ausbuchtungen beiden Aufnahmen klar zugeordnet werden können. Dies bedeutet, die Oberflächenstruktur beinhaltet diese Ausbuchtungen. Diese ent-

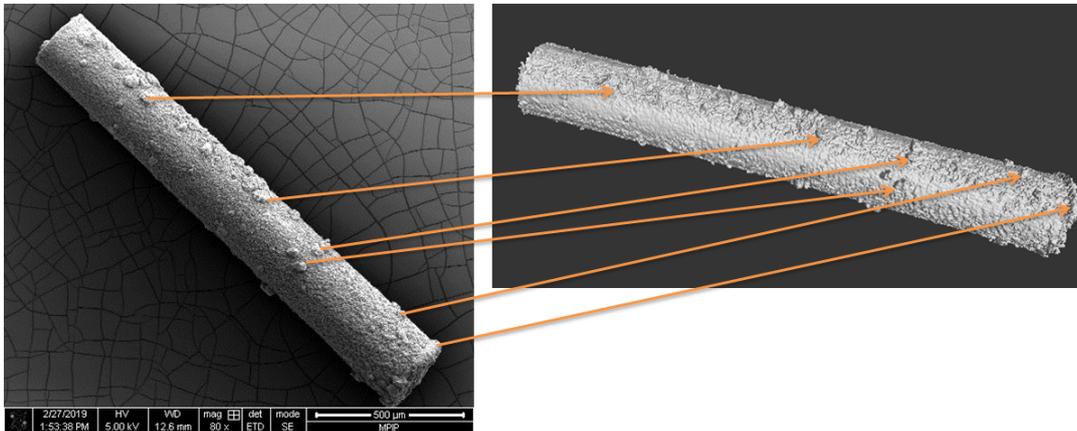


Abbildung 4.3.6.4.: Abbildung des Objektes mit dem *FIB* (links) und dem MikroCT (rechts) sowie der Zuordnung der Ausbuchtungen

stehen beim Extrudierprozess und sind über das komplette Objekt verteilt. Durch die Trocknungsphase schrumpft das Objekt ein wenig. Da die Ausbuchtungen stark komprimiertes Material sind, schrumpfen diese nicht weiter. Aus diesem Grund stehen diese etwas mehr aus der Oberfläche heraus.

Im Vergleich zum ersten Objekt (Probe 1), das kurz vor den *FIB*-Messungen aus einem gekühlten Glaszylinder herausgenommen wurde, ist der Unterschied deutlich erkennbar (siehe Abbildung 4.3.6.5). Das erste Objekt (Probe 1) hat eine deutlich ruhigere Oberfläche (4.3.6.5, rechts, war länger an der Luft). Dies ist ein Hinweis darauf, dass die Objekte an der Luft reagieren. Vermutlich wird mit der Luftfeuchtigkeit der Zersetzungsprozess aktiviert und dadurch reagiert die Oberfläche (wird rauer). Dies bedeutet für die Referenzmessung, dass die Objekte sehr zeitnah mit dem VI und dem MikroCT vermessen werden müssen. Zusätzlich müssen die Objekte gekühlt und mit Trocknungsmaterial transportiert werden, damit eine Änderung der Oberfläche zwischen den Messungen vermieden wird.

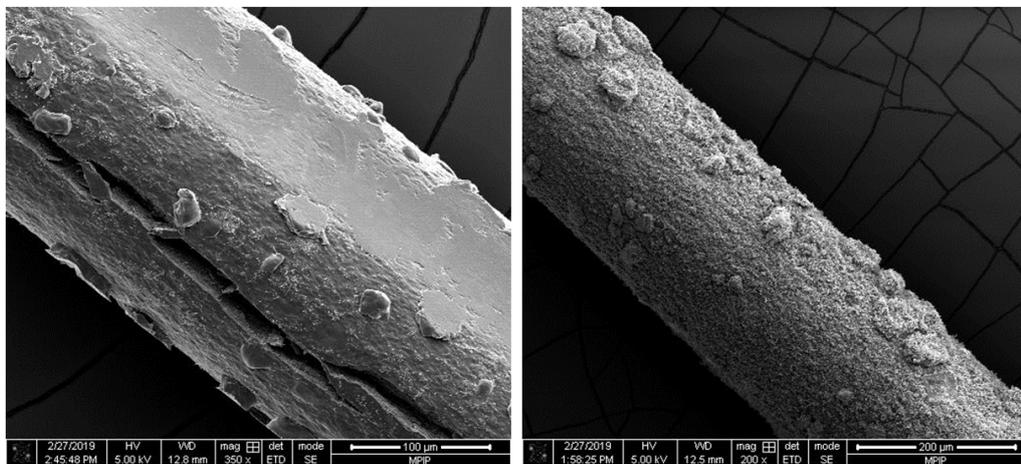


Abbildung 4.3.6.5.: Oberflächenvergleich zwischen einem Objekt, das kurz vor der *FIB*-Messung aus dem Zylinder herausgeholt wurde (links, Probe 1) und der Probe, die vier Wochen außerhalb des Glaszylinders aufbewahrt wurde (rechts, Probe 2)

5. Technisches Konzept

Volumen-inline System

In diesem Kapitel wird das technische Konzept des VI-Systems erläutert. Zuerst wird beschrieben, wie das Volumen mit Hilfe eines optischen Aufbaus und der Bildverarbeitung ermittelt werden kann und welche Kriterien dafür erfüllt werden sollten. Anschließend werden die Bildverarbeitungsschritte und die einzelnen Komponenten des optischen Aufbaus erläutert.

5.1. Konzeptherleitung

Es wird das Volumen der Polymerstäbchen benötigt. Für die Rahmenbedingungen gilt, dass das Objekt von mehreren Seiten betrachtet werden muss, dass das Volumen präzise berechnet wird (max. Standardabweichung Breite = $2,5 \mu\text{m}$; max. Standardabweichung Länge = $32,5 \mu\text{m}$) und dass die Prozesszeit für ein Objekt nicht mehr als fünf Sekunden betragen soll. Im Idealfall kann das Objekt vollständig rekonstruiert und das Volumen ermittelt werden. Dies wäre zum Beispiel mit einer Computertomographie möglich. Diese Messung ist jedoch zu zeitaufwändig (siehe Kapitel 2). Eine erste Vereinfachung wäre, dass nur die Außenhülle der Polymerstäbchen detektiert wird, ohne das Durchdringen des Objektes. Dies wäre beispielsweise mit mehreren Aufnahmen eines Konfokalmikroskop machbar. Das Objekt muss gedreht werden, da das Verfahren einzelne Ansichten misst, die dann verknüpft werden müssen. Für die Verknüpfung werden ortsfeste Geometrie- oder Texturmerkmale benötigt. Beide Merkmale sind jedoch bei den Polymerstäbchen nicht vorhanden. Eine weitere Alternative ist die Aufnahme der Kontur der Polymerstäbchen aus unterschiedlichen Perspektiven/ Rotationswinkeln mit Hilfe einer Kamera. Aus den Aufnahmen wird ein Voxelmodell konstruiert (2.5D). Dies wäre mit dem *Shape from Motion*-Verfahren möglich. Jedoch kann dies nicht umgesetzt werden, da das Objekt dafür mit Aufsicht betrachtet und markante Oberflächenpunkte gesucht werden müssen, damit die 2D Bilder miteinander im Raum kombiniert werden können. Aus diesem Grund kann die Vermessung der Objekte mittels Musterprojektion nicht durchgeführt werden, da auch für dieses Verfahren eine markante Oberflächenstruktur vorhanden sein sollte. Es zeigt sich, dass sich ein 3D Verfahren (CT, Konfokalmikroskop) bzw. ein Verfahren zur 2.5D Vermessung nicht für die Vermessung der Polymerstäbchen eignen,

da sie zu zeitaufwändig sind oder das Objekt zu wenig Anhaltspunkte zur Volumenberechnung liefert. Aus diesem Grund ist einzig ein Konturverfahren (2D-Kamera-System) zur Bestimmung des Volumens machbar, das einzelne Aufnahmen auswertet und mathematisch anschließend das Volumen approximiert. Die Abbildung 5.1.0.1 zeigt das Konzept. In der Abbildung 5.1.0.2 sind die genannten Verfahren in einem

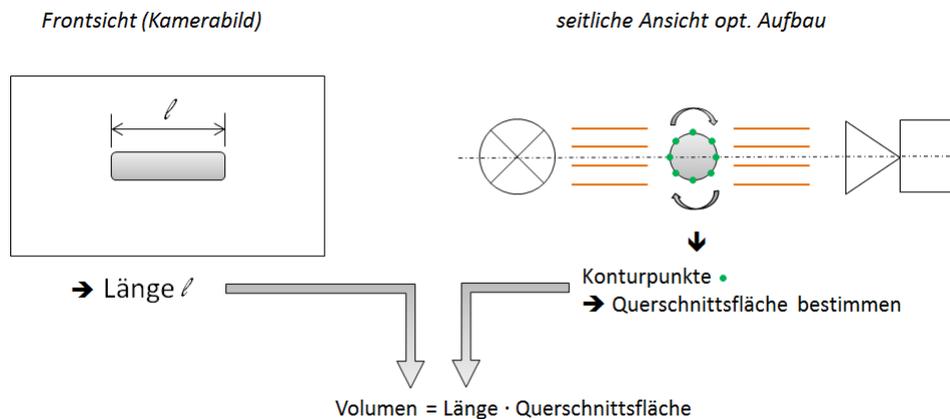


Abbildung 5.1.0.1.: Graphische Darstellung des 2D-Kamera-Konzepts; links: Frontsicht, in der die Länge des Objektes gemessen wird; rechts: seitliche Ansicht des optischen Aufbaus mit Beleuchtung, Objekt und Kamera sowie den horizontalen Lichtstrahlen durch die telezentrische Beleuchtung; für jeden Konturpunkt (grün) wird über alle Winkelschritte die Querschnittsfläche bestimmt

Schema dargestellt, mit ihren Ergebnissen und weshalb diese nicht in Frage kommen. Die Oberfläche kann nicht direkt abgetastet werden, da diese keine Struktur hat und keine Informationen liefert. Aus diesem Grund muss das Volumen approximiert werden, indem eine ausreichende Anzahl an Ansichten des Querschnittes aufgenommen wird. Für jeden Winkelschritt wird an vielen Positionen am Objekt die Breite gemessen. Durch die Annahme eines Kreis- bzw. Ellipsen-Querschnittes kann anschließend für jede Position über alle Winkelschritte die Breite (mittlere oder minimale und maximale) berechnet werden. Es kann die mittlere Querschnittsfläche des Polymerstäbchens berechnet werden. Somit ist ein 2D-Kamera-System ausreichend. Für das Konzept mit einem 2D-Kamera-System werden Aufnahmen benötigt, die kontrastreich sind und das Objekt bestmöglich mit so wenig Abschattungen wie möglich darstellen. Dafür muss das Objekt gehalten und aus unterschiedlichen Winkeln betrachtet werden können. Dies hat zur Folge, dass ein Handhabungssystem erstellt werden muss. Somit könnten die Breiten an vielen Querschnittspunkten ermittelt und mit Hilfe der Länge des Polymerstäbchens das Volumen approximiert werden. Folgende Kriterien sollte der optische Aufbau (das 2D-System) erfüllen: es

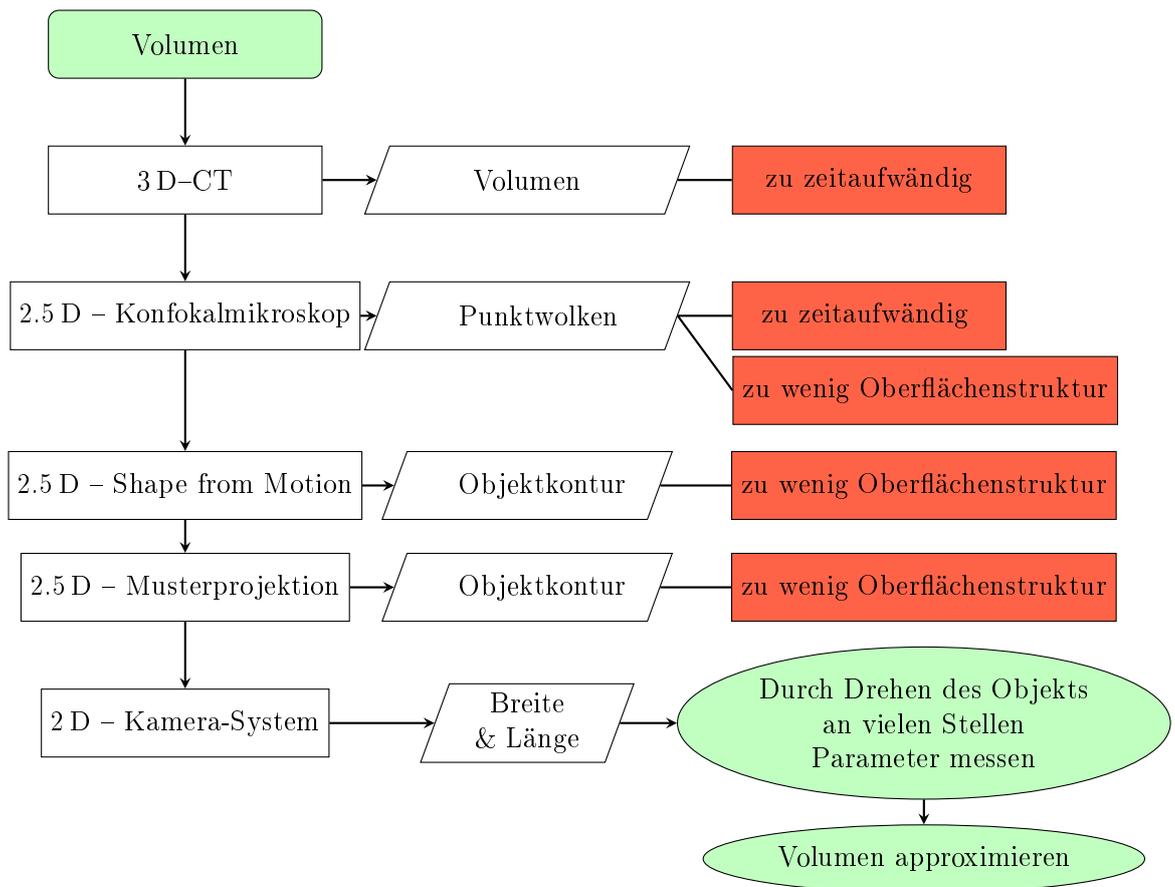


Abbildung 5.1.0.2.: Übersicht des Konzepts in Form eines Flussdiagramms; rot = Kommentar, grün = Daten, die benötigt und mit dem Vorgang erreicht werden

wird eine Kamera benötigt, bei der auf die Wahl des Sensorchips geachtet werden sollte, dass dieser unter anderem rauscharm ist und eine hohe *Full well Kapazität* hat; die Beleuchtung sollte monochrom und telezentrisch sein; das Objektiv sollte telezentrisch und verzeichnungsfrei sein, damit die meisten Abbildungsfehler unterdrückt werden können und das Handhabungssystem sollte die Objekte halten und drehen können. Das Flussdiagramm in der Abbildung 5.1.0.3 zeigt das Konzept des 2D-Kamera-Systems und welche Kriterien beachtet werden sollten.

Es werden unterschiedliche Ansätze getestet, die aus verschiedenen Gründen nicht weiter verfolgt werden konnten bzw. nicht für einen Prozess geeignet sind. Diese sind im Anhang A.3, Seite 214, dokumentiert.

Im Folgenden wird zuerst die verwendete Bildverarbeitung und der Berechnungsprozess mit Hilfe der Bildverarbeitung erläutert und anschließend die Komponenten

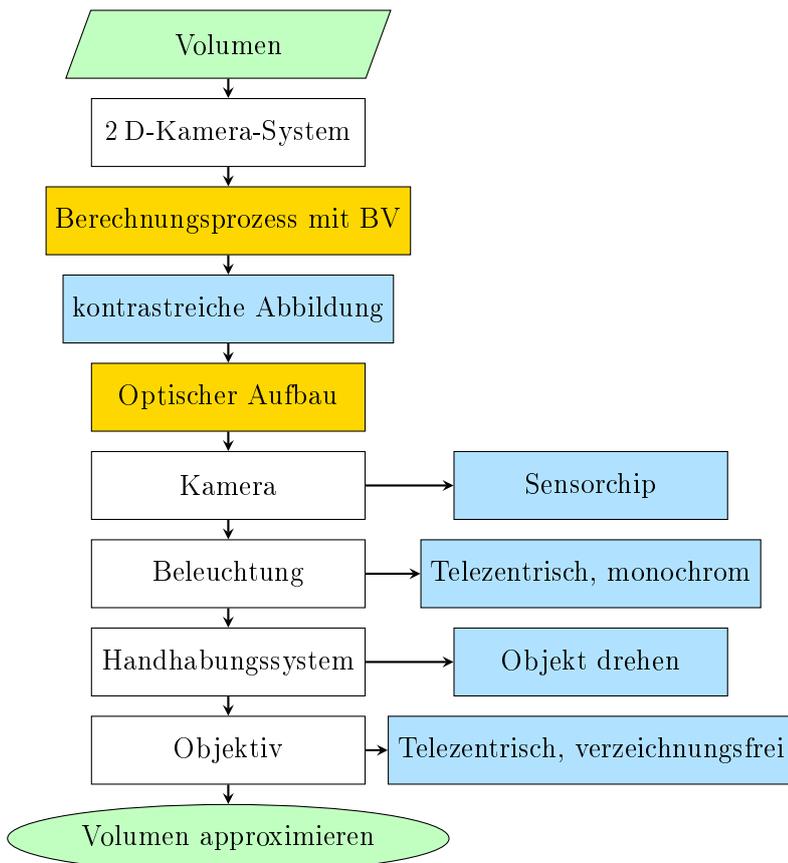


Abbildung 5.1.0.3.: Übersicht des 2D-Kamera-Konzepts in Form eines Flussdiagramms (blau = Kriterien, gelb = Abschnitte werden im Folgenden genauer erläutert)

des optischen Aufbaus beschrieben.

5.2. Berechnungsprozess

Zur Bestimmung des Volumens muss dieses in ausreichend viele Querschnitte zerlegt werden. Das Volumen wird anhand von Projektionen bestimmt. In [D W14] wird die Volumenberechnung mit Hilfe von Stützfunktionen erläutert. Dieser Ansatz kann jedoch für die Polymerstäbchen nicht verwendet werden. Für die Berechnung nach [D W14] muss sichergestellt werden, dass der Nullpunkt sich zwischen den einzelnen Aufnahmen bzw. Winkelschritten nicht ändert. Dies kann bei dem VI-Aufbau nicht garantiert werden. Die Mechanik müsste so ausgerichtet werden, dass die Nadelspitze, die das Objekt hält, bei der Drehung einen Kreis beschreibt, der den Durchmesser des Objektes hat. Somit würde der Mittelpunkt des Objektes immer an derselben Stelle sein. Dies ist jedoch nicht realisierbar. Zusätzlich haben nicht alle Objekte eine identische Breite und können variieren. Somit müsste für jedes Objekt der Mittelpunkt neu ausgerichtet werden, was einen viel zu hohen Aufwand bedeuten würde. Der Drehmittelpunkt wird zwischen den Winkelschritten um einige μm variieren. Dies würde bei dem Ansatz mit den Stützfunktionen zu vielen Fehlern führen. Aus diesem Grund wird in jeder Projektion nicht die Stützfunktion bestimmt, sondern die Breiten an vielen Querschnitten und die Länge.

Für eine möglichst präzise Erfassung des Objektes ist die Erfassung möglichst vieler Querschnitte wichtig, um Abweichungen von der erwarteten Form erkennen zu können. Aufgrund von Störfaktoren (Objekt wird mit einer Nadel gehalten), können allerdings nicht überall Profile für die Breitenmessung angelegt werden. Daher wird das Objekt in drei Abschnitte zerlegt. In dem Bereich, in dem das System das Polymerstäbchen festhält, ist eine Objektkante nicht zu sehen. Aus diesem Grund kann in diesem Bereich nicht gemessen werden (siehe Abbildung 5.2.0.1, nicht messbar). Durch den Schneidprozess können sich die Enden des Objektes leicht verformen bzw. entstehen Schnittkanten, die einen Winkel aufweisen können. Links und rechts neben der Halterung gibt es jeweils einen Bereich, in dem die Objektform von eventuell vorhandenen Schnittkanten nicht beeinflusst wird. Es hat sich gezeigt, dass dieser Bereich näherungsweise 60 % der Länge links bzw. rechts neben der Halterung ausmacht. In diesem Bereich werden an vielen Positionen die Breiten und somit die Querschnittsflächen bestimmt (siehe Abbildung 5.2.0.1, B-Bereich). In dem Bereich am Ende des Objektes werden die Querschnittsflächen separat betrachtet, um somit eine saubere Trennung der Bereiche zu garantieren (siehe Abbildung 5.2.0.1, S-Bereich). Die Bereiche sind in der Abbildung 5.2.0.1 dargestellt. Die Übersicht des Programmablaufs ist in dem Flussdiagramm in der Abbildung 5.2.0.2 dargestellt. Die Detektion und Berechnung der einzelnen Bereiche wird im Abschnitt 5.2.4, ab Seite 111ff, beschrieben. Da für die Berechnung des Volumens die Querschnitte an vielen Positionen betrachtet werden, um anschließend mit der Länge das Volumen zu approximieren, wird im folgenden die Ermittlung der Querschnitte genauer er-

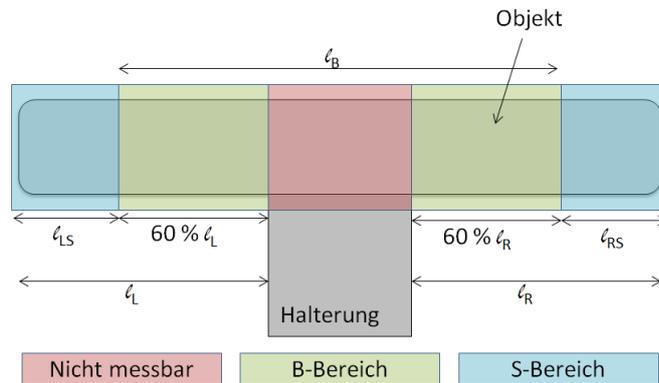


Abbildung 5.2.0.1.: Graphische Darstellung des Objektes auf der Halterung mit drei markierten Bereichen: rot = nicht messbar; grün = Breiten-Bereich (B-Bereich); blau = Schnittkanten-Bereich (S-Bereich).

läutert.

Für die Berechnung muss das Objekt im Bild lokalisiert werden (*Blob Analyse*¹). Anhand der gefundenen Region können alle anschließenden Positionen angepasst werden, da das Objekt bei der Drehung im Bild wandert. Im nächsten Schritt werden die Längenbereiche berechnet. Oben wird beschrieben, dass der S-Bereich jeweils 40% der Längen links bzw. rechts beträgt. Weiterhin wird die Objektkante detektiert, um somit die Rotation des Objektes im Bild zu ermitteln. Es wird zwischen der Objektkante O, der Kante im rechten Bereich (OBr) und der Kante im linken Bereich (OBl) unterschieden. Dies ist in der Abbildung 5.2.0.3 dargestellt.

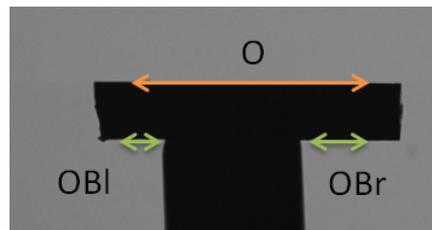


Abbildung 5.2.0.3.: Graphische Darstellung des Detektion der Objektkante O, der Objektkante im rechten Bereich OBr und im linken Bereich OBl

Im Schritt *Längenbereich berechnen* werden zuerst die Länge des Objektes und die Position der Halterung ermittelt. Anhand dieser Daten werden die Anfangs- und Endpunkte der Bereiche, die in der Abbildung 5.2.0.1 markiert sind, berechnet. An-

¹Ein Blob ist eine Gruppe von zusammenhängenden Pixeln, die denselben oder einen ähnlichen Grauwert haben [Jah03][S. 17].

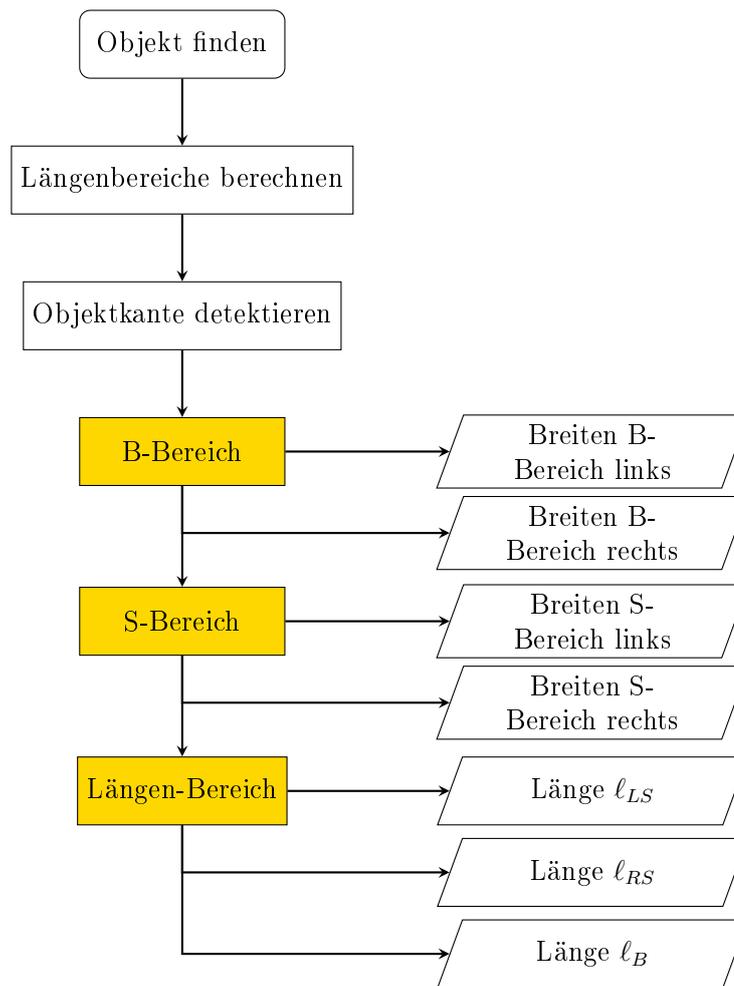


Abbildung 5.2.0.2.: Übersicht des Programmablaufs in Form eines Flussdiagramms; gelb = Abschnitte werden im Folgenden genauer erläutert

schließlich werden die Breiten für den B- und S-Bereich detektiert und abgespeichert, sowie die Längen für diese Bereiche.

5.2.1. Querschnittsfläche

Die Querschnittsflächen werden für alle Kantenpunkte über alle Winkelschritte ermittelt. Dafür wird jeder Kantenpunkt (Abbildung 5.2.3.1 und 5.2.4.5) als Querschnittspunkt Q_i angesehen. Für jeden Querschnitt werden über alle aufgenommenen Winkel die minimale b_{min} und maximale b_{max} Breite bestimmt. Anschließend wird für Q_i die Fläche F_i bestimmt, mit der Annahme, dass die Querschnittsform eine Ellipse ist.

$$F_i = \frac{\pi}{4} b_{i,min} \cdot b_{i,max}$$

Die Flächen der Querschnittspunkte im B-Bereich $F_{B,i}$ (Abbildung 5.2.3.1) werden zu einer mittleren Fläche verrechnet \bar{F}_B .

$$\bar{F}_B = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n F_{B,i},$$

wobei n für 190 (Querschnitte B links und B rechts), B für den B-Bereich und i für den Querschnittspunkt steht.

Für die Breiten des linken und rechten S-Bereiches werden separat die mittleren Flächen bestimmt.

$$\bar{F}_{LS} = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n F_{LS,i},$$

wobei n für 40 Punkte (linker oder rechter S-Bereich), LS für den linken S-Bereich und i für einen Querschnittspunkt steht.

5.2.2. Volumen

Für die Volumenbestimmung des Polymerstäbchens werden die Flächen aus dem vorherigen Abschnitt mit den berechneten Längen multipliziert. Eine Übersicht dazu zeigt das Flussdiagramm in der Abbildung 5.2.2.1.

Die Fläche des B-Bereiches wird mit der Länge ℓ_B multipliziert und die Flächen des linken und rechten S-Bereiches mit der passenden Länge der jeweiligen Seite (ℓ_{RS} bzw. ℓ_{LS}).

$$V_B = \bar{F}_B \cdot \ell_B$$

$$V_{LS} = \bar{F}_{LS} \cdot \ell_{LS}$$

$$V_{RS} = \bar{F}_{RS} \cdot \ell_{RS}$$

Anschließend werden die drei Volumina zum Gesamtvolumen V addiert.

$$V = V_B + V_{LS} + V_{RS}$$

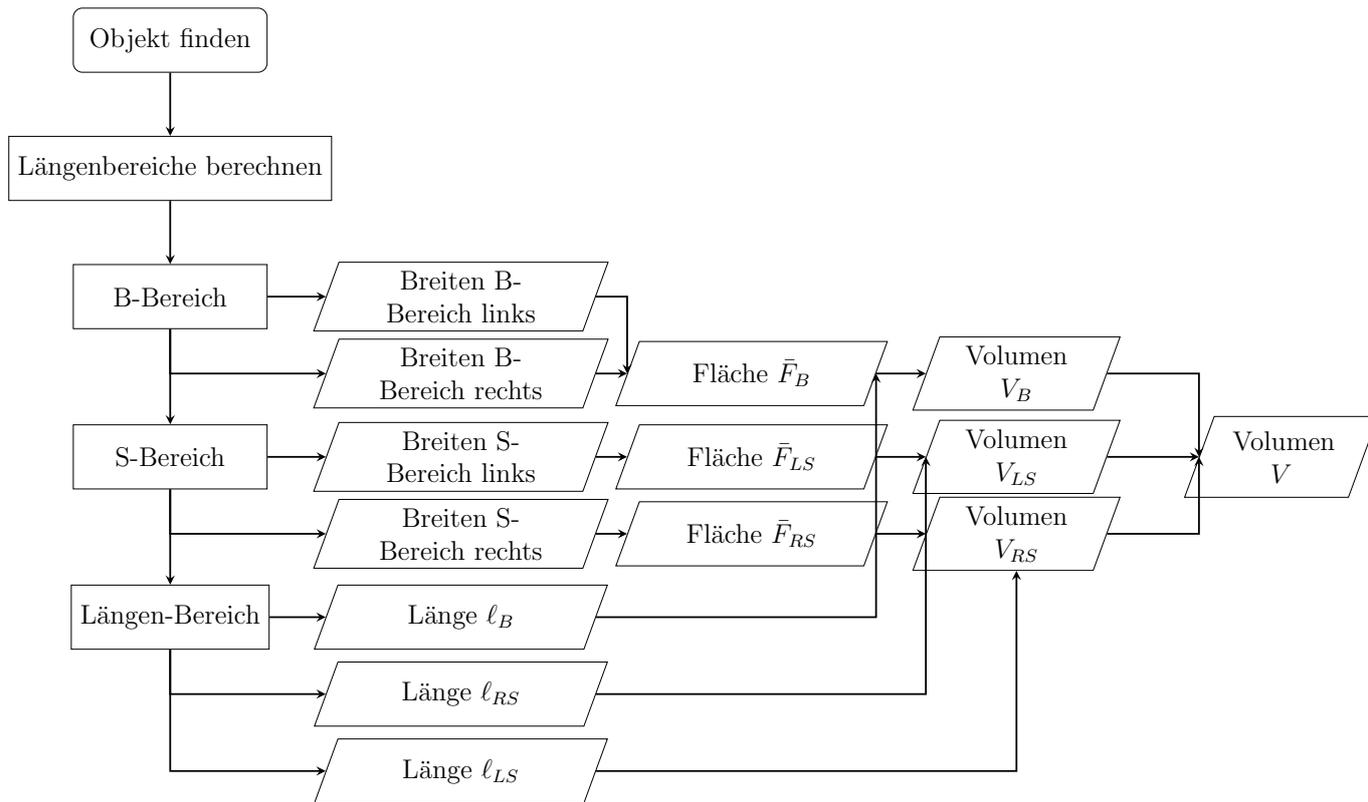


Abbildung 5.2.2.1.: Übersicht der Volumenberechnung in Form eines Flussdiagramms

5.2.3. Kantendefinition

Die Kante wird mit einem Interpolationsverfahren detektiert. Die Bildverarbeitung wird mit dem Programm *VisionPro* von *Cognex* realisiert. Dieses detektiert die Kanten mit einem Interpolationsverfahren. Dafür wird die Aufnahme in eine eindimensionale Anordnung von Pixeln reduziert. Dies entspricht einer Projektion durch Summieren der Pixelwerte entlang eines Strahls innerhalb des Projektionsbereiches [59].

Die Kantendetektion wird für einen ausgewählten Bereich durchgeführt. Die Kanten soll an vielen Punkten separat detektiert werden. Dadurch werden mehrere Messrechtecke benötigt. Falls Störungen bzw. Rauschen im Bild vorhanden sind, sollten diese nicht die Kontur stören. Damit diese Punkte beachtet werden, werden folgende Parameter vom Benutzer festgelegt: Suchbereich in y-Richtung und die Projektionslänge in x-Richtung; Anzahl an zu ignorierenden Punkten. Die ignorierenden Punkte bedeuten, dass diese Anzahl an Punkten, die den größten Abstand zur berechneten Ausgleichsgerade der Konturpunkte haben, nicht beachtet werden.

Der Anfangs- und Endpunkt der Suchregionen wird im Prozessschritt *Längenbereiche berechnen*, Abbildung 5.2.0.2 festgelegt. Für die Berechnung werden 100 Kantenpunkte auf jeder Seite der Halterung gesucht (Abbildung 5.2.3.1, a) und es dürfen jeweils fünf Punkte ignoriert werden (Abbildung 5.2.3.1, b und c, rote Markierungen).

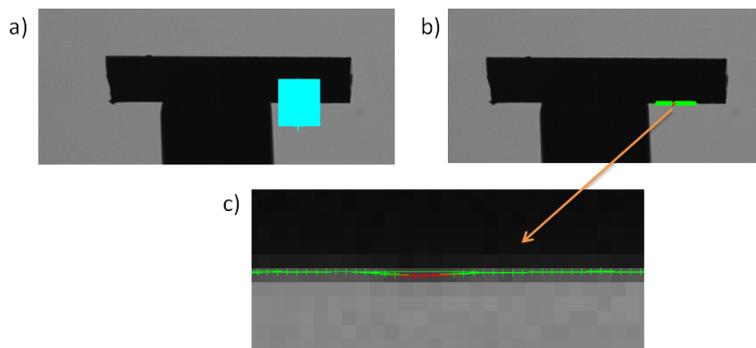


Abbildung 5.2.3.1.: Graphische Darstellung der Detektion der Kantenpunkte im rechten B-Bereich. Ein Suchbereich wird in dem Bereich aufgespannt (a) und das Ergebnis der gefundenen Kantenpunkte dargestellt (b). Ein vergrößerter Ausschnitt des Ergebnisses ist in c) zu sehen. Die rot markierten Punkte werden in der weiteren Berechnung nicht verwendet.

Die Kanten oder Kantenpaare werden in einem Bild mit einem einfachen 1D-Kernel-Filter detektiert (Filtermaske $[-1 \ 0 \ +1]$). Der Filter entspricht der ersten Ableitung einer Gaußschen Verteilung [Ohs18][S. 86]. Die Position des Wendepunktes der ersten Ableitung entspricht der Maximumposition der Gaußkurve und dies entspricht der Kantenposition. Diese kann somit subpixelgenau bestimmt werden. Jedoch werden nicht nur die Objektkanten dargestellt, sondern auch das Rauschen, welches in den Bildern vorhanden sein kann. Im besten Fall sollte das Anwenden des Ableitungsfilters die Kanten hervorheben und das Rauschen unterdrücken. Folgende drei Parameter können die Detektion der Kanten beeinflussen: Polarität, Kontrastschwellwert und Filtergröße.

Mit Hilfe der Polarität kann festgelegt werden, ob der gesuchte Kantenübergang einen hell-dunkel oder dunkel-hell Übergang hat. Mit dem Kontrastschwellwert kann die minimale Peakhöhe definiert werden. Alle Peaks, die niedriger sind, als das angegebene Minimum, werden unterdrückt. Dadurch kann die Analyse der Kanten im Bild auf eine gewisse Größe beschränkt werden.

Für die Filtergröße sollte eine Größe angegeben werden, die der Breite der Kante im Eingangsbild entspricht. Werden Kanten scharf abgebildet, kann der Übergang nur ein bis zwei Pixel betragen. Liegt eine unscharfe Kante vor, kann diese viele Pixel

umfassen. In der Abbildung 5.2.3.2 sind eine scharfe und unscharfe Kante und die Auswirkungen auf die Funktion mit unterschiedlichen Filtergrößen dargestellt.

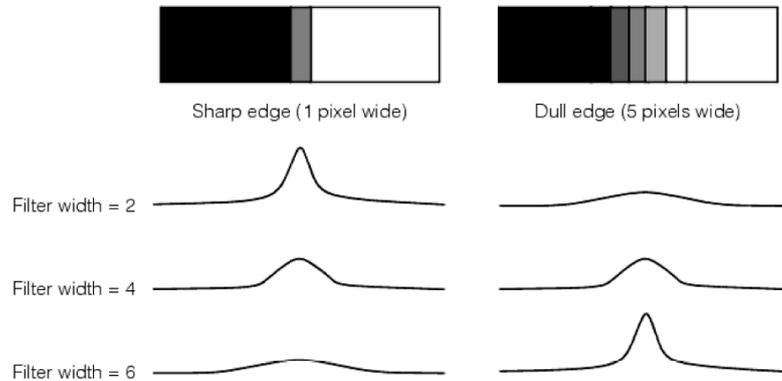


Abbildung 5.2.3.2.: Graphische Darstellung einer scharfen Kante (links) und einer unscharfen Kante (rechts), sowie das Ergebnis der Filterung mit unterschiedlichen Filtergrößen (2, 4 und 6) [59]

Liegt die Filtergröße nah an der Kantengröße, erzeugt die Berechnung ausgeprägte Peaks im Filterbild (siehe Abbildung 5.2.3.2, links, Filtergröße 2 bzw. rechts, Filtergröße 6). Ist die Filtergröße zu klein oder zu groß, enthält das Filterbild niedrigere bzw. breite Peaks. Dies ist in der Abbildung 5.2.3.2 für die scharfe Kante mit der Filtergröße 6 zu erkennen und für die unscharfe Kante mit der Filtergröße 2.

Für die Filterung wird das 1D Projektionsbild mit dem Filteroperator gefaltet. Dies ist an einer Beispielkante in der Abbildung 5.2.3.3 dargestellt. Für jeden vorher definierten Suchbereich ergibt sich ein Graph mit den gefilterten Pixelwerten. Das Ergebnis kann als Graph dargestellt werden (Abbildung 5.2.3.3, Filtered output und Graph of filtered output). Dieser Graph wird verwendet, um die Position der Kanten zu definieren. In der Abbildung 5.2.3.4 ist eine Kante mit Rauschen dargestellt, sowie die Ergebnisse nach der Filterung mit einer *FilterHalfSize* 1 (links) und 2 (rechts). Es ist bekannt, dass bspw. Tiefpassfilter Rauschen unterdrücken bzw. eliminieren können, jedoch die Kanten dadurch breiter werden (mehr Informationen [42]). Wird in dem Beispiel ein Filter der Größe 1 auf das Bild angewendet, erscheinen sowohl die relevanten Kanten als auch die störenden Kanten als Spitzen im gefilterten Bild (Abbildung 5.2.3.4, links). Würde ein Filter mit einer größeren Breite verwendet werden, würden die Peaks der relevanten Kanten breiter, und die meisten störenden Peaks wären im gefilterten Bild nicht mehr zu sehen.

Der relevante Bereich muss nicht parallel zum Pixelraster liegen, sondern kann auch eine Rotation aufweisen. Die Pixel für den Projektionsgraphen werden mit Hilfe der

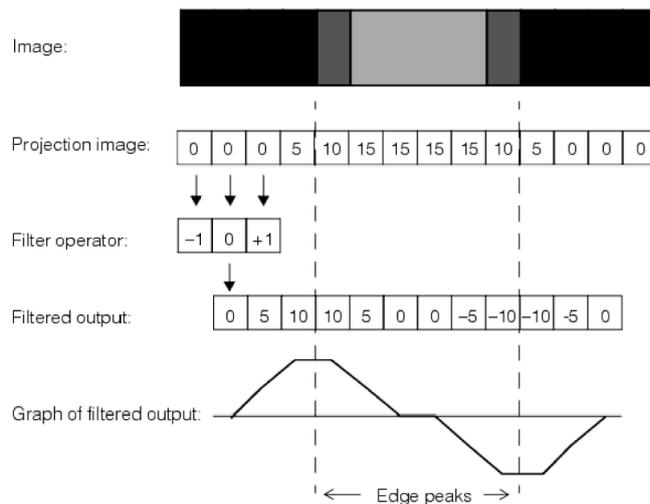


Abbildung 5.2.3.3.: Graphische Darstellung des Projektionsgraphen und Berechnung des Filtergraphen [59]

benachbarten Grauwerte berechnet. Dazu wird die Maske aus der Abbildung 5.2.3.5 verwendet.

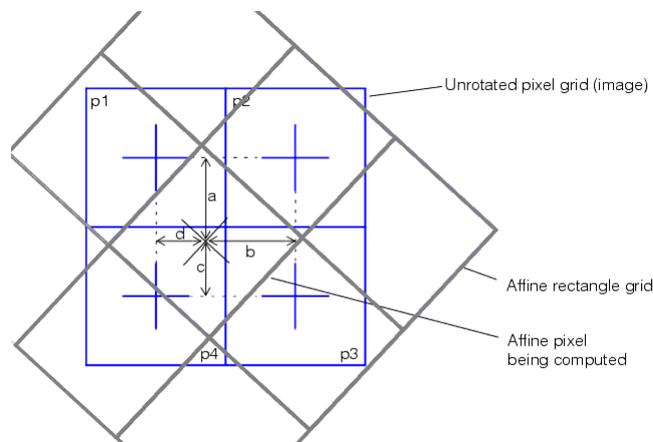


Abbildung 5.2.3.5.: Graphische Darstellung der Berechnungsmaske für die Berechnung der Pixelwerte, wenn der Suchbereich einen Rotation zum Pixelraster aufweist [59]

Die grau gekennzeichneten Rechtecke zeigen das Raster der interessanten Region. Die blau markierten Rechtecke spiegeln die Pixel wider. Für das mittlere graue Rechteck soll der Grauwert berechnet werden. Dazu werden die Abstände a, b, c und d vom Mittelpunkt zu den Verbindungen der Pixelmittelpunkte benötigt, sowie

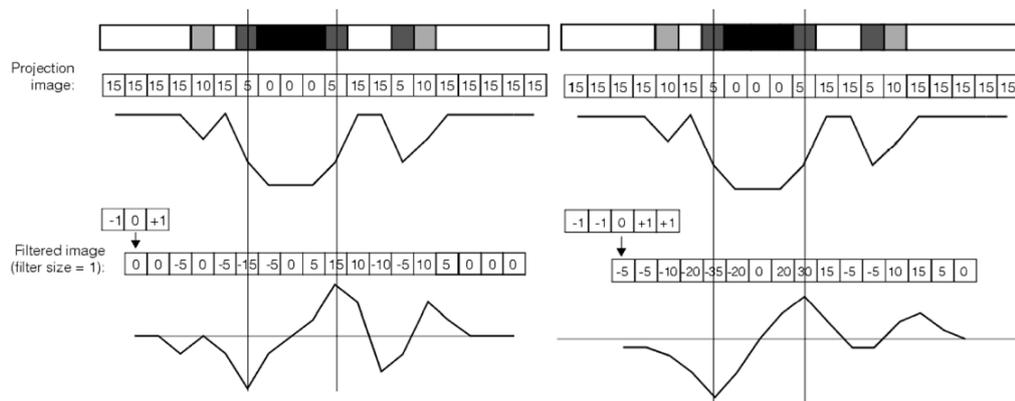


Abbildung 5.2.3.4.: Graphische Darstellung einer Kante mit Rauschen, sowie die Ergebnisse der Filterung mit einer *FilterHalfSize* 1 (links) und 2 (rechts) [59]

die Grauwerte der vier Pixel p_1 , p_2 , p_3 und p_4 . Der Grauwert GW für das mittlere Rechteck berechnet sich aus folgender Formel:

$$GW = (1 - \alpha)(p_2 \cdot (1 - b) + p_1 \cdot b) + a \cdot (p_3 \cdot (1 - b) + p_4 \cdot b). \quad (5.1)$$

Diese Berechnung wird für den kompletten Suchbereich durchgeführt und daraus ergibt sich der gefilterte Graph, an dem die Wendepunkte zur Kantendetektion berechnet werden.

Die Lage der Kanten in den Abbildungen wird in Bruchteilen eines Pixels gemessen. Eine Kante wird beispielsweise an sechs Pixelpositionen detektiert. Zwischen den Punkten wird eine Interpolation berechnet, die den Verlauf zwischen den Stützstellen annähert. Mit Hilfe der Information der Nachbarpixel kann die Genauigkeit in der Kantenbestimmung somit gesteigert werden. Die Wendepunkte der Interpolationsfunktion spiegeln die Kantenpositionen wieder. Ein grundsätzlicher Aspekt ist die Sicherstellung, dass die ermittelte Position frei von anderen Störfaktoren ist, wie z.B. die perspektivische oder optische Verzeichnung, inhomogene Beleuchtung, Signalrauschen und die Geometrie des Pixelrasters [43][S. 50ff].

5.2.4. Unterteilung des Objektes

Die Abbildung 5.2.0.1, Seite 104, zeigt die Unterteilung des Objektes in Bereiche. Im Folgenden wird die Breiten-, Schnittkanten- und Längen-Bereich-Berechnung erläutert. Davor wird der Bereich beschrieben, in dem nicht gemessen werden kann durch die Verdeckung der Halterung.

Nicht messbarer Bereich

Das Polymerstäbchen wird mit Hilfe einer Halterung gehalten und gedreht. Die Vakuumnadel verdeckt einen Teil des Objektes (Durchmesser Nadel $520\ \mu\text{m}$). Bei einer mittleren Objektlänge von $1309\ \mu\text{m}$ entspricht dies einer Verdeckung von näherungsweise 40 %. Für die Volumenauswertung muss garantiert sein, dass das Objekt im verdeckten Bereich keine Breitenschwankungen durch den Produktionsprozess aufweist.

Für die Überprüfung wird eine baugleiche Kamera (Baumer VLG-22M) verwendet, wie für den VI-Aufbau, ein bi-telezentrisches Objektiv (Opto engineering - TC23004), sowie eine Durchlichteinheit (weiß). Die Abbildung 5.2.4.1 zeigt den schematischen Aufbau.

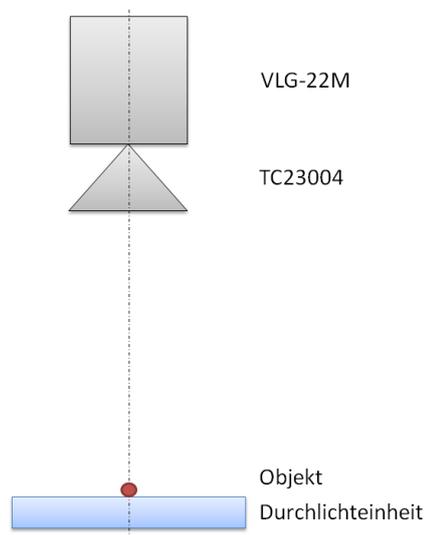


Abbildung 5.2.4.1.: Schematische Darstellung des optischen Aufbaus zur Überprüfung der Breite entlang der Objektachse

Zuerst wird ein Kalibriertarget auf der Durchlichteinheit positioniert und der Kalibrierungsfaktor bestimmt ($2,755\ \mu\text{m}/\text{Pxl}$).

Ein Polymerstäbchen wird auf der Platte positioniert und ein Bild aufgenommen. Die Abbildung 5.2.4.2 zeigt einen Ausschnitt des Bildes.

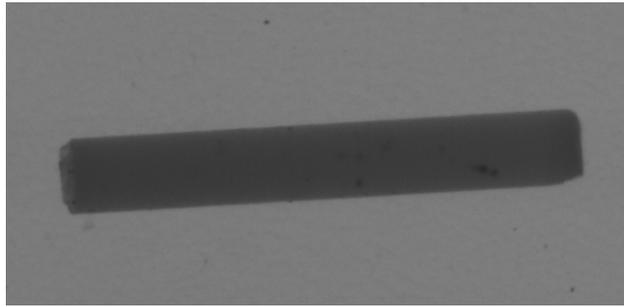


Abbildung 5.2.4.2.: Ausschnitt der Aufnahme eines Polymerstäbchens auf einer Durchlichteinheit

Die Kanten werden an 45 Punkten (Querschnitten) wie beschrieben detektiert und die Breiten bestimmt. Der Graph zeigt die Breiten des Objektes entlang der Längsachse.

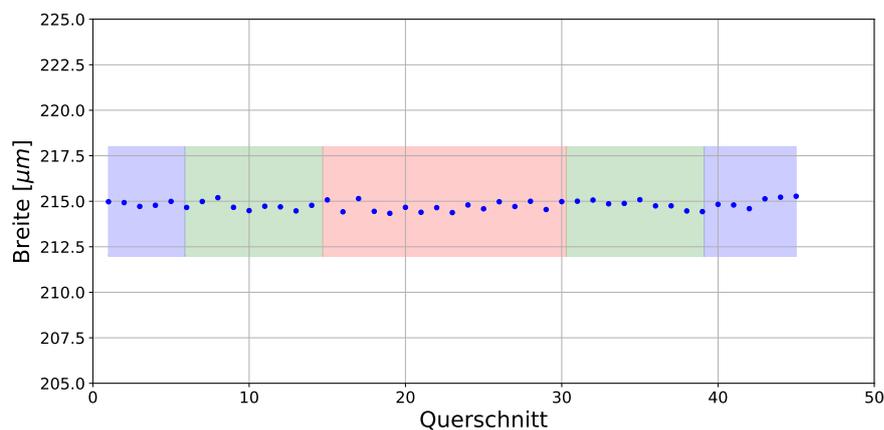


Abbildung 5.2.4.3.: Graphische Darstellung der Breite entlang der Objektachse. Die im Abschnitt 5.2, Seite 103, definierten Bereiche sind farblich markiert: blau = S-Bereich, grün = B-Bereich, rot = nicht messbar.

Im Abschnitt 5.2, Seite 103, ist beschrieben, dass die Volumenberechnung in mehreren Bereichen eingeteilt ist. Damit erkennbar ist, welche gemessenen Breiten zu welchem Bereich gehören, sind diese in dem Graphen (Abbildung 5.2.4.3) markiert. Der Breitenverlauf zeigt, dass die Breite sich entlang der Objektachse nicht signifikant ändert. Der Mittelwert über alle Werte beträgt $214,78 \mu\text{m}$. Werden die Werte nur im B-Bereich beachtet, beträgt der Mittelwert $214,79 \mu\text{m}$. Es kann somit ausgeschlossen werden, dass es offensichtliche Unterschiede gibt. Sollte jedoch ein Polymerstäbchen im mittleren Bereich Störungen (Ausbuchtungen oder ähnliches haben) würden diese nicht detektiert werden.

Breiten-Bereich

Für den B-Bereich werden an insgesamt 190 Punkten die Breiten bestimmt. Diese Punkte spiegeln die Querschnitte wider. Da an jedem dieser Punkte die Breite für jeden Winkel bestimmt wird. Somit ist es möglich, dass Objekt sehr genau abzutasten und somit mögliche Breitenschwankungen zu detektieren. Die Berechnung der Breiten verläuft links und rechts neben der Halterung identisch (jeweils 95 Punkte). Der Ablauf ist im Flussdiagramm in der Abbildung 5.2.4.4 dargestellt.

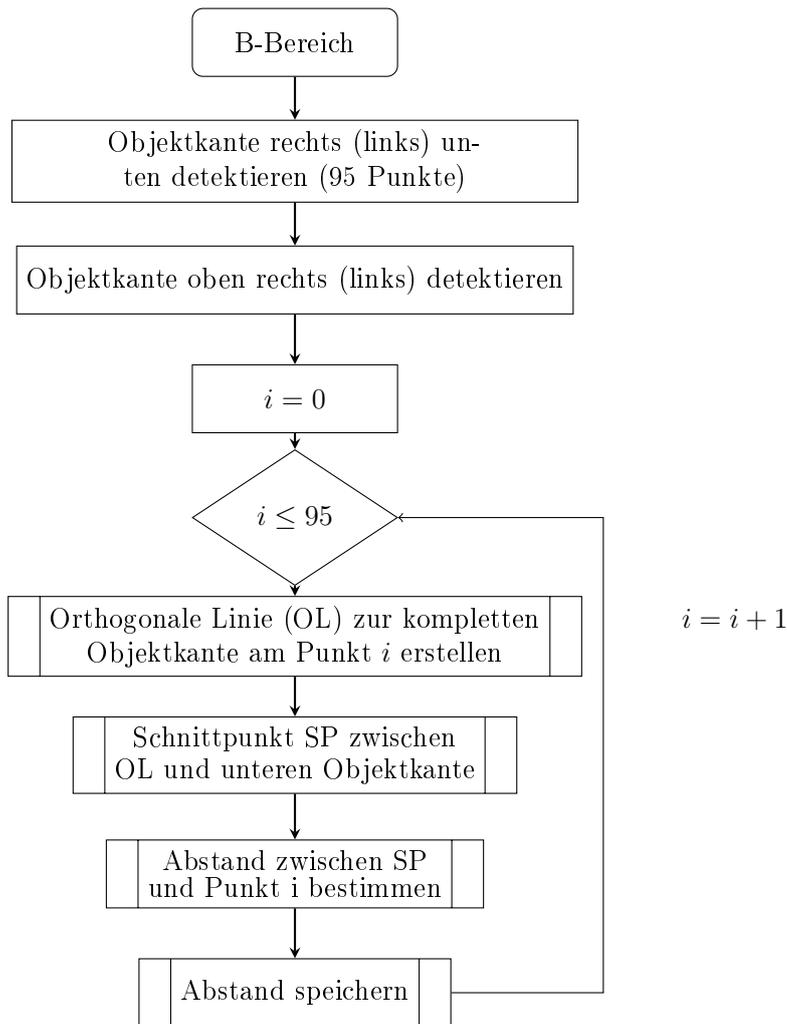


Abbildung 5.2.4.4.: Übersicht der Breitenmessung im B-Bereich in Form eines Flussdiagramms

Schnittkanten-Bereich

Der S-Bereich definiert die Endfacetten des Objektes. Durch den Schneideprozess kann nicht garantiert werden, dass die Schnittkanten senkrecht zur Längsachse des Objektes verlaufen. Würde nur der mittlere Bereich für die Querschnittfläche betrachtet und mit der Länge multipliziert werden, würde dies das Ergebnis verfälschen, wenn die Schnittkanten Winkel aufweisen. Dann würde es sich nicht um einen vollständigen Zylinder handeln, der jedoch von der Berechnung dann als Grundlage verwendet werden würde. Aus diesem Grund ist es wichtig, die Schnittkanten zu betrachten und in diesem Fall separat.

Die Detektion der Bereiche verläuft wie die Breitenbestimmung im B-Bereich. Der Unterschied liegt in der Position und dass nur 50 Kantenpunkte gesucht werden, wobei fünf Punkte wiederum ignoriert werden. Ein Beispielergebnis der gefundenen Kantenpunkte ist in der Abbildung 5.2.4.5 dargestellt.

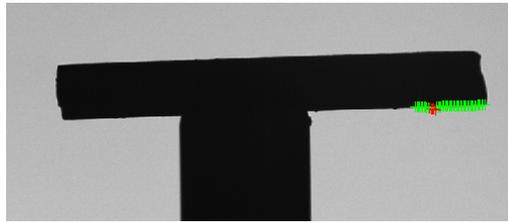


Abbildung 5.2.4.5.: Graphische Darstellung der Detektion der Kantenpunkte für den rechten S-Bereich

Die separate Betrachtung ist für den besseren Überblick, wie viel die Schnittkanten im Volumen ausmacht. Weiterhin können so Berechnung mit unterschiedlichen Annahmen (mit separater Schnittkantenbetrachtung, ohne, unterschiedliche Schnittwinkel zulassen) schneller realisiert werden.

Längen-Bereich

Im vorherigen Abschnitt ist erwähnt, dass die Randbereiche separat betrachtet werden, da die Schnittkanten oft Winkel aufweisen. Würde nur eine Länge mit der mittleren Fläche multipliziert werden, würde es zu Fehler kommen, da somit wieder ein kompletter Zylinder zu Grunde gelegt wird. Aus diesem Grund werden drei Längen benötigt, um das Volumen für jeden Bereich zu ermitteln, die am Ende addiert werden. Die drei Längen sind: eine für den B-Bereich und zwei für die S-Bereiche. Die Länge ℓ_B beinhaltet die B-Bereiche sowie den nicht messbaren Bereich (siehe Abbildung 5.2.0.1 grün und rot). Die Länge ℓ_{LS} steht für den linken S-Bereich und ℓ_{RS} für die Länge des rechten S-Bereiches. Mit Hilfe der Vorkenntnisse aus dem *Längenbereich berechnen*, können die Suchbereiche für die einzelnen Längen positioniert werden.

Zuerst werden die Schnittkanten zwischen den B- und S-Bereichen festgelegt. Die sind in der Abbildung 5.2.4.6 gezeigt.

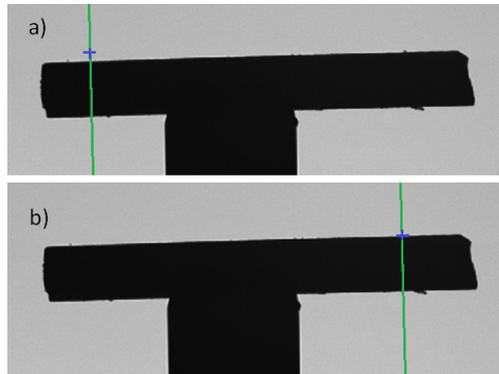


Abbildung 5.2.4.6.: Graphische Darstellung der Schnittkanten zwischen den B- und S-Bereichen links (a) und rechts (c)

Der Abstand dieser beiden Linie ergibt die Länge ℓ_B . Diese ist für das Beispiel in der Abbildung 5.2.4.7 eingezeichnet.



Abbildung 5.2.4.7.: Graphische Darstellung der Länge ℓ_B der B-Bereiche, sowie dem nicht messbaren Bereich

Im nächsten Schritt wird die rechte Schnittkante angetastet (40 Kantenpunkte, 10 ignorieren). Ein Ergebnis der Kantendetektion ist in der Abbildung 5.2.4.8 dargestellt.



Abbildung 5.2.4.8.: Graphische Darstellung der Schnittkantenantastung auf der rechten Objektseite

Der anschließende Ablauf ist als Flussdiagramm in der Abbildung 5.2.4.9 zusammengestellt.

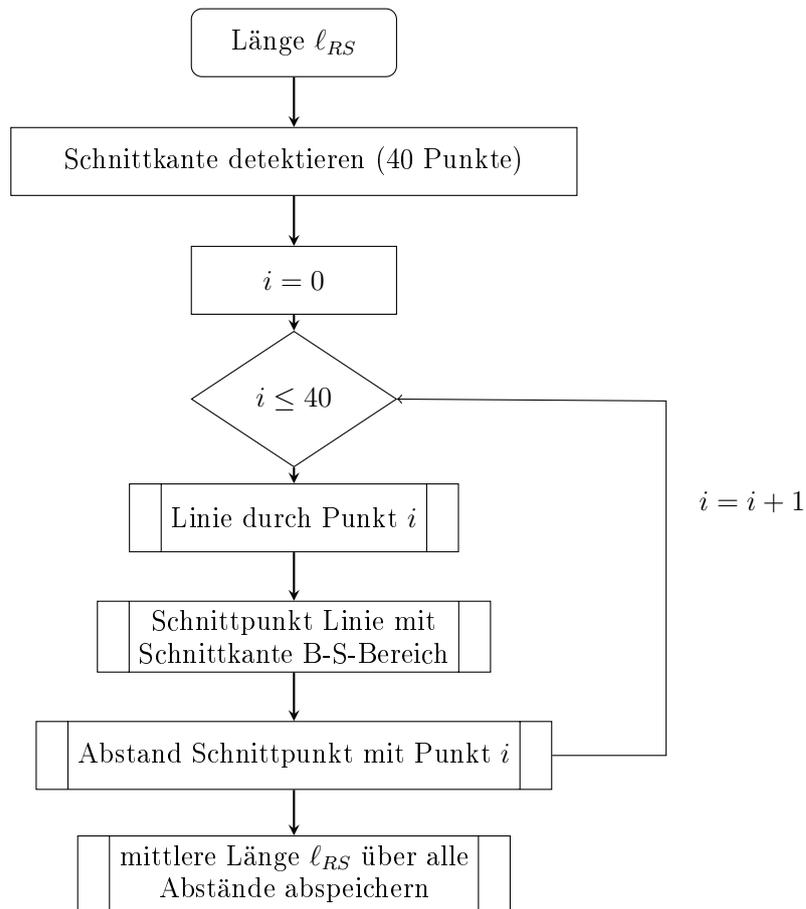


Abbildung 5.2.4.9.: Übersicht der Längenmessung im SL-Bereich in Form eines Flussdiagramms

Für jeden Punkt der Schnittkante wird eine Linie parallel zur Objektkante erzeugt und der Schnittpunkt mit der Schnittkante B-S-Bereich ermittelt (siehe Abbildung 5.2.4.10, a und b).

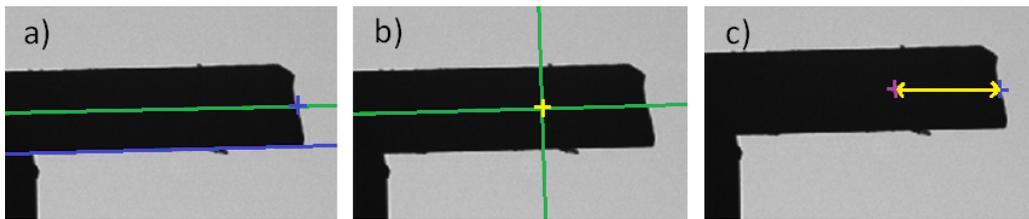


Abbildung 5.2.4.10.: Graphische Darstellung der Längendetektion im rechten S-Bereich. Parallele Linie durch jeden Kantenpunkt zur Objektkante (a); Schnittpunkt dieser Linie mit der Schnittkante B-S-Bereich (b); Abstand des Schnittpunktes mit dem Kantenpunkt (c).

Der Abstand zwischen dem Schnittpunkt und dem Kantenpunkt ist die Länge ℓ_{RS} an diesem Punkt (siehe Abbildung 5.2.4.10, c). Dieser Ablauf wird mit allen gefundenen Kantenpunkten durchgeführt und anschließend die mittlere Länge über die 40 Längen bestimmt.

Dasselbe Verfahren wird für die linke Objektseite durchgeführt.

Weiterhin wird der Winkel der Schnittkanten zur Objektkante gespeichert. Dazu wird der Winkel zwischen der Schnittkante aus Abbildung 5.2.4.8 zur Objektkante bestimmt. In der Abbildung 5.2.4.11 ist ein ermittelter Winkel an einem Beispiel dargestellt.

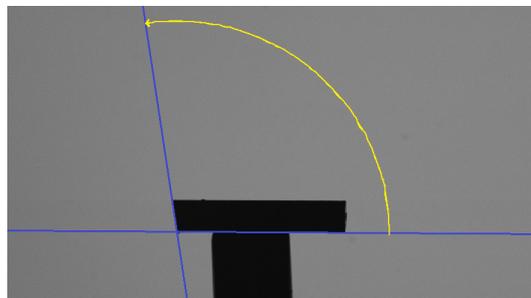


Abbildung 5.2.4.11.: Graphische Darstellung der Winkeldetektion zwischen der Objektkante und der Schnittkante (= $98,84^\circ$)

Im idealen Fall beträgt der Winkel 90° . In der Spezifikation ist festgelegt, dass die Schnittkante maximal einen Winkel von $\pm 15^\circ$ an einer optimalen Kante aufweisen darf. Für die anschließende Bewertung des Polymerstäbchens wird der maximale erfasste Schnittwinkel über alle Winkelaufnahmen verwendet um das Objekt als gut oder schlecht einzustufen. Sobald ein Winkel des Objektes 15° überschreitet, wird dieses Objekt nicht für die weitere Auswertung verwendet.

5.3. Technischer Aufbau

Der technische Aufbau stellt sicher, dass das Berechnungskonzept richtig umgesetzt werden kann und die Bilder in der nötigen Qualität und Ausprägung bereit gestellt werden. Wichtig für den Aufbau sind der Sensor, die Optik, die Beleuchtung und die Handhabung der Objekte. Die einzelnen Komponenten werden im Folgenden erläutert.

5.3.1. Kamera

Es stehen zwei Kameras zur Verfügung: VLG-12C und VLG-22M von *Baumer*. Die wichtigsten Daten der Kameras sind in der Tabelle 5.3.1.1 dargestellt.

	VLG-12C	VLG-22M
Auflösung [Pxl]	1288 x 960	2040 x 1084
Sensor	Sony ICX445	CMV2000
Pixelgröße [μm]	3,75 x 3,75	5,5 x 5,5
Sensortyp	1/3" CCD	2/3" CMOS
Framerate [fps]	max. 42	max. 55
Farbmodelle	RGB	Mono

Tabelle 5.3.1.1.: Auflistung der wichtigsten Daten für die *Baumer* Kameras VLG-12C [30] und VLG-22M [31]

Die VLG-22M hat eine größere Pixelanzahl und größere Pixel. Weiterhin hat sie eine höhere Framerate im Vergleich zur VLG-12C. Ein weiterer Unterschied zwischen den beiden Kameras sind die verbauten Sensoren. In der *Baumer* VLG-12C Kamera ist ein CCD-Chip² und in der VLG-22M ein CMOS-Chip³ verbaut. Mehr Informationen bezüglich den Gemeinsamkeiten und Unterschieden zwischen den beiden Sensorarten können in [45][S. 249f] und [Jah03][S. 19] nachgelesen werden.

In der Tabelle 5.3.1.2 sind die wichtigsten Eigenschaften der beiden verwendeten Sensoren gegenüber gestellt.

²Charge-coupled Device [Jah03][S. 19]

³Complementary Metal Oxide Semiconductor [Jah03][S. 19]

	ICX445	CMV2000
Kamera	VLG-12C	VLG-22M
Dunkelrauschen [e^-]	8,6	13
Sättigungskapazität [e^-]	7000	13500
Dynamikbereich [db]	57,8	60

Tabelle 5.3.1.2.: Auflistung der wichtigsten Daten für die Sensoren ICX445 (VLG-12C) [49] und CMV2000 (VLG-22M) [34]

Im Abschnitt 4.1.1 ist beschrieben, welche Eigenschaften der Kamerasensor haben sollte:

- große Pixelgröße,
- je höher *Full well Kapazität*, desto besser ist das maximale Signal-Rausch-Verhältnis,
- großen Dynamikbereich.

Die Kamera VLG-22M ist in allen Punkten besser, wie die VLG-12C: größere Pixelgröße ($5,5\ \mu\text{m}$ zu $3,75\ \mu\text{m}$), höhere Sättigungskapazität ($13500\ e^-$ zu $6421\ e^-$) und der Dynamikbereich ist etwas besser (60 db zu 56,77 db). Zusätzlich braucht VLG-12C (C = color) bis zu vier Mal mehr Licht, als eine vergleichbare Monochrom-Kamera. Aus diesen Gründen wird für den optischen Aufbau die Kamera VLG-22M verwendet.

5.3.2. Beleuchtung

Für die Vermessung des Objektes sind die Außenmaße relevant. Damit die Kanten bestmöglich abgebildet werden, wird eine Durchlichteinheit verwendet, die das Objekt von hinten beleuchtet. Im Abschnitt 4.1.1 sind die Abbildungsfehler erläutert. Damit es zu keiner chromatischen Abweichung kommt, wird eine monochromatische Lichtquelle verwendet. Eine unverzichtbare Eigenschaft der Beleuchtung ist die Telezentrie. Es wird ein telezentrisches Durchlicht von *Sil* verwendet. Die Tabelle 5.3.2.1 listet die wichtigsten Daten auf.

LED Wellenlänge:	660 nm
Effektive Brennweite:	30 mm
Empfohlener Arbeitsabstand:	15 mm - 75 mm

Tabelle 5.3.2.1.: Auszug aus dem Datenblatt des telezentrischen Durchlichts von *Sil* [57]

Die Objektive sind im grünen Wellenlängenbereich am besten korrigiert. Tests haben ergeben, dass es für das verwendete bi-telezentrische Objektiv keine signifikanten Unterschiede für den roten und grünen Wellenlängenbereich gibt. Ohne Einschränkungen für die Qualität kann somit auch diese Beleuchtung gewählt werden. Der Vorteil telezentrischer Beleuchtung in der Kombination mit telezentrischen Objektiven ist, dass die Kanten sauber dargestellt und nicht durch Beugungseffekte negativ beeinflusst werden.

5.3.3. Handhabungssystem

Das Handhabungssystem sollte das Objekt halten, ohne dass die Schnittkanten verdeckt werden. Es sollte weiterhin das Polymerstäbchen um sich selbst drehen und im optimalen Fall keine zu hohen Abweichungen bzgl. des Drehmittelpunktes haben. Ansonsten müssten Objektive mit deutlich höherer Schärfentiefe gewählt werden. Das Handhabungssystem besteht aus einer Halterungsvorrichtung. Diese hält das Objekt an einer Nadelspitze mit Vakuum. Zusätzlich ist ein Motor mit Encoder angeschlossen, der die Halterungsvorrichtung drehen kann. Dies ist in der Abbildung 5.3.3.1 dargestellt.

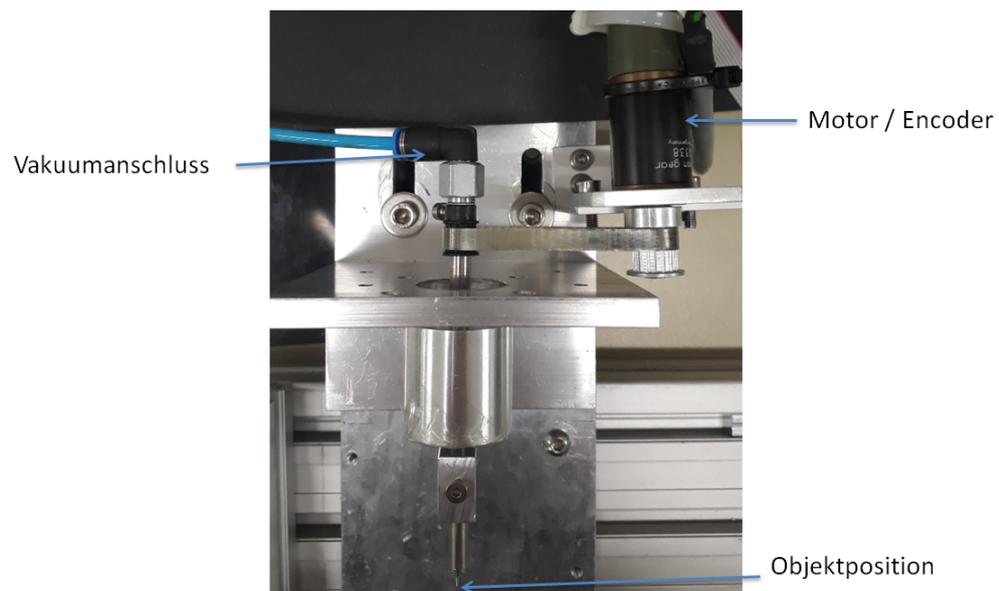


Abbildung 5.3.3.1.: Darstellung des Handhabungssystems, bestehend aus einem Motor / Encoder, einem Vakuumanschluss und einer Halterungsvorrichtung, an der das Objekt mit Vakuum gehalten wird

Durch die Halterungsvorrichtung wird das Vakuum bis zur Nadelspitze, an der das Objekt positioniert wird, geleitet. An der Halterung ist eine Nadel mit einem Au-

ßendurchmesser von 520 µm angebracht. Die Nadel hat die im Abschnitt 4.1.1 beschriebene V-Nut. Die Spitze der Nadel und somit die Position des Objektes bildet den Drehmittelpunkt der Halterungsvorrichtung. Die Abbildung 5.3.3.2 zeigt die seitliche Ansicht der Vorrichtung.

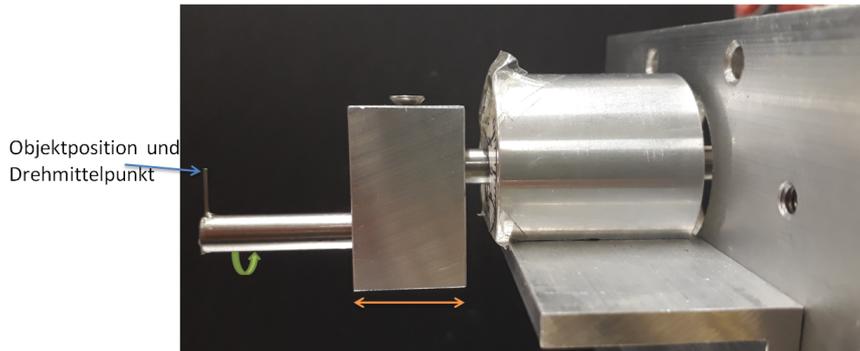


Abbildung 5.3.3.2.: Darstellung der Seitenansicht der Halterungsvorrichtung. Es kann die horizontale Objektposition im Bild angepasst (orange) und der Drehmittelpunkt des Objektes justiert werden (grün)

Durch den Aufbau ist gesichert, dass der Objektmittelpunkt bei der Drehung näherungsweise an derselben Position bleibt (max. $\Delta = 240 \mu\text{m}$). Dadurch muss das Objektiv bei der Drehung nicht nachgeführt werden bzw. der benötigte Schärfentiefebereich ist deutlich geringer, als würde der Mittelpunkt des Objektes stärker wandern.

Es kann die horizontale Objektposition im Bild angepasst werden, indem die Halterung in Richtung der Lagerung verschoben wird (Abbildung 5.3.3.2, orange). Zusätzlich kann der Drehmittelpunkt justiert werden. Dazu kann die Halterung der Vakuumnadel, wenn das Vakuum ausgeschaltet ist, durch Drehen angepasst werden (Abbildung 5.3.3.2, grün).

Im Abschnitt 4.1.1 wird erläutert, dass die V-Nut an der Nadel für die Objektposition sehr wichtig ist. Wenn die V-Nut nicht gegenüber der Kamera gefluchtet ist, kann es zu Auswertungsfehler kommen. Auch wenn ein telezentrisches Objektiv verwendet wird, kann es einen Telezentriefehler geben [69]. Aus diesem Grund wird ein Strichgitter aufgenommen, wenn das Handhabungssystem orthogonal zur Grundplatte und somit zur Kamera steht. Dies ist in der Abbildung 5.3.3.3, a) abgebildet. Im nächsten Schritt wird das Handhabungssystem und somit das darauf positionierte Strichgitter um einen Winkel α gedreht und das Gitter aufgenommen (siehe Abbildung 5.3.3.3, b).

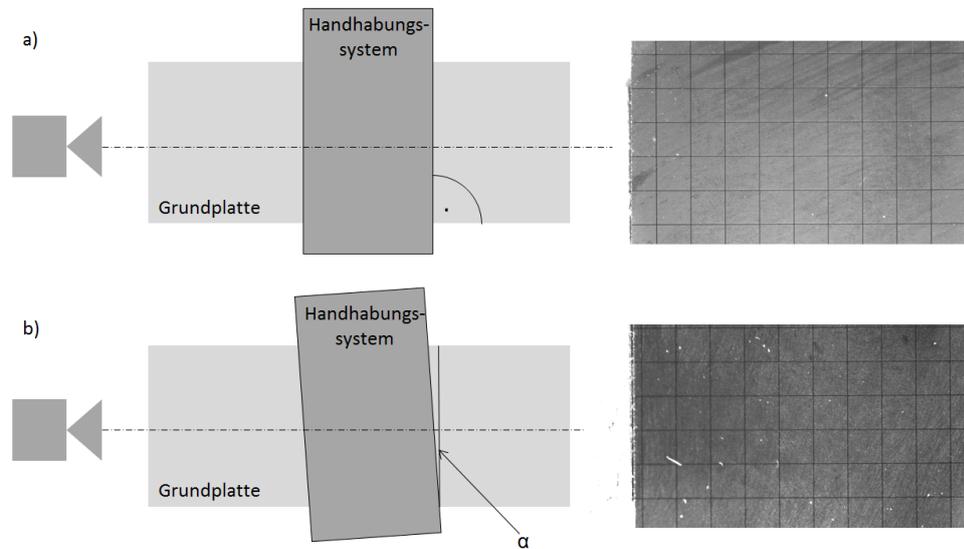


Abbildung 5.3.3.3.: Graphische Darstellung des optischen Aufbaus mit orthogonal ausgerichtetem Handhabungssystem (a) und einem Ausschnitt der dazugehörigen Strichgitteraufnahme (oben, rechts), sowie um einen Winkel α verkipptem Handhabungssystem (b) mit der dazugehörigen Strichgitteraufnahme (unten, rechts)

Die Abstände des Strichgitters sind bekannt ($500\ \mu\text{m}$). Um einen Einfluss des verkippten Systems zu ermitteln, wird der Verlauf des Kalibrierungsfaktors⁴ in vertikaler Richtung berechnet. Es wird vertikal der Abstand zwischen der fünften und der ersten Linie an vielen Punkten gemessen. An jedem Punkt kann der Kalibrierungsfaktor bestimmt werden. Dies wird für beide Aufnahmen durchgeführt. Die Abbildung 5.3.3.4 zeigt den Verlauf des Kalibrierungsfaktors entlang der y-Achse im Bild.

⁴Der Kalibrierungsfaktor legt das Verhältnis zwischen der Pixelgröße und der Objektgröße fest [Jah03][S. 44].

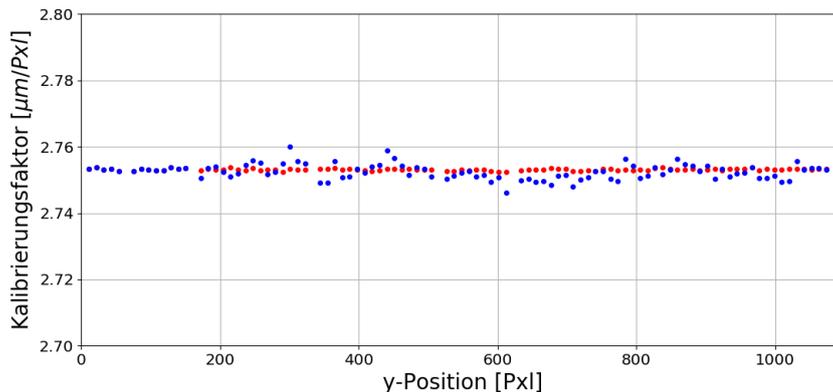


Abbildung 5.3.3.4.: Graphische Darstellung des Kalibrierungsfaktors über der y-Position wenn das Handhabungssystem orthogonal zur Grundplatte positioniert ist (rot) und wenn es um einen Winkel $\alpha = 2,4^\circ$ verkippt ist (blau)

Über alle Punkte kann die Standardabweichung und die prozentuale Abweichung A zum Faktor von $2,75 \mu\text{m}$ bestimmt werden. Dasselbe Verfahren wird für die horizontalen Linien durchgeführt (Linie 3 zu Linie 6). Die Tabelle 5.3.3.1 zeigt die Ergebnisse.

Winkel	$\alpha = 0^\circ$	$\alpha = 2,4^\circ$
σ_V [$\mu\text{m}/\text{Pxl}$]	0,002	0,006
σ_H [$\mu\text{m}/\text{Pxl}$]	0,001	0,003
A_V [%]	0,01	0,03
A_H [%]	0,04	0,15

Tabelle 5.3.3.1.: Ergebnis der Standardabweichung über die horizontalen σ_H und vertikalen σ_V Kalibrierungsfaktoren für zwei Positionen des Handhabungssystems, sowie die prozentualen Abweichungen A

Die Ergebnisse zeigen, dass eine Verkipfung des Handhabungssystems von $2,4^\circ$ die Standardabweichungen um das Dreifache negativ beeinflussen kann. Dies zeigt, dass es auch bei telezentrischen Objektiven sehr wichtig ist, dass alle Komponenten gefluchtet sind und keinen Winkel aufweisen, da ansonsten bei den vorliegenden Größen des Prüfobjektes größere Abweichungen entstehen können.

Das Handhabungssystem verdeckt beim Drehen in einem bestimmten Winkelbereich das Objekt, sodass eine Messung in diesem Bereich nicht möglich ist. Die Abbildung 5.3.3.5 zeigt schematisch den Messbereich von 0° bis 180° .

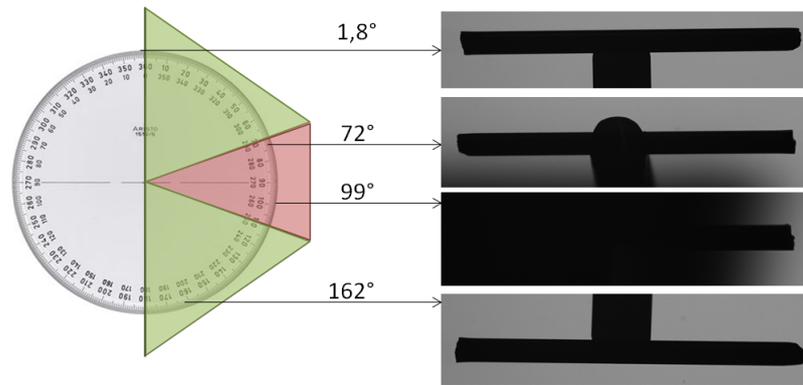


Abbildung 5.3.3.5.: Schematische Darstellung der Winkelbereiche mit Beispielbildern, die vermessen werden können (grün) und der Bereich, der durch das Handhabungssystem verdeckt wird (rot)

Im Bereich von 70° bis 110° ist eine Vermessung der Polymerstäbchen nicht möglich, da das Handhabungssystem die Objekte verdeckt.

Encoder

Im Abschnitt 4.1.1 wird beschrieben, dass der verwendete Encoder mindestens eine Auflösung (Impulszahl pro Umdrehung) von 46 haben sollte, damit eine Winkelschrittweite von $7,8^\circ$ aufgelöst werden kann.

Für den optischen Aufbau wird der Motor (*EPOS Maxon Motor*) mit dem Encoder *HEDL 5540* von *Maxon Motor* angetrieben. Die Tabelle 5.3.3.2 zeigt einen Auszug aus dem Datenblatt.

Impulszahl pro Umdrehung	500
Max. Impulsfrequenz [kHz]	100
Max. Drehzahl [min^{-1}]	12000
Wellendurchmesser [mm]	3

Tabelle 5.3.3.2.: Auszug aus dem Datenblatt des Encoders *HEDL 5540* von *Maxon Motor* [51]

Der Encoder hat eine Impulszahl von 500 pro Umdrehung. Dies bedeutet, dass eine Winkelschrittweite von $0,72^\circ$ aufgelöst werden kann. Somit ist dieser sehr gut geeignet für den optischen Aufbau.

Zur genauen Bestimmung der Positioniergenauigkeit wird der Motor zwanzig Mal zwischen $0^\circ - 180^\circ$ in 9° -Schritten verfahren und die Nadelspitze des Handhabungssystems mit der Kamera aufgenommen. Anschließend wird in jedem Bild die Position

der Nadel bestimmt und die Standardabweichungen zwischen den Aufnahmen eines Winkel über alle Wiederholungen ermittelt.

Die Abbildung 5.3.3.6 zeigt die Dreheinheit mit Markierungen der Winkelzahlen (links) und des Koordinatensystems. Ein Ausschnitt der Aufnahme mit der Winkelstellung 0° ist rechts zu sehen. In der Abbildung 5.3.3.6, b) ist wiederum das Koordinatensystem eingezeichnet.

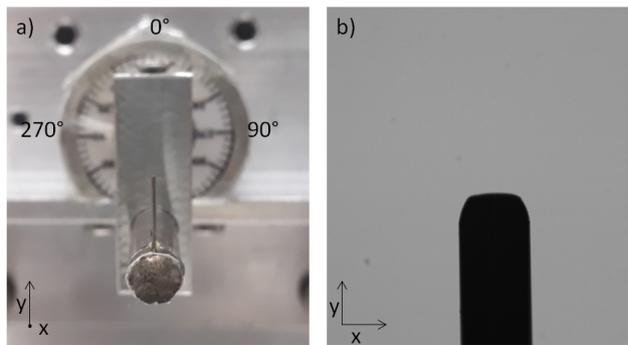


Abbildung 5.3.3.6.: Graphische Darstellung der Dreheinheit mit Markierungen der Winkel, sowie dem Koordinatensystem (a) und ein Ausschnitt aus der Aufnahme mit markierten Koordinatensystem (b)

Von den zwanzig Aufnahmen sind nur 16 auswertbar, da bei den restlichen vier Aufnahmen die Halterung das Objekt verdeckt.

Die Abbildung 5.3.3.7 zeigt die Standardabweichungen der x- und y-Positionen für alle Winkel.

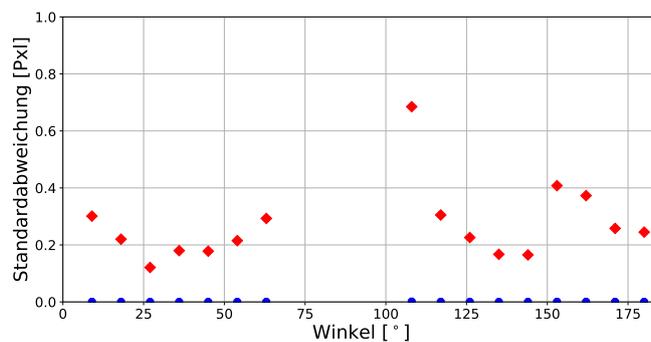


Abbildung 5.3.3.7.: Darstellung der Standardabweichungen über alle Winkel für die x- (blau, Kreis) und y-Positionen (rot, Raute)

Es gibt keine Abweichungen der x-Achse pro Winkel. Die Standardabweichungen liegen unter $0,002$ Pixel. Die Abweichungen für die y-Achse sind größer. Maximal be-

trägt die Standardabweichung σ für 20 Wiederholungen für einen Winkel 0,69 Pixel. Dies bedeutet ein Rauschen R

$$R = \frac{\sigma}{y}$$

von maximal 0,08 %.

Bei dem wiederholten Positionieren durch den Encoder entsteht ein Fehler von 0,08 %. Für eine komplette Umdrehung von 360° würde der Winkelfehler 0,29° betragen und ist somit nicht limitierend für die Messungen.

5.3.4. Optik

Die verwendete Optik muss das Objekt perspektivfrei und mit so wenig Abbildungsfehlern wie möglich abbilden. Weiterhin sollte eine Vergrößerung gewählt werden, bei der das Objekt in Längsrichtung die Abbildung ausfüllt und nicht zu viel Hintergrund abgebildet wird. Zusätzlich muss darauf geachtet werden, dass das Objekt während der Drehung nicht aus dem Schärfentiefebereich läuft.

Die wichtigste Eigenschaft ist die perspektivfreie Abbildung. Es gibt entozentrische und telezentrische Objektive. Die entozentrischen Objektive haben die Eigenschaften, dass die Hauptstrahlen gerade verlaufen, die Objektwinkel differenziert sind und die Bildgröße abhängig von der Objektposition auf der optischen Achse ist (entfernungsabhängig). Der Nachteil ist die perspektivische Verzerrung.

Die Telezentrie bezeichnet die perspektivfreie Aufnahme [N S08]. Telezentrische Objektive reduzieren oder beseitigen die meisten der Probleme der entozentrischen Objektive [opto]. Ein Objekt wird in einem definierten Bereich immer gleich groß abgebildet, unabhängig der Position auf der optischen Achse.

Wird ein beidseitig telezentrisches Objektiv verwendet, verlaufen zusätzlich die bildseitigen Hauptstrahlen parallel. Somit können Änderungen des Abbildungsmaßstabs bei Schwankungen des Sensorabstands zum Objektiv vermieden werden [33].

Der Strahlenverlauf der verschiedenen Objektivarten ist im Anhang A.5, Seite 217 dargestellt.

Für Dimensionsmessungen, wie es bei dieser Messung der Fall sein wird, ist es sehr wichtig, dass die Abbildungen kontrastreich sind und die Verzeichnung minimal ist. Die perspektivischen Effekte, die Veränderung der Vergrößerung und die Bildverzeichnung, die durch die entozentrischen Objektive entstehen, sind bei dieser Art von Messung nicht erwünscht. Diese Effekte bergen Risiken und können die Auswertung signifikant beeinflussen. Die Abbildung 5.3.4.1 zeigt ein Beispiel aus [35] zum Vergleich zwischen einem entozentrischen und einem telezentrischen Objektiv. Der



Abbildung 5.3.4.1.: Eine Aufnahme mit einem entozentrischen (links) und einem telezentrischen Objektiv (rechts) [35]

Strahlengang bei telezentrischen Objektiven ist im Schärfentiefebereich, wie oben erwähnt, im Idealfall parallel. Dies ist ein Grund, wieso die Abbildungen kaum perspektivische Fehler aufweisen. Der Unterschied zu einem entozentrischen Objektiv ist in dem Beispiel in der Abbildung 5.3.4.1 gut erkennbar. Alle Pinspitzen werden durch das telezentrische Objektiv senkrecht betrachtet.

Die Verzeichnung ist ein großes Problem für Messaufgaben. Die Genauigkeit kann deutlich eingeschränkt werden. Gewöhnliche (entozentrische) Objektive weisen Verzeichnungswerte auf, die bis zu einigen Prozente reichen. Werden die Objektive und der Aufbau nicht kalibriert, sind präzise Messungen mit diesen Objektiven sehr schwierig. Telezentrische Objektive haben hingegen einen sehr geringen Verzeichnungsgrad (ca. 0,1%). Für hochauflösende Kameras (z.B. mit einer Pixelgröße von $2,75\ \mu\text{m}$) ist somit der Verzeichnungsfehler geringer als ein Pixel [opto].

Der Telezentriebereich ist ein symmetrischer Bereich um den Arbeitsabstand. Durch Abbildungsfehler und Fertigungs- und Montagetoleranzen kann es passieren, dass der Hauptstrahlengang nicht vollständig parallel verläuft [Pat98].

Durch Aberrationen und Blendenabbildungen entsteht unter anderem der Telezentriefehler. Dies ist eine Winkelabweichung der Parallelität zur optischen Achse, wodurch die Objektgröße vom Arbeitsabstand abhängig wird [Pat98]. Der Telezentriefehler wird als Winkel angegeben und beinhaltet die maximale Steigung der Hauptstrahlen im Objektiv. Ist der Telezentriefehler positiv, laufen die Strahlen mit zunehmendem Abstand vom Objektiv wenige mrad auseinander. Somit entsteht ein leicht entozentrischer Strahlenverlauf.

Aus den genannten Gründen sollte für den optischen Aufbau ein telezentrisches oder bi-telezentrisches Objektiv verwendet werden. Jedoch muss beachtet werden, dass es auch bei Abbildungen mit diesen Objektiven zu Messunsicherheiten kommen kann. Der Telezentriefehler ist als maximale Steigung der Hauptstrahlen im Objektiv angegeben: die Angabe des Fehlers bezieht sich auf die optische Achse. Der ideale

Telezentriefehler führt dazu, dass das Objekt im „Best Focus“⁵ 1 mm groß ist und durch den Fehler 1,7 μm größer oder kleiner abgebildet wird, je nachdem in welche Richtung das Objekt auf der optischen Achse bewegt wird. Die Abbildung 5.3.4.2 zeigt die Ermittlung der Abweichung [33]. Wandert das Objekt entlang der optischen

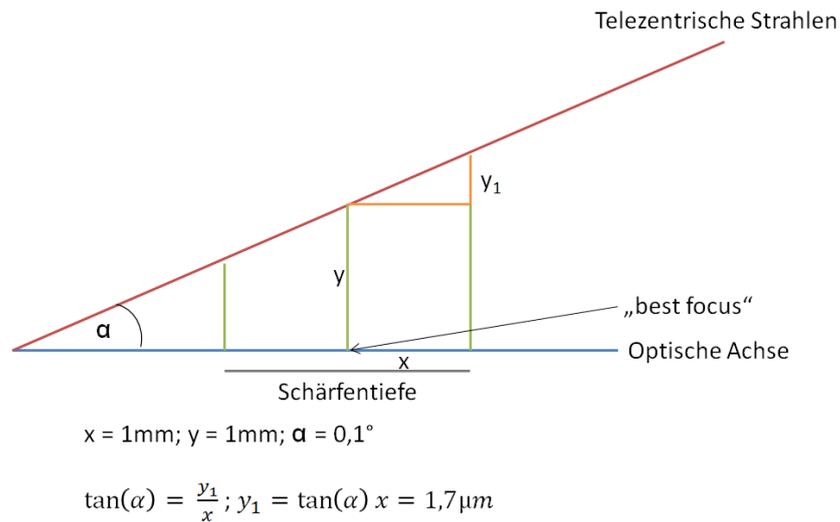


Abbildung 5.3.4.2.: Graphische Darstellung der Berechnung des Telezentriefehlers

Achse, können dadurch Größenänderungen entstehen.

Weiterhin kann es zu Maßstabsfehlern kommen, wenn bspw. Objekte mit unterschiedlichen Dicken verwendet werden. Je breiter das Objekt ist, umso größer wird der Fehler, da somit mehr Bereiche im Bild benötigt werden (siehe Abbildung 5.3.4.3, a). Die Schärftiefe kann zusätzlich noch Unsicherheiten einbringen, wenn das Objekt nicht deutlich kleiner ist, als dieser Bereich (siehe Abbildung 5.3.4.3, b). Somit

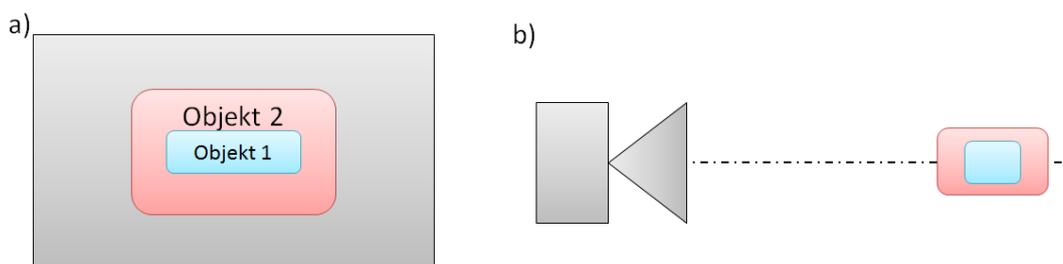


Abbildung 5.3.4.3.: Graphische Darstellung einer Abbildung mit unterschiedlich großen Objekten (a) und einer Skizze des optischen Aufbaus mit diesen Objekten (b)

⁵Position auf der optischen Achse mit der optimalen Abbildung (im Schärftiefenbereich).

könnte bei einer Messung das Objekt nur teilweise im Schärfentiefebereich liegen und die damit verbundenen Abweichungen deutlich schneller eintreten und die Messung stärker beeinflussen.

Ein weiterer Faktor kann die Unschärfe sein. Ändert sich die Position des Objektes entlang der optischen Achse und es werden Aufnahmen für die Auswertung verwendet, bei denen der Kantenübergang in der Abbildung nicht optimal ist, kann es zu leichten Abweichungen bei der Wendepunktberechnung kommen und somit die Breite verfälschen.

Für das VI-System wird das Objekt gedreht. Der Mittelpunkt des Objektes bewegt sich während der Drehung (siehe oben). Die Position kann sich entlang der optischen Achse und senkrecht dazu ändern (senkrecht zur Achse ca. $210\ \mu\text{m}$). Wäre der Maßstab Bildpositionsabhängig bzw. abhängig von der Position auf der optischen Achse, würde dies die Messung verfälschen.

Die Abweichung würde sich auf alle Auswertungen gleich auswirken und ein systematisch⁶ verfälschtes Volumen erzeugen. Da der Vergleich direkt mit dem Gewicht durchgeführt wird, erzeugt das „falsche“ Volumen nur eine andere Steigung der Ausgleichsgerade.

Um dies verifizieren zu können, werden mit einem bi-telezentrischen Objektiv die drei Prüfstifte mit unterschiedlicher Breite ($262\ \mu\text{m}$, $203\ \mu\text{m}$, $152\ \mu\text{m}$) an unterschiedlichen Positionen auf der optischen Achse und in unterschiedlichen Winkeln aufgenommen. Für jede Position und Winkel werden die gemessenen Breiten den Sollbreiten gegenübergestellt. Die Abbildung 5.3.4.4 zeigt die gemessenen Breiten für die Winkelposition 18° für die Kameraposition $8,8\ \text{mm}$. Es wird eine Ausgleichsgerade durch die Punkte gelegt (Schnittpunkt $0,0$). Mit dieser Gleichung kann für jedes beliebige Objekt die Breite in μm bestimmt werden, das mit dem Winkel 18° bei der Kameraposition $8,8\ \text{mm}$ aufgenommen wird.

Somit kann die Breite für jedes Objekt für jeden Winkelschritt mit der passenden Korrekturfunktion berechnet werden. In der Abbildung 5.3.4.5 sind die Breiten eingezeichnet, die mit einem einfachen Kalibrierungsfaktor multipliziert werden (rot) und die Breiten, die mit der Korrekturfunktion berechnet werden (blau). Die Sollbreite des Objektes ist zusätzlich eingezeichnet (grün). Es ist erkennbar, dass ohne eine Korrekturfunktion die Breiten entlang der Winkelschritte deutlich variieren. Dies entspricht jedoch nicht der Realität (Breitentoleranz des Objektes = $\pm 0,51\ \mu\text{m}$). Wird die Korrekturfunktion angewendet, sind die Breiten näherungsweise konstant.

⁶Systematischer Fehler: „Wird die Messung unter gleichen Bedingungen wiederholt, dann tritt ein systematischer Fehler in gleich bleibender Größe und mit gleichem Vorzeichen auf.“[Kuc07]

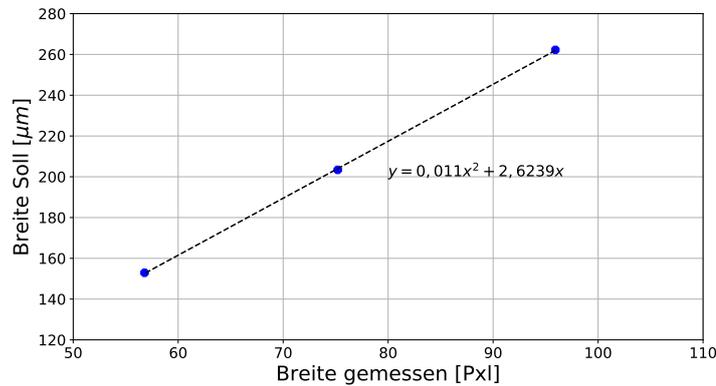


Abbildung 5.3.4.4.: Graphische Darstellung des Zusammenhangs der gemessenen Breite in Pixel und der Sollbreite in μm

Im nächsten Schritt wird nur ein Winkelschritt betrachtet und die Auswertung an unterschiedlichen Positionen entlang der optischen Achse ausgewertet. Ist der Schärfentiefe- und Telezentriebereich fehlerfrei, sollten die Breiten sich entlang der optischen Achse nicht ändern.

In der Abbildung 5.3.4.6 sind für den Winkelschritt 18° die Breiten an unterschiedlichen Positionen entlang der optischen Achse eingezeichnet. Einmal mit dem Kalibrierungsfaktor berechnet (rot) und einmal mit der Korrekturfunktion (blau).

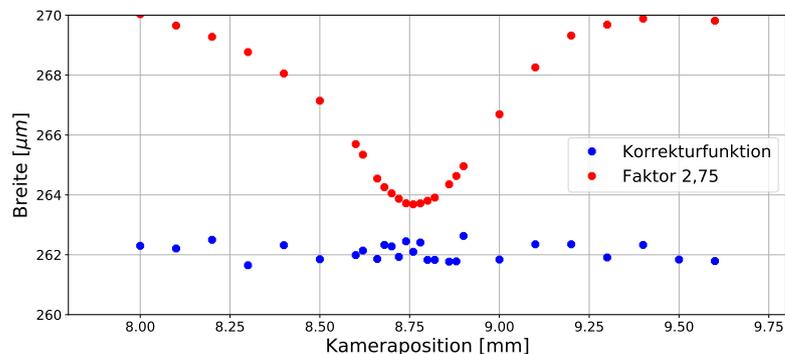


Abbildung 5.3.4.6.: Graphische Darstellung des Zusammenhangs der berechneten Breite über unterschiedliche Kamerapositionen entlang der optischen Achse. Einmal berechnet mit einem Kalibrierungsfaktor von $2,5 \mu\text{m}$ (rot) und einmal mit der Korrekturfunktion (blau).

Es ist eindeutig, dass einen Fehler im Schärfentiefe-/ Telezentriebereich vorliegt. Es

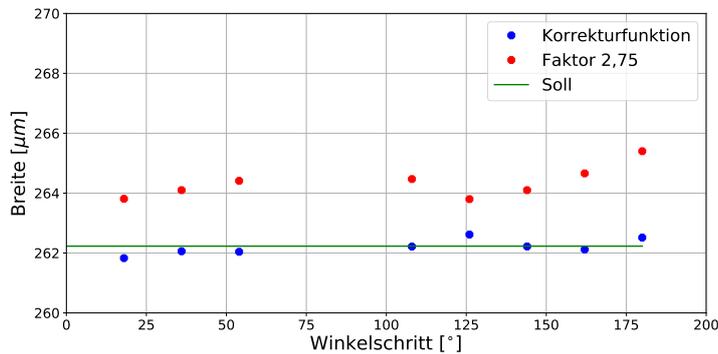


Abbildung 5.3.4.5.: Graphische Darstellung des Zusammenhangs der berechneten Breite über unterschiedliche Winkelschritte. Einmal berechnet mit einem Kalibrierungsfaktor von $2,5 \mu\text{m}$ (rot) und einmal mit der Korrekturfunktion (blau).

kann nicht klar definiert werden, woher die Abweichungen kommen. Es ist klar erkennbar, dass mit einer Korrekturfunktion die Abweichungen vollständig beidseitig werden können und die Breiten wie erwartet konstant entlang der optischen Achse verlaufen.

Die letzte Prüfung, ob der Fehler systematisch ist, liegt bei der Auswertung des Korrelationskoeffizienten. Dieser wird bestimmt, indem einige Objekte mit unterschiedlichen Gewichten gewogen und optisch vermessen werden. Diese werden gegeneinander aufgetragen und der Korrelationskoeffizient bestimmt. Wird das Volumen der Objekte einmal mit dem Kalibrierungsfaktor bestimmt und einmal mit der Korrekturfunktion bleibt der Korrelationskoeffizient identisch. Nur der Steigung der Ausgleichsgerade ändert sich (Steigung mit Kalibrierungsfaktor = $1454 \cdot x$; mit Korrekturfunktion = $1504,3 \cdot x$).

Es hat sich gezeigt, dass der optische Aufbau mit einem bi-telezentrischen Objektiv Abweichungen beinhalten kann. Diese können zu einer Änderung des Volumens führen.

Es kann anhand der Korrekturfunktion nachgewiesen werden, dass es sich bei den Fehlern um systematische Abweichungen handelt. Da für die Korrelation das Volumen in Bezug zur Masse gesetzt wird, sind diese Abweichungen nicht relevant für das Ergebnis. Ob alle Volumina etwas zu klein oder zu groß gemessen werden, macht sich in der Auswertung nicht bemerkbar. Dies ist ein vergleichbarer „unbekannter“ Faktor wie auf der Gewichtsseite die Dichte. Der genaue Wert ist nicht bekannt. Jedoch ist dies für die Messungen uninteressant, solange gewährleistet werden kann, dass entlang des Objektes die Dichte homogen verteilt ist. Genauso verhält es sich

mit dem systematischen Fehler für das Volumen, der durch die Abbildungskomponenten zustande kommt.

Die einzelnen Ursachen der Fehler sind nicht relevant für diese Auswertung. Wie oben erwähnt, wird das Volumen mit dem Gewicht verglichen und somit ändert sich bei systematischen Fehlern nur die Steigung der Ausgleichsgeraden, aber nicht der Korrelationskoeffizient. Die Abweichungen durch einen optischen Aufbau (Telezentriefehler, Unschärfe, Abbildungsfehler, etc.) sind nicht entscheidend, solange die komplette Auswertung systematisch bleibt.

Es muss darauf geachtet werden, dass kein Objektiv vollständig fehlerfrei ist und immer Abweichungen vorhanden sein können. Da diese jedoch in diesem Fall systematisch sind und das Ergebnis (der Korrelationskoeffizienten) nicht beeinflussen, muss keine aufwändige Kalibrierung/Korrekturfunktion für die Messungen bestimmt werden.

6. Bewertung technisches Konzept Volumen-inline System

In diesem Kapitel werden das technische Konzept und somit die einzelnen Komponenten bewertet. Zuerst wird eine Risikobewertung in Bezug auf die Hardware durchgeführt. Dabei spielt die Wahl des Objektivs eine entscheidende Rolle. Anschließend werden die Verarbeitungsschritte bewertet. Dazu zählt die Bildauswertung, das Objekt und die Volumenberechnung. Zum Abschluss werden die untersuchten Objektivs verglichen, bewertet und entschieden, welches für dieses Konzept und den optischen Aufbau am besten geeignet ist.

6.1. Risikobewertung Hardware

Der größte Risikofaktor für die Hardware ist das Objektiv. Wenn dieses das Objekt nicht fehlerfrei und mit einer genügend großen Vergrößerung darstellt, kann es bei der Auswertung zu signifikanten Fehlern kommen. Aus diesem Grund werden im folgenden zwei Objektivs vorgestellt und geprüft, ob sie Abbildungsfehler vorweisen.

6.1.1. Objektiv

Es werden für den Aufbau zwei Objektivs getestet: ein objektseitig¹ und ein beidseitig telezentrisches² Objektiv. In der Tabelle 6.1.1.1 sind die Eigenschaften des Objektivs von *NET* (einseitig telezentrisch) und von *Opto engineering* (bi-telezentrisch) gegenüber gestellt. Der Vorteil des Objektivs von *NET* ist die Vergrößerung und das damit verbundene kleinere Bildfeld. Dadurch würde nicht viel Bildfeld an den Hintergrund verloren gehen. Der Arbeitsabstand kann für den Aufbau beliebig sein. Die maximale Verzeichnung ist laut den Datenblättern bei beiden identisch. Das Objektiv von *Opto engineering* hat durch die beidseitige Telezentrie-Anordnung eine bessere Korrektur bzw. Unterdrückung der optischen Abbildungsfehler. Ein Nachteil ist die geringere Vergrößerung. Jedoch hat das Objektiv einen minimal größeren

¹Im Strahlengang ist eine Sammellinse angeordnet, die eine Blende in der bildseitigen Blendenebene aufweist [Sill].

²Zusätzlich zur objektseitigen Telezentrie-Anordnung ist der Strahlengang so konstruiert, dass der Brennpunkt auf der Kamerasensorseite im Unendlichen liegt [Sill].

Eigenschaft	VS-TC3-65	TC23004
Telezentrie	einseitig	beidseitig
Vergrößerung	3x	2x
Bildfeld [mm]	2,2 x 2,9	4,22 x 3,55
Arbeitsabstand [mm]	65,3	56
Blendenzahl	22	11
Schärfentiefe [mm]	0,2	0,23
max. Verzeichnung [%]	0,04	0,04

Tabelle 6.1.1.1.: Eigenschaften der Objektiv *VS-TC3-65* [27] und *TC23004* [56]

Schärfentiefebereich. Da die Blendeneinstellung die Telezentrie und die Verzeichnung nicht beeinflusst, ist diese Angabe nur zweitrangig.

Der optische Aufbau wird mit beiden Objektiven getestet und anschließend die Ergebnisse miteinander verglichen, um das bessere Objektiv für diese Messaufgabe zu wählen.

Das Objektiv *TC23004* wurde von *Opto engineering* vermessen und qualifiziert. Die Vergrößerung liegt bei 1,9961. Es wird ein maximaler Telezentriefehler von 0,097 deg und eine trapezförmige Verzerrung mit 0,01 deg angegeben. Weitere Informationen finden sich im Anhang A.1 (Seite 212).

Es werden die optimale Einstellung für die Kantendetektion die *FilterHalfSize* und die *ContrastThreshold*³ für die beiden optischen Setups definiert. Dazu wird ein Prüfstift (nominale Breite 206,5 µm) aufgenommen. Die Position einer Region bleibt unverändert, genauso die Länge (250 Pixel) und Breite (2 Pixel) der Region. Für die erste Überprüfung wird die *FilterHalfSize* auf 12 gesetzt und nur die *ContrastThreshold* geändert. Die Breite links und rechts neben der Halterung des Prüfstiftes wird über der eingestellten Schwelle aufgetragen. Dies ist in der Abbildung 6.1.1.1 für beide Objektiv dargestellt. Es ist erkennbar, dass die Breitenmessung unabhängig vom eingestellten *ContrastThreshold* ist.

Im nächsten Schritt wird der *ContrastThreshold* auf 15 festgelegt und die *FilterHalfSize* geändert. Die gemessenen Breiten und die *FilterHalfSize* werden übereinander aufgetragen (siehe Abbildung 6.1.1.2).

³Grenze, ab welcher Höhe Peaks für die Kantenbeurteilung verwendet werden. Alles unterhalb der Grenze wird für die Kantendetektion ignoriert.

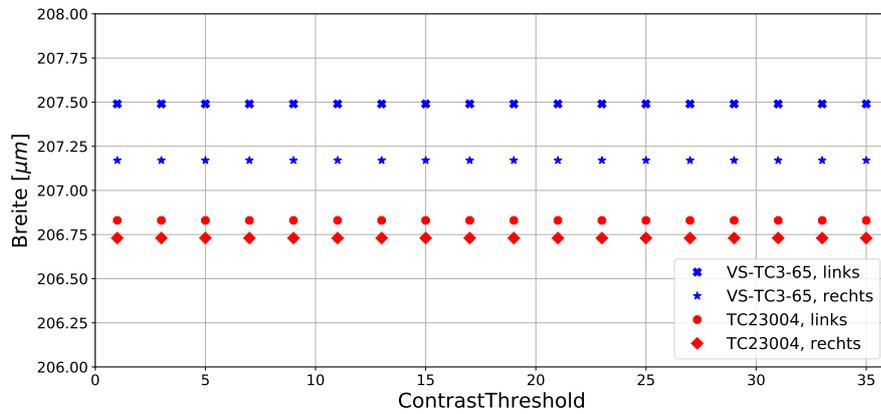


Abbildung 6.1.1.1.: Graphische Darstellung der Breitenänderung über unterschiedliche *ContrastThreshold*-Werte für das *VS-TC3-65* (blau; links = Kreuz, rechts = Stern) und das *TC23004*-Objektiv (rot; links = Kreis, rechts = Raute)

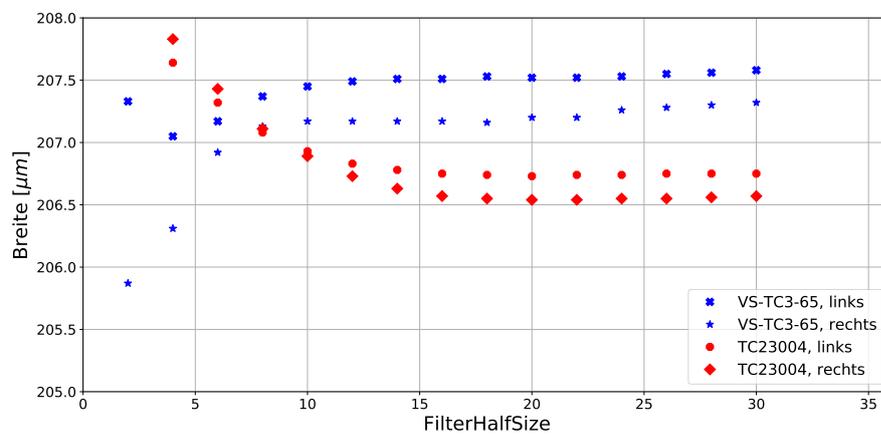


Abbildung 6.1.1.2.: Graphische Darstellung der Breitenänderung über unterschiedliche *FilterHalfSize*-Werte für das *VS-TC3-65* (blau; links = Kreuz, rechts = Stern) und das *TC23004*-Objektiv (rot; links = Kreis, rechts = Raute)

Die Größe des *FilterHalfSize*-Parameters hat Einfluss auf die Breitenmessung. Der Parameter hat für die Aufnahmen mit dem *VS-TC3-65*-Objektiv mehr Auswirkungen, auch im Vergleich zwischen der Breite links und rechts der Halterung, als mit dem bi-telezentrischen Objektiv.

Im Abschnitt 5.2.3, Seite 107, wird erläutert, dass der Parameter in Bezug auf die Kantenbreite eingestellt werden muss. Umso breiter die Kante, umso höher sollte die *FilterHalfSize* gewählt werden. In der Abbildung 6.1.1.2 ist erkennbar, dass die Breite bei höheren Filtergrößen konstant ist.

Für die kommenden Messungen wird eine *ContrastThreshold* von 15 gewählt. Die *FilterHalfSize* für das Objektiv *VS-TC3-65* auf 20 und für bi-telezentrische Objektiv auf 12 festgelegt. Das *VS-TC3-65*-Objektiv hat eine höhere Filtergröße, da die Kante deutlich breiter ist und somit Schwankungen besser abgefangen werden können.

MTF

Das Auflösungsvermögen eines Objektivs kann mit der MTF bestimmt werden. Dazu wird ein USAF-Target (siehe Abbildung 4.1.1.4, Seite 47) aufgenommen und für jedes Linienpaar pro Millimeter der *Michelson – Contrast* nach der Formel 4.1, Seite 47, berechnet. Die Abbildung 6.1.1.3 zeigt beispielhaft eine Abbildung der 9.0 Linienpaare pro Millimeter. In den grün markierten Bereichen werden die maximalen und minimalen Grauwerte bestimmt und der Kontrast berechnet.

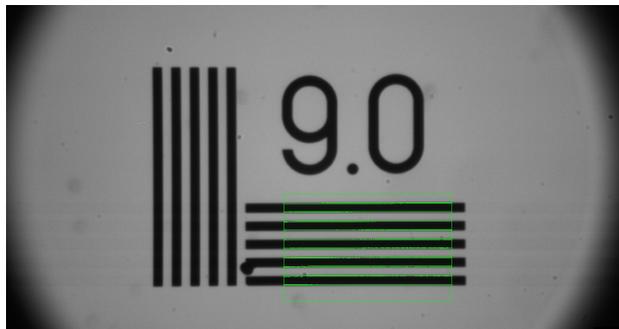


Abbildung 6.1.1.3.: Graphische Darstellung des Linienpaares 9.0 des USAF mit den ROIs für die Kontrastberechnung (Objektiv *VS-TC3-65*)

Der Kontrast wird für einige Linienpaare bestimmt und anschließend in einem Graph dargestellt.

VS-TC3-65

Das Ergebnis des Kontrastes für mehrere Linienpaare pro Millimeter sind in dem Graphen 6.1.1.4 dargestellt.

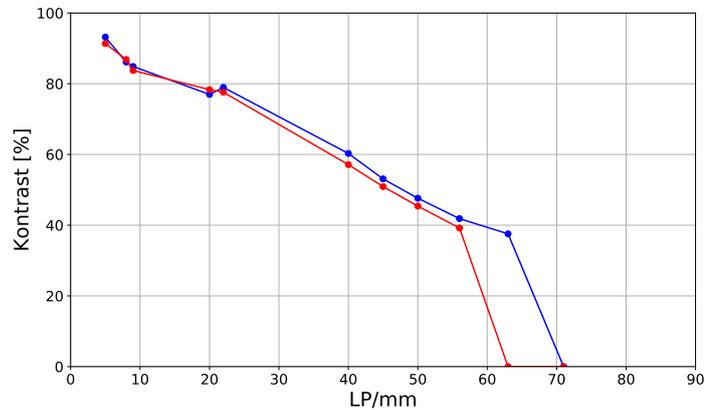


Abbildung 6.1.1.4.: Graphische Darstellung des Kontrastes über die Linienpaare für die vertikalen (rot) und horizontalen Linien (blau) (Objektiv *VS-TC3-65*)

Die Auflösung für die vertikalen und horizontalen Linien ist näherungsweise gleich. Jedoch ist erkennbar, dass die Grenzfrequenz nicht sehr hoch (< 60 LP/mm) ist und der Kontrast sehr stärker abfällt.

Der Winkelabstand ω_{min} als Auflösungsgrenze (Rayleigh-Kriterium, siehe Abschnitt 4.1.1, Seite 46) beträgt $17,8 \mu\text{m}$.

$$\omega_{min} = 1,22 \cdot \frac{660\text{nm}}{1,22}$$

TC23004

Eine Beispielaufnahme mit dem Objektiv *TC23004* ist in der Abbildung 6.1.1.5 dargestellt.



Abbildung 6.1.1.5.: Graphische Darstellung des Linienpaares 9.0 des USAF mit den ROIs für die Kontrastberechnung (Objektiv *TC23004*)

Der Kontrast wird für einige Linienpaare bestimmt und anschließend in dem Graph in der Abbildung 6.1.1.6 dargestellt.

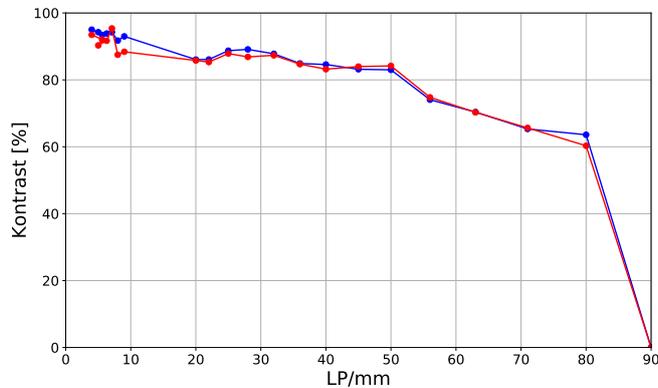


Abbildung 6.1.1.6.: Graphische Darstellung des Kontrastes über die Linienpaare für die vertikalen (rot) und horizontalen Linien (blau) (Objektiv *VS-TC3-65*)

Die Auflösung für die vertikalen und horizontalen Linien ist näherungsweise gleich. Die Grenzfrequenz ist deutlich höher im Vergleich zum *VS-TC3-65*. Sie liegt bei 90 LP/mm. Weiterhin sinkt der Kontrast nicht so schnell ab, sondern fällt erst ab 56 LP/mm unter 80%. Der Winkelabstand ω_{min} als Auflösungsgrenze (Rayleigh-Kriterium, siehe Abschnitt 4.1.1, Seite 46) beträgt 8,9 μm .

$$\omega_{min} = 1,22 \cdot \frac{660 \text{ nm}}{11}$$

Verzeichnung

Im Abschnitt 4.1.1 ist beschrieben, dass die Objektive auf Verzeichnung geprüft werden müssen. Sollte das Objektiv diesen Abbildungsfehler haben, werden die Ergebnisse stark beeinflusst, wenn die Objekte im Bild wandern können (unterschiedliche Bildposition) und sich entlang der x-Achse deutlich ausbreiten.

Aus diesem Grund wird ein Testobjekt mit einem Gitter aufgenommen. Dabei handelt es sich um ein einkristalliniem Silizium Target von *Plano GmbH* [40]. Auf diesem Target sind mit einem Elektronenstrahl Quadrate aufgebracht. Die Kennzahlen des Targets sind in der Tabelle 6.1.1.2 aufgelistet. Für jede Position im Bild sollte dieselbe Pixelauflösung erreicht werden. Im Folgenden wird das Gitter aufgenommen und zuerst die Pixelauflösung an vielen Punkten zwischen zwei Linien horizontal berechnet. Im nächsten Schritt wird die Berechnung für die vertikalen Linien durchgeführt.

Für eine weitere Betrachtung der möglichen Verzeichnung und die Auswirkungen auf die Breitenmessung wird ein Prüfstift an drei Positionen (links, mittig, rechts) von

unten nach oben an verschiedenen Positionen aufgenommen. Es werden anschließend die mittleren Breiten verglichen. Dasselbe wird für die mittlere y-Position für die Breiten vom linken bis zum rechten Bildrand durchgeführt.

Abmessungen:	5 mm x 5 mm
Periodizität:	$9,87 \mu\text{m} \pm 0,05 \mu\text{m}$
Linientiefe:	ca. 300 nm
Linienbreite:	$1,9 \mu\text{m}$
Linienabstand:	$500 \mu\text{m}$

Tabelle 6.1.1.2.: Kennzahlen des Silizium Target, *Plano GmbH* [40]

Das Gitter-Target wird mit Hilfe einer Halterung in die Objekt-Aufnahmeebene positioniert und aufgenommen (siehe Abbildung 6.1.1.7).

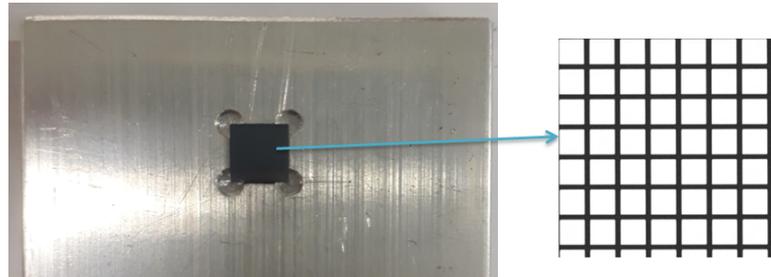


Abbildung 6.1.1.7.: Graphische Darstellung des Targets mit der Detektion zweier Linien und ihrem Abstand für das Objektiv *VS-TC3-65*

Es werden die Abstände zwischen den einzelnen Linien detektiert und an mehreren Positionen gemessen. Mit Hilfe des Linienabstandes aus der Spezifikation kann an jeder Position der Abbildungsmaßstab bestimmt werden. Ist das Objektiv verzeichnungsfrei, ist der Maßstab an jeder Position im Bild vergleichbar. Liegt eine Kissen-/Tonnenverzeichnung vor, nimmt der Abbildungsmaßstab zum Rand hin ab/zu.

VS-TC3-65

Die Abbildung 6.1.1.8 zeigt die Aufnahme (Beleuchtungszeit = 500 ms) und die Nummerierung der Linien.

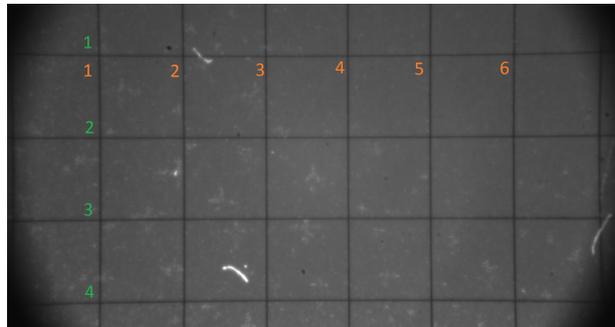


Abbildung 6.1.1.8.: Graphische Darstellung des Targets mit der Nummerierung der Linien für das Objektiv *VS-TC3-65*

Es werden die Linien horizontal und vertikal separat betrachtet. Es wird eine mittlere Linie definiert (horizontal Nummer 3, vertikal Nummer 4) und alle Abstände zu den anderen horizontalen bzw. vertikalen Linien berechnet. Dazu werden die Linien detektiert und der senkrechte Abstand zwischen den Linien an vielen Punkten gemessen. Dies ist in der Abbildung 6.1.1.9 an einem Beispiel dargestellt. Der Ab-

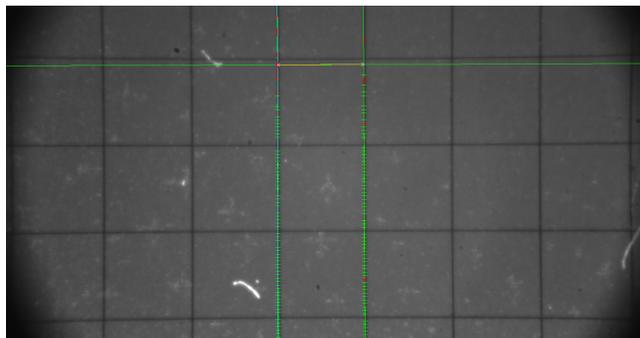


Abbildung 6.1.1.9.: Graphische Darstellung des Targets mit der Detektion zweier Linien und ihrem Abstand für das Objektiv *VS-TC3-65*

stand zwischen den Linien ist bekannt (500 μm). Daraus kann an jedem Punkt die Pixelauflösung berechnet werden. Die Abbildung 6.1.1.10 zeigt das Ergebnis.

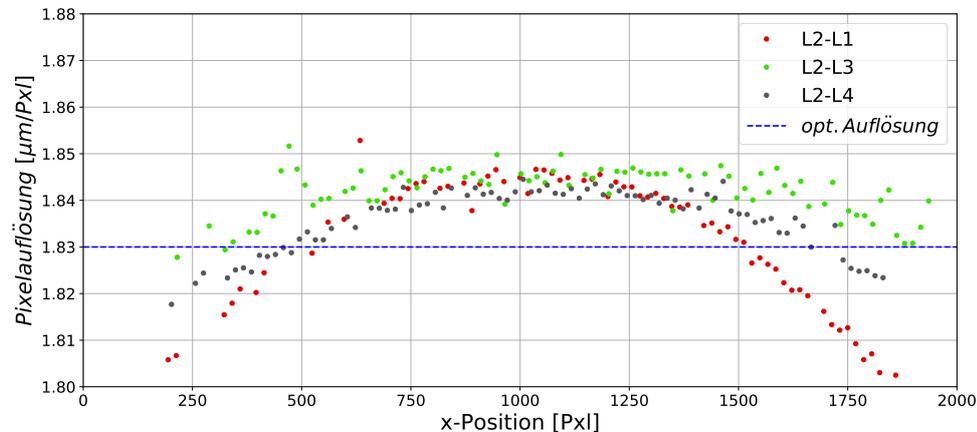


Abbildung 6.1.1.10.: Graphische Darstellung der Pixelauflösung für jeden horizontalen Punktabstand zwischen den Linien 2 und 1 (rot), den Linien 2 und 3 (grün) und den Linien 2 und 4 (schwarz), sowie der optimalen errechneten Auflösung (*VS-TC3-65*)

Die Auswertung zeigt, dass horizontal eine Verzeichnung vorliegt, da die Pixelauflösung zum Rand hin deutlich abnimmt im Vergleich zur Bildmitte. Dieselbe Auswertung wird mit den vertikalen Linien durchgeführt (siehe Abbildung 6.1.1.11). Die Abbildung 6.1.1.18 zeigt, dass die Abbildung auch eine vertikale Verzeichnung vorweist. Wieder nimmt der Pixelauflösung zum Rand hin ab.

Die Messung hat gezeigt, dass das telezentrische Objektiv eine starke Kissenverzeichnung hat. Für die horizontale Messung ergibt sich ein maximales Rauschen der Pixelauflösung von 0,7% und vertikal von 0,3%. Dies hat zur Folge, dass das Objektiv und somit der optische Aufbau kalibriert werden muss, wenn dieses Objektiv verwendet werden soll. Würden die Messungen unkalibriert ausgewertet werden, würde es zu Abweichungen in der Breite kommen. Das Objekt würde fälschlicherweise zum Rand immer breiter gemessen werden.

Für eine weitere Untersuchung der Verzeichnung werden drei Prüfstifte aufgenommen. Das Ziel des Tests ist es, die Verzeichnung und ihre Auswirkung weiter zu untersuchen. Dazu wird ein Prüfstift auf der Halterung positioniert und im linken, mittleren und rechten Bildbereich (x-Position) aufgenommen. Dazu wird zusätzlich der Prüfstift an mehreren y-Positionen betrachtet. Die Aufnahmen sind schematisch in der Abbildung 6.1.1.12 dargestellt. Jede x-Position wird separat ausgewertet (l, m, r). An allen drei Positionen gibt es mehrere Aufnahmen entlang der y-Achse. Für jede Aufnahme i wird die mittlere Breite auf der rechten und linken Seite der Halterung bestimmt ($b_{.li}$ und $b_{.ri}$). Über alle Breiten an einer x-Position wird die Standardabweichungen $\sigma_l, \sigma_m, \sigma_r$ über alle Aufnahmen berechnet.

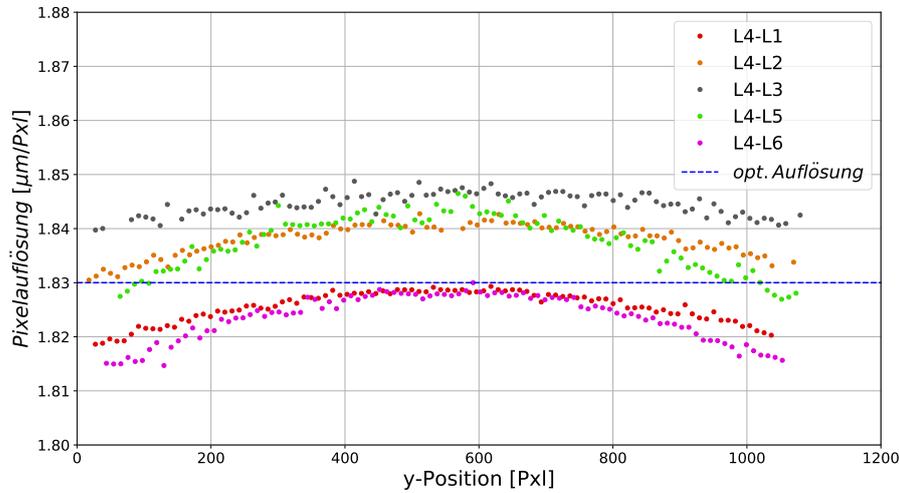


Abbildung 6.1.1.11.: Graphische Darstellung der Pixelauflösung für jeden vertikalen Punktabstand zwischen den Linien 4 und 1 (rot), den Linien 4 und 2 (orange), den Linien 4 und 3 (grau), den Linien 4 und 5 (grün) und den Linien 4 und 6 (violett), sowie der optimalen errechneten Auflösung (*VS-TC3-65*)

Der Breitenverlauf an unterschiedlichen x- und y-Positionen ist in der Abbildung 6.1.1.13 dargestellt.

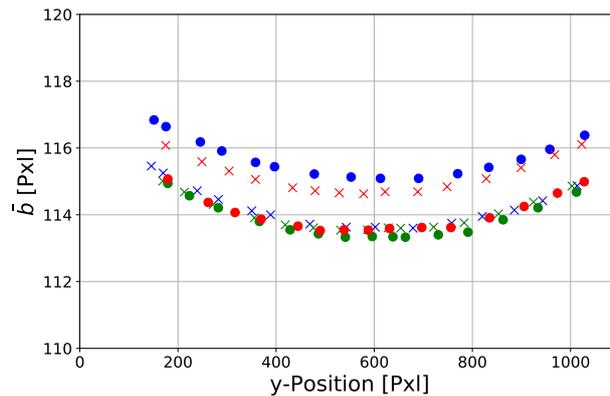


Abbildung 6.1.1.13.: Graphische Darstellung des Breitenverlaufs links (Kreis) und rechts (Kreuz) neben der Halterung entlang der y-Achse für die linke (blau), mittlere (grün) und rechte (rot) x-Position für den Prüfstift *72TPI* (mit dem Objektiv *VS-TC3-65*)

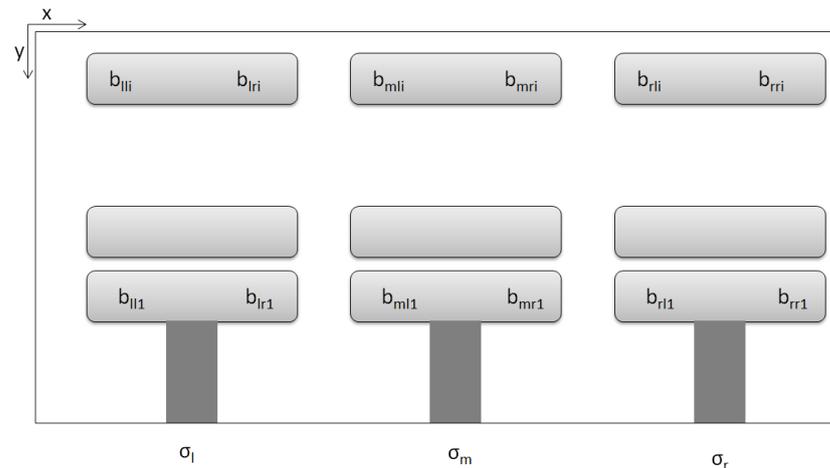


Abbildung 6.1.1.12.: Schematische Darstellung der Aufnahmen zur Überprüfung der Verzeichnung mit einem Prüfstift. Diesen an drei x-Positionen (links, mittig, rechts) an mehreren y-Positionen aufnehmen und die Standardabweichung der Breite für jede x-Position ermitteln.

An dem Breitenverlauf ist erkennbar, dass zwischen den Breiten rechts und links neben der Halterung nur in der mittleren x-Positionen am wenigstens Unterschiede sind. Am Rand des Bildes haben die Breiten einen Unterschied von mehreren Pixeln. Weiterhin haben die Breiten entlang der y-Achse einen typischen Verzeichnungsverlauf.

Über alle Breiten einer x-Position wird die Standardabweichung bestimmt. Die Ergebnisse sind in der Tabelle 6.1.1.3 dargestellt.

Prüfstift	96 TPI	72 TPI	56 TPI
nom.B [μm]	152,91	203,38	262,23
σ_l [μm]	0,6	0,9	1,2
σ_m [μm]	0,4	0,5	0,6
σ_r [μm]	0,6	0,8	0,9

Tabelle 6.1.1.3.: Ergebnis der Standardabweichung über alle y-Positionen für die x-Positionen links σ_l , mittig σ_m und rechts σ_r für das Objektiv VS-TC3-65

Die Standardabweichungen in den mittleren x-Positionen sind immer am niedrigsten, wie auch schon in der Abbildung 6.1.1.13 erkennbar. Dies trifft auf alle drei Prüfstifte zu. Die Standardabweichungen am linken und rechten Bildrand sind größer. Dies unterstreicht die Auswertungen mit dem Strichgitter, dass eine Verzeichnung vorliegt. Da die Abweichungen in der Breite maximal $1\mu\text{m}$ betragen darf, wären

nur Aufnahmen im mittleren Bildbereich machbar und die Objekte dürften nicht die komplette Breite des Bildes ausfüllen, da ansonsten die Genauigkeit nicht mehr garantiert werden kann (ohne Kalibrierung des optischen Aufbaus). Weiterhin ist erkennbar, dass die Standardabweichung mit der Objektbreite steigt. Dies ist wiederum ein Anzeichen für eine Verzeichnung.

Im nächsten Schritt wird von jeder der drei x-Positionen das Bild an der mittleren y-Position verwendet. Für diese drei Bilder werden die Breiten links bzw. rechts von der Halterung ermittelt. Dies ist schematisch in der Abbildung 6.1.1.14 dargestellt.

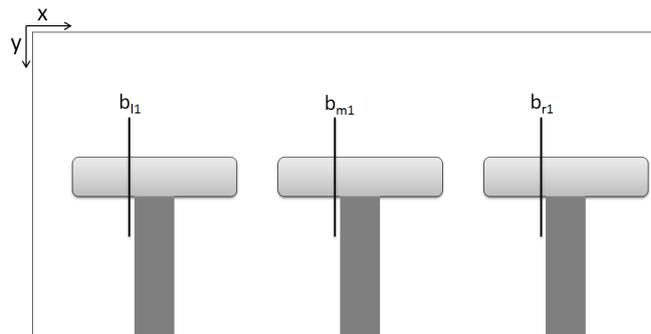


Abbildung 6.1.1.14.: Schematische Darstellung der Aufnahmen zur Überprüfung der Verzeichnung mit einem Prüfpin. Es werden die Aufnahmen mit derselben y-Position und unterschiedlichen x-Position verglichen (mit dem Objektiv VS-TC3-65).

Es werden die linken und rechten Seiten neben der Halterung separat betrachtet. Für jeden Querschnitt wird der Abstand Δb zwischen der maximalen und minimalen Breite bestimmt (z.B. $\max(b_{l1}, b_{m1}, b_{r1})$). Die Abbildung 6.1.1.15 zeigt die Breitenverläufe für die drei x-Positionen für den Prüfstift 72 TPI. Über alle Abstände wird der maximale Abstand $\max(\Delta b)$ und die Standardabweichung σ berechnet. Um die prozentuale Abweichung A sichtbar zu machen, die die Variation der Breite beinhaltet, wird der Quotient aus der Standardabweichung und der nominalen Breite bestimmt.

Die Tabelle 6.1.1.4 zeigt die Ergebnisse für die drei Prüfstifte.

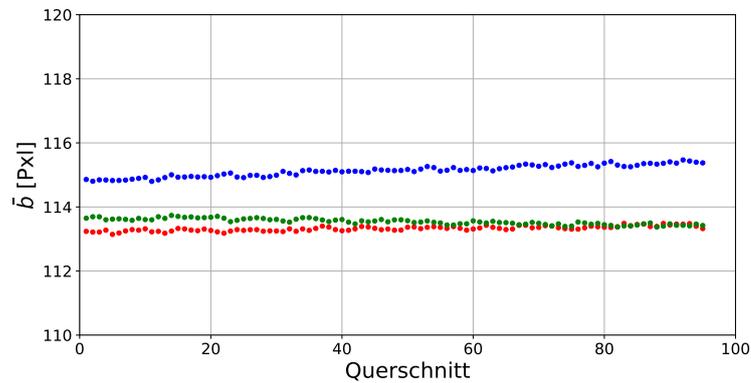


Abbildung 6.1.1.15.: Graphische Darstellung des Breitenverlaufs, auf der linken Seite der Halterung, links (blau), mittig (rot) und rechts (grün) im Bild (mit dem Objektiv *VS-TC3-65*)

Prüfstift		96 TPI	72 TPI	56 TPI
nom.B [μm]		152,91	203,38	262,23
links	$\max(\Delta b)$ [μm]	2,6	3,8	5,1
	σ [μm]	0,2	0,2	0,2
	A [%]	0,15	0,12	0,23
rechts	$\max(\Delta b)$ [μm]	2,1	2,6	3,2
	σ [μm]	0,1	0,2	0,2
	A [%]	0,1	0,11	0,15

Tabelle 6.1.1.4.: Ergebnis des maximalen Breitenabstandes, Standardabweichung über alle Abstände sowie die prozentuale Abweichung auf der linken und rechten Seite der Halterung für das Objektiv *VS-TC3-65*

Die Auswertung zeigt, dass es keinen signifikanten Unterschied zwischen dem linken und rechten Bereich neben der Halterung gibt, aber dass die prozentualen Abweichungen größer als 0,1 % sind. Dies weist wieder darauf hin, dass eine Abweichung entlang der x-Achse vorhanden ist (Verzeichnung).

Dieses Objektiv kann für den optischen Aufbau nur verwendet werden, wenn dieses aufwendig kalibriert wird. Würde es ohne Kalibrierung verwendet werden, würde es zu großen Abweichungen im Ergebnis durch die Verfälschung der Daten aufgrund der Verzeichnung kommen.

TC23004

Es wird das Strichgitter-Target aufgenommen und der Abstand zwischen den horizontalen und vertikalen Linien bestimmt (Belichtungszeit = 40 ms, siehe Abbildung 6.1.1.16). Die Ergebnisse sind in der Abbildung 6.1.1.17 (horizontal) und 6.1.1.18

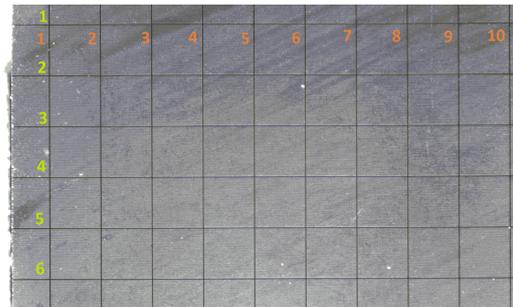


Abbildung 6.1.1.16.: Graphische Darstellung des Targets mit der Nummerierung der horizontalen und vertikalen Linien (*TC23004*)

(vertikal) dargestellt.

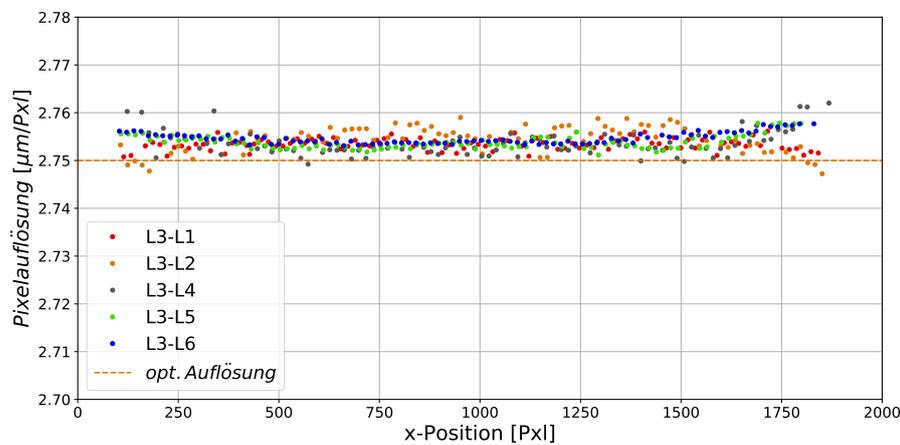


Abbildung 6.1.1.17.: Graphische Darstellung der Pixelauflösung für jeden horizontalen Punktabstand zwischen den Linien 3 und 1 (blau), den Linien 3 und 2 (rot), den Linien 3 und 4 (grün), den Linien 3 und 5 (cyan) und den Linien 3 und 6 (violett), sowie der optimalen errechneten Auflösung (*TC23004*)

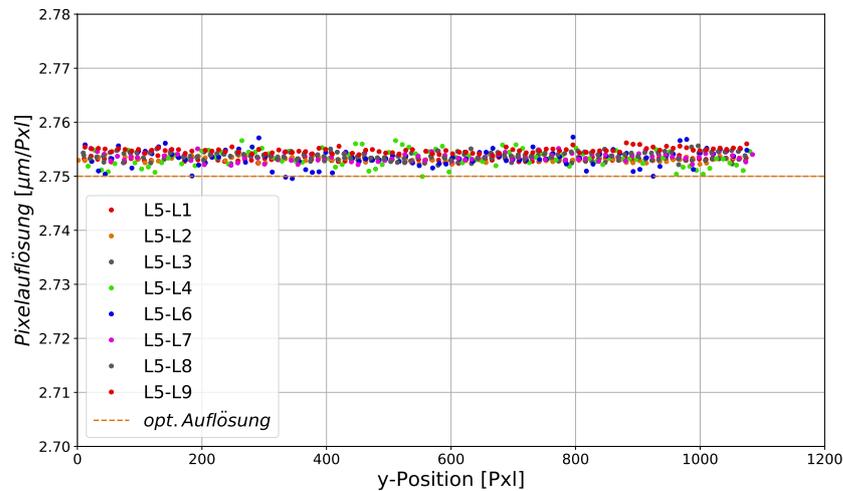


Abbildung 6.1.1.18.: Graphische Darstellung der Pixelauflösung für jeden vertikalen Punktabstand zwischen den Linien 5 und 1 (blau), den Linien 5 und 2 (rot), den Linien 5 und 3 (grün), den Linien 5 und 4 (cyan), den Linien 5 und 6 (violett), den Linien 5 und 7 (schwarz), den Linien 5 und 8 (ocker) und den Linien 5 und 9 (pink), sowie der optimalen errechneten Auflösung (*TC23004*)

Die Auswertungen zeigen, dass das *TC23004* keine nennenswerte Verzeichnung vorweist. Für die horizontale Messung ergibt sich ein maximales Rauschen der Pixelauflösung von 0,09 % und vertikal von 0,06 %. Die Verzeichnung des *VS-TC3-65* Objektivs ist im Vergleich 7 (horizontal) bzw. 5 (vertikal) mal schlechter.

Als nächstes werden die Prüfstifte an drei x-Positionen aufgenommen und entlang der y-Achse verschoben (siehe Abbildung 6.1.1.12). An dem Graphen 6.1.1.19 ist keine signifikante Abweichung entlang der x- oder y-Achse zu erkennen. Für alle drei x-Achsen-Positionen (links, mittig, rechts) wird die Standardabweichung über alle aufgenommenen y-Positionen berechnet und die Ergebnisse in der Tabelle 6.1.1.5 dargestellt. Die Standardabweichungen sind näherungsweise unabhängig der Bildposition. Der kleinste Prüfstift hat die geringsten Abweichungen, wobei alle Abweichungen sehr gering sind. Dieser Test unterstützt die obere Auswertung, dass das Objektiv keine große Verzeichnung hat. Im Vergleich zum Test mit dem Objektiv *VS-TC3-65* ist die Standardabweichung der mittleren x-Position um das 8-fache besser und es gibt keinen signifikanten Unterschied zwischen den Prüfstiften (größenunabhängig).

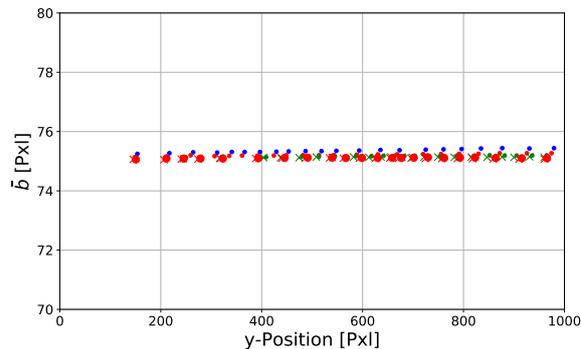


Abbildung 6.1.1.19.: Graphische Darstellung des Breitenverlaufs links (Kreis) und rechts (Kreuz) neben der Halterung entlang der y-Achse für die linke (blau), mittlere (grün) und rechte (rot) x-Position für den Prüfstift 72TPI (mit dem Objektiv TC23004)

Prüfstift	96 TPI	72 TPI	56 TPI
nom.B [μm]	152,91	203,38	262,23
σ_l [μm]	0,02	0,1	0,1
σ_m [μm]	0,05	0,03	0,1
σ_r [μm]	0,11	0,02	0,1

Tabelle 6.1.1.5.: Ergebnis der Standardabweichung über alle y-Positionen für die x-Positionen links σ_l , mittig σ_m und rechts σ_r für das Objektiv TC23004

Als nächster Schritt werden wie bei dem vorherigen Objektiv die Abweichungen entlang der x-Achse betrachtet. Dazu wird die Auswertung verwendet, die auf Seite 146 beschrieben ist.

Die Abbildung 6.1.1.20 zeigt die Breitenverläufe für die drei x-Positionen für den Prüfstift 72TPI. Es ist direkt ein signifikanter Unterschied zu dem Objektiv VS-TC3-65 erkennbar (siehe Abbildung 6.1.1.15, Seite 147). Bei dieser Auswertung liegen alle Breitenwerte nah beieinander und haben keinen großen Unterschied im Vergleich zu dem vorherigen Objektiv. Dies zeigen auch die Auswertungen, die in der Tabelle 6.1.1.6 aufgezeigt werden. Die Abweichungen für alle Prüfstifte sind gleich und somit gibt es keine Größenabhängigkeit. Zusätzlich sind die Abweichungen deutlich geringer als beim vorherigen Objektiv. Sie liegen unter 0,06 % (Vergleich VS-TC3-65 0,23 %).

Die Auswertungen zeigen, dass die Verzeichnungen so gering sind, dass eine aufwendige Kalibrierung nicht notwendig ist.

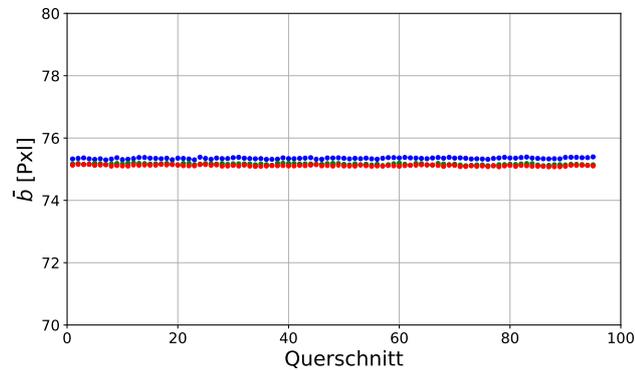


Abbildung 6.1.1.20.: Graphische Darstellung des Breitenverlaufs links (links), mittig (grün) und rechts (rot) im Bild (mit dem Objektiv *TC23004*)

Prüfstift		96 TPI	72 TPI	56 TPI
nom.B [μm]		152,91	203,38	262,23
links	$\max(\Delta b)$ [μm]	0,4	0,8	0,6
	σ [μm]	0,1	0,1	0,1
	A [%]	0,05	0,04	0,03
rechts	$\max(\Delta b)$ [μm]	0,8	0,5	0,5
	σ [μm]	0,1	0,1	0,1
	A [%]	0,06	0,04	0,02

Tabelle 6.1.1.6.: Ergebnis des maximalen Breitenabstands, Standardabweichung über alle Abstände sowie die prozentuale Abweichung auf der linken und rechten Seite der Halterung für das Objektiv *TC23004*

Kalibrierung

Im Abschnitt 4.1.1, Seite 48, wird die Kalibrierung von telezentrischen Objektiven erläutert. Für die Kalibrierung wird ein Kameramodel benötigt. Dieses setzt sich aus den intrinsischen Parametern K , den extrinsischen Parametern $[R|t]$ (R - Rotation, t - Translation) und einem Weltpunkt zusammen. Dies kann in [52] nachgelesen werden. Das Kameramodel sieht folgendermaßen aus:

$$\begin{pmatrix} u \\ v \\ w \end{pmatrix} = K [R|t] \begin{pmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} u \\ v \\ w \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_x & s & x_0 & 0 \\ 0 & \alpha_y & y_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{pmatrix}$$

Mit Hilfe des Modells kann unter anderem die Verzeichnung korrigiert werden. Jedoch wird dafür eine feste Entfernung zwischen Kamera und dem Objekt benötigt. Weiterhin sollte das Objekt im Bild die Position zwischen den Aufnahmen bzw. Drehungen nicht verändern. Dies ist durch die Variabilität des optischen Aufbaus nicht gegeben. Der Abstand zwischen der Kamera und dem Objekt ändert sich bei der Drehung leicht und das Objekt wandert zusätzlich im Bild. Dies bedeutet, dass die Telezentrie nicht vollständig gegeben ist. Es wäre eine entfernungsabhängige Korrektur notwendig. Für alle Entfernungen bzw. Winkelschritte und für alle Bildbereiche müsste die Korrektur bzw. das Kameramodell berechnet werden. Dies ist jedoch für einen Aufbau in einer Produktionslinie zu aufwändig. Die Kalibrierung muss in regelmäßigen Abständen durchgeführt werden und muss für den Operator an der Anlage schnell und einfach durchführbar sein. Dies wäre unter diesen Umständen nicht der Fall. Die Berechnungen im Kapitel 5 haben gezeigt, dass zwar ein systematischer Fehler durch den Aufbau vorhanden ist, dieser jedoch keinen Einfluss auf den Vergleich zwischen Volumen und Gewicht haben wird. Aus diesem Grund wird nur eine datenbezogene Kalibrierung durchgeführt und nicht das vollständige Kameramodell bestimmt.

6.2. Risikobewertung Verarbeitungsschritte

Die einzelnen Verarbeitungsschritte können Risiken aufweisen, die das Ergebnis negativ beeinflussen können. Aus diesem Grund werden Abweichungen, die durch die Auswertung, das Objekt und die Volumenberechnung entstehen können, mit den beiden vorher vorgestellten Objektiven betrachtet. Anschließend werden alle Ergebnisse der Objektive verglichen und eine Wahl getroffen, welches am besten für den VI-Aufbau geeignet ist.

6.2.1. Bildauswertung

Im Abschnitt 4.1.2, Seite 52, wird erläutert, dass das Bildauswertung durch die Pixellauflösung, die benötigte Anzahl der Aufnahmen und die kontrastreiche Abbildung der Kanten definiert ist. Im Folgenden werden diese drei Punkte im direkten Bezug auf das optische Messsystem betrachtet.

Pixelauflösung

Zur Bestimmung der Pixelauflösung wird ein Kalibriertarget mit einem Schachbrettmuster von *Opto Engineering* aufgenommen. Es hat die Größe von 33 mm x 26 mm mit einer aktiven Fläche von 15 mm x 13 mm. Das verwendete Schachbrettmuster hat die Maße für ein Quadrat von 0,2 mm. Die Maßgenauigkeit beträgt 1,29 μm . Die Abbildung 6.2.1.1 zeigt das Target.

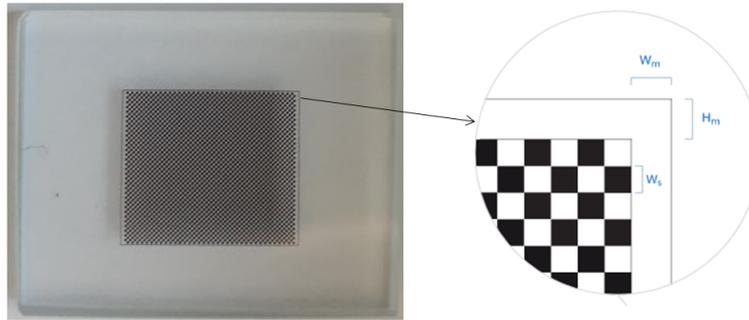


Abbildung 6.2.1.1.: Aufnahme des Kalibriertargets (links) mit einer Zeichnung der Abmaße (rechts); $W_m = 0,3 \text{ mm}$; $H_m = 0,1 \text{ mm}$; $W_s = 0,20 \text{ mm}$ [55]

Es gibt auf der optischen Achse zwei Anschlagpunkte. Die Grundplatte muss an dem rechten Anschlag positioniert werden, wenn die Kalibriertargets bzw. das Target zur Überprüfung der Verzeichnung aufgenommen werden soll. Der linke Anschlag ist die Position für die Grundplatte um die Volumenmessung durchzuführen. Somit kann gewährleistet werden, dass für beide Varianten (Targetaufnahme, Volumenvermessung) immer ein scharfes Bild aufgenommen wird, ohne dass die Position der Kamera angepasst werden muss. In der Abbildung 6.2.1.2 sind die beiden Positionen im optischen Aufbau markiert.

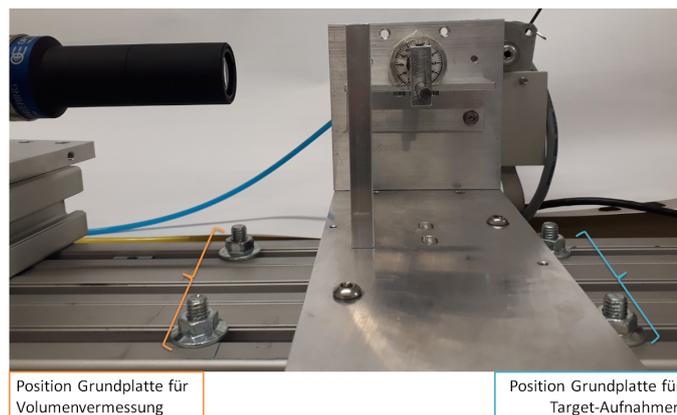


Abbildung 6.2.1.2.: Darstellung der Anschlagpositionen der Grundplatte zur Volumenvermessung (links) und zur Target-Aufnahme (rechts)

In der Abbildung 6.2.1.3 ist das Kalibriertarget in der dazu passenden Halterung auf der Grundplatte dargestellt.

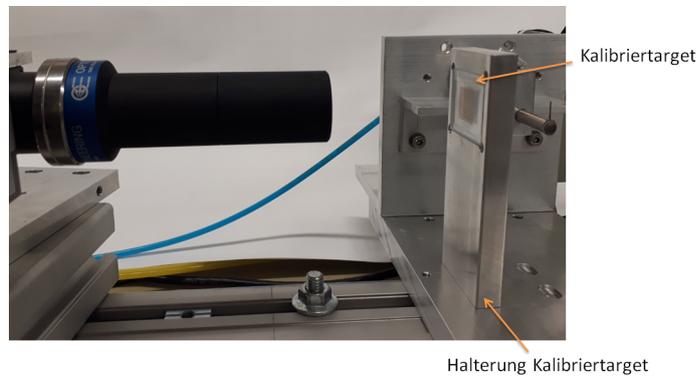


Abbildung 6.2.1.3.: Darstellung des Kalibriertargets in der Halterung auf der Grundplatte

Für die Auswertung der Aufnahmen wird das Tool *Vision Pro* von *Cognex* verwendet. Mit Hilfe des *Checkerboard Calibration Tool* kann die Kalibrierung mit einem geladenen Bild durchgeführt werden. Dabei müssen die Abmaße der Quadrate angegeben werden. Es werden die Eckpunkte und unter anderem den Skalierungsfaktor berechnet.

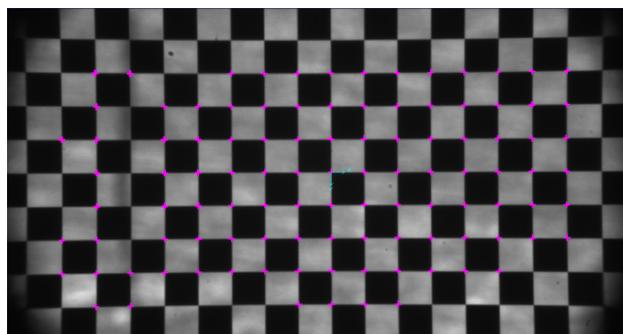


Abbildung 6.2.1.4.: Graphische Darstellung der detektierten Eckpunkte (lila) mit Hilfe der Kalibrierung von *Cognex* für das Objektiv *VS-TC3-65*

Die Abbildung 6.2.1.4 zeigt die detektierten Eckpunkte des Kalibriertargets (violett).

Im Abschnitt 4.1.2, Seite 52, wird beschrieben, dass die Messmittelfähigkeit für das Messsystem berechnet werden sollte. Diese Messung wird mit dem Objektiv durchgeführt, welches für das VI-System in Frage kommt und wird im nächsten Kapitel durchgeführt.

VS-TC3-65

Das Kalibriertarget wird mit einer Belichtungszeit von 200 ms aufgenommen. Das Ergebnis der Skalierung beträgt 547,087 Pixel. Damit ergibt sich eine Pixelauflösung von $1,83 \mu\text{m}/\text{Pxl}$ ($\frac{1}{547,087 \text{ Pxl}}$). Die theoretisch benötigte Pixelauflösung beträgt $0,96 \mu\text{m}/\text{Pxl}$ und ist somit deutlich geringer als die Berechnete. Jedoch ist dies noch kein Ausschlusskriterium, da alle Ergebnisse zusammen bewertet werden müssen.

TC23004

Es wird dasselbe Target aufgenommen wie bei der Auswertung für das *VS-TC3-65*-Objektiv und mit dem *Checkerboard Calibration Tool* von *Cognex* ausgewertet (Belichtungszeit = 10 ms). Die Abbildung 6.2.1.5 zeigt die detektierten Eckpunkte des Targets.

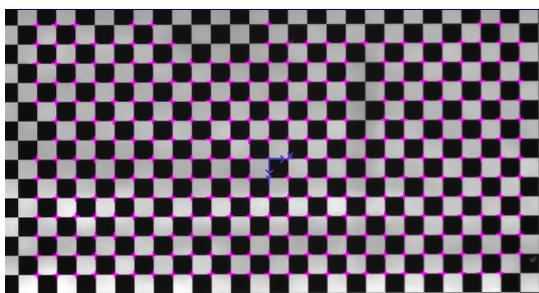


Abbildung 6.2.1.5.: Graphische Darstellung der detektierten Eckpunkte (lila) mit Hilfe der Kalibrierung von *Cognex* für das Objektiv *VSTC23004*

Der Skalierungsfaktor beträgt 363,217 Pixel. Dies bedeutet, dass die Pixelauflösung bei diesem Objektiv $2,75 \mu\text{m}/\text{Pxl}$ ist.

Benötigte Anzahl der Aufnahmen

Im Abschnitt 4.1.2, Seite 54, wird beschrieben, dass 23 Aufnahmen benötigt werden, wenn die Form der Querschnittsfläche nicht bekannt ist. Jedoch kann durch das Extrudieren durch eine Kreisöffnung davon ausgegangen werden, dass der Querschnitt einer Ellipse ähnelt. Aus diesem Grund kann die theoretische Aufnahmeanzahl verringert werden. Zusätzlich wäre dies zu zeitaufwändig (Aufnahme- plus Auswertzeit) und die Prozesszeit könnte somit nicht erreicht werden. Aus diesem Grund wird die Anzahl der Aufnahmen auf zehn festgelegt (Abschnitt 6.2.3, Seite 171). Dies entspricht einer Winkelschrittweite von 18° .

Abschätzung Kantenbreite

Das Objekt sollte optimal scharf abgebildet werden. Dies bedeutet, dass der hell-dunkel Übergang so klein wie möglich sein sollte. Ansonsten kann es zu Fehlern bei der Breitenmessung kommen. Aus diesem Grund wird die Kantenbreite der Prüfstif-

te bei der Abbildung mit den beiden Objektiven überprüft. In der Abbildung 6.2.1.6 ist eine Aufnahme des Prüfstiftes *72TPI* mit einer *ROI* (rot) dargestellt.

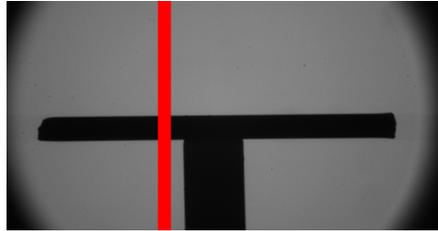


Abbildung 6.2.1.6.: Graphische Darstellung der Aufnahme des Prüfstiftes *72TPI* mit eingezeichneter *ROI* (Objektiv *VS-TC3-65*)

Es werden folgende Punkte betrachtet:

- Grauwertverlauf in der ROI entlang der y-Achse bestimmen.
- Erste und zweite Ableitung der Messwerte bestimmen.
- Steigung der Messwerte an beiden Kanten berechnen.
- Wendepunkte entlang des Grauwertverlaufs bestimmen.
- Wendepunkte an einer optimalen Kante durch den Grauwertverlauf bestimmen.
- Prozentualer Unterschied U zwischen dem optimalen und dem realen Wendepunkt bestimmen.

VS-TC3-65

Der Grauwertverlauf sowie die erste und zweite Ableitung der Messwerte werden in einem Graphen dargestellt (siehe Abbildung 6.2.1.7). Die Steigung der Kante beträgt

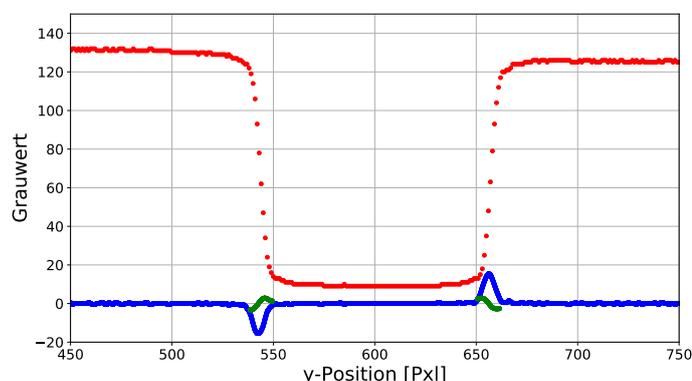


Abbildung 6.2.1.7.: Graphische Darstellung der Grauwerte der Kante entlang der y-Achse (rot), der ersten (blau) und der zweiten Ableitung (grün) der Messwerte. (Objektiv VS-TC3-65)

näherungsweise 9. Dies weist daraufhin, dass es sich hierbei um eine unscharfe Kante handelt. Im Beispiel im Abschnitt 4.1.2 hat die scharfe Kante eine Steigung von 192 und die unscharfe Kante einen Wert von 13.

Für beide Kanten werden die Wendepunkte und anschließend die Breite zwischen den Punkten bestimmt. Weiterhin wird eine ideale Kante in den Verlauf gefittet und auch für diesen Verlauf die Wendepunkte und der Abstand ermittelt. Die Kanten sowie die Wendepunkte sind in der Abbildung 6.2.1.8 dargestellt. Der Quotient aus den beiden ermittelten Abständen gibt den prozentualen Unterschied U an, der durch die nicht perfekte Abbildung der Kante entsteht. Dieser beträgt für den Prüfstift 72 TPI 0,26 % (Abstand Grauwertverlauf = 113,6 Pxl, Abstand ideale Kante = 113,9 Pxl).

Die Tabelle 6.2.1.1 zeigt die Ergebnisse für alle drei Prüfstifte.

Prüfstift	96 TPI	72 TPI	56 TPI
nom.B [μm]	152,9080	203,3778	262,2296
Steigung	9	9,2	9,5
U [%]	0,17	0,26	0,41

Tabelle 6.2.1.1.: Ergebnis der Steigung des Grauwertverlaufs, sowie des prozentualen Unterschieds zwischen dem Verlauf und einer idealen Kante für die drei Prüfstifte (Objektive VS-TC3-65)

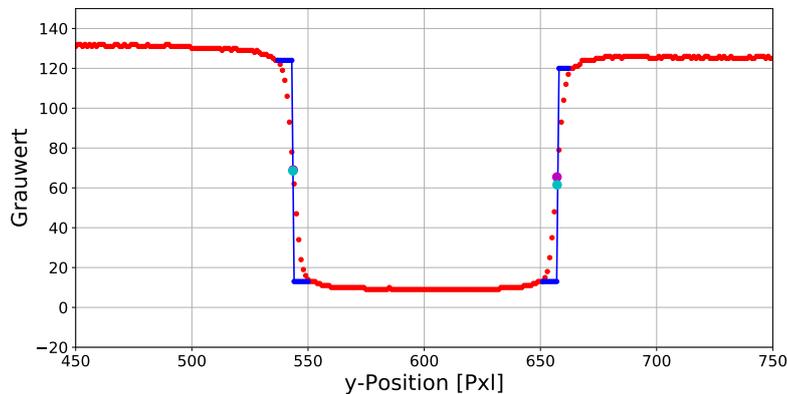


Abbildung 6.2.1.8.: Graphische Darstellung der Grauwerte der Kante entlang der y-Achse (rot) sowie die ideale Kanten (blau). Die Wendepunkte für den Grauwertverlauf (magenta) und der idealen Kante (cyan) sind mit Kreisen markiert (Objektiv *VS-TC3-65*)

Die Steigungen der Grauwertverläufe sind für die drei Prüfstifte gleich. Der prozentuale Unterschied zur idealen Kante steigt mit wachsendem Durchmesser der Prüfstifte. Der Abstand der Wendepunkte und somit die ermittelte Objektbreite unterscheidet sich bei dem Prüfstift *56 TPI* um 0,41 %.

TC23004

Die Abbildung 6.2.1.9 zeigt die Aufnahme des Prüfpins *72TPI* mit dem Objektiv von *Opto Engineering*.

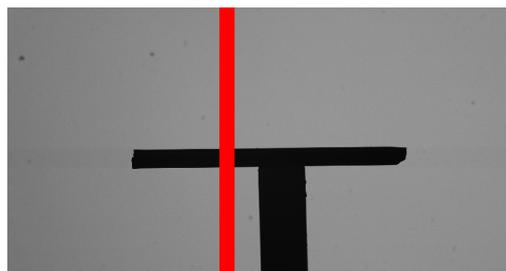


Abbildung 6.2.1.9.: Graphische Darstellung der Aufnahme des Prüfstiftes *72TPI* mit eingezeichneter *ROI* (Objektiv *TC23004*)

Der Grauwertverlauf entlang der *ROI* ist in der Abbildung 6.2.1.10 dargestellt, sowie die erste und zweite Ableitung der Messwerte.

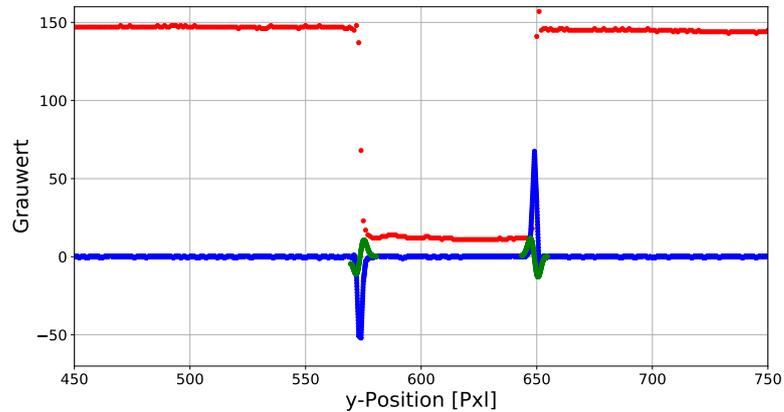


Abbildung 6.2.1.10.: Graphische Darstellung der Grauwerte der Kante entlang der y-Achse (rot), der ersten (blau) und der zweiten Ableitung (grün) der Messwerte. (Objektiv *TC23004*)

Die zweite Ableitung ist sichtbar ausgeprägter im Vergleich zur Auswertung mit dem Objektiv *VS-TC3-65*. Die Steigung der Kanten beträgt 34.

Es werden die Wendepunkte der Kante und ihr Abstand berechnet. Weiterhin werden ideale Kanten in den Verlauf gefittet und auch für diese der Abstand der Wendepunkte bestimmt. Die Abbildung 6.2.1.11 zeigt die Kanten mit ihren Wendepunkten.

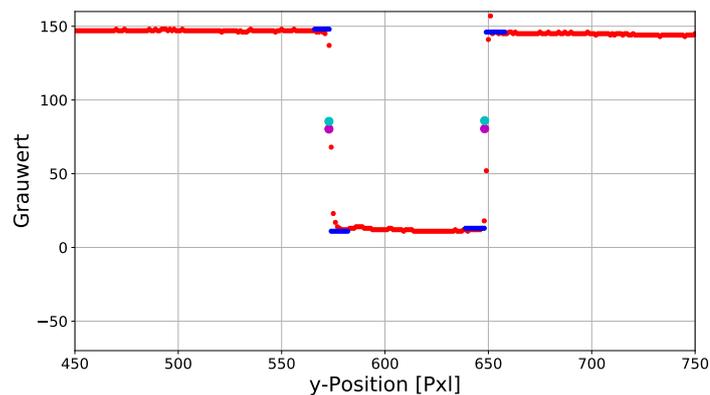


Abbildung 6.2.1.11.: Graphische Darstellung der Grauwerte der Kante entlang der y-Achse (rot) sowie die ideale Kanten (blau). Die Wendepunkte für den Grauwertverlauf (magenta) und der idealen Kante (cyan) sind mit Kreisen markiert. (Objektiv *TC23004*).

Mit Hilfe des prozentualen Unterschieds kann berechnet werden, wie groß der Unterschied zwischen den beiden Breiten ist (ideal und real). Dieser Unterschied beträgt bei dem Prüfstift 72 TPI 0,03 %.

Die Tabelle 6.2.1.2 zeigt die Ergebnisse für alle drei Prüfstifte.

Prüfstift	96 TPI	72 TPI	56 TPI
nom.B [μm]	152,9	203,38	262,23
Steigung	29,3	34	38,7
U [%]	0,04	0,03	0,01

Tabelle 6.2.1.2.: Ergebnis der Steigung des Grauwertverlaufs, sowie des prozentualen Unterschieds zwischen dem Verlauf und einer idealen Kante für die drei Prüfstifte (Objektive TC23004)

Die Steigung der Grauwertverläufe liegt über 29 und somit um das Dreifache höher, als mit dem Objektiv VS-TC3-65. Der Unterschied zwischen einer idealen Kante und der gemessenen Kante ist vernachlässigbar gering. Dies bedeutet, dass mit Hilfe des Objektivs TC23004 eine sehr gute Abbildung des Objektes möglich ist.

6.2.2. Objekt

Das Objekt hat Einfluss auf die Berechnungen im Bezug auf die Form der Querschnittsfläche (Auswirkung höher Fehlerordnung). Wenn diese abweicht von der erwarteten Kontur kann es bei der Volumenberechnung zu Fehlern kommen. Weiterhin muss die Breite deutlich präziser abgetastet werden, als die Länge. Im Folgenden werden diese drei Aspekte (Auswirkung höher Fehlerordnung, Gewichtung der Faktoren, Abweichung der erwarteten Kontur) und ihre Auswirkungen betrachtet.

Auswirkung höher Fehlerordnung

Im Abschnitt 4.1.3, Seite 57, wird erläutert, dass es zu hohen Abweichungen kommen kann, wenn die falsche Annahme für die Querschnittsfläche verwendet wird. Aus diesem Grund werden in den folgenden Berechnungen und Auswertungen immer die drei Querschnittsannahmen getroffen: Kreis, Ellipse und die numerische Flächenberechnung. Somit kann geprüft werden, welche Annahme die geringsten Abweichungen und besten Korrelationskoeffizient-Ergebnisse erreicht.

Gewichtung der Faktoren

Im Abschnitt 4.1.3, Seite 60, wird beschrieben, dass die Breite deutlich genauer gemessen werden muss als die Länge. Aus diesem Grund wird berechnet, wie genau die Messungen grundsätzlich sind. Dafür wird der Antastfehler ermittelt. Dieser stellt

das Limit der Genauigkeit dar, die erzielt werden kann. Besser als der Antastfehler kann die Messung nicht sein. Deswegen wird ein Objekt auf dem Handhabungssystem positioniert und mehrmals hintereinander aufgenommen (30x), ohne dass sich das Objekt oder die Kamera bewegt. Es werden an insgesamt 190 Querschnitten die Breiten b_i pro Wiederholung bestimmt. Für jeden Winkelschritt wird die mittlere Breite für den rechten und linken Bereich bestimmt und anschließend die Standardabweichung σ_{links} bzw. σ_{rechts} über alle 30 Wiederholungen gebildet. Die Seiten werden separat betrachtet, damit eine evtl. vorhandene Objektivverzeichnung die Ergebnisse nicht beeinflusst. In der Abbildung 6.2.2.1 sind die Querschnitte an einem Objekt skizziert.

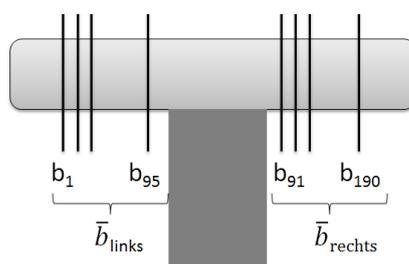


Abbildung 6.2.2.1.: Graphische Darstellung der Querschnitte an einem Objekt, an denen die Breiten b_i über alle Wiederholungen berechnet werden

Die Messung wird mit allen drei Prüfstiften durchgeführt und ausgewertet. Dadurch kann untersucht werden, ob eine Objektgrößenabhängigkeit der Ergebnisse vorliegt.

VS-TC3-65

Die Ergebnisse der gemittelten Standardabweichungen $\bar{\sigma}$ für alle drei Prüfstifte sind in der Tabelle 6.2.2.1 dargestellt.

Prüfstift	96 TPI	72 TPI	56 TPI
nom.B [μm]	152,91	203,38	262,23
σ_{rechts} [μm]	0,02	0,02	0,02
σ_{links} [μm]	0,02	0,01	0,02

Tabelle 6.2.2.1.: Ergebnis der mittleren Standardabweichung $\bar{\sigma}$ über alle 190 Querschnitt aller Wiederholungen für das Objektiv VS-TC3-65

Aus den Theorieüberlegungen ist bekannt, dass die Standardabweichung für die Breite kleiner $1,0 \mu\text{m}$ sein muss, damit die geforderte Genauigkeit erreicht wird. Mit Hilfe der Wiederholungsmessung ist nun bekannt, dass die Breite mit diesem optischen Aufbau (Objektiv VS-TC3-65) nicht genauer aufgelöst werden kann als $0,02 \mu\text{m}$.

Es gibt keinen nennenswerten Unterschied, welcher Prüfstift verwendet wird. Dies zeigt, dass der Antastfehler unabhängig von der Objektbreite ist.

Ein Auszug aus den Messdaten des Prüfstiftes 56 *TPI* ist im Anhang A.4, Seite 216ff, dargestellt (15 Querschnitte für den linken Bereich neben der Halterung).

TC23004

Die mittlere Standardabweichung über alle Querschnitte (siehe Abbildung 6.2.2.1, Seite 161) für jeden Prüfstift sind in der Tabelle 6.2.2.2 dargestellt.

Prüfstift	96 TPI	72 TPI	56 TPI
nom.B [μm]	152,91	203,38	262,23
σ_{rechts} [μm]	0,02	0,01	0,01
σ_{links} [μm]	0,02	0,01	0,02

Tabelle 6.2.2.2.: Ergebnis der mittleren Standardabweichung $\bar{\sigma}$ über alle 190 Querschnitt aller Wiederholungen für das Objektiv *TC23004*

Mit Hilfe der Wiederholungsmessung ist nun bekannt, dass die Breite mit diesem optischen Aufbau nicht genauer aufgelöst werden kann als $0,02 \mu\text{m}$.

Wie bei dem vorherigen Objektiv gibt es keinen nennenswerten Unterschied, welcher Prüfstift verwendet wird. Dies zeigt, dass auch bei diesem optischen Aufbau der Antastfehler unabhängig von der Objektbreite ist.

Ein Auszug aus den Messdaten des Prüfstiftes 56 *TPI* ist im Anhang A.4, Seite 216ff (15 Querschnitte für den linken Bereich neben der Halterung) dargestellt.

Abweichung der erwarteten Kontur

Im Abschnitt 4.1.3, Seite 62, wird erläutert, dass die Schnittkanten separat betrachtet werden sollten. Wird ein vollständiger Zylinder mit perfekten Schnittkanten als Grundlage für die Volumenberechnung verwendet, kann es zu deutlichen Abweichungen kommen. Aus diesem Grund werden die Schnittkanten separat betrachtet. Welche Auswirkungen größere Schnittwinkel auf die Auswertung und somit auf den Korrelationskoeffizienten hat, wird im Abschnitt 7.1.4, Seite 186ff betrachtet.

6.2.3. Volumenberechnung

Im Folgenden werden für die Volumenberechnung der Fehler der einzelnen Parameter im Volumen, die Querschnittsfläche und die Variation der Winkelschritte betrachtet.

Fehler der einzelnen Parameter im Volumen

Das Ziel mit der folgenden Auswertung ist die Unsicherheit der Breiten- und Längenberechnung zu ermitteln. Es ist wichtig, dass die theoretisch ermittelten Standardabweichungen nicht überschritten werden. Ansonsten wäre dies ein direktes Ausschlusskriterium für dieses Objektiv.

Für die Messung wird ein Prüfstift auf der Halterung positioniert und in 9°-Schritten zwischen 0° und 180° aufgenommen. Ohne das Objekt ab zu legen wird die Messung 30 mal durchgeführt.

In jeder Aufnahme wird an je 95 Querschnitten links und rechts neben der Halterung die Breite gemessen. Über diese Breiten wird der Mittelwert $\bar{b}_{lw\alpha}$ gebildet, wobei l für links (bzw. r für rechts), w für die Wiederholung [0 - 30] und α für den Winkel [9° - 180°] steht.

Somit ergibt sich für jede Aufnahme jeweils eine mittlere linke Breite $\bar{b}_{lw\alpha}$ und eine mittlere rechte Breite $\bar{b}_{rw\alpha}$. Die linke und rechte Seite müssen separat betrachtet werden. Falls das Objektiv nicht verzeichnungsfrei ist, würden ansonsten die Ergebnisse nicht der Realität entsprechen. Somit kann zusätzlich kontrolliert werden, ob die Auswertung abhängig von der Bildposition ist. Für jeden Winkel über alle Wiederholungen wird wiederum der Mittelwert gebildet $\bar{b}_{l,\alpha}$. Mit Hilfe dieser Mittelwerte kann die Standardabweichung σ_α der Breiten pro Winkel über alle Wiederholungen bestimmt werden. Die Berechnungsfolge ist im Detail im Anhang A.7 dargestellt (siehe Seite 221).

Zusätzlich wird die mittlere Länge über alle Winkelschritte pro Wiederholung und anschließend die Standardabweichung über alle mittleren Längen der Wiederholungen berechnet.

VS-TC3-65

Die Abbildung 6.2.3.1 zeigt die Standardabweichungen pro Winkel für die Auswertung mit dem Prüfstift 72 *TPI*. Es müssen jedoch beide Seiten separat betrachtet werden. Liegt eine Verzeichnung des Objektivs vor, würden ansonsten die Ergebnisse durch eine Mittelung der beiden Seiten besser dargestellt werden, als sie in Wirklichkeit sind. Die Standardabweichungen liegen unterhalb des theoretischen Wertes. Die mittlere Standardabweichung beträgt für den 72 *TPI* Prüfstift für beide Seiten 0,1 μm .

Für jede Wiederholung wird über alle Winkelaufnahmen die mittlere Objektlänge

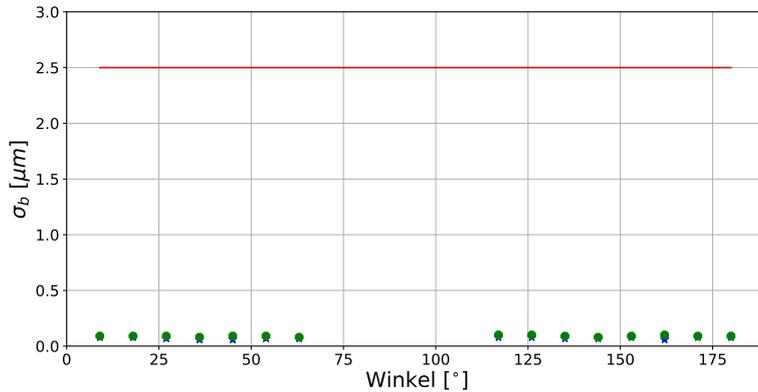


Abbildung 6.2.3.1.: Graphische Darstellung der Standardabweichungen für die Breiten der linken (grün, Kreis) und rechten (blau, Stern) Seite neben der Halterung, abhängig von der Winkelposition für den Prüfstift 72 TPI, aufgenommen mit dem Objektiv VS-TC3-65. Die rote Linie markiert die theoretisch maximale Standardabweichung, die oben berechnet wurde.

ermittelt. Über alle 30 Längen wird die Standardabweichung ermittelt. Diese liegt bei dem Prüfstift 72TPI bei 0,92 µm.

Die Tabelle 6.2.3.1 zeigt die Ergebnisse für alle drei Prüfstifte. Die Standardabwei-

Prüfstift	96 TPI	72 TPI	56 TPI
nom.B [µm]	152,91	203,38	262,23
$\sigma_{b,l}$ [µm]	0,1	0,1	0,1
$\sigma_{b,r}$ [µm]	0,1	0,1	0,1
σ_l [µm]	0,3	0,9	1,0

Tabelle 6.2.3.1.: Ergebnis der Standardabweichung über alle Wiederholungen für die Breite und die Länge (Objektiv VS-TC3-65)

chung der Länge darf maximal 32,5 µm und die Abweichung für die Breite 2,5 µm sein. Diese Werte gelten nur, wenn die jeweils andere Standardabweichung null beträgt. Zur Verdeutlichung werden die berechneten Werte in die Abbildung 4.1.4.1 von Seite 65 eingetragen. Das Ergebnis ist in der Abbildung 6.2.3.2 dargestellt.

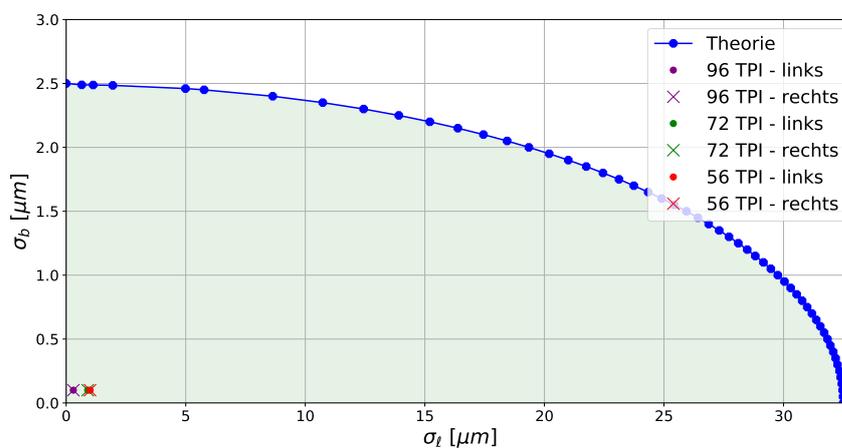


Abbildung 6.2.3.2.: Graphische Darstellung der Standardabweichungen für die Breite und Länge für die drei Prüfstifte sowie die maximalen theoretische Werte

Mit allen drei Prüfstiften sind die Werte deutlich geringer als die Grenzen der maximalen theoretischen Werte.

TC23004

Die Abbildung 6.2.3.3 zeigt die Standardabweichung der Breiten pro Winkel für die Auswertung mit dem Prüfstift 72 TPI. Die Standardabweichungen liegen deut-

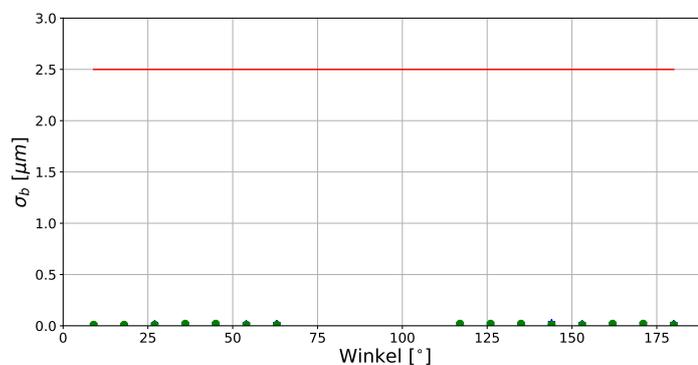


Abbildung 6.2.3.3.: Graphische Darstellung der Standardabweichungen für die Breiten abhängig von der Winkelposition auf der linken (blau, Stern) und der rechten Seite der Halterung (grün, Kreis) für den Prüfstift 72 TPI, aufgenommen mit dem Objektiv TC23004. Die rote Linie markiert die theoretisch maximale Standardabweichung, die oben berechnet wurde.

lich unterhalb des theoretischen Wertes und sind auch geringer im Vergleich zu den

Werten des anderen Objektives (Abbildung 6.2.3.1, Seite 164). Die mittlere Standardabweichung beträgt für den 72 TPI Prüfstift 0,02 μm und ist somit um den Faktor 40 geringer als die Auswertung mit dem vorherigen Objektiv.

Die Tabelle 6.2.3.2 zeigt die Ergebnisse für all drei Prüfstifte für das Objektiv TC23004. Die Standardabweichung ist unabhängig vom Prüfstift. Zur besseren Ver-

Prüfstift	96 TPI	72 TPI	56 TPI
nom.B [μm]	152,91	203,38	262,23
$\sigma_{b,l}$ [μm]	0,02	0,02	0,02
$\sigma_{b,r}$ [μm]	0,03	0,02	0,02
σ_l [μm]	0,35	0,11	0,32

Tabelle 6.2.3.2.: Ergebnis der Standardabweichung über alle Wiederholungen für die Breite und die Länge (Objektiv TC23004)

deutlichung, wo die Werte gegenüber den theoretischen Werten liegen, werden die Standardabweichungen in die Abbildung 4.1.4.1 von Seite 65 eingetragen. Das Ergebnis ist in der Abbildung 6.2.3.4 dargestellt.

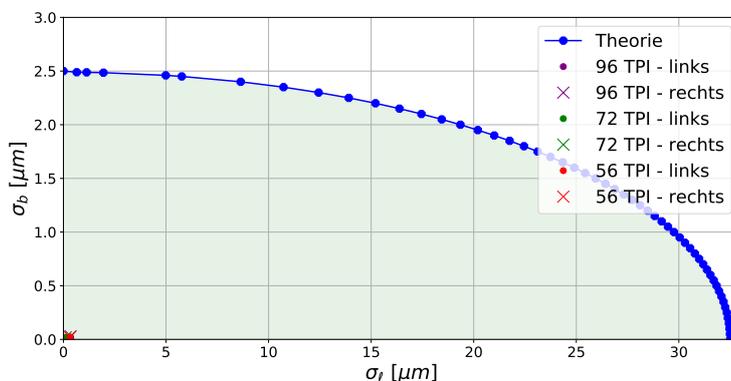


Abbildung 6.2.3.4.: Graphische Darstellung der Standardabweichungen für die Breite und Länge für die drei Prüfstifte sowie die maximalen theoretische Werte (Objektiv TC23004)

Mit allen Prüfstiften sind die Werte deutlich geringer als die Grenzen der maximalen theoretischen Werte.

Querschnittsfläche

Im Abschnitt 4.1.4, Seite 66, ist beschrieben, welche Ansätze zur Berechnung der Querschnittsfläche verwendet werden können. Es werden die Aufnahmen aus der vorherigen Wiederholungsmessung verwendet. Für jede Wiederholung wird die Fläche des Objektes mit den drei beschriebenen Ansätzen bestimmt (Querschnitt Kreis F_K , Ellipse F_E oder numerische Berechnung F_N). Es wird die Standardabweichung über alle Wiederholungen pro Ansatz berechnet ($\sigma_K, \sigma_E, \sigma_N$).

VS-TC3-65

In der Abbildung 6.2.3.5 sind die Flächen über den Wiederholungsschritten dargestellt. Die Kreis- und Ellipsenflächen sind im Graphen nicht unterscheidbar. Die

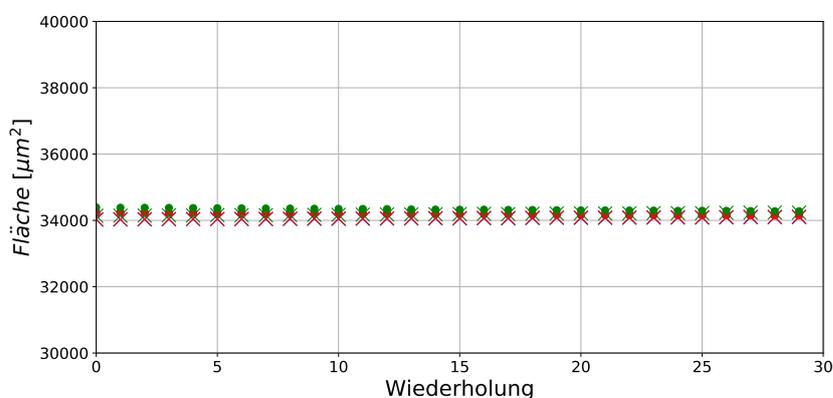


Abbildung 6.2.3.5.: Graphische Darstellung der Flächen mit der Querschnittsgrundlage eines Kreises (blau), einer Ellipse (rot) oder der numerischen Berechnung (grün) für das Objektiv *VS-TC3-65* für die linke (Kreis) und rechte (Kreuz) Seite neben der Halterung

Flächen mit der numerischen Berechnung sind etwas größer, jedoch in sich konstant. Die Tabelle 6.2.3.3 zeigt die Standardabweichungen für jeden Prüfstift über alle 30 Wiederholungen mit den drei Ansätzen. Die Standardabweichungen liegen alle deutlich unter dem theoretischen Wert von $1106 \mu\text{m}^2$ (siehe Abschnitt 4.1.4, Seite 64 ff). Die Prüfstifte sollten ideal rund sein. Aus diesem Grund kann von einer Querschnittsfläche mit der Grundlage eines Kreises ausgegangen werden. Um die berechneten Abweichungen besser bewerten zu können, wird die prozentuale Abweichung A zur idealen Fläche F_i berechnet. Dazu wird die Standardabweichung durch die Fläche geteilt. Somit wird sichtbar wie viel diese Abweichungen in der idealen Fläche ausmachen.

Die Tabelle 6.2.3.4 zeigt die idealen Flächen pro Prüfstift sowie die prozentuale Abweichung A für jede Querschnittsflächenart. Diese Auswertung zeigt, dass es Ab-

Prüfstift	96 TPI	72 TPI	56 TPI
nom.B [μm]	152,91	203,38	262,23
$\sigma_{K,l}$ [μm^2]	17,9	28,2	34,5
$\sigma_{K,r}$ [μm^2]	5,6	22,4	36,3
$\sigma_{E,l}$ [μm^2]	25,0	28,7	33,3
$\sigma_{E,r}$ [μm^2]	12,2	23,5	36,2
$\sigma_{N,l}$ [μm^2]	22,2	34,7	42,8
$\sigma_{N,r}$ [μm^2]	12,0	29,7	46,8

Tabelle 6.2.3.3.: Ergebnis der Standardabweichung über alle Wiederholungen für die Flächen (Objektiv *VS-TC3-65*) mit der Grundlage eines Kreises (σ_K), einer Ellipse (σ_E) und der numerischen Berechnung (σ_N)

Prüfstift	96 TPI	72 TPI	56 TPI
F_i [μm^2]	18363,28	32486,05	54007,40
$A_{K,l}$ [%]	0,10	0,09	0,06
$A_{K,r}$ [%]	0,03	0,07	0,07
$A_{E,l}$ [%]	0,14	0,09	0,06
$A_{E,r}$ [%]	0,07	0,07	0,07
$A_{N,l}$ [%]	0,11	0,1	0,08
$A_{N,r}$ [%]	0,06	0,09	0,08

Tabelle 6.2.3.4.: Ergebnis der Abweichungen zur idealen Fläche für die drei Querschnittsflächen (Objektiv *VS-TC3-65*).

weichungen für die Prüfstifte gibt (0,06 % – 0,14 %). Die geringsten Unterschiede sind vorhanden, wenn die Berechnung von einem Kreisquerschnitt ausgeht.

Für jede Wiederholung wird die mittlere Fläche bestimmt und mit der mittleren Länge zum Volumen multipliziert. Es wird das mittlere Volumen über alle Wiederholungen für die rechte und linke Seite für alle drei Querschnittsflächenarten bestimmt. Mit Hilfe der Standardabweichung σ_V und dem mittleren Volumen kann die prozentuale Abweichung A bestimmt werden. Die Tabelle 6.2.3.5 zeigt die Ergebnisse.

Prüfstift	96 TPI	72 TPI	56 TPI
$A_{K,l}$ [%]	0,18	0,09	0,07
$A_{K,r}$ [%]	0,07	0,07	0,06
$A_{E,l}$ [%]	0,21	0,09	0,07
$A_{E,r}$ [%]	0,10	0,07	0,06
$A_{N,l}$ [%]	0,20	0,11	0,08
$A_{N,r}$ [%]	0,05	0,09	0,08

Tabelle 6.2.3.5.: Ergebnis der Abweichungen zum mittleren Volumen für die drei Querschnittsflächen (Objektiv VS-TC3-65)

Die Auswertung zeigt, dass die Werte noch unter 1 % liegen und die rechte Seite weniger Abweichungen aufweist als die linke.

TC23004

In der Abbildung 6.2.3.6 sind die Flächen über den Wiederholungsschritten für den Prüfstift 72TPI dargestellt. Die Kreis- und Ellipsenflächen sind auch bei diesem op-

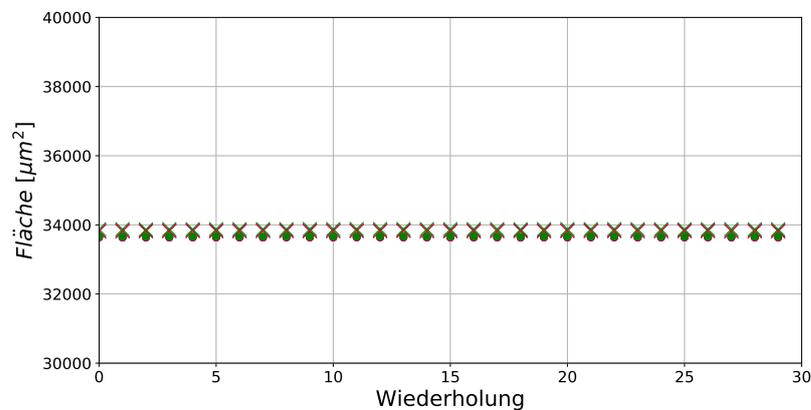


Abbildung 6.2.3.6.: Graphische Darstellung der Flächen mit der Querschnittsgrundlage eines Kreises (blau), einer Ellipse (rot) oder der numerischen Berechnung (grün) für das Objektiv TC23004 für die linke (Kreis) und rechte (Kreuz) Seite neben der Halterung

tischen Aufbau nicht unterscheidbar. Die Flächen mit der numerischen Berechnung liegen gering unter den anderen Flächenwerten. Jedoch sind sie in sich konstant. Die Tabelle 6.2.3.6 zeigt die Standardabweichungen für jeden Prüfstift über alle 30 Wiederholungen mit den drei Ansätzen. Die Standardabweichungen liegen alle deut-

Prüfstift	96 TPI	72 TPI	56 TPI
nom.B [μm]	152,91	203,38	262,23
$\sigma_{K,l}$ [μm^2]	2,1	1,5	5,0
$\sigma_{K,r}$ [μm^2]	3,6	2,4	7,6
$\sigma_{E,l}$ [μm^2]	2,5	1,7	2,6
$\sigma_{E,r}$ [μm^2]	4,1	4,5	5,4
$\sigma_{N,l}$ [μm^2]	2,6	1,8	6,0
$\sigma_{N,r}$ [μm^2]	3,9	2,9	9,1

Tabelle 6.2.3.6.: Ergebnis der Standardabweichung über alle Wiederholungen für die Flächen (Objektiv *TC23004*)

lich unter dem theoretischen Wert von $1106 \mu\text{m}^2$.

Die Tabelle 6.2.3.7 zeigt die idealen Flächen pro Prüfstift sowie die prozentuale Abweichung A für jede Querschnittsflächenart. Diese Auswertung zeigt, dass die

Prüfstift	96 TPI	72 TPI	56 TPI
F_i [μm^2]	18363,28	32486,05	54007,40
$A_{K,l}$ [%]	0,01	0,005	0,009
$A_{K,r}$ [%]	0,02	0,007	0,01
$A_{E,l}$ [%]	0,01	0,005	0,005
$A_{E,r}$ [%]	0,02	0,01	0,01
$A_{N,l}$ [%]	0,01	0,006	0,01
$A_{N,r}$ [%]	0,02	0,009	0,02

Tabelle 6.2.3.7.: Ergebnis der Abweichungen zur idealen Fläche für die drei Querschnittsflächen (Objektiv *TC23004*)

Abweichungen minimal sind für die Prüfstifte und für diese auch nicht relevant ist, welcher Ansatz für die Querschnittsfläche verwendet wird.

Weiterhin wird die Volumenabweichung zum mittleren Volumen bestimmt. Die Ergebnisse sind der Tabelle 6.2.3.8 aufgezeigt. Alle Abweichungen liegen konstant $< 0,02\%$ und somit deutlich unter den Werten mit dem Vergleichsobjektiv. Weiterhin gibt es keinen sichtbaren Unterschied, ob rechts oder links neben der Halterung gemessen wurde.

Prüfstift	96 TPI	72 TPI	56 TPI
$A_{K,l}$ [%]	0,01	0,01	0,01
$A_{K,r}$ [%]	0,02	0,01	0,02
$A_{E,l}$ [%]	0,01	0,01	0,01
$A_{E,r}$ [%]	0,02	0,01	0,02
$A_{N,l}$ [%]	0,01	0,01	0,01
$A_{N,r}$ [%]	0,02	0,01	0,02

Tabelle 6.2.3.8.: Ergebnis der Abweichungen zum mittleren Volumen für die drei Querschnittsflächen (Objektiv *TC23004*)

Variation Winkelschritte

Im Abschnitt 4.1.4, Seite 71, ist erläutert, dass ein Winkelabstand von 18° angewendet werden sollte. Dies bedeutet, dass 10 Aufnahmen benötigt werden. Bei einer Belichtungszeit von 200 ms würden zwei Sekunden für die Bildaufnahme verwendet. Die kleinsten Abweichungen der Breitenmessung bei der Untersuchung im Abschnitt 4.1.4 liegt bei einer Winkelschrittweite von 9° vor. Jedoch würde die Bildaufnahme bei 20 Bildern schon vier Sekunden betragen. Bei einer gewünschten Prozesszeit von fünf Sekunden ist dies für diese Winkelschrittweite ein Ausschlusskriterium, da die Auswertung deutlich länger als die Bildaufnahme sein wird und somit die Prozesszeit nicht erreicht werden kann.

6.2.4. Objektivbewertung

Die Tabelle 6.2.4.1 fasst alle oben erzielten Ergebnisse zu den Objektiven zusammen.

Optischer Aufbau				
Eigenschaft		Soll	VS-TC3-65	TC23004
Kamera			VLG-22M	
Beleuchtung			telezentrisch, rot	
MTF	Auflösungsgrenze [LP/mm]		63	90
Verzeichnung	vorhanden	nein	ja	nein

Bildauswertung				
Auflösung	Abbildungsmaßstab [$\mu\text{m}/\text{Pxl}$]	0,96	1,83	2,75
Anzahl Aufnahmen			10	
Kantenbreite	Steigung		9	29
	$U = \frac{b_{ideal}}{b_{ist}}$ [%]		0,41	0,04

Objekt				
Auswirkung höherer Fehlerfaktoren		alle drei Querschnittsvarianten betrachten		
Gewichtung der Faktoren	$\bar{\sigma}$ [μm]		0,02	0,02
Abweichung der erwarteten Kontur		Schnittkanten separat betrachten		

Volumenberechnung				
Fehler Parameter	σ_B [μm]	< 2,5	0,09	0,02
	σ_l [μm]	< 32,5	0,9	0,35
Querschnittsfläche	σ_K [μm^2]		36,3	7,6
	σ_E [μm^2]	< 1106	36,2	5,4
	σ_N [μm^2]		44,5	10,5
Volumen	A [%]	< 2,5%	0,2	0,02
Variation Winkelschritte			Winkelschrittweite 18°	

Tabelle 6.2.4.1.: Übersicht der Ergebnisse zur Bewertung der Objektiv *VS-TC3-65* und *TC23004*

Es wird die Kamera *VLG-22M* von Baumer und ein telezentrisches Durchlicht in rot verwendet.

Die Auflösungsgrenze mit dem Objektiv *TC23004* liegt bei 90 LP/mm. Mit dem

Objektiv *VS-TC3-65* werden nur 63 LP/mm erreicht.

Die Auswertungen haben gezeigt, dass das Objektiv *VS-TC3-65* nicht verzeichnungsfrei ist, sondern eine starke Kissenverzeichnung hat. Das Objektiv *TC23004* hat hingegen keine ergebnisbeeinflussende Abweichung. Dies hat zur Folge, wenn das Objektiv *VS-TC3-65* verwendet werden sollte, dass der optische Aufbau aufwändig kalibriert werden müsste.

Die Auflösung des Messsystems sollte theoretisch maximal $0,96 \mu\text{m}/\text{Pxl}$ betragen. Mit beiden Objektiven wird diese Auflösung nicht erreicht, wobei der Wert mit dem *VS-TC3-65* Objektiv von beiden Auswertungen am nächsten liegt.

Es werden 10 Aufnahmen pro Polymerstäbchen gemacht. Für die Detektion der Objektbreite ist die Kantenbreite ausschlaggebend. Ist diese unscharf, kann es zu Fehlern in der Breitenmessung kommen. Die Auswertung hat gezeigt, dass die Kanten mit dem *TC23004* deutlich steiler sind und die Abweichungen zur idealen Kante bei dieser Abbildung sehr gering ist. Dadurch wird das Objekt deutlich besser abgebildet.

Es werden immer alle drei Querschnittsflächen für die Auswertungen betrachtet und die Schnittkanten separat berechnet. Der Antastfehler bei dem Objektiv mit der kleineren Vergrößerung ist deutlich geringer als mit dem *VS-TC3-65*.

Für die Volumenberechnung sind die Fehler der einzelnen Parameter, die Querschnittsfläche, das Volumen und die Variation der Winkelschritte relevant. In der Theorie darf die Standardabweichung für die Breite nicht mehr als $2,5 \mu\text{m}$ betragen und für die Länge $< 32,5 \mu\text{m}$. In der Abbildung 6.2.4.1 sind die berechneten Werte in den Graphen für die maximalen theoretischen Werte eingetragen.

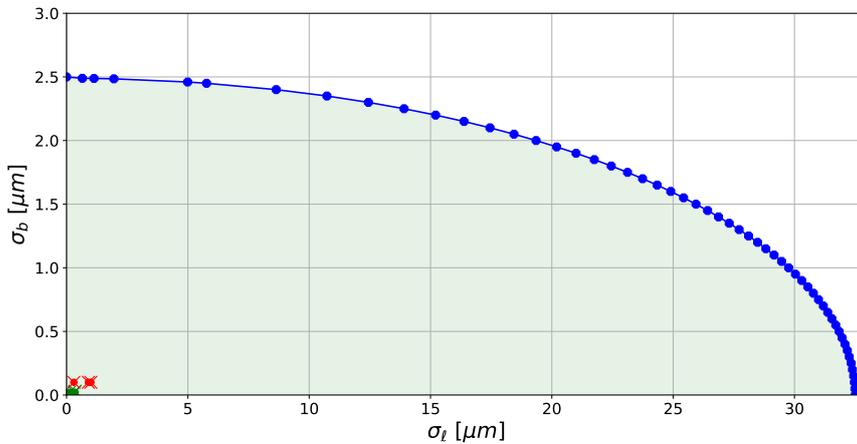


Abbildung 6.2.4.1.: Graphischer Zusammenhang zwischen den Standardabweichungen τ_b und τ_l für eine maximale Volumenabweichung von 1 %. Darstellung der Ergebnisse mit dem *VS-TC3-65* (rot) und *TC23004* (grün) Objektiv für die Auswertung der drei Prüfstifte (linke Seite = Kreis; rechte Seite = Kreuz).

Alle Werte liegen weit unter den Grenzwerten. Die Abweichungen mit dem Objektiv *TC23004* sind geringer im Vergleich zu den Werten mit dem Objektiv *VS-TC3-65*.

Die Standardabweichung der Querschnittsflächen darf 1106 μm nicht überschreiten, damit die Volumenabweichung unter 2,5 % bleibt. Werden nur die Ergebnisse verglichen, sind die Werte mit dem Objektiv *TC23004* signifikant besser (Faktor 5).

Die Volumenabweichung muss unter 2,5 % liegen. Die Wiederholungsmessungen haben gezeigt, dass die Abweichungen mit dem bi-telezentrischen Objektiv *TC23004* um den Faktor 10 besser ist.

Damit die Prozesszeit eingehalten werden kann, wird eine Winkelschrittweite von 18° verwendet.

Die Tabelle 6.2.4.1 bewertet welches Objektiv das bessere Ergebnis erreicht hat (grün). Die Bewertung der Ergebnisse zeigt, dass das Objektiv mit der geringeren Vergrößerung die besseren Werte erzielt. Auch wenn der Abbildungsmaßstab kleiner ist, ist das Objektiv besser korrigiert und erreicht deutlich bessere Ergebnisse. Der optische Aufbau muss mit diesem Objektiv nicht kalibriert werden, um eine mögliche Verzeichnung herauszurechnen. Dies müsste durchgeführt werden, wenn das Objektiv *VS-TC3-65* verwendet werden soll. Im Hinblick darauf, dass das VI in einem Produktionsprozess integriert wird, sollte der Aufwand gering gehalten werden, da

die Kalibrierung mehrmals durchgeführt werden muss. Dies ist abhängig vom Industriepartner und kann zwischen einmal am Tag, mehrmals am Tag oder bei jedem Produktwechsel stattfinden.

Aus diesen Gründen wird für den VI Aufbau das Objektiv *TC23004* gewählt.

Zusätzlich haben die Tests gezeigt, dass fast alle Forderungen an den Aufbau erfüllt werden. Die theoretische Auflösung wird nicht erreicht. Dies ist jedoch kein Ausschlusskriterium für das Objektiv, da das Zusammenspiel aller Faktoren betrachtet wird.

Optischer Aufbau				
Eigenschaft		Soll	VS-TC3-65	TC23004
Kamera			VLG-22M	
Beleuchtung			telezentrisch, rot	
MTF	Auflösungsgrenze [LP/mm]		63	90
Verzeichnung	vorhanden	nein	ja	nein

Bildauswertung				
Auflösung	Abbildungsmaßstab [$\mu\text{m}/\text{Pxl}$]	0,96	1,83	2,75
Anzahl Aufnahmen			10	
Kantenbreite	Steigung		9	29
	$U = \frac{b_{ideal}}{b_{ist}}$ [%]		0,41	0,04

Objekt				
Auswirkung höherer Fehlerfaktoren		alle drei Querschnittsvarianten betrachten		
Gewichtung der Faktoren	$\bar{\sigma}$ [μm]		0,02	0,02
Abweichung der erwarteten Kontur		Schnittkanten separat betrachten		

Volumenberechnung				
Fehler Parameter	σ_B [μm]	< 2,5	0,09	0,02
	σ_ℓ [μm]	< 32,5	0,9	0,35
Querschnittsfläche	σ_K [μm^2]		36,3	7,6
	σ_E [μm^2]	< 1106	36,2	5,4
	σ_N [μm^2]		44,5	10,5
Volumen	A [%]	< 2,5%	0,2	0,02
Variation Winkelschritte			Winkelschrittweite 18°	

Tabelle 6.2.4.2.: Bewertung der Objektiv-Ergebnisse (VS-TC3-65 und TC23004)

7. Systemtests an realen Objekten

Im folgenden Kapitel wird das System mit realen Objekten getestet. Zuerst werden die Einflussgrößen im Messprozess mit Polymerstäbchen geprüft und die Messmittelfähigkeit des Systems bestimmt. Anschließend wird der Korrelationskoeffizient berechnet. Diese Messungen werden zeigen, ob mit dem VI das Ziel von einem Korrelationskoeffizienten von mindestens 98% erreicht werden kann.

Im nächsten Schritt wird das Volumen mit einer übergeordneten Genauigkeit ermittelt (CT). Zuerst wird der Messablauf und -aufbau erläutert und eine Wiederholungsmessung mit einem Polymerstäbchen mit dem CT-System durchgeführt. Die daraus resultierende Genauigkeit darf die theoretischen Werte nicht übersteigen (Vergleich Abschnitt 4.3.5, Seite 93), damit das System als Referenzsystem verwendet werden kann. Anschließend wird eine Oberflächenanalyse durchgeführt und im letzten Schritt das VI-System qualifiziert, indem einige Polymerstäbchen mit dem VI und dem CT vermessen und verglichen werden.

7.1. Einflussgrößen im Messprozess

Die vorherigen Betrachtungen haben die Einflussgrößen im Messprozess theoretisch oder mit Prüfstiften betrachtet. Wie stark sich die Theorie und das Messen an realen Objekten unterscheiden, wird im Folgenden geprüft. Zuerst werden Wiederholungsmessungen mit einem Polymerstäbchen an dem VI-System durchgeführt. Somit kann festgestellt werden, ob die Genauigkeit vom Prüfobjekt abhängt (Prüfstifte und Polymerstäbchen) und ob die Genauigkeit mit den realen Objekten die theoretischen Werte nicht übersteigt. Im nächsten Schritt wird geprüft, ob das Messsystem den Anforderungen gerecht wird und messfähig ist. Dazu wird eine Messmittelfähigkeitsanalyse mit Prüfstiften und den Toleranzen des Polymerstäbchens durchgeführt. Die nächste Fragestellung ist, ob die Taktzeit mit der Aufnahme und Auswertung der Objekte die Vorgabe von 5 s nicht übersteigt. Anschließend wird geprüft, ob die gewählten Parameter in der Theorie (Winkelschrittweite, Querschnittsannahme, separate Schnittkantenbetrachtung) auch in der Praxis die besten Ergebnisse erreicht. Dazu werden die Parameter variiert und die Volumina miteinander verglichen. Im letzten Schritt wird die Korrelation zwischen Volumen und Gewicht für eine große Anzahl an Polymerstäbchen bestimmt und geprüft, ob das System die Vorgabe von 98 % erreicht. Wenn alle Einflussgrößen unter den theoretischen Werten bleiben und

die Vorgaben der Taktzeit und Korrelation erreicht werden, kommt das VI System als Ersatz für die Waage in Frage.

7.1.1. Wiederholungsmessung Volumen-inline System

In diesem Abschnitt wird geprüft, wie gut das VI-System die realen Objekte vermessen kann. Ist der Antastfehler vergleichbar mit den Prüfstiften oder gibt es bei der Auswertung der Daten eine Abhängigkeit, ob es sich bei der Aufnahme um Prüfobjekte oder Polymerstäbchen handelt.

Es werden Wiederholungsmessungen mit dem VI durchgeführt. Somit kann eine Aussage getroffen werden, wie gut das System die Parameter (Breite und Länge) bestimmen kann, welche Einflüsse auf das Ergebnis einwirken und ob die theoretische Genauigkeit mit den Polymerstäbchen erreicht werden können. Mit den Messungen wird der Antastfehler bestimmt.

Mit Hilfe der ersten Messung wird geprüft, wie stark die Abweichungen, die durch die Bildverarbeitung entstehen, beispielsweise durch den Antastfehler, sind. Die Genauigkeit, die bei dieser Messung erzielt wird, ist das Limit des Systems. Für die Messung wird ein Objekt auf dem Handhabungssystem positioniert und nicht bewegt. Die Bildaufnahme wird 30x hintereinander ausgeführt und diese Bilder ausgewertet.

Die Standardabweichungen über alle Querschnitte aller Wiederholungen beträgt $\sigma_{links} = 0,010 \mu m$ und $\sigma_{rechts} = 0,019 \mu m$. Dieser Wert entspricht der Auswertung mit den Prüfstiften. Dies weist daraufhin, dass das Polymerstäbchen den Antastfehler nicht negativ beeinflusst.

Es können Abweichungen durch das Zusammenspiel der Dreheinheit (Nullpunkt nicht zentrisch) und der Optik entstehen. Das Objekt wird nicht bei jedem Winkelschritt identisch abgebildet und dies könnte das Ergebnis zusätzlich beeinflussen. Aus diesem Grund wird wieder das Polymerstäbchen positioniert und gedreht (0° bis 180°). Dabei wurden in 18° -Schritten Bilder aufgenommen. Anschließend wird die Dreheinheit auf die Ausgangsstellung zurück gefahren und die Aufnahmen wiederholt, ohne dass der Prüfstift von der Halterung abgenommen wird. Für die Auswertung werden alle Aufnahmen eines Winkelschrittes für sich betrachtet. Daraus ergibt sich, wie stark der Einfluss der Dreheinheit auf die Messung ist. Im Idealfall sollte sich beispielsweise die Breite bei einem Winkelschritt über alle Wiederholungen nicht ändern. Die Ergebnisse sind in der Tabelle 7.1.1.1 dargestellt. Die Werte sind vergleichbar mit den Auswertungen der Prüfstifte. Die Standardabweichung liegt weiterhin deutlich unter den theoretischen Werten. Wird die Standardabweichung im Verhältnis zum mittleren Volumen betrachtet, ergibt sich eine Abweichung von 0,09%.

Dies zeigt, dass der Aufbau auch mit realen Objekten die Werte mit optimalen Prüf-

Eigenschaft	Ergebnis
$\sigma_{b,l}$ [μm]	0,02
$\sigma_{b,r}$ [μm]	0,02
σ_b [μm]	0,02
σ_l [μm]	1,10
$\sigma_{E,l}$ [μm^2]	7,2
$\sigma_{E,r}$ [μm^2]	4,8
σ_E [μm^2]	4,5
$\frac{\sigma_V}{V}$ [%]	0,09

Tabelle 7.1.1.1.: Ergebnisse der Standardabweichung für die Breite, der Länge, der Fläche und des Volumens für ein Polymerstäbchen

stiften erreicht und das Objekt die Messung/Auswertung nicht negativ beeinflusst.

Im Kontext der industriellen Produktion kann die Wiederholungsmessung genutzt werden, um die Messmittelfähigkeit des Systems zu ermitteln.

Im Abschnitt 4.1.2, Seite 52f, wird der Vorgang zur Berechnung der Messmittelfähigkeit beschrieben. Mit der Analyse kann geprüft werden, ob mit den erzielten Werten ein stabiler Prozess möglich ist.

Die drei Prüfstifte werden jeweils 30 mal in 9°-Schritten aufgenommen. Für die Toleranz wird die Kundenangabe verwendet ($\pm 4,79 \mu\text{m}$). Der Nominalwert der Prüfstifte entspricht den Spezifikationen des Herstellers.

Für jeden Prüfstift wird für jede Winkelposition über alle 30 Wiederholungen die mittlere Breite, die Standardabweichung und der C_g - und C_{gk} -Wert berechnet. Die Mittelwerte über alle Winkelpositionen sind in der Tabelle 7.1.1.2 angegeben.

Prüfstift	C_g	C_{gk}
96 TPI	14,0	13,0
72 TPI	18,6	16,3
56 TPI	14,4	11,3

Tabelle 7.1.1.2.: Ergebnisse der Messmittelfähigkeit für alle drei Prüfstifte

Im Anhang A.6, Seite 219, ist ein Auszug des Prüfstifts 96TPI für den Winkelschritt 9° dargestellt.

Alle Werte liegen deutlich über 1,33. Das Messsystem wird den Anforderungen gerecht und ist messfähig.

7.1.2. Taktzeit Volumen-inline System

Die Prozesszeit pro Polymerstäbchen sollte nicht größer als fünf Sekunden betragen. Es wird definiert, dass die Prozesszeit startet, wenn das Objekt auf dem Handhabungssystem positioniert und endet, wenn die letzte Aufnahme ausgewertet wurde. Momentan wird für jede Aufnahme der Motor angehalten. Da der Motor eine kurze Zeit benötigt, um eine stabile Position zu erreichen, ist nach jedem Anhalten vor der Bildaufnahme eine Wartezeit von zwei Sekunden programmiert. Aus diesem Grund werden die Drehzeit des Objektes und das Anhalten nicht in die Prozesszeit eingerechnet. In einem späteren Aufbau sollte der Motor durch eine neue Version ersetzt werden. Da die Belichtungszeit sehr gering ist ($200\ \mu\text{s}$), können die Aufnahmen während dem Drehen aufgenommen werden und beeinflussen somit die Prozesszeit nicht.

Die Prozesszeit beinhaltet folgende Punkte:

- Bildaufnahme
- Bild speichern
- Bildauswertung
- Volumenberechnung.

Die Firma *IMSTec* hat ein Softwaretool *IMSShell* erstellt, mit dem Kameras angesteuert, der Motor gedreht und die Bilder abgespeichert werden können. Weiterhin gibt es ein internes *TestTool* um Bilderordner zu laden und es lädt für die Auswertung *Cognex* oder *Halcon*. Diese beiden Softwares werden verwendet, um die Bildverarbeitung in der Firma zu realisieren. Dafür wurde ein Cognexadapter in C# programmiert, um *VisionPro* aus dem *TestTool* heraus aufrufen zu können. Für die Volumenberechnung werden alle ermittelten Breiten und Längen des Polymerstäbchens in einer *Halcon* Prozedur geladen, die das Volumen daraus berechnet. Es werden 280 Bilder (28 Objekte) aufgenommen, ausgewertet und die Zeit über alle gemittelt. Dabei ergeben sich die Werte in der Tabelle 7.1.2.1.

Prozessschritt	Auswertetool	Zeit [Sekunden]
Bildaufnahme	IMSShell	0,074
Bild speichern		
Bildauswertung	TestTool	0,624
Volumenberechnung	Halcon	0,008
		0,71

Tabelle 7.1.2.1.: Benötigte Zeit für jeden Prozessschritt

Die Prozesszeit pro Aufnahme eines Polymerstäbchens beträgt 0,71 s.

Es werden pro Objekt 10 Aufnahmen aufgenommen. Jedoch können davon drei Bilder nicht ausgewertet werden, da die Halterung das Polymerstäbchen verdeckt. Im späteren Ablauf würden ausschließlich die Positionen angefahren und ausgewertet werden, die das Objekt zeigen. Für die sieben Aufnahmen würde sich somit eine Prozesszeit von 4,97 s ergeben. Die Zeit liegt somit minimal unterhalb der gewünschten Prozesszeit.

Es gibt Optimierungsoptionen. Das verwendete Software Tool zur Auswertung hat einigen Komfort. Es wird ein Stapel Ordner ausgesucht und ausgewertet. Das Programm durchläuft die Bilder automatisch und ruft für die Auswertung *Cognex* auf. Das Tool hat aber einen Overhead. Es übergibt Input Parameter an *Cognex*, führt das Programm aus, holt das Ergebnisbild und gleicht die Outputs mit Schwellwerten ab. Dieser Vorgang wird immer durchgeführt, unabhängig davon, ob es In- und Outputs gibt oder nicht. Die reine Auswertzeit, wenn das Bild in *Cognex* aufgerufen und ausgewertet wird, beträgt 400 ms ($TestTool = 642$ ms).

Eine weitere Optimierungsmöglichkeit ist die Parallelisierung der Prozesspunkte. Mit einer optimierten Software könnten weitere Bilder aufgenommen werden, während die ersten Bilder ausgewertet werden. Die Abbildung 7.1.2.1 zeigt ein mögliches Ablaufdiagramm.

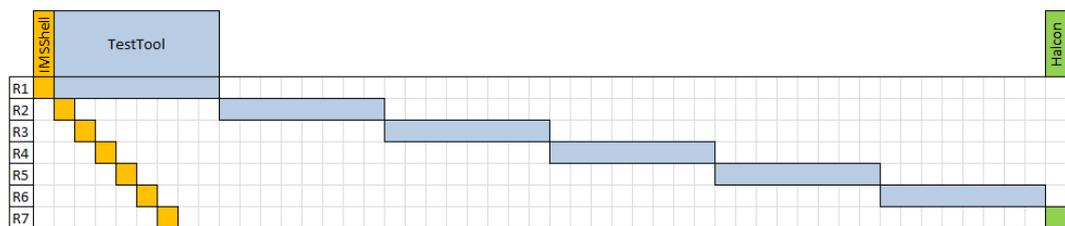


Abbildung 7.1.2.1.: Darstellung der Prozesspunkt-Parallelisierung für die drei Auswertepunkt *IMSShell* (Bildaufnahme, Bild speichern; orange), *TestTool* (Bildauswertung; blau) und *Halcon* (Volumenberechnung; grün) für alle sieben Rotationsposition. Eine Zeiteinheit entspricht 79 ms.

Für jede Rotation (R1-R7) wird mit der *IMSShell* das Bild aufgenommen und abgespeichert. Anschließend wird mit dem *TestTool* die Aufnahme ausgewertet. Die restlichen Bilder können ausgewertet werden und zum Abschluss wird das Volumen berechnet (Volumenberechnung programmiert in *Halcon*). Durch diese Parallelisierung ergibt sich eine Prozesszeit von 4,45 s für alle sieben Aufnahmen des Polymerstäbchens. Somit würde die Prozesszeit unter dem Sollwert von fünf Sekunden liegen.

7.1.3. Volumenvergleich

Die Auswertungen haben gezeigt, dass der optische Aufbau und die Bildverarbeitung bzw. die Berechnung, für die Messaufgabe geeignet sind und die theoretischen Annahmen nicht übersteigen. Im nächsten Schritt wird überprüft, ob die angenommenen Parameter (Winkelschrittweite, maximal erlaubter Schnittwinkel, separate Schnittkantenbetrachtung, Querschnittsannahme) in der Praxis die besten Ergebnisse bringen.

Für den Volumenvergleich und den Korrelationskoeffizienten werden Objekte mit unterschiedlichen Gewichten bzw. Volumina benötigt. Um dies zu erzielen, werden mehrere Polymerstäbchen händisch in unterschiedlichen Längen geschnitten. Das Handhabungssystem, um die Filamente in kleinere Stäbchen zu unterteilen, ist in der Abbildung 7.1.3.1 dargestellt.

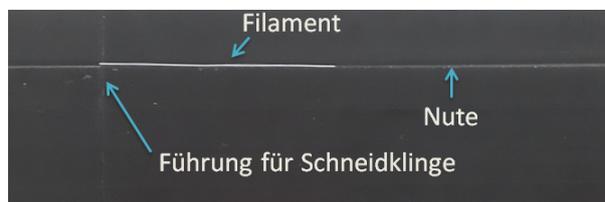


Abbildung 7.1.3.1.: Graphische Darstellung des Handhabungssystems um die Filamente mit Hilfe einer Rasierklinge in kleine Stäbchen zu unterteilen

Es besteht aus einem Kunststoffblock mit einer Nute. Diese hat den Radius eines Polymerstäbchens. Senkrecht dazu verläuft eine weitere Nute, die die Breite einer Rasierklinge hat. Das Filament wird in die lange Vertiefung gelegt und mit einer Klinge in kleine Polymerstäbchen geschnitten.

In der theoretischen Betrachtung werden die Parameter Winkelschrittweite, Annahme der Querschnittsfläche, sowie die Betrachtung der Schnittkante festgelegt. Für ein optimales Ergebnis und der Einhaltung der Prozesszeit sollten die Parameter in der Theorie folgendermaßen gewählt werden:

Winkelschrittweite:	18°
max. Schnittwinkel	20°
separate Randbereichbetrachtung:	ja
Querschnittsannahme:	Ellipse

Die Winkelschrittweite sollte 18° betragen, da mit einer kleineren Schrittweite und somit mit mehr Aufnahmen bzw. mehr Auswertzeit die Prozesszeit nicht mehr eingehalten werden kann. Der maximale Schnittkantenwinkel ist in der Spezifikation

mit 15° angegeben. Dies gilt jedoch für die Objekte, die mithilfe eines Cutters geschnitten werden. Es ist sehr schwierig mit dem händische Schneiden Schnittkanten senkrecht zur Längsachse des Objektes zu erzeugen, wird der maximal zulässige Schnittkantenwinkel auf 20° erhöht. Weiterhin wird angenommen, dass der Querschnitt einer Ellipse entspricht bzw. sich ähnelt.

Im Folgenden wird geprüft, ob diese Annahmen richtig sind. Dafür werden die Volumina, die mit diesen Eigenschaften aufgenommen/berechnet werden, als theoretische Vergleichsbasis (Theorie) bezeichnet.

Es werden 77 Objekte geschnitten, mit dem VI aufgenommen und ausgewertet. Für die Auswertung werden unterschiedliche Varianten durchgeführt. Diese sind in der Tabelle 7.1.3.1 dargestellt.

Variante	Theorie	A	B	C
Winkelschrittweite [°]	18	18	36	36
max. Schnittwinkel [°]	20	20	20	20
separate Randbereichbetr.	ja	nein	ja	nein

Tabelle 7.1.3.1.: Übersicht der Varianten zur Volumenbestimmung

Für jede Variante wird das Volumen der Objekte mit den drei Querschnittsannahmen Kreis, Ellipse und der numerischen Berechnung bestimmt. Es wird für jede Variantenkombination die Stichprobenstandardabweichung ermittelt. Diese ist nach [29] mit

$$s_j = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X}_i)^2} \quad (7.1)$$

definiert. Dabei entspricht \bar{X}_i dem Theorie-Volumen. Weiterhin wird die mittlere Volumenabweichung bestimmt ($\frac{s_j}{V_{Theorie}}$). Die Tabelle 7.1.3.2 zeigt die Ergebnisse für die Variantenkombinationen.

Querschnitt	Variantenvergleich	s_j [mm^3]	RMS/MW [%]
Kreis	Theorie & A	0,00017	0,44
	Theorie & B	0,00035	0,91
	Theorie & C	0,00044	1,13
Ellipse	Theorie & A	0,00025	0,64
	Theorie & B	0,00053	1,35
	Theorie & C	0,00063	1,63
num. Berechnung	Theorie & A	0,00031	0,81
	Theorie & B	0,00055	1,41
	Theorie & C	0,00060	1,53

Tabelle 7.1.3.2.: Ergebnisse der Stichprobenstandardabweichung und Volumenabweichung für verschiedene Kombinationen der Volumenvarianten

Alle Abweichungen liegen deutlich unter der zukünftigen Toleranz von 2,5%. Werden die Querschnittsformen unabhängig voneinander betrachtet, werden die besten Ergebnisse und somit die kleinsten Abweichungen erreicht, wenn die theoretischen Volumina mit der Variante A verglichen werden. Der Randbereich wird einmal separat beachtet und einmal wird von einem vollständigen Zylinder ausgegangen. Dies bedeutet, dass die separate Randbereichsbetrachtung für diese Auswahl an Objekten keinen starken Unterschied erzeugt. Wird im Vergleich zu den theoretischen Parameter die Winkelschrittweite verdoppelt, wird die Abweichung um das 1,7- bis 2,1-fache schlechter. Dies ist unabhängig vom Querschnittsform. Für alle drei Querschnittsannahmen verschlechtert sich s_j um das Doppelte. Im letzten Vergleich ist die Winkelschrittweite verdoppelt und die Randbereiche werden nicht separat berechnet. Dies verschlechtert das Ergebnis um das 2- bis 2,6-fache. Dies zeigt, dass die theoretischen Parameter richtig gewählt wurden. Es wäre nur sinnvoll bspw. die Winkelschrittweite zu erhöhen, wenn somit signifikant die Prozesszeit verbessert wird, da somit die Stichprobenabweichung deutlich steigt. Dasselbe gilt für die separate Schnittekantenbetrachtung.

Die Auswertung zeigt, dass der Vergleich zwischen dem theoretischen Volumen und der Variante A am besten ist. Werden für diesen Vergleich die verschiedenen Querschnittsformen betrachtet, wird das beste Ergebnis für die Annahme eines Kreises erreicht. Die numerische Flächenberechnung hat eine 1,8-fache schlechtere Standardabweichung und die Annahme eine Ellipse liegt in der Mitte. Die Abweichung würde geringer werden, wenn mehr Aufnahmen verwendet werden, da die Genauigkeit der numerischen Flächenberechnung mit der Anzahl der Bilder steigt. Jedoch kann die Anzahl wegen der Taktzeit nicht erhöht werden.

Im nächsten Schritt werden unterschiedliche Schnittekantenwinkel zugelassen. Die

Parameter Winkelschrittweite 18° , separate Randbereichsbetrachtung bleiben fest. Nur der Schnittkantenwinkel wird geändert und der Vergleich zwischen den Querschnittsformen (Kreis zu Ellipse, Kreis zur numerischen Berechnung) wird betrachtet. Der Kreis wird als Theorie festgelegt, da er in der vorherigen Betrachtung das beste Ergebnis erzielt hat.

Die Abbildung 7.1.3.2 zeigt den graphischen Zusammenhang zwischen dem Schnittkantenwinkel und der prozentualen Abweichung zwischen den Querschnittsformen.

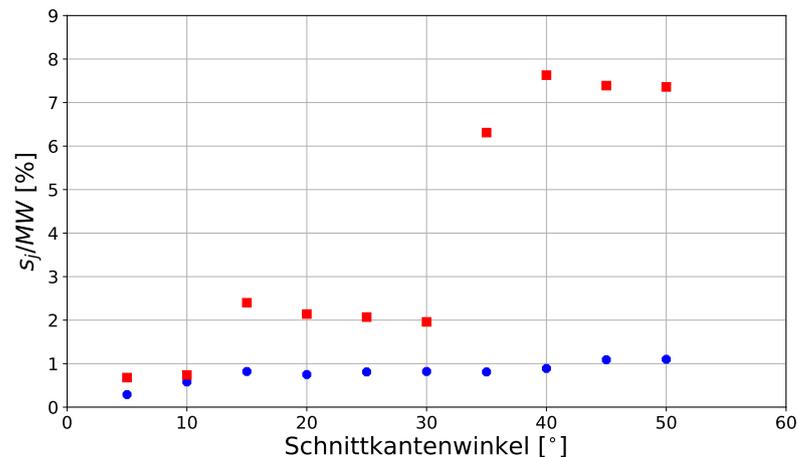


Abbildung 7.1.3.2.: Graphische Darstellung des Zusammenhangs zwischen dem Schnittkantenwinkel und der Abweichung zwischen dem theoretischen Volumen und der Querschnittsannahme einer Ellipse (blau, Kreis) und der numerischen Flächenberechnung (rot, Rechteck)

Es ist erkennbar, dass die Abweichungen zwischen der Annahme, dass der Querschnitt einem Kreis ähnelt und der numerischen Flächenberechnung stark abhängig von dem Schnittkantenwinkel ist. Je größer der zulässige Winkel ist, desto stärker wächst die Abweichung zwischen den beiden Ansätzen. Werden hingegen die Ellipse und der Kreis verglichen, wächst die Abweichung auch mit dem Schnittkantenwinkel, jedoch nur minimal. Dies zeigt, dass der numerische Ansatz deutlich stärker vom Schnittkantenwinkel negativ beeinflusst wird als die beiden anderen Ansätze.

Der Volumenvergleich zeigt, dass die theoretischen Parameter richtig gewählt wurden. Für die Berechnung des Korrelationskoeffizienten wird eine Winkelschrittweite von 18° , eine maximale Schnittkantenwinkel von 20° , die Randbereiche werden separat betrachtet und als Querschnittsannahme wird der Kreis und die Ellipse verwendet, da diese beiden Annahmen die besten Ergebnisse erzielt haben.

7.1.4. Korrelationskoeffizient Volumen–Gewicht

Der Korrelationskoeffizient wird zur Überprüfung verwendet, wie gut das Volumen und das Gewicht der Polymerstäbchen übereinstimmen. Dafür werden die Objekte aus der vorherigen Betrachtung verwendet.

Die Abbildung 7.1.4.1 zeigt das Flussdiagramm des Messablaufes.

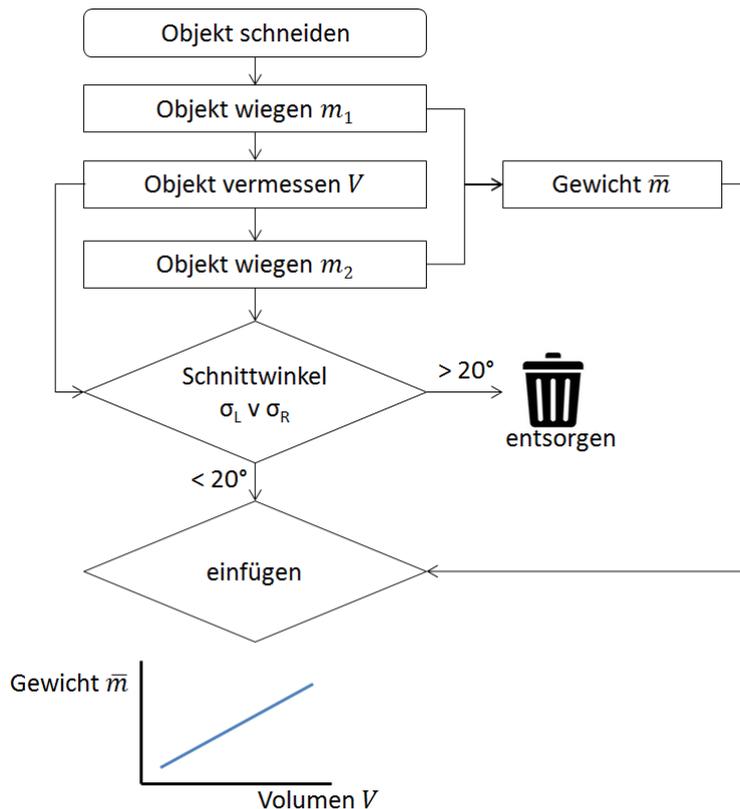


Abbildung 7.1.4.1.: Übersicht des Messablaufes für die Bestimmung des Korrelationskoeffizienten in Form eines Flussdiagramms

Alle Objekte werden erst gewogen, anschließend mit dem VI aufgenommen und ausgewertet. Zum Schluss wird das Objekt ein zweites Mal gewogen. Aus den beiden Gewichten wird der Mittelwert für jedes Polymerstäbchen für die Gegenüberstellung verwendet. Da mit dem händischen Schneiden der Polymerstäbchen keine konstanten und senkrechten Schnittkanten erreicht werden, wird der Schnittkantenwinkel erhöht (von 15 % auf 20 %). Nur wenn beide Schnittwinkel unter der Grenze liegen, wird das Objekt zur Auswertung hinzugefügt.

Alle Gewichte werden über den Volumina aufgetragen. Das Ergebnis ist in der Abbildung 7.1.4.2 dargestellt.

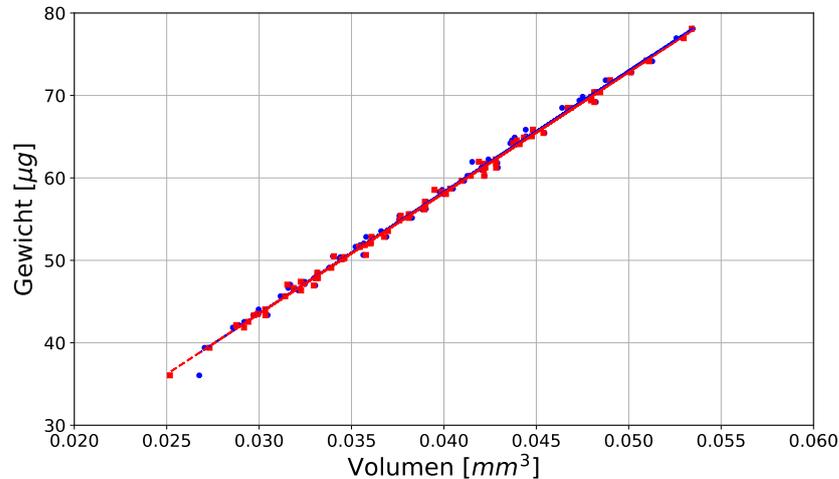


Abbildung 7.1.4.2.: Graphische Darstellung der Abhängigkeit zwischen dem Volumen und dem Gewicht für 77 Polymerstäbchen mit der Querschnittsannahme eines Kreises (blau) und einer Ellipse (rot). Das Bestimmtheitsmaß liegt bei 99,55 % (Ellipse: 99,75 %) und der Korrelationskoeffizient bei 99,78 % (Ellipse: 99,87 %)

Die Berechnung erfolgt wie im Abschnitt 4.2.3 (Seite 83f) beschrieben. Die Standardabweichung des Volumens über alle Objekte beträgt $s_x = 0,0066 \text{ mm}^3$ (Ellipse: $s_x = 0,0067 \text{ mm}^3$) und für die Gewichte $s_y = 9,55 \text{ µg}$. Für die Kovarianz ergibt sich ein Wert von $s_{xy} = 0,065 \text{ mm}^3 \text{ µg}$ (Ellipse: $s_{xy} = 0,065 \text{ mm}^3 \text{ µg}$). Damit beträgt der Korrelationskoeffizient $r_{xy} = 99,78 \%$ (Ellipse: $r_{xy} = 99,87 \%$) und das Bestimmtheitsmaß $B_{xy} = 99,55 \%$ (Ellipse: $B_{xy} = 99,75 \%$). Das Korrelationsziel zwischen dem Volumen und dem Gewicht von mindestens 98 % zu erhalten ist mit beiden Querschnittsansätzen erreicht. Die hohen Bestimmtheitsmaße zeigen, dass alle Punkte auf bzw. ohne große Abweichung an den Ausgleichsgeraden liegen. Die Ergebnisse mit der Annahme einer Ellipse sind etwas besser, jedoch sind beide Ansätze deutlich über dem erwünschten Mindestziel und kommen somit als Berechnungsansatz in Frage.

Als Kontrolle, ob die Variablen voneinander unabhängig sind, wird die t-Statistik durchgeführt (siehe Formel 4.25, Seite 85).

$$|t_K| = \frac{99,78\% \cdot \sqrt{77-2}}{\sqrt{1-(99,78\%)^2}}$$

$$|t_K| = 130,34$$

$$|t_E| = 169,68$$

Für $t(n-2; \alpha) = t(75; 0, 99)$ ergibt sich 2,3778 nach [47][S. 7] (siehe Anhang A.6.1, Seite 220). Somit ist $|t| > t(n-2; \alpha)$ und damit sind die Variablen für beide Berechnungsansätze unabhängig und die Bestimmtheitsmaße bestätigt.

Für den Korrelationskoeffizienten kann der Standardfehler berechnet werden. Nach [28] ergibt sich dieser aus dem Stichprobenumfang n und der Korrelation r .

$$\sigma_r = \frac{1 - r^2}{\sqrt{n - 1}} \quad (7.2)$$

Es ergibt sich ein Fehler von $5,12 \cdot 10^{-4}$ (Ellipse: $2,89 \cdot 10^{-4}$). Dies bedeutet, dass der Korrelationskoeffizient eine Abweichung $\frac{\sigma_r}{r_{xy}}$ von 0,05 % (Ellipse: 0,03 %) beinhaltet. Für die Berechnung des Volumens haben sich die theoretisch festgelegten Parameter sich als sinnvoll erwiesen.

7.2. Ermittlung eines Volumens mit übergeordneter Genauigkeit

Das Ziel dieser Messung ist die Absolutgenauigkeit des VI-Systems zu ermitteln. Dazu wird ein System benötigt, das die Objekte mit einer übergeordneten Genauigkeit vermisst. Dies bedeutet, dass das Referenzsystem die Objekte sehr präzise erfasst und das Volumen genau bestimmen kann (keine Approximation). Die vorherigen Untersuchungen waren relative Betrachtungen und es wurde festgestellt, welche Aufnahmeparameter (Winkelschrittweite, Querschnittsannahme, etc.) die besten Ergebnisse erreicht.

Für die Bestimmung der Absolutgenauigkeit sollte das Referenzsystem die Objekte deutlich genauer aufnehmen können. Dabei spielt die Messzeit keine Rolle, da die Ermittlung nur über eine kleine Anzahl von Polymerstäbchen durchgeführt wird. Für die Referenzmessungen werden einige Polymerstäbchen mit einem CT-System von *YXlon* aufgenommen und ausgewertet.

Im Folgenden wird zuerst der Messprozess und Aufbau beschrieben. Anschließend wird eine Wiederholungsmessung mit einem Polymerstäbchen mit dem CT durchgeführt um die Genauigkeit des Systems mit diesen Objekten festzustellen. Mit Hilfe des CTs wird die Oberflächenstruktur sehr präzise dargestellt. Es wird diskutiert, welche Auswirkungen die somit festgestellten Erkenntnisse auf das VI-System haben. Im letzten Abschnitt wird das VI-System qualifiziert, indem mehrere Polymerstäbchen mit beiden Systemen (VI und CT) gemessen, ausgewertet und verglichen werden.

7.2.1. Messprozess

Die Messungen werden mit dem *FF35 CT*, in dem der Detektor 4343¹ eingebaut ist, durchgeführt.

Die Abbildung 7.2.1.1 zeigt den Aufbau mit dem Detektor, der Halterung und der Röntgenröhre.



Abbildung 7.2.1.1.: Darstellung des Messaufbaus mit dem CT, bestehend aus einem Detektor, einer Röntgenröhre und einer Halterung für das Objekt

Das Objekt sollte für die Aufnahmen aufrecht positioniert werden und darf sich beim Drehen nicht verkippen. Weiterhin sollte es nicht mit der Längsachse senkrecht stehen, sondern leicht verkippt sein, damit die Schnittkanten so gut wie möglich abgebildet werden können. Es sollte vermieden werden, dass die Strahlung zu viele Schichten durchlaufen muss. Dies hat zur Folge, dass das Polymerstäbchen „frei“ positioniert werden sollte und nicht z.B. in einem Kaptonröhrchen positioniert wird. Die Abbildung 7.2.1.2 zeigt den Probenaufbau. Auf einem Schwenktisch wird ein Karbonstab befestigt. Dieser ist stabil und wird bei den Drehungen kaum Schwankungen aufweisen. Auf diesem Stab ist Mosy am oberen Ende eingesteckt. Mosy wird üblicherweise als Steckschaum z.B. in der Floristik eingesetzt. Er weist eine sehr geringe Dichte auf. In das Mosy wird ein Objekt händisch eingesteckt. Durch die Struktur des Steckschaums kann das Polymerstäbchen mit einem Ende in das Mosy geschoben werden, ohne dass das Objekt zerbricht. Das Polymerstäbchen kann somit aufrecht aufgenommen werden und nur ein kleiner Teil des Objektes wird durch das Mosy verdeckt. Die Verdeckung kann jedoch bei der späteren Bearbeitung der Daten bereinigt werden.

¹Datenrate: 15 fps, Pixelgröße: 150 μm , Pixelanzahl: 2880 x 2880, 16bit, Bildfeld: 432 mm x 432 mm



Abbildung 7.2.1.2.: Messaufbau für die CT-Messungen mit Hilfe eines Carbonstabs und Mosy, in dem das Objekt positioniert werden kann

Die Voxelgröße beträgt $0,68\ \mu\text{m}$ und die Spannung der Röntgenröhre wird auf $48\ \text{kV}$ eingestellt. Die Messdauer für ein Polymerstäbchen liegt bei näherungsweise zwei Stunden. Es werden 1260 Projektionen für 360° aufgenommen. Dies entspricht einer Winkelschrittweite von $0,29^\circ$. Es ist wichtig weniger Spannung (kV) für mehr Kontrast zu verwenden und mehr Bilder zu integrieren, damit das Rauschen unterdrückt wird. Aus diesem Grund werden pro Winkelschritt vier Bilder integriert.

Zuerst wird eine Basisjustage durchgeführt. Dafür wird eine Wolframkugel in den Strahlengang positioniert. Mit dieser Justage wird die Zentralstrahlachse justiert. Dabei werden der Detektor, der Röntgenstrahl und der Manipulator² zueinander ausgerichtet. Es werden Offsets bestimmt, die später verwendet werden, damit alle Komponenten gefluchtet sind. Wenn eine Anlage bei einem Kunden aufgebaut wird, wird diese Justage beim ersten Aufstellen des CTs durchgeführt und anschließend ca. einmal im Jahr. Im Applikationslabor wird die Basisjustage vor jeder wichtigen Messung durchgeführt um zu vermeiden, dass die Ergebnisse durch eine Verstellung der Parameter negativ beeinflusst werden.

Der Messablauf beinhaltet mehrere Schritte:

1. Basisjustage
2. Detektor-Kalibrierung
3. Scan
4. Rekonstruktion

²x,y,z-Achse, auf dem die Objekte positioniert werden

Mit der **Basisjustage** wird der Detektor und der Röntgenstrahl zueinander ausgerichtet.

Die **Detektor-Kalibrierung** hat eine große Bedeutung für die Bildqualität. Sie wird ohne Objekt im Strahlengang durchgeführt. Es werden Bilder mit und ohne Röntgenstrahlung aufgenommen und das Rauschen bestimmt, das anschließend bei den Scans herausgerechnet wird. Dadurch werden die Aufnahmen deutlich homogener. Es können von Pixel zu Pixel Variationen vorhanden sein und die Dunkelströme können sich unterscheiden. Aus diesem Grund sollten vor der Messung die Dunkelströme bestimmt werden, damit diese korrigiert werden. [Dr 11a][S. 102f] Wegen der hohen Vergrößerung, die verwendet wird, kann somit der Röntgenspot aus den Bildern herausgerechnet werden, der ansonsten mit abgebildet werden würde. Für die Berechnung werden 60 Bilder aufgenommen, um die Offsets pro Pixel zu bestimmen. Anschließend wird der **Scan** gestartet (*Quality-Scan*). Dabei wird nach jedem Winkelschritt die Probenhalterung angehalten und von einem Winkel vier Bilder integriert. Dies führt dazu, dass das Rauschen noch weiter verringert werden kann. Sind alle Winkelschritte angefahren, wird die **Rekonstruktion** gestartet. Es gibt unterschiedliche Rekonstruktionstechniken: Transformationsverfahren, algebraische und statistische Rekonstruktionstechniken. *YXlon* wendet die Transformationsverfahren an. Mehr Informationen zu den Verfahren können in [Dr 11c][S. 70ff] nachgelesen werden.

Für die nächste Aufnahme wird der Messablauf ab der Detektor-Kalibrierung durchgeführt.

Nachdem das Objekt rekonstruiert wurde, muss der Datensatz bearbeitet werden, damit das Volumen des Polymerstäbchens berechnet werden kann. Zuerst wird das Objekt mit Hilfe einer ROI aus dem 3D-Datensatz geschnitten und horizontal ausgerichtet. Das Ausrichten muss nicht zwingend ausgeführt werden, hilft jedoch bei der anschließenden Bearbeitung der Daten. Es wird der Grauwertbereich des Vorder- und Hintergrundes bestimmt und somit die erste Oberflächenbestimmung durchgeführt. Anschließend werden die Zusammenhangskomponenten berechnet, sodass das Rauschen und die kleineren Mosy-Anteile eliminiert werden. Mit der definierten Oberflächenstruktur wird erneut die Kontur des Objektes gesucht. Somit ist nur das Polymerstäbchen in der Kontur und alle Mosy-Anteile, die das Objekt berühren. Diese werden mit Polygonzügen umrandet und aus dem Datensatz herausgenommen. Mit Hilfe von Erosion und Dilatation werden die übrigen inneren kleinen Volumina zum Polymerstäbchen hinzugefügt. Nach diesem Schritt ist nur noch die Außenkontur des Polymerstäbchens markiert. Im letzten Schritt wird noch einmal die Oberfläche mit der berechneten Kontur bestimmt. Dazu wird der *ISO50*-Algorithmus

verwendet. Die Abbildung 7.2.1.3 zeigt die Start-Kontur von der mit dem *ISO50*-Algorithmus die Oberfläche gesucht wird.

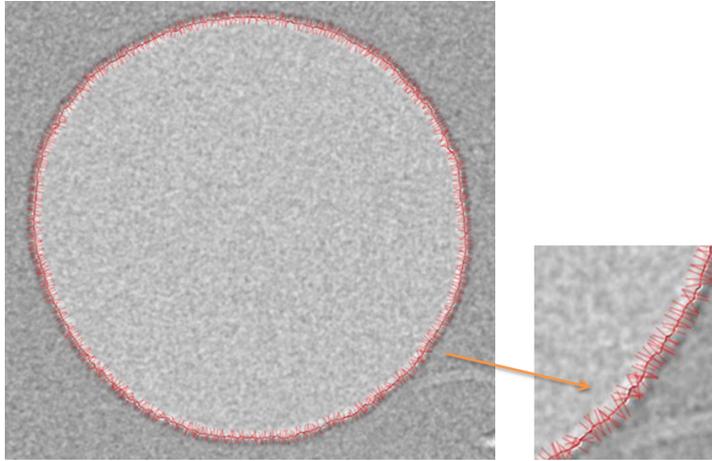


Abbildung 7.2.1.3.: Darstellung der Startkontur eines Polymerstäbchen mit den Suchregionen für den ISO50-Algorithmus

Entlang der Startkontur wird für jeden „Fühlers“ die Kante des Objektes detektiert und anschließend das Volumen berechnet.

7.2.2. Wiederholungsmessung opt. Referenzsystem

Es werden Wiederholungsmessungen mit dem Referenzsystem und einem Polymerstäbchen durchgeführt. Somit kann festgestellt werden, ob das System als Referenzsystem verwendet werden kann.

Ein Polymerstäbchen wird auf der Halterung positioniert und ohne Änderung der Position wird der Messablauf sieben Mal hintereinander durchgeführt. Vor der ersten Messung wird eine Detektor-Kalibrierung durchgeführt. Nach den einzelnen Messungen kann diese im automatischen Ablauf nicht ein weiteres Mal berechnet werden. Aus diesem Grund wird das Rauschen im Laufe der Zeit zwischen den Aufnahmen zunehmen. Dies beeinflusst das rekonstruierte Volumen jedoch nicht. Alle Aufnahmen werden rekonstruiert, die Daten bereinigt und das Volumen bestimmt. Die Abbildung 7.2.2.1 zeigt die Volumen für jede Wiederholungsmessung abhängig vom Aufnahmezeitpunkt. In der Abbildung 7.2.2.1 ist erkennbar, dass das Volumen mit der Zeit größer wird. Zwischen der vierten und fünften Aufnahme gibt es einen Sprung. Bei den Wiederholungsmessungen läuft die Röntgenröhre ohne Unterbrechung. Dabei erwärmt sich die Kühlflüssigkeit mit der Zeit. Dadurch wird die gesamte Röhre wärmer und dehnt sich aus. Somit verändert sich der FDD (Focus Detector Distance) und der FOD (Focus Object Distance). Dies hat zur Folge, dass

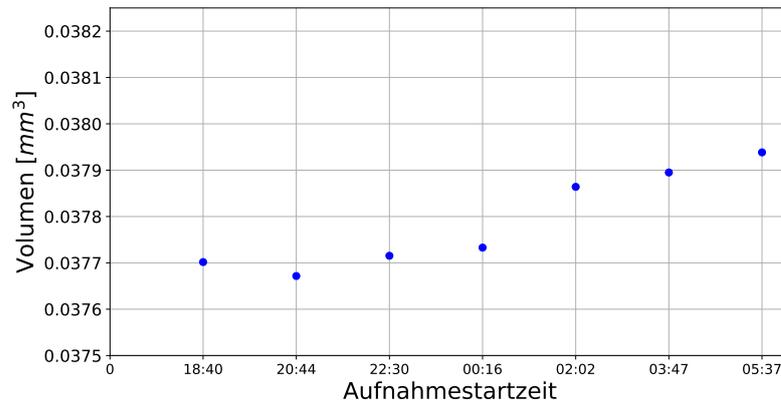


Abbildung 7.2.2.1.: Graphische Darstellung der Volumina in Abhängigkeit des Aufnahmezeitpunktes der CT-Messung

mit der Zeit die Vergrößerung zunimmt und somit das Volumen wächst. Dies wird bei den späteren Messungen nicht der Fall sein, da dort die Röhre zwischen den einzelnen Messungen kurz ausgeschaltet wird und es zu der Erwärmung über längere Dauerbetriebszeit nicht kommt.

Aus diesem Grund wird für die Auswertung der Wiederholgenauigkeit nur die ersten vier Werte verwendet, da danach erkennbar ist, dass die Röhre sich erwärmt hat. Die Standardabweichung beträgt $2,24 \cdot 10^{-5} \text{ mm}^3$. In Abhängigkeit des mittleren Volumens ergibt sich eine Abweichung von 0,06%.

Der Aufbau wird vor den Messungen sehr präzise zueinander ausgerichtet und die Offsets bestimmt (Basis-Justage), wodurch weitere Fehler durch bspw. einer leicht verkippten Ausrichtung das Ergebnis nicht negativ beeinflussen kann. Die erreichte Wiederholgenauigkeit entspricht der Genauigkeit des Systems mit allen Faktoren. Dies zeigt, dass das CT als Referenzsystem verwendet werden kann, da es unter der geforderten Genauigkeit von 0,8% liegt.

7.2.3. Oberflächenanalyse

Anhand der Mirko-CT Messungen wird sichtbar, dass die Oberfläche einige Ausbuchtungen beinhaltet. Zu Beginn war unklar, ob diese Unebenheiten zum Objekt gehören oder Fremdmaterial sind, wie z.B. Staub. Im Abschnitt 4.3.6, Seite 93, wird die Oberflächenstruktur der Objekte dargestellt. Die Messung zeigt, dass das Mirko-CT das Objekt richtig erfasst und die Ausbuchtungen zum Objekt gehören. Jedoch ergeben sich durch diese Messungen Fragestellungen für das VI-System:

- a) Sind die Ausbuchtungen mit dem VI-System detektierbar?

- b) Wie viel macht eine Ausbuchtung im Volumen aus?
- c) Sind Vertiefungen/Krater mit dem VI erkennbar?

Diese Fragen werden im Folgenden diskutiert und welche Auswirkungen auf das VI-System dadurch entstehen.

a) Sind die Ausbuchtungen mit dem VI-System detektierbar?

Die Ausbuchtungen sind mit dem VI-System detektierbar. Die Abbildung 7.2.3.1 zeigt eine Beispielaufnahme und die detektierten Kantenpunkte.

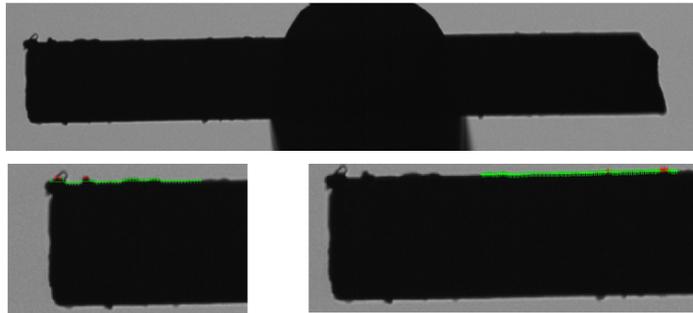


Abbildung 7.2.3.1.: Aufnahme mit dem VI-System. Ausbuchtungen am Objektrand sind erkennbar und werden an den Querschnittspunkten detektiert

Im Beispiel betragen die Höhenänderungen näherungsweise 6 Pixel (= 16,5 μm). Es werden jedoch einige Punkte ignoriert, die zu weit von der Ausgleichsgerade durch die Kantenpunkte entfernt sind. Dadurch könnten Ausbuchtungen kleiner gemessen werden, als sie eigentlich sind.

b) Wie viel macht eine Ausbuchtung im Volumen aus?

Die Ausbuchtungen können als kleine Objekte betrachtet werden, die auf dem eigentlich Objekt platziert sind. Um definieren zu können, welche Auswirkungen Ausbuchtungen auf das Volumen haben, wird für die erste Annahme das Volumen berechnet, wenn das Objekt optimal wäre und es keine Breitenabweichungen geben würde. In der zweiten Annahme wird eine Ausbuchtung mit einer Breite von 6 μm und einer Länge von 30 μm auf dem Objekt projiziert. In einer dritten Annahme wird eine Ausbuchtung von 30 μm und einer Länge von 30 μm angenommen.

Die Abbildung 7.2.3.2 zeigt den Breitenverlauf für alle drei Annahmen. Die Volumina werden mit der Grundlage eines Kreises- und Ellipsen-Querschnittes berechnet sowie mit der numerischen Berechnung. Die Ergebnisse sind der Abbildung 7.2.3.3 dargestellt. Das Sollvolumen wäre das Volumen des Objektes mit einer Kreisgrundlage plus dem Volumen der Ausbuchtung (Kreis, Breite und Längen siehe oben, Breite konstant). Die berechneten Volumina mit den verschiedenen Grundlagen aus den

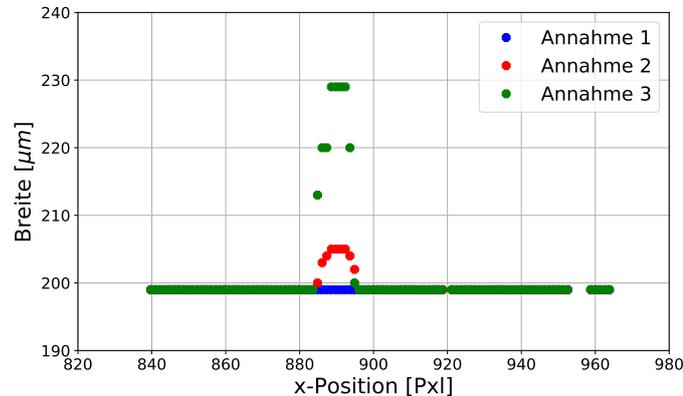


Abbildung 7.2.3.2.: Graphische Darstellung des Breitenverlaufs mit der Annahme 1 (konstante Breite, blau), Annahme 2 (Ausbuchtung 6 µm Höhe, rot) und Annahme 3 (Ausbuchtung 30 µm, grün)

Werten der Abbildung 7.2.3.2 werden im prozentualen Verhältnis zum Sollvolumen gestellt. Die Tabelle 7.2.3.1 zeigt die Abweichungen $(1 - \frac{V_{ist}}{V_{soll}})$ der berechneten Volumina zum Soll. Je größer die Ausbuchtung ist, desto größer sind die Abweichungen

	Kreis	Ellipse	numerisch
Annahme 1	0,00 %	0,00 %	0,00 %
Annahme 2	0,07 %	0,22 %	0,04 %
Annahme 3	0,29 %	0,99 %	0,14 %

Tabelle 7.2.3.1.: Abweichungen zum Sollvolumen mit unterschiedlichen Annahmen

zwischen dem berechneten und dem Sollvolumen. Mit der aktuellen Auswertung würden durch Ausbuchtungen die Ergebnisse leicht verfälscht werden, wenn diese stark ausgeprägt sind. Für die Ellipsen-Grundlage wird beispielsweise die minimale und maximale Breite pro Querschnitt bestimmt. Da die Ausbuchtungen jedoch nur punktuell sind, wird mit der momentanen Berechnung die Ausbuchtung künstlich verlängert und die Breite als maximaler Wert für diesen Querschnitt verwendet. Es ist auch erkennbar, dass durch die numerische Berechnung die Abweichungen durch Ausbuchtungen deutlich besser berechnet werden. Dadurch, dass bei dieser Berechnung von Winkel zu Winkel die Flächen berechnet werden, ist die Fehlberechnung nicht so stark ausgeprägt wie bei den beiden anderen Ansätzen.

Jedoch sind bei verwendeten Charge der Polymerstäbchen für die Vermessung starke Ausbuchtungen nicht vorhanden.

Die Ausbuchtungen können mit dem VI-System detektiert werden. Momentan wird

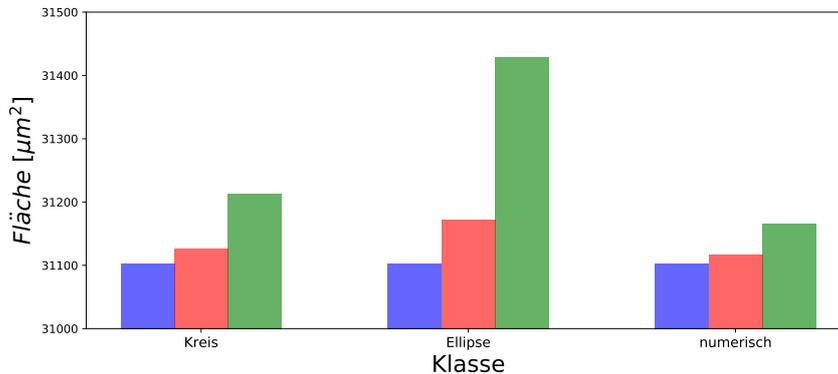


Abbildung 7.2.3.3.: Graphische Darstellung des Breitenverlaufs mit der Annahme 1 (konstante Breite, blau), Annahme 2 (Ausbuchtung 6 µm Höhe, rot) und Annahme 3 (Ausbuchtung 30 µm, grün)

jedoch in der Berechnung nicht berücksichtigt, dass Breitenabweichungen nur für einen kleinen Bereich gelten. Wenn größere Ausbuchtungen in den Chargen möglich sind, sollte die Auswertung angepasst werden, da ansonsten größere Abweichungen bei der Volumenberechnung entstehen. Dazu kann bspw. kontrolliert werden, über welchen Umfang die Breitenabweichungen verlaufen. Dies hätte zur Folge, dass mehr Bilder aufgenommen und ausgewertet werden müssten. Somit wird die Prozesszeit pro Polymerstäbchen länger. Weiterhin sollte in diesem Fall die numerische Berechnung als Grundlage für das Volumen verwendet werden.

c) Sind Vertiefungen/Krater mit dem VI erkennbar?

Für die Messungen mit dem *FIB* werden zwei Polymerstäbchen aufgenommen. Eins der Objekte hatte eine Spalte/Krater. Diese ist in der Abbildung 7.2.3.4 dargestellt. Diese Spalte wäre mit dem VI-System nicht detektierbar. Die Spalte hat keine Breitenänderung im Durchlicht. Somit würde für dieses Polymerstäbchen das Volumen gleich bleiben, jedoch das Gewicht wäre niedriger. Für die Weiterverarbeitung ist das Aussehen der Objekte irrelevant. Dies bedeutet, wenn das Objekt trotz Spalte genug Gewicht hat und somit der Medikamentengehalt für diese Dosis garantiert ist, könnte es weiterverarbeitet werden. Dies ist jedoch ein Risiko für das VI-System und die Korrelation. Das Objekt würde durch das fälschlicherweise richtige Volumen weiter prozessiert.

Die Abbildung 7.2.3.5 zeigt schematisch, eine Spalte in einem Polymerstäbchen. Der Spaltenquerschnitt wird für diese Betrachtung mit einem Dreieck gleichgesetzt. Für die erste Berechnung hat das Polymerstäbchen keine Spalte (Annahme 1). Im nächsten Schritt hat der Spaltenquerschnitt eine Höhe h von 30 µm und eine Grundseite c von 10 µm (Annahme 2). Mit den Daten wird das Volumen der Spalte berechnet und die Differenz zu dem Volumen der Annahme 1 berechnet. Für die Annahme 3 be-

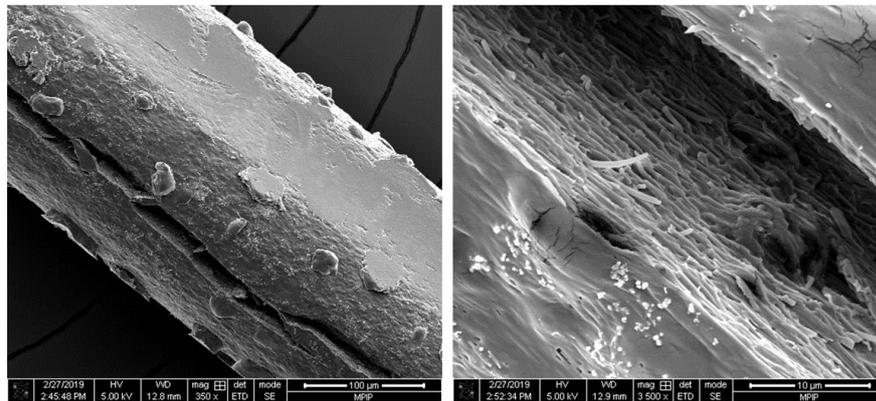


Abbildung 7.2.3.4.: Aufnahme eines Polymerstäbchens mit dem FIB. Das Objekt ist entlang der Längsachse aufgebrochen (links). Die typische Struktur von Polymer ist in der höheren Vergrößerung in der Spalte erkennbar (rechts).

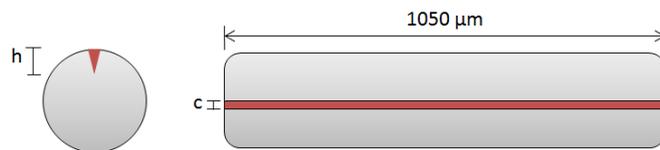


Abbildung 7.2.3.5.: Darstellung eine Polymerstäbchens mit einer Spalte (rot) und den Parameter Höhe h und Grundseite c

trägt $h = 50 \mu\text{m}$ und die Grundseite weiterhin $10 \mu\text{m}$. Die Abbildung 7.2.3.6 zeigt die Volumina der drei Annahmen. Die berechneten Volumina werden im prozentualen Verhältnis zueinander gesetzt (Quotient zwischen Volumen mit Spalte und Volumen ohne Spalte). Die Tabelle 7.2.3.2 zeigt die Ergebnisse. Wenn das Objekt eine Spalte

	Kreis	Ellipse	numerisch
Annahme 1	0,000 %	0,000 %	0,000 %
Annahme 2	0,347 %	0,348 %	0,348 %
Annahme 3	0,578 %	0,580 %	0,579 %

Tabelle 7.2.3.2.: Abweichungen zum Sollvolumen mit unterschiedlichen Spaltenannahmen

hat ($c = 10 \mu\text{m}$, $h = 50 \mu\text{m}$), aber das VI-System diese nicht detektiert, wird das Volumen um 0,6 % zu groß berechnet. Die Medikamentendosis wäre durch die Spalte zu gering, würde aber durch das größer gemessene Volumen weiter prozessiert werden. Aus diesem Grund sollte genau spezifiziert werden, ob diese Spalten sehr

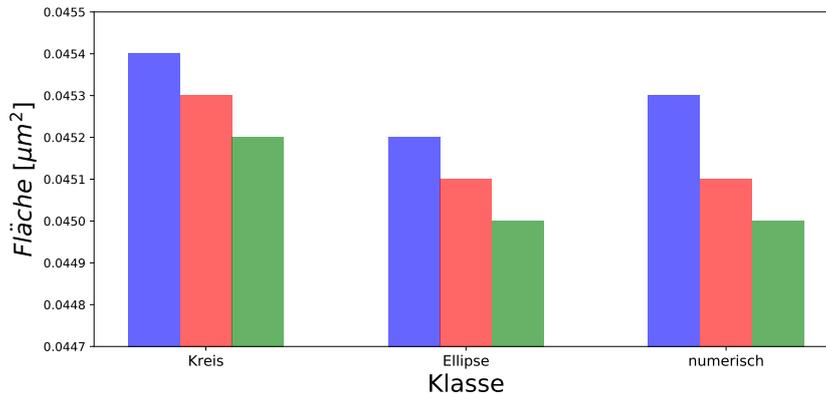


Abbildung 7.2.3.6.: Graphische Darstellung des Volumens mit der Annahme 1 (keine Spalte, blau), Annahme 2 (Spaltenhöhe h 30 μm und Grundseite c 10 μm , rot) und Annahme 3 (h 50 μm und c 10 μm , grün)

selten oder nur durch Alterungsprozesse auftreten. Da die Objekte beim eigentlichen Prozess nicht so lange aufbewahrt werden wie für diese Messung, würden Spalten, die durch einen Alterungsprozess entstehen, nicht vorkommen. Sollte dieser Fall jedoch häufiger im normalen Prozess auftreten, sollte eine weitere Prüfung integriert werden, die das Polymerstäbchen auf diese Spalten kontrolliert.

7.2.4. Rundheit

Für die Berechnung des Volumens ist, wie schon erwähnt, die Querschnittsfläche ausschlaggebend. Mit Hilfe der CT-Messungen können die Abweichungen zu einem Kreis bestimmt werden. Wird sich die Querschnittsform durch den Trocknungsprozess nicht ändern, dürfte es keine Abweichungen zu einem in die Kontur gefitteten Kreis geben.

Es wird an einem Objekt an zehn Positionen entlang der Längsachse ein optimaler Kreis in die Kontur positioniert. Die Positionen sind in der Abbildung 7.2.4.1 dargestellt.

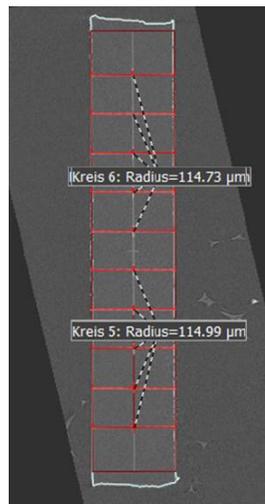


Abbildung 7.2.4.1.: Darstellung der Kreismessung an unterschiedlichen Positionen an einer CT-Aufnahme eines Polymerstäbchens

Es wird der Radius des gefitteten Kreises angegeben. Ist die reale Form kein Kreis, wird die maximale Abweichung zum Kreisradius aufgelistet. Dies ist in der Abbildung 7.2.4.2 an einem Beispiel dargestellt. In der Abbildung 7.2.4.2 hat der Kreis 6

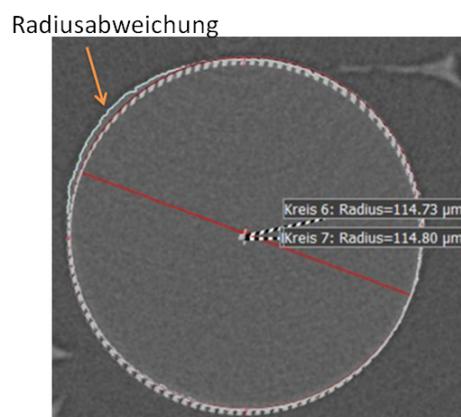


Abbildung 7.2.4.2.: Darstellung der maximalen Radiusabweichung am Beispiel von zwei Kreisen

eine maximale Radiusabweichung von 3,15 µm und der Kreis 7 von 3,66 µm.

Der Graph in der Abbildung 7.2.4.3 zeigt alle maximalen Radienabweichungen für die zehn Kreise entlang des Polymerstäbchens. Es ist erkennbar, dass keine der Messpositionen einem Kreis entspricht. Die mittlere Abweichung beträgt 3,46 µm. Wird

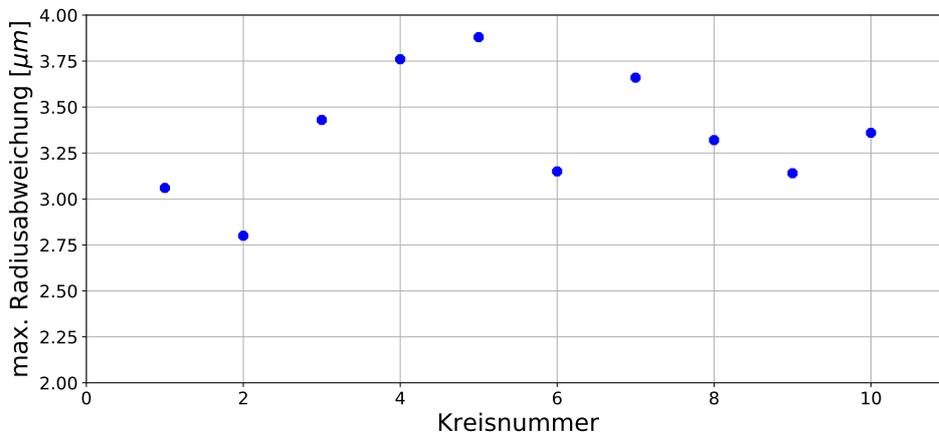


Abbildung 7.2.4.3.: Graphische Darstellung der maximalen Radienabweichungen für die gefitteten Kreise entlang des Polymerstäbchens

für die Volumenberechnung ein Kreis als Grundlage verwendet, obwohl es der Querschnitt einer Ellipse entspricht, würde das Volumen für ein Polymerstäbchen mit einer Länge von $1300\ \mu\text{m}$ um $5,77\%$ falsch berechnet werden.

Dies zeigt, dass es sich bei dem Querschnitt dieses Polymerstäbchens nicht um einen optimalen Kreis handelt. Die Auswertung unterstützt das Ergebnis des Korrelationskoeffizienten (Abschnitt 7.1.4, Seite 186ff). Die Ergebnisse mit der Grundlage einer Ellipse sind besser, da mit der CT-Messung gezeigt werden konnte, dass der Querschnitt kein optimaler Kreis ist.

7.2.5. Qualifizierung Volumen-inline System

Das Ziel der Qualifizierung des VI-Systems mit einem Referenzsystem ist die Berechnung der Absolutgenauigkeit des VI. Dafür werden Polymerstäbchen mit beiden System vermessen und die Volumina verglichen. Die Objekte werden hochaufgelöst mit dem CT aufgenommen und ausgewertet und im Gegensatz zu den Wiederholungsmessungen mit dem VI beinhalten die Messungen mit dem CT alle Abweichungen, die evtl. durch das System entstehen können. Mit der Qualifizierung soll nachgewiesen werden, ob die Genauigkeit des VI unterhalb der Spezifikation liegt. Das VI hat Grenzen in der Genauigkeit durch bspw. den Schärfentiefenbereich des Objektes und der Ausrichtung des Aufbaus und der kleinen Objekte. Darum wird die berechnete Standardabweichung zwischen den Volumina vollständig auf das VI-System bezogen.

Der Aufwand für die Referenzmessung ist sehr hoch. Aus diesem Grund muss die Stichprobenanzahl begrenzt werden. Es werden sechs Polymerstäbchen mit beiden

Systemen, VI und CT, aufgenommen und ausgewertet.

Zuerst werden die Objekte geschnitten und mit dem VI-System vermessen. Damit sichergestellt werden kann, dass die Objekte nicht durch Wärme oder Feuchtigkeit die Form verändern, werden die Polymerstäbchen in separaten Dosen, mit Trocknungsmaterial und gekühlt zu den CT-Messungen transportiert.

Für die CT-Messungen werden die Objekte wie oben beschrieben auf dem Mosy einzeln positioniert und aufgenommen. Die Messparameter werden zu Beginn mit dem längsten Objekt eingestellt und für die alle Aufnahmen verwendet, damit die Auswertung nicht durch geänderte Messparameter beeinflusst wird. Dies ist besonders wichtig für den Abstand zwischen dem Objekt und dem Detektor, damit alle Objekte mit derselben Vergrößerung aufgenommen werden. Weiterhin sollte die Röhrenspannung sich nicht ändern, damit die Durchstrahlcharakteristik identisch bleibt. Die verwendeten Parameter sind in der Tabelle 7.2.5.1 aufgelistet. Die Abbildung

Röhrenspannung [kV]	45
Röhrenstrom [μA]	23
Aufnahmezeit [Std]	01:45
Rekonstruktionszeit [min]	07:21
Rekonstruktionsalgorithmus	Feldkamp
Scan Methode	Kegelstrahl, stop and go
Fokus Objekt Abstand (FOD) [mm]	2,501
Fokus Detektor Abstand (FDD) [mm]	550,001
Vergrößerung (FDD/FOD)	219,9
Integrationszeit [s]	4
Filter	-
Projektionsanzahl	1260
Detektor Binning	1x1
Röhren Modus	Nanofocus
Röhren Typ	Transmission

Tabelle 7.2.5.1.: Eingestellte Parameter für die CT Messungen

7.2.5.1 zeigt die Rekonstruktion eines Polymerstäbchens und dessen Querschnitte. Es wird die Stichprobenstandardabweichung nach Formel (7.1), Seite 183, bestimmt. X und \bar{X} spiegeln in diesem Fall die Volumina der beiden Systeme. Es wird für jedes Objekt das Quadrat der Volumendifferenz gebildet, die Quadrate aufsummiert und die Standardabweichung berechnet. Es ergibt sich eine Standardabweichung s_j von $0,0016 \text{ mm}^3$. Die Volumendifferenz und Quadrate sind in der Tabelle 7.2.5.2 aufgelistet. Bei genauerer Betrachtung der Objekte sind bei zwei Polymerstäbchen bei der CT-Rekonstruktion Fremdkörper am äußeren Rand erkennbar (Objekt 4

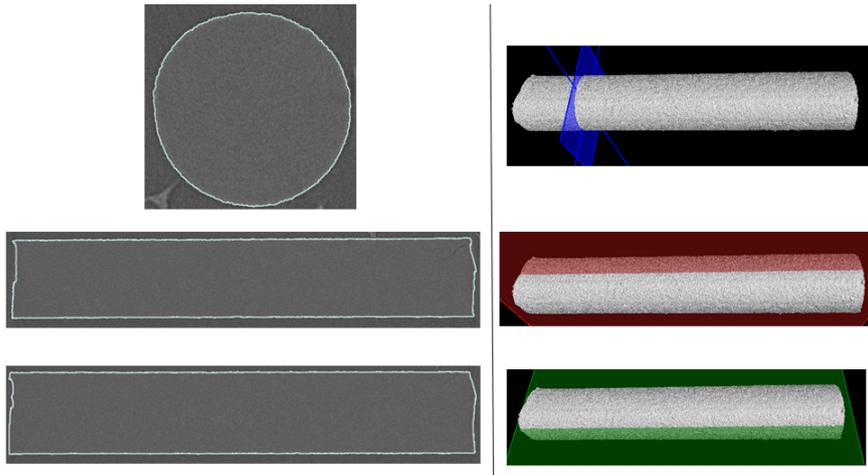


Abbildung 7.2.5.1.: Ausschnitt der 3D Rekonstruktion des Objektes Nr. 1

Objekt	$\bar{X} - \bar{X}[mm^3]$	$(\bar{X} - \bar{X})^2[mm^6]$
1	-0,0019	3,71E-06
2	0,0000	1,97E-09
3	-0,0012	1,56E-06
4	-0,0011	1,13E-06
5	-0,0029	8,36E-06
6	0,0002	2,34E-08

Tabelle 7.2.5.2.: Ergebnis der Volumendifferenzen und Quadrate für jedes aufgenommene Objekt zwischen dem VI und CT

und Objekt 5). Die Abbildung 7.2.5.2 zeigt jeweils einen Ausschnitt der Objekte mit den starken Artefakten, die durch die Fremdkörper verursacht werden. In der 2D-Aufnahme sind die Punkte deutlich sichtbar, was bedeutet, dass es sich um ein viel dichteres Material handeln muss im Vergleich zum Polymerstäbchen. Weiterhin sind nach der Rekonstruktion Artefakte erkennbar, die eine eindeutige Charakteristik aufweisen, die sehr dichtes Material im Röntgenbereich aufweist. Aus diesen Gründen ist es sehr wahrscheinlich, dass es sich bei den Fremdkörpern um Metall handelt. Polymerstäbchen mit diesen Fremdkörpern dürfen nicht in den Prozess gelangen. Es ist nicht bekannt, wie sich das Volumen oder Gewicht bei Metalleinschluss verhält. Aus diesem Grund werden diese beiden Objekte aus der Auswertung heraus genommen (Objekt 4 und Objekt 5). Somit ergibt sich eine neue Standardabweichung von $0,0011 \text{ mm}^3$. Dies ist eine Verbesserung der Abweichung um das 1,4 fache ($0,0011 \text{ mm}^3$ zu $0,0016 \text{ mm}^3$). Weiterhin ist eine Systematik an den Volumendifferenzen erkennbar. Die Differenzen sind entweder negativ oder null. Da die

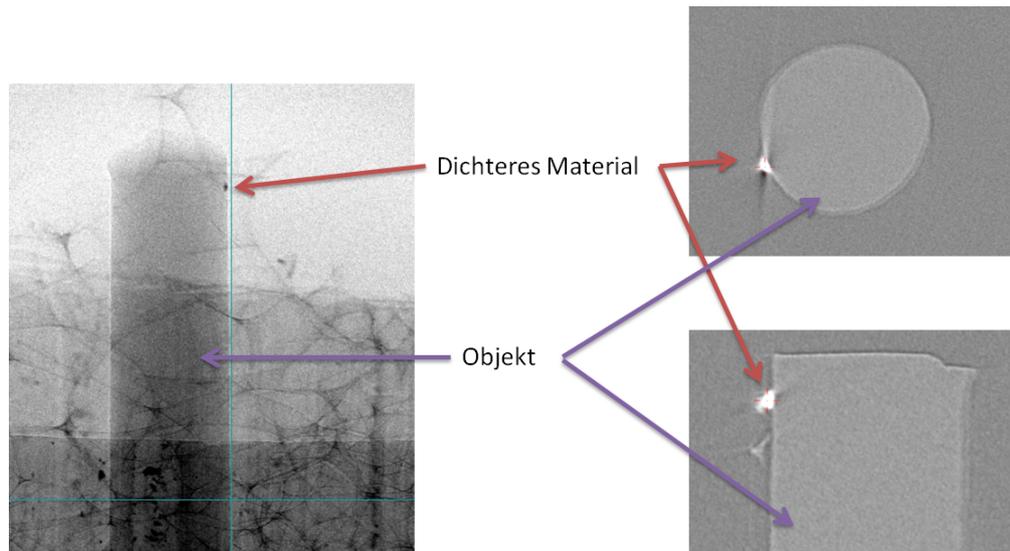


Abbildung 7.2.5.2.: links: Ausschnitt einer 2D Aufnahme mit dem CT des Objektes in Mosy; rechts: 3D Rekonstruktion mit deutlichen Artefakten

CT Messungen hochpräzise sind und kaum Abweichungen aufweisen (siehe Wiederholungsmessungen), wird die Systematik durch das VI-System entstehen. Es wird geprüft, wie die Standardabweichung und die Abweichung sich verändert, wenn die Systematik aus den Differenzen herausgerechnet wird. Dafür wird über die vier Polymerstäbchen ohne die Objekte mit Metall die mittlere Volumendifferenz V_{diff} gebildet. Anschließend wird der Mittelwert von den Differenzen abgezogen und mit den neuen Differenzen die Standardabweichung und die Abweichung bestimmt. Die Tabelle 7.2.5.3 zeigt die korrigierten Differenzen. Die Standardabweichung beträgt

Objekt	$(\bar{X} - \bar{X}) - V_{diff} [mm^3]$	$((\bar{X} - \bar{X}) - V_{diff})^2 [mm^9]$
1	-0,0012	1,34E-06
2	0,0007	5,21E-07
3	-0,0005	2,32E-07
6	0,0009	8,45E-07

Tabelle 7.2.5.3.: Ergebnis der Volumendifferenzen und Quadrate mit korrigierter Systematik für jedes aufgenommene Objekt zwischen dem VI und CT

$0,0009mm^3$ und somit ergibt sich eine Abweichung von 1,71%. Dies ist eine deutliche Verbesserung im Vergleich zu den nicht korrigierten Werten. In den oberen Betrachtungen ist bekannt, dass die Objektive des VI eine Fehlerquelle sein können. Da der Schärfentiefebereich des gewählten Objektives und die Breite

des Objektes sehr nah beieinander liegen, könnte dies zu Fehlern bei der Messung führen. Dies könnte diese Systematik verursachen. Jedoch würde eine Systematik für ein kalibriertes System nicht stören, da dies nur die Steigung der Korrelation beeinflusst und nicht den Korrelationskoeffizienten.

Die Tabelle 7.2.5.4 zeigt die Standardabweichungen s_j , die in Bezug auf die Systeme ermittelt wurden. Um die prozentuale Abweichung des Volumens bestimmen

System	s	s/MW
VI	0,0009 mm ³	1,71 %
CT	$2,24 \cdot 10^{-5}$ mm ³	0,06 %

Tabelle 7.2.5.4.: Ermittelte Standardabweichungen der Systeme (VI und CT)

zu können, wird die Standardabweichung in Verhältnis mit dem mittleren ermittelten Volumen gesetzt. Das Volumen wird mit dem VI-System mit einer Abweichung von 1,71 % berechnet.

Die Qualifizierung mit Hilfe des CTs zeigt, dass das VI-System das Volumen der Polymerstäbchen mit einer Abweichung von 1,71 % ermitteln kann. Somit liegt die Abweichung unter der zukünftigen Toleranz von 2,5 %.

8. Diskussion der Ergebnisse

Im Folgenden werden zuerst die Ergebnisse zusammengefasst und geprüft, ob das VI-System alle Anforderungen erfüllt. Anschließend wird das VI-System mit dem Stand der Technik verglichen und das System auf Optimierungsmöglichkeiten geprüft. Anschließend wird im Ausblick betrachtet, ob das VI-System in anderen Industriebereichen eingesetzt werden könnte.

8.1. Zusammenfassung der Ergebnisse

Die vorliegende Arbeit entwirft und setzt eine Lösung zur Volumenmessung von einem pharmazeutischen Produkt mit optischer Messtechnik und Bildverarbeitung um. Dabei handelt es sich um die Vermessung und die dreidimensionale Rekonstruktion von Polymerstäbchen. Das Ziel ist, das abgeleitete Volumen als Maß für die Masse der Objekte zu verwenden.

Zur Zeit wird die Masse der Objekte mit einer Präzisionswaage bestimmt. Jedoch wird mit der nächsten Generation der Objekte die Toleranz der Waage nicht mehr ausreichen. Weiterhin werden aktuell nur Stichprobenmessungen durchgeführt. In Zukunft soll jedes Objekt während der Produktion vermessen werden.

Das entstehende VI-System sollte folgende Anforderungen erfüllen: aufgrund der vom Industriepartner geforderten Qualität des Prüfprozesses sollte die Toleranz 2,5% nicht übersteigen. Die Prozesszeit pro Objekt sollte fünf Sekunden nicht überschreiten. Der Korrelationskoeffizient zwischen dem Volumen und dem Gewicht sollte mindestens 98% betragen.

Da das Objekt keine markante Oberflächenstruktur aufweist, kommen die meisten 3D und 2.5D Verfahren nicht in Frage (bspw. CT, Konfokalmikroskop, Shape from Motion, Mustererkennung). Weiterhin kann die Prozessezeit von fünf Sekunden von den Systemen nicht eingehalten werden. Die vorgeschlagene Lösung basiert daher auf der Vermessung von 2D Konturen, die aus einer ausreichenden Anzahl von Perspektiven aufgenommen und zur Objektrekonstruktion verwendet werden.

Zur Erzeugung der notwendigen Perspektiven muss der optische Messprozess durch ein Handhabungssystem unterstützt werden, das die Polymerstäbchen mit einer Va-

kuumnadel hält und näherungsweise um den Mittelpunkt der Längsachse die Objekte in beliebigen Winkelschritten drehen kann.

Das VI-System besteht aus einer Kamera, einem bi-telezentrischen Objektiv, einer telezentrischen Beleuchtung und dem Handhabungssystem. Die erfassten Perspektiven erstrecken sich über einen Winkelbereich von 0° bis 180° in einem Abstand von 18° . Mit Hilfe der Bildverarbeitung werden die Breiten für viele Querschnitte über alle Winkel gemessen. Mit drei verschiedenen mathematischen Annahmen zur Querschnittsgeometrie wird deren Fläche bestimmt (Kreis, Ellipse, numerische Flächenberechnung). In Verbindung mit der Länge wird das Volumen für das Polymerstäbchen approximiert.

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass der Prozess messfähig und präzise ist (Messmittelfähigkeitsanalyse) und die Taktzeit eingehalten werden kann. Der Korrelationskoeffizient zwischen Volumen und Gewicht für 76 Objekte beträgt 99,87 % und liegt somit über der Vorgabe von 98 %. Zur Qualifizierung des VI-Systems werden Referenzmessungen mit einem CT gemacht. Die Messungen zeigen, dass das VI das Volumen mit einer Abweichung von 1,7 % vermisst und somit unter der Toleranzgrenze von 2,5 % bleibt.

Die aktuellen Messsysteme auf dem Markt können jeweils nur eine Anforderung gewährleisten. Häufig benötigen die Messsysteme eine markante Oberflächenstruktur, die das Objekt nicht hat (z.B. Konfokalmikroskop, Shape from Motion, Musterprojektion). Ein CT würde die Objekte sehr genau vermessen, dies ist aber zu zeitaufwändig (zwei Stunden pro Objekt).

Es wird der Ansatz eines Konturverfahrens angewendet und ein Handhabungssystem für die kleinen Objekte angefertigt. Für die Absicherung des industriellen Prozesses ist eine notwendige Robustheit unumgänglich. Dies erfordert die Erkennung, Bewertung und Kompensation aller relevanter Fehler- und Einflussgrößen. Die zu betrachtende Fehlereinflüsse werden durch theoretische Berechnung, Fehlerfortpflanzung und Wiederholungsmessungen bestimmt. Dazu zählt die Auswirkung höherer Fehlerordnung, die Abweichung der erwarteten Kontur, die Fehler der einzelnen Parameter im Volumen, die Annahme der Form der Querschnittsfläche, die Variation der Winkelschritte, die Pixelauflösung, u.v.m. Die Messungen und Untersuchungen zeigen, dass alle Punkte mit dem VI Aufbau erfüllt werden.

Das entstandene VI-System kann als Alternative für die Waage verwendet werden. Alle Rahmenbedingungen und Parameter werden erfüllt.

8.2. Verbesserungsansätze

Der optische Aufbau kann optimiert werden. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass durch die verwendeten Objektive die Ergebnisse stark beeinflusst werden können. Weiterhin können mit dem momentanen Aufbau des Handhabungssystems nur Objekte bis zu $40\ \mu\text{g}$ vermessen werden. Kleinere Objekte sind mit dem aktuellen Setup nicht auswertbar.

Das verwendete bi-telezentrische Objektiv ist für einen Laboraufbau ausreichend, aber nicht für ein Setup in einer Produktionslinie. Der Telezentriebereich sollte deutlich größer sein als der Objektdurchmesser. Dies zeigt die Abbildung 5.3.4.3 im Abschnitt 5.3.4, Seite 127ff. Dies ist mit dem aktuellen Objektiv grenzwertig. Zusätzlich kommt die Positionsabweichung entlang der optischen Achse durch das Drehen des Handlingsystems hinzu. Dadurch ändert sich die Position des Objektes im Schärfentiefenbereich und somit besteht die Möglichkeit, dass das Objekt beim Drehen aus diesem Bereich herauswandert. Mit einem größeren Schärfentiefenbereich könnte dies vermieden werden. Die Tabelle 8.2.0.1 zeigt Alternativobjektive vom Hersteller *Opto engineering*. Ein größerer Schärfentiefenbereich bedeutet aller-

	TC23004	TC23007	TC23009
Vergrößerung	2	1,33	1,00
Blendenzahl	11	11	11
Schärfentiefenbereich [μm]	0,23	0,5	0,9
Telezentriefehler [deg]	0,08	0,08	0,08

Tabelle 8.2.0.1.: Übersicht Eigenschaften für alternative Objektive. TC23004 wird momentan verwendet

dings auch eine geringere Vergrößerung. Somit würde das Polymerstäbchen in der Abbildung kleiner dargestellt werden, aber Abweichungen durch einen zu kleinen Telezentriebereich werden vermieden. Die Kontur des Objektes wird somit niedriger aufgelöst. Jedoch wird dies im Gesamtergebnis nicht viel ausmachen, da es andere Faktoren gibt, die einen deutlich größeren negativen Einfluss auf das Ergebnis hat (Anzahl Aufnahmen, Annahme Querschnittsfläche, etc.). Wie stark sich ein Objektiv mit einer geringeren Vergrößerung in der Wiederholgenauigkeit und in der Volumenberechnung niederschlägt, müssten weitere Untersuchungen zeigen.

Mit Hilfe des Handhabungssystems können die Objekte ohne sie zu kontaminieren gehalten und in beliebigen Winkelschritten gedreht werden. Die Vakuumnadel verdeckt einen Teil des mittleren Bereiches der Polymerstäbchen. Durch die Breite

der Nadel sind Objekte der aktuellen Generation bis minimal zu einem Gewicht von $40\ \mu\text{g}$ messbar. Ansonsten sind die Objekte zu kurz, sodass nicht mehr genug vom Objekt sichtbar ist, um dieses vermessen zu können. Die nächste Generation an Polymerstäbchen wird jedoch nur noch $30\ \mu\text{g}$ wiegen. Die Nadel sollte auf jeden Fall durch eine Nadel mit einem Durchmesser von $0,24\ \text{mm}$ ersetzt werden (dünnste Nadel vom verwendeten Hersteller), damit diese Objekte vermessen werden können. Somit würde bspw. für ein Objekt mit dem Gewicht $35\ \mu\text{g}$ statt $227\ \mu\text{m}$ Länge des Polymerstäbchens $507\ \mu\text{m}$ vermessen und somit kann der Messbereich verdoppelt werden.

8.3. Ausblick

Das Ziel, die Waage durch eine Volumenmessung der Polymerstäbchen ersetzen zu können, ist erreicht. Das VI kann das Volumen zerstörungsfrei von konvexen Objekten ermitteln. Dafür muss jedoch garantiert werden, dass die Dichte homogen im Objekt verteilt ist.

Das Volumen kann in ca. fünf Sekunden berechnet werden. Der optische Aufbau könnte jederzeit auch für größere Prüfobjekte ausgelegt werden. In [D W14] wird beschrieben, dass zerstörungsfreie Methoden erforscht werden, um physikalische Charakteristiken von biologischen Produkten zu bestimmen, um somit die Objekte zu sortieren und automatisch zu kontrollieren. Dies wird beispielsweise mit Bananen, Pastinaken oder Kartoffeln durchgeführt. Nach dem veröffentlichten Ansatz in [D W14] muss der Dreh-Nullpunkt starr sein. Bei der Volumenmessung in dieser Arbeit würde eine leichte Variation zu keinem Fehler führen, wodurch z.B. die Vermessung der genannten Objekte evtl. deutlich vereinfacht werden würde. Weiterhin werden vermehrt Samen oder Partikel (bspw. in der Pharmaindustrie oder Kosmetik-/Waschmittelbranche) kontrolliert. Dies könnte auch für eine genauere Betrachtung mit diesem Aufbau realisiert werden.

Falls das Drehen eines Objektes in der Produktion nicht möglich ist, könnten stattdessen auch mehrere Kameras verwendet werden. Somit könnten die Objekte bspw. im Fall oder auf einem Transportband vermessen werden.

Das System kann in weiteren Themenbereiche zur Verwendung kommen. In vielen Bereichen spielt die Qualitätssicherung eine immer größer werdende Rolle. So könnten bspw. das VI-System auch zum Sortieren von Samen verwendet werden, für die Vermessung kleinster Volumina in der industriellen Fertigung oder für weitere Fertigung medizinischer Implantaten.

Der VI-Aufbau kann prinzipiell automatisiert werden. Das bestehende Setup kann als Grundlage verwendet werden. Die größte Herausforderung für die Automatisierung

ist jedoch die Objekthandhabung. Es wäre möglich, den Transport des Filaments und das Schneiden der Polymerstäbchen direkt auf dem Handhabungssystem zu positionieren, so dass die geschnittenen Objekte direkt auf der Nadel positioniert werden. Nach der Prüfung könnte das Polymerstäbchen weiterverarbeitet werden, oder wenn es entsorgt werden soll, da es außerhalb der Spezifikation gemessen, oder als weitere Variante auf eine kleine Platte geblasen werden, die zur Kontrollwägung in die Waage gelegt wird. Die Abbildung 8.3.0.1 zeigt eine Skizze des möglichen Prozesses. Im Vergleich zum Stand der Technik, kann das Volumen mit dem VI-System deut-

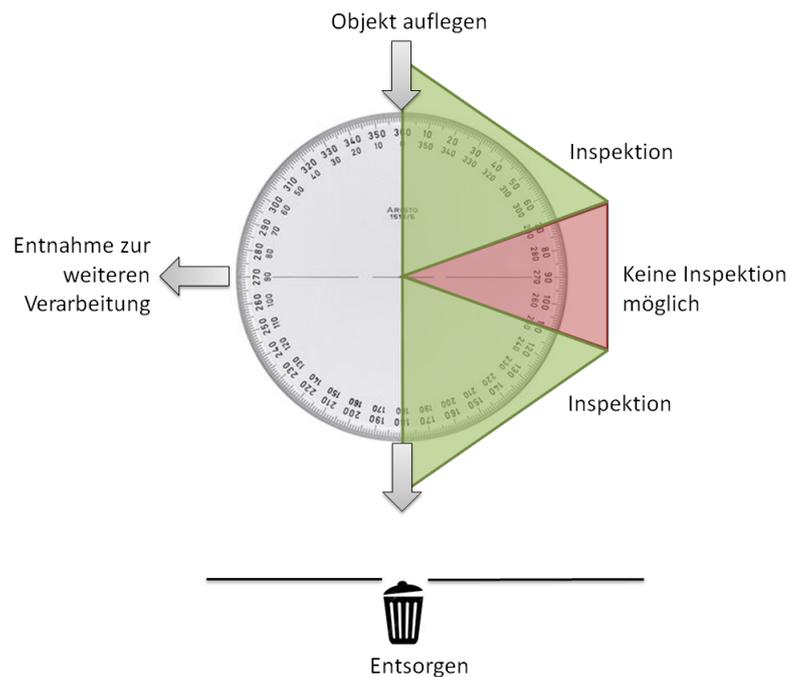


Abbildung 8.3.0.1.: Skizze des Prozesses: Das Objekt wird platziert, geschnitten und um 180° inspiziert. Das Objekt kann anschließend zur Waage transportiert, entsorgt oder zur Weiterverarbeitung entnommen werden. Im roten Bereich kann das Objekt nicht vermessen werden (Halterung im Bild), die Aufnahmen im grünen Winkelbereich können ausgewertet werden

lich schneller (Vergleich mit CT) und präziser (Vergleich Konfokalmikroskop, Shape from Motion) erfasst werden. Somit ist es möglich, auch in anderen Bereichen das Volumen schneller zu berechnen und somit die Produktion und Qualitätskontrolle zu steigern.

A. Anhang

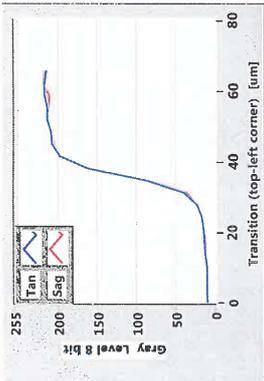
A.1. Datenblatt zur Berechnung des Objektivs TC23004



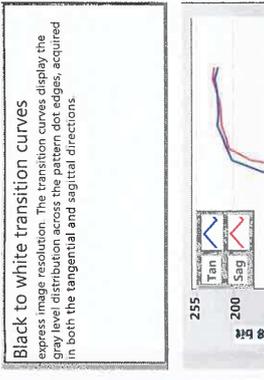
Test Conditions
 PATTERN: Chrome-on-glass, with better than 0.01% geometrical accuracy. Pattern alignment within +/- 2mrad. Pattern phase rotation within 0.5 deg.
 ILLUMINATION: 450-650 nm white led back light source. Pattern illumination uniformity within +/- 5%.
 CAMERA: 8 bit GiGE camera. Maximum gray level between 200 and 240.

Part Number: TC23004
Serial Number: Z10951
Image area width [mm]: 8.50
Image area height [mm]: 7.09
N° of Horizontal pixel: 2464
N° of Vertical pixel: 2056
Pixel size [µm]: 3.45

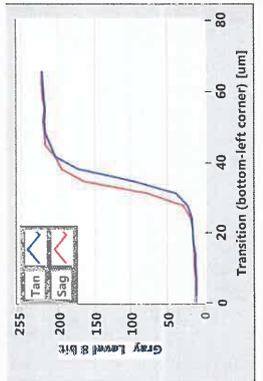
Transition (top-left corner) [µm]



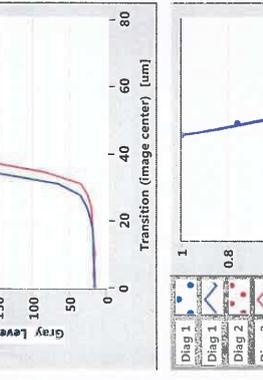
Transition (top-right corner) [µm]



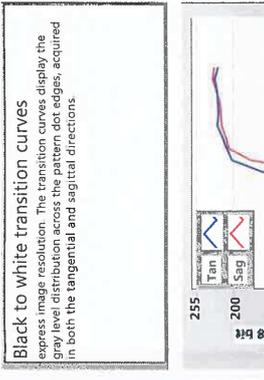
Transition (bottom-left corner) [µm]



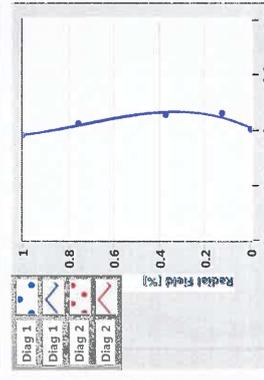
Transition (bottom-right corner) [µm]



Black to white transition curves
 express image resolution. The transition curves display the gray level distribution across the edges, acquired in both the tangential and sagittal directions.



Radial Distortion
 is calculated as a percent deviation of pattern dots from the position that would be determined if using a distortion-free lens with the same magnification. The graph shows the distortion across two image diagonals.



Max Radial Distortion [%] **0.03**

Working Distance
 is the distance measured from the front end of the lens to the object plane. The distance is measured in millimeters to get the maximum image contrast at the lens nominal working distance.

56.00 W.D., Nominal [mm]
55.97 W.D., Test [mm]
0.05 W.D. Error Report [%]

Magnification
 is calculated by analyzing the image of a dot pattern: distances of each dot from the image center are measured and plotted against the corresponding pattern's nominal distances. Magnification is then taken as the slope of the line that best fits such data distribution.

2.00000 Magn., Nominal
1.99610 Magn., Measured
0.20 Magn. Error [%]

Telecentricity
 is measured by displacing the pattern at the borders of the image zones; the magnification between the borders of the pattern and the borders of the image zones. The telecentricity error is calculated as the ratio between the changes in distance and the pattern displacement.

-0.097 Telec., External [deg]
-0.069 Telec., MidExternal [deg]
-0.032 Telec., MidInternal [deg]
-0.011 Telec., Internal [deg]
0.097 Telec., Max [deg]

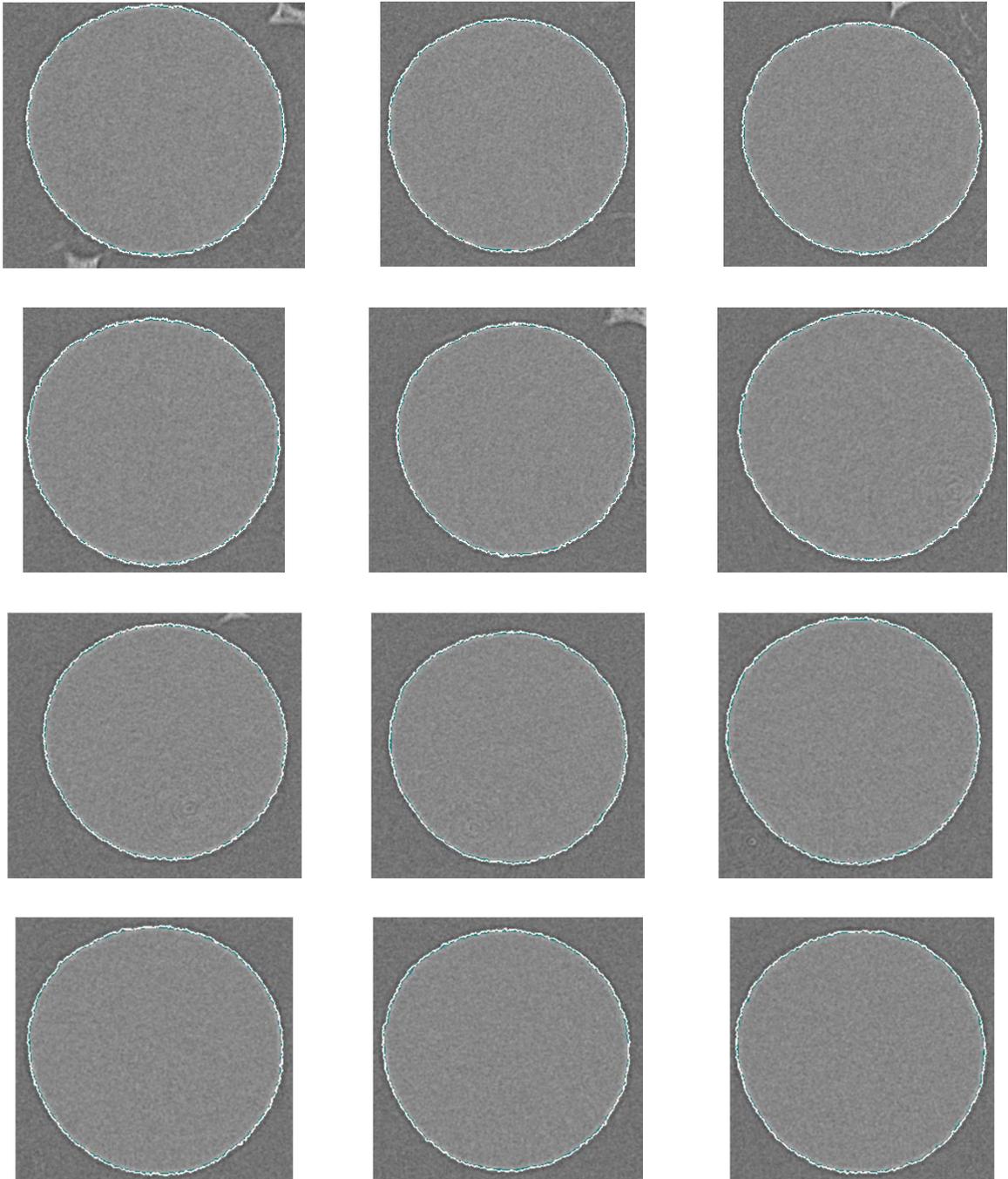
Trapezoidal Distortion
 is computed as the maximum deviation angle between parallel rows of dots on the pattern image.

0.01 Maximum Divergence [deg]

OPTO ENGINEERING

OPTICAL TEST REPORT

A.2. 3D-Rekonstruktion CT Messung: Querschnitte eines Polymerstäbchens



A.3. Nicht funktionierende Volumen-inline Ansätze

- Polymerstäbchen zwischen zwei Zylinder einklemmen

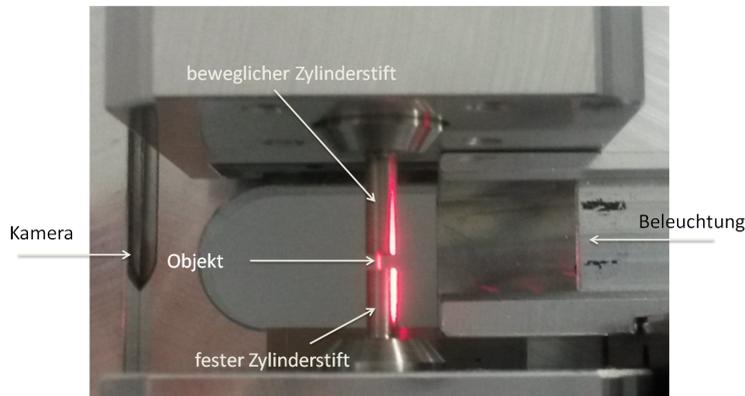


Abbildung A.3.0.1.: Abbildung des Aufbaus, bei dem das Polymerstäbchen zwischen zwei Zylindern eingeklemmt wird.

- Schnittkanten werden verdeckt
- Polymerstäbchen zerbrechen
- Korrelationskoeffizient wird nicht erreicht (96,35 %, 11 Objekte, 53 μg bis 94 μg)

- Polymerstäbchen nicht drehen; mit drei Kameras drei Ansichten aufnehmen

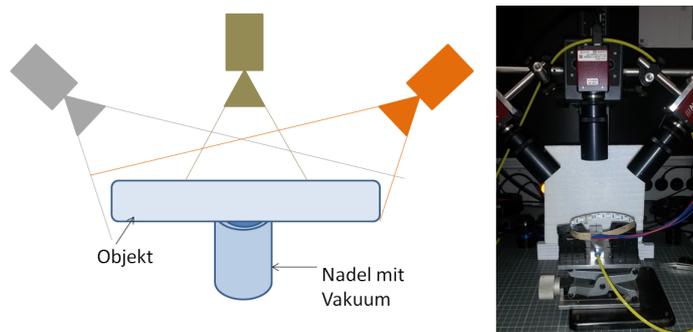


Abbildung A.3.0.2.: Abbildung des Aufbaus mit drei Kameras, ohne Dreheinheit des Polymerstäbchens.

- zu wenig Aufnahmen
- Rückseite des Objektes nicht erkennbar

- Aufnahme mit einem optisches LED Lichtbandmikrometer

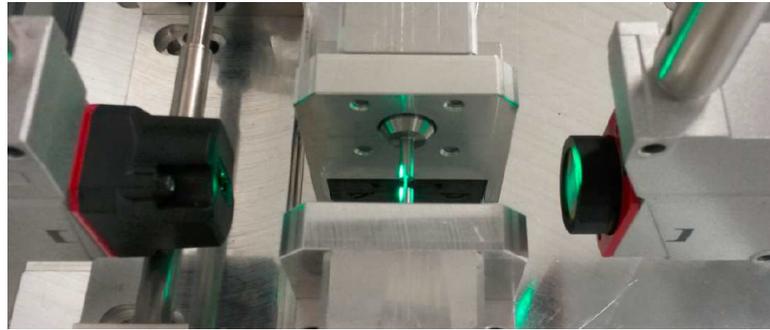


Abbildung A.3.0.3.: Abbildung des Aufbaus mit einem optischen LED Lichtbandmikrometer.

- Auswertung zu langwierig
 - Problematisch, wenn Objekt leicht verkippt ist
 - Handhabung umständlich
- Referenzsystem: Konfokalmikroskop

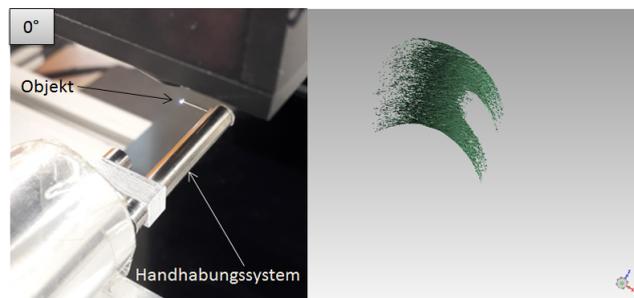


Abbildung A.3.0.4.: Abbildung des Aufbaus mit einem Konfokalmikroskop (links) und Darstellung einer Punktwolke für die Aufnahme bei 0° (rechts).

- Objekt auf Handhabungssystem drehen
- Punktwolken händisch zueinander orientieren, da zu wenige markante Oberflächen für eine Automation vorhanden sind
- zu große Fehler beim Zusammensetzen
- Schnittflächen können nicht mit derselben Punktdichte aufgenommen werden, da durch den Schnittwinkel weniger Lichtstrahlen ins Mikroskop zurück reflektiert werden

A.5. Strahlenverlauf verschiedener Objektivarten

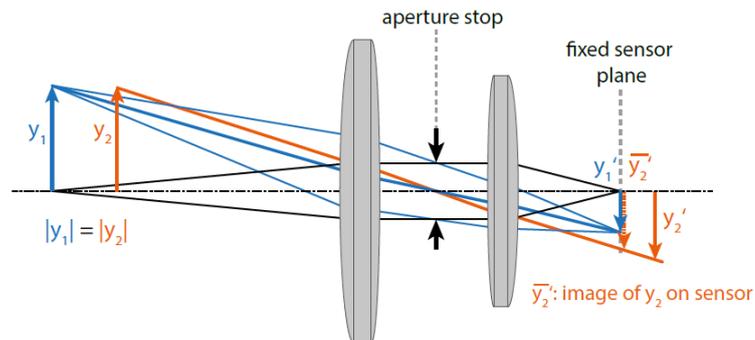


Abbildung A.5.0.1.: Strahlenverlauf eines entozentrischen Objektivs. Objekte, die näher an dem Objektiv positioniert sind, werden größer abgebildet, als wenn der Abstand zwischen Objekt und Objektiv größer ist [Sill][S. 8]

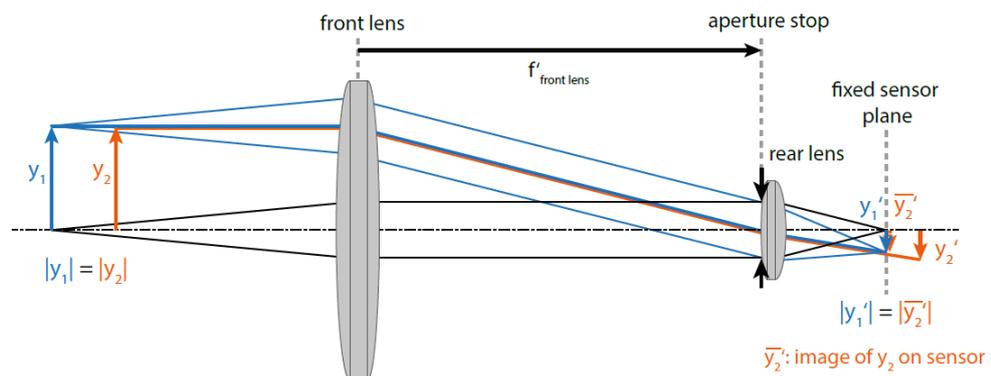


Abbildung A.5.0.2.: Strahlenverlauf eines telezentrischen Objektivs. In einem definierten Bereich kann das Objekt auf der optischen Achse positioniert werden und wird ohne Größenänderung auf dem Kamerasensor abgebildet [Sill][S. 9]

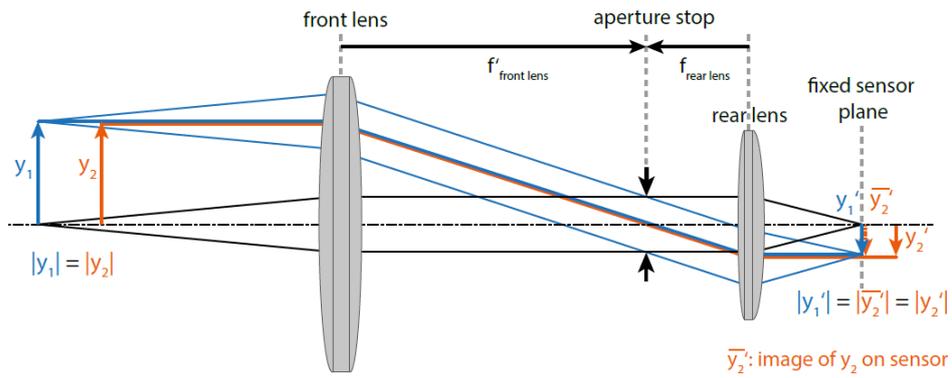
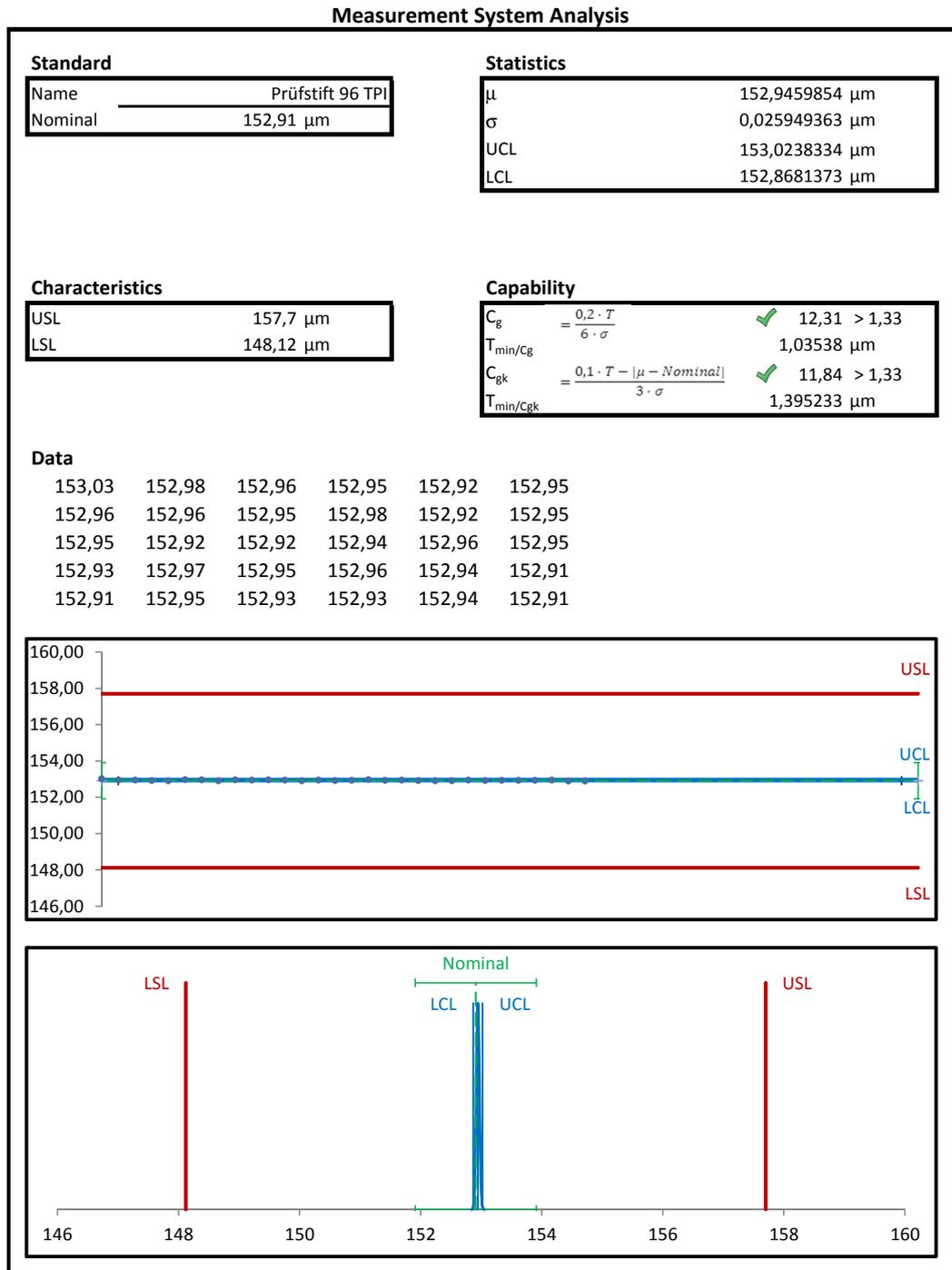


Abbildung A.5.0.3.: Strahlenverlauf eines bi-telezentrischen Objektivs. In einem gewissen Bereich kann das Objekt auf der optischen Achse positioniert werden und wird ohne Größenänderung auf dem Kamerasensor abgebildet [Sill][S. 9]

A.6. Messmittelfähigkeit - Prüfstift 96 TPI, Winkelschritt 9°



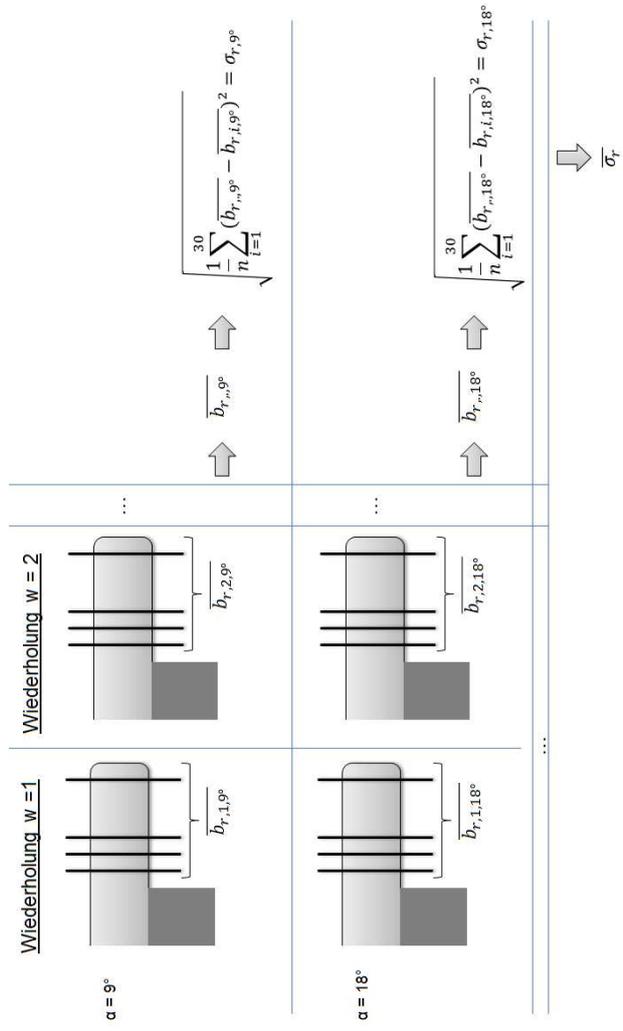
A.6.1. tVerteilung [47][S. 7]

T3 Quantile der t-Verteilung

Tabelliert ist das α -Quantil $t_{n;\alpha}$ der t-Verteilung mit n Freiheitsgraden.

n	$t_{n;0.9}$	$t_{n;0.95}$	$t_{n;0.975}$	$t_{n;0.99}$	$t_{n;0.995}$	n	$t_{n;0.9}$	$t_{n;0.95}$	$t_{n;0.975}$	$t_{n;0.99}$	$t_{n;0.995}$
1	3.0777	6.3138	12.7062	31.8205	63.6567	46	1.3002	1.6787	2.0129	2.4102	2.6870
2	1.8856	2.9200	4.3026	6.9646	9.9248	47	1.2998	1.6779	2.0117	2.4084	2.6846
3	1.6377	2.3534	3.1824	4.5407	5.8409	48	1.2994	1.6772	2.0106	2.4066	2.6822
4	1.5332	2.1318	2.7764	3.7470	4.6041	49	1.2991	1.6766	2.0096	2.4049	2.6800
5	1.4759	2.0150	2.5706	3.3649	4.0321	50	1.2987	1.6759	2.0086	2.4033	2.6778
6	1.4398	1.9432	2.4469	3.1427	3.7074	54	1.2974	1.6736	2.0049	2.3974	2.6700
7	1.4149	1.8946	2.3646	2.9980	3.4995	59	1.2961	1.6711	2.0010	2.3912	2.6618
8	1.3968	1.8596	2.3060	2.8965	3.3554	64	1.2949	1.6690	1.9977	2.3860	2.6548
9	1.3830	1.8331	2.2622	2.8214	3.2498	69	1.2939	1.6672	1.9950	2.3816	2.6490
10	1.3722	1.8125	2.2281	2.7638	3.1693	74	1.2931	1.6657	1.9925	2.3778	2.6439
11	1.3634	1.7959	2.2010	2.7181	3.1058	79	1.2924	1.6644	1.9904	2.3745	2.6395
12	1.3562	1.7823	2.1788	2.6810	3.0545	84	1.2917	1.6632	1.9886	2.3716	2.6356
13	1.3502	1.7709	2.1604	2.6503	3.0123	89	1.2911	1.6622	1.9870	2.3690	2.6322
14	1.3450	1.7613	2.1448	2.6245	2.9768	94	1.2906	1.6612	1.9855	2.3667	2.6292
15	1.3406	1.7530	2.1314	2.6025	2.9467	99	1.2902	1.6604	1.9842	2.3646	2.6264
16	1.3368	1.7459	2.1199	2.5835	2.9208	104	1.2897	1.6596	1.9830	2.3627	2.6239
17	1.3334	1.7396	2.1098	2.5669	2.8982	109	1.2894	1.6590	1.9820	2.3610	2.6217
18	1.3304	1.7341	2.1009	2.5524	2.8784	114	1.2890	1.6583	1.9810	2.3595	2.6196
19	1.3277	1.7291	2.0930	2.5395	2.8609	119	1.2887	1.6578	1.9801	2.3581	2.6178
20	1.3253	1.7247	2.0860	2.5280	2.8453	124	1.2884	1.6572	1.9793	2.3568	2.6161
21	1.3232	1.7207	2.0796	2.5176	2.8314	129	1.2882	1.6568	1.9785	2.3556	2.6145
22	1.3212	1.7171	2.0739	2.5083	2.8188	134	1.2879	1.6563	1.9778	2.3545	2.6130
23	1.3195	1.7139	2.0687	2.4999	2.8073	139	1.2877	1.6559	1.9772	2.3535	2.6117
24	1.3178	1.7109	2.0639	2.4922	2.7969	144	1.2875	1.6555	1.9766	2.3525	2.6104
25	1.3164	1.7081	2.0595	2.4851	2.7874	149	1.2873	1.6551	1.9760	2.3516	2.6092
26	1.3150	1.7056	2.0555	2.4786	2.7787	154	1.2871	1.6548	1.9755	2.3508	2.6081
27	1.3137	1.7033	2.0518	2.4727	2.7707	159	1.2869	1.6545	1.9750	2.3500	2.6071
28	1.3125	1.7011	2.0484	2.4671	2.7633	164	1.2867	1.6542	1.9745	2.3493	2.6061
29	1.3114	1.6991	2.0452	2.4620	2.7564	169	1.2866	1.6539	1.9741	2.3486	2.6052
30	1.3104	1.6973	2.0423	2.4573	2.7500	174	1.2864	1.6537	1.9737	2.3480	2.6044
31	1.3095	1.6955	2.0395	2.4528	2.7440	179	1.2863	1.6534	1.9733	2.3474	2.6036
32	1.3086	1.6939	2.0369	2.4487	2.7385	184	1.2862	1.6532	1.9729	2.3468	2.6028
33	1.3077	1.6924	2.0345	2.4448	2.7333	189	1.2860	1.6530	1.9726	2.3462	2.6021
34	1.3070	1.6909	2.0322	2.4412	2.7284	194	1.2859	1.6528	1.9723	2.3457	2.6014
35	1.3062	1.6896	2.0301	2.4377	2.7238	199	1.2858	1.6526	1.9720	2.3452	2.6008
36	1.3055	1.6883	2.0281	2.4345	2.7195	219	1.2854	1.6518	1.9709	2.3435	2.5985
37	1.3048	1.6871	2.0262	2.4314	2.7154	239	1.2851	1.6512	1.9699	2.3420	2.5966
38	1.3042	1.6860	2.0244	2.4286	2.7116	259	1.2848	1.6508	1.9692	2.3408	2.5949
39	1.3036	1.6849	2.0227	2.4258	2.7079	279	1.2846	1.6503	1.9685	2.3398	2.5936
40	1.3031	1.6838	2.0211	2.4233	2.7045	299	1.2844	1.6500	1.9679	2.3389	2.5924
41	1.3025	1.6829	2.0195	2.4208	2.7012	349	1.2840	1.6492	1.9668	2.3371	2.5900
42	1.3020	1.6820	2.0181	2.4185	2.6981	399	1.2837	1.6487	1.9659	2.3357	2.5882
43	1.3016	1.6811	2.0167	2.4162	2.6951	499	1.2832	1.6479	1.9647	2.3338	2.5857
44	1.3011	1.6802	2.0154	2.4141	2.6923	999	1.2824	1.6464	1.9623	2.3301	2.5808
45	1.3006	1.6794	2.0141	2.4121	2.6896	∞	1.2816	1.6449	1.9600	2.3264	2.5758

A.7. Berechnungsfolge zur Fehlerberechnung der einzelnen Parameter im Volumen



Literaturverzeichnis

Literatur

- [AT 97] A.T. Smith, T. Ledgeway. “Separate Detection of Moving Luminance and Contrast Modulations: Fact or Artifact?” In: *Vision Research* volume 37 (January 1997). Eingesehen am 05.07.2018, S. 45–62.
- [D F96] D. Fritsch. “Three-dimensional geographic information systems – status and prospects”. In: *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing XXXI* (1996). Vienna.
- [D L13] D. Li, J. Tian. “An accurate calibration method for a camera with telecentric lenses”. In: *Optics and Lasers in Engineering* volume 51 (Mai 2013), S. 538–541.
- [D W14] D. Wulfsohn, H.J.G. Gundersen, E.B. Vedel Jensen, J.R. Nyengaard. “Volume estimation from projections”. In: *Journal of Microscopy* 215 (2014), S. 111–120.
- [Dr 11a] Dr. Th. Fuchs. “Bildqualität in der Computertomographie”. In: *Grundlagen und Anwendungen der Röntgen-Computertomographie in Industrie und Technik*. 1. Auflage. Fraunhofer EZRT, Fraunhofer IIS, 2011.
- [Dr 11b] Dr. Th. Fuchs. “Einflussfaktoren auf die Qualität einer CT-Messung”. In: *Grundlagen und Anwendungen der Röntgen-Computertomographie in Industrie und Technik*. 1. Auflage. Fraunhofer EZRT, Fraunhofer IIS, 2011.
- [Dr 11c] Dr. Th. Fuchs. “Grundlagen Rekonstruktion”. In: *Grundlagen und Anwendungen der Röntgen-Computertomographie in Industrie und Technik*. 1. Auflage. Fraunhofer EZRT, Fraunhofer IIS, 2011.
- [F P05] F. Pedrotti, L. Pedrotti, W. Bausch, H. Schmidt. *Optik für Ingenieure*. 4. Auflage. Heidelberg: Springer Verlag, 2005.
- [Fra93] W. Franke. *Prüfung von Papier, Pappe, Zellstoff und Holzstoff: Band 2: Mikroskopische und photometrische Verfahren*. Heidelberg: Springer Verlag, 1993.
- [G S07] G. Schröder, H. Treiber. *Technische Optik*. 10. Auflage. Würzburg, 2007.

- [H N14] H. Naumann, G. Schröder, M. Löffler-Mang. *Handbuch Bauelemente der Optik: Grundlagen, Werkstoffe, Geräte, Messtechnik*. 7. Auflage. München: Hanser, 2014.
- [Ima12] St. Kennerknecht (Stemmer Imaging). “3D-Bildverarbeitung - Technologien und Anwendungen”. In: Hannovermesser. 26.04.2012.
- [Jah03] I. Jahr. *Lexikon der industriellen Bildverarbeitung - Begriffe und Abkürzungen aus der industriellen Bildverarbeitung*. Spurbuchverlag, 2003.
- [Ku66] H.K. Ku. “Notes on the Use of Propagation of Error Formulas”. In: *Journal of research of the National Bureau of Standards - C. Engineering and Instrumentation* 70C.4 (October-December 1966).
- [Kuc07] H. Kuchling. *Taschenbuch der Physik*. 19. Auflage. München, 2007.
- [N S08] N. Schuster, S. Weber. “Telezentriefehler und Telezentriebereich”. In: *Optik & Photonik* 3 (Oktober 2008).
- [Not07] G. Notni. “Handbuch zur Industriellen Bildverarbeitung”. In: 1. Auflage. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart: Norbert Bauer, 2007. Kap. Verfahren zur optischen 3-D-Messtechnik.
- [Ohs18] Prof. Dr. J. Ohser. *Angewandte Bildverarbeitung und Bildanalyse*. Leipzig: Hanser, 2018.
- [P G95] P. Geissler, B. Jähne, T. Scholz, C. Schmidt, H. Suhr, G. Wehnert. “Depth-from-Focus Verfahren zur absoluten Größen- und Konzentrationsbestimmung kleiner Teilchen”. In: *Symposium Bilderverarbeitung, Forschen, Entwickeln, Anwenden* (29.11. - 01.12.1995).
- [Pat98] M.A. Pate. “Optical Design and Specification of Telecentric Optical Systems”. In: *SPIE-The International Society for Optical Engineering* Vol. 3482 (1998), S. 877–886.
- [R C12] R. Christoph, H.J. Neumann. *Röntgentomographie in der industriellen Messtechnik - Präzise, wirtschaftlich und universell*. 2. Auflage. Werth Messtechnik. München: Süddeutscher Verlag onpact, 2012.
- [Rei11] Ch. Reinhart. “Industrial CT & Precision”. In: Danish Technological Institute. Volume Graphics GmbH, Heidelberg: Application of CT Scanning in Industry, 31.May 2011.
- [Sac14] M. Sackewitz. “Leitfaden zur optischen 3D-Messtechnik”. In: Stuttgart: Fraunhofer Verlag, 2014.
- [Sto92] F. Stopp. *Lehr- und Übungsbuch Mathematik IV*. 13. Auflage. Leipzig - Köln: Fachbuchverlag, 1992.

- [Ter10] Dipl.-Ing. T. Terboven. “Handheld 3D color measurements for food inspection”. In: 8th NEMO-SpectroNetCollaboration Forum. Jena: GFMesstechnik GmbH, 27.08.2010.
- [U H08] U. Hilpert, M. Bartscher, M. Neugebauer, J. Goebbels, A. Staude. “Ein neuartiges Normal zu Charakterisierung von Mikrocomputertomographie-Messsystemen”. In: *Industrielle Computertomografie Tagung*. Shaker Verlag, Februar 2008, 163ff.

weitere Quellen

- [27] net - new electronic technology. *Compact Telecentric Lens*. Eingesehen am 24.05.2019. https://net-gmbh.com/files/downloads/lens/VS/VS-TC40_65.pdf.
- [28] H.-J. Andreß. *Glossar zur Datenerhebung und statistischen Analyse - Standardfehler*. <http://eswf.uni-koeln.de/glossar/node142.html>. Eingesehen am 07.08.2019. Universität Bielefeld, 2001.
- [29] R.J. Eckersley A.P. King. *Descriptive Statistics I: Univariate Statistics*. <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/sample-standard-deviation>. Eingesehen am 06.08.2019. Statistics for Biomedical Engineers und Scientists, 2019.
- [30] Baumer. *VLG-12C*. Eingesehen am 24.05.2019. https://www.baumer.com/de/de/produktubersicht/bildverarbeitung-identifikation/industriekameras/lange-verfugbarkeit/visiline-serie/sony-sensoren/vlg-12c/p/medias/__secure__/Baumer_VLG_12C_DS_DE.pdf?mediaPK=8798837014558.
- [31] Baumer. *VLG-22M*. Eingesehen am 24.05.2019. https://www.baumer.com/de/de/produktubersicht/bildverarbeitung-identifikation/industriekameras/lange-verfugbarkeit/visiline-serie/ams-cmosis-sensoren/vlg-22m/p/medias/__secure__/Baumer_VLG_22M_DS_EN.pdf?mediaPK=8798842322974.
- [32] A. Blinne. “Kohärenztomographie mit kurzen Wellenlängen”. Bachelorarbeit. Physikalisch-Astronomische Fakultät: Friedrich-Schiller-Universität Jena, März 2011.
- [33] Dr.-Ing. C. Brückner. “Vom Objekt zum Objektiv - Auswahl und Bewertung telezentrischer Objektive”. In: *inspect-online* (September 2016). <https://www.inspect-online.com/topstories/vision/auswahl-und-bewertung-telezentrischer-objektive>.
- [34] CMOSIS. *CMV2000*. Eingesehen am 24.05.2019. https://www.mouser.de/datasheet/2/588/cmosis_CMV2000-10-2015-1214702.pdf.

- [35] Vision Doctor. *Telezentrische Objektive*. <http://www.vision-doctor.com/telezentrische-objektive.html>. Eingesehen am 17.07.2018.
- [36] Messsysteme für die Qualitätssicherung Dr. D. Wehrhahn. *Lasermesstechnik - 2D-Messung - Das Messprinzip*. http://www.drwehrhahn.de/sites/02produkte/01lasermesstechnik/06_2d_messung/10-2D-messung.html. Eingesehen am 21.03.2019.
- [37] European Machine Vision Association. “EMVA Standard 1288 Standard for Characterization of Image Sensors and Cameras”. In: (2016). <https://www.emva.org/wp-content/uploads/EMVA1288-3.1a.pdf>.
- [38] Vermont Gage. *Product Catalog*. Eingesehen am 06.06.2018. 2016.
- [39] BGR - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. *Rasterelektronenmikroskop*. https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/GG-Stratigraphie/Labore/REM/rem_inhalt.html. Eingesehen am 16.04.2019.
- [40] Plano GmbH. *Zubehör für Elektronenmikroskopie - Testobjekte / Gitter*. <https://www.plano-em.de/katalog/eichstandards-und-testobjekte/testobjekte-gitter/>. Eingesehen am 18.07.2018.
- [41] Universität Göttingen. *Röntgenröhre*. <https://lp.uni-goettingen.de/get/text/6639>. Eingesehen am 06.03.2019.
- [42] Dr. B. Haasdonk. *Digitale Bildverarbeitung Einheit 8 Lineare Filter*. https://lmb.informatik.uni-freiburg.de/people/haasdonk/DBV_FH0/DBV_FH0_SS07_E08_handout.pdf. Eingesehen am 18.07.2019. Fachbereich M+I, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, SS 2007.
- [43] Prof. Dr. Ch. Heckenkamp. “Subpixel-Genauigkeit”. In: *Grundlagen der Bildverarbeitung*. Kompendium der Fachbeiträge aus der INSPECT: Git Verlag, 1/2005.
- [44] Dr. v. Hundelshausen. “Kamera Kalibrierung nach Tsai”. In: Eingesehen am 06.07.2018. Freie Universität Berlin: <http://www.inf.fu-berlin.de/lehre/SS06/SeminarComputerVision/Kamerakalibrierung.pdf>.
- [45] Stemmer Imaging. *Das Handbuch der Bildverarbeitung*. 2018.
- [46] S. Kanies. “Anwendbarkeit von Depth-from-focus-Verfahren zur visuellen Navigation mobiler Roboter”. Diplomarbeit. AG Technische Informatik: Universität Bielefeld, 11.02.2008.
- [47] A. Klenke. *Tabellenwerk Statistik*. Johannes Gutenberg - Universität Mainz. Eingesehen am 20.09.2018. https://www.staff.uni-mainz.de/klenke/vorlesungen/vorl_ss13-2/tabellenwerk.pdf: Institut für Mathematik, 2011.

- [48] M. Kochsiek. *Handbuch des Wägens - Band 1*. 2. Auflage. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 1989.
- [49] SODA VISION PTE LTD. *BASLER scout sca1300-32fm*. Eingesehen am 05.06.2019. <https://www.sodavision.com/product/sca1300-32fm/>.
- [50] MettlerToledo. *XPR-Mikro- und Ultramikrowaagen*. https://www.mt.com/de/de/home/products/Laboratory_Weighing_Solutions/Micro_Ultra_Balances.htmlservicespl. Eingesehen am 26.02.2019.
- [51] maxon motor. *Encoder HEDL 5540, 500 CPT, 3 Channels, with Line Driver RS 422*. Eingesehen am 18.07.2018. <https://www.maxonmotor.com/maxon/view/product/sensor/encoder/Encoder-HEDL-5540-500imp/110516>.
- [52] Prof. St. Naser. "Machine Vision". In: *Vorlesungsskript FB Mathematik und Naturwissenschaften Hochschule Darmstadt* (WS, 2011).
- [53] R. Neubecker. *Beleuchtung - Fallstudien von BV-Anwendungen*. Fachbereich Mathematik und Naturwissenschaft, Studiengang: Optotechnik und Bildverarbeitung. Hochschule Darmstadt, Sommersemester 2017.
- [54] Edmund Optics. *1951 USAF Auflösungsstestbilder aus Glas*. Eingesehen am 05.07.2018. <https://www.edmundoptics.de/test-targets/resolution-test-targets/1951-usaf-glass-slide-resolution-targets/>.
- [55] Opto Engineering. *PT004-009 Kalibrierungspattern*. Eingesehen am 20.09.2018. <https://www.opto-e.de/produkte/gittermuster-PT004-009>.
- [56] Opto Engineering. *TC23004*. Eingesehen am 24.05.2019. <https://www.opto-e.de/media/pdf/TC23004-datasheet-de.pdf>.
- [57] sill optics. *Data sheet S6IRI1530*. Eingesehen am 20.09.2018. https://www.silloptics.de/fileadmin/user_upload/Downloads/Datasheet/S6IRI1530.pdf.
- [58] Prof. Dr. M. Burger, Dr. Ch. Brune. "Grundlagen der Bildverarbeitung". In: *Variationsmethoden in der Biomedizinischen Bildgebung*. Eingesehen am 20.09.2018. Universität Münster: https://www.uni-muenster.de/AMM/num/Vorlesungen/VarBioMed_WS10/skript/Kapitel3a.pdf, WS 2010/2011.
- [59] Cognex Vision Pro. "Caliper - Caliper Tool Overview". In: (2013).
- [60] J. Schulze. "Stand der Implementierung von 3D-GIS". In: Eingesehen am 22.05.2019. FB Vermessungswesen Kartographie, Labor Geoinformatik, HTW Dresden: http://geoinformatik.htw-dresden.de/abschlussarbeiten/DA_SCHULZE_2008/index.html, 2008.
- [61] R. Schnurr. *MSA Messsystemanalyse Messmittelfähigkeit*. <https://www.sixsigmablackbelt.de/msa-messsystemanalyse-messmittelfaehigkeit/>. Eingesehen am 16.06.2019. Sixsigmablackbelt.de, 3.05.2016.

- [62] St. Wilhelm, B. Gröbler, M. Gluch, H. Heinz. "Die konfokale Laser Scanning Mikroskopie". In: *Carl Zeiss Jena* (Eingesehen am 24.01.2019). http://www.cai.hhu.de/fileadmin/redaktion/Fakultaeten/Mathematisch-Naturwissenschaftliche_Fakultaet/CAI/Literatur/Die_konfokale_Laser_Scanning_Mikroskopie.pdf.
- [63] Mettler Toledo. *The First Classic Choice For Valuable Samples*. <http://pdf.medicaexpo.com/pdf/mettler-toledo/first-class-choice-valuable-samples/74754-158157.html>. 5/2008.
- [64] Mettler Toledo. *XP6U / XP2U Ultra Micro Balance and XP6 Micro Balance*. Eingesehen am 09.07.2018. https://www.mt.com/dam/P5/labtec/04_Micro_And_Ultra_Micro_Balances/03_Documentations/04_Datasheets/DS_XP2U_XP6U_Micro_EN.pdf, 5/2008.
- [65] Core Facility Cell Imaging und Ultrastrukturforschung. *Konfokal Mikroskop*. https://www.univie.ac.at/mikroskopie/3_fluoreszenz/fluoreszenz_mikroskop/5c_konfokal.htm. Eingesehen am 15.01.2018. Universität Wien.
- [66] Core Facility Cell Imaging und Ultrastrukturforschung. *Reduktion von „Out of Focus“ – Licht: Konfokal-Mikroskopie*. https://www.univie.ac.at/mikroskopie/3_fluoreszenz/fluoreszenz_mikroskop/5c_konfokal.htm. Eingesehen am 21.03.2019. Universität Wien.
- [67] Spektrum Akademischer Verlag. *Lexikon der Chemie – Massenspektroskopie*. <https://www.spektrum.de/lexikon/chemie/massenspektrometrie/5622>. Eingesehen am 16.04.2019. Heidelberg, 1998.
- [68] Fraunhofer-Allianz Vision. *3-D-Flächenkamera mit Streifenlicht-Projektion*. <http://www.vision.fraunhofer.de/de/presse/361.html>. Eingesehen am 19.07.2013.
- [69] S. Weber. "Telezentriefehler und seine Auswirkungen auf die Messgenauigkeit". In: vision & control, 2008.
- [70] WIPOTEC. *Wägeprinzip*. <https://www.wipotec-wt.com/de/unternehmen/waegeprinzip/>. Eingesehen am 18.01.2018.
- [71] YXLON. *Technical Guide - Computertomographie (CT) für industrielle Anwendungen - Die Fähigkeit, Anwendungsfelder und Technik moderner 3D-Röntgensysteme*. YXLON International.
- [72] YXLON. *YXLON FF20 CT - Hochauflösendes Computertomografie-Prüfsystem für filigrane Prüfteile*. Eingesehen am 05.03.2019. <https://www.yxlon.de/Yxlon/media/Content/Products/X-ray20and20CT20inspection20systems/YXLON20FF2020CT/YXLON-FF20-CT-Product-brochure-DE.pdf>.

Tabellenverzeichnis

2.1.2.1	Charakterisierung einer Waage	23
2.2.1.1	Charakterisierung eines Kamera-Systems	25
2.2.2.1	Charakterisierung eines DfF	26
2.2.3.1	Charakterisierung eines Konfokalmikroskops	28
2.2.4.1	Charakterisierung eines Lichtschnittverfahren	30
2.2.4.2	Charakterisierung eines Streifenlichtprojektors	32
2.2.5.1	Charakterisierung eines CTs	33
3.2.0.1	Übersicht unterschiedlicher Messverfahren und welche Eigenschaften erfüllt werden (+ Merkmal erfüllt; o unter bestimmten Bedingungen erfüllt; - Merkmal nicht erfüllt)	36
4.1.2.1	Benötigte Anzahl der Aufnahmen für die Bestimmung aller Parameter	54
4.1.3.1	Die Abweichung D in Abhängigkeit der Schnittflächenanzahl n mit jeweils 15° Facettenwinkel und der Objektlänge ℓ	63
4.1.4.1	Berechnung der Flächen mit der Grundlage eines Kreises, einer Ellipse und der numerischen Berechnung	69
4.1.4.2	Abweichungen der Flächen in Bezug auf die vorgegebene Ellipsenfläche von $34557,52 \mu\text{m}^2$	69
4.1.4.3	Durchführung mit unterschiedlichen Winkelschritten	71
4.1.4.4	Auswertung der Breiten über unterschiedliche Winkelschrittweiten für den Prüfstift $72TPI$	72
4.1.4.5	Auswertung der Länge über unterschiedliche Winkelschrittweiten für den Prüfstift $72TPI$	73
4.2.1.1	Technische Daten der Waage $XP2U$ von Mettler Toledo [64]	76
4.3.4.1	Ausschnitt der Eigenschaften des $FF20$ -CTs [72]	92
5.3.1.1	Auflistung der wichtigsten Daten für die <i>Baumer</i> Kameras VLG-12C [30] und VLG-22M [31]	119
5.3.1.2	Auflistung der wichtigsten Daten für die Sensoren ICX445 (VLG-12C) [49] und CMV2000 (VLG-22M) [34]	120

5.3.2.1	Auszug aus dem Datenblatt des telezentrischen Durchlichts von <i>Sil</i> [57]	120
5.3.3.1	Ergebnis der Standardabweichung über die horizontalen σ_H und vertikalen σ_V Kalibrierungsfaktoren für zwei Positionen des Handhabungssystems, sowie die prozentualen Abweichungen A	124
5.3.3.2	Auszug aus dem Datenblatt des Encoders <i>HEDL 5540</i> von <i>Maxon Motor</i> [51]	125
6.1.1.1	Eigenschaften der Objektive <i>VS-TC3-65</i> [27] und <i>TC23004</i> [56]	136
6.1.1.2	Kennzahlen des Silizium Target, <i>Plano GmbH</i> [40]	141
6.1.1.3	Ergebnis der Standardabweichung über alle y-Positionen für die x-Positionen links σ_l , mittig σ_m und rechts σ_r für das Objektiv <i>VS-TC3-65</i>	145
6.1.1.4	Ergebnis des maximalen Breitenabstandes, Standardabweichung über alle Abstände sowie die prozentuale Abweichung auf der linken und rechten Seite der Halterung für das Objektiv <i>VS-TC3-65</i>	147
6.1.1.5	Ergebnis der Standardabweichung über alle y-Positionen für die x-Positionen links σ_l , mittig σ_m und rechts σ_r für das Objektiv <i>TC23004</i>	150
6.1.1.6	Ergebnis des maximalen Breitenabstands, Standardabweichung über alle Abstände sowie die prozentuale Abweichung auf der linken und rechten Seite der Halterung für das Objektiv <i>TC23004</i>	151
6.2.1.1	Ergebnis der Steigung des Grauwertverlaufs, sowie des prozentualen Unterschieds zwischen dem Verlauf und einer idealen Kante für die drei Prüfstifte (Objektive <i>VS-TC3-65</i>)	157
6.2.1.2	Ergebnis der Steigung des Grauwertverlaufs, sowie des prozentualen Unterschieds zwischen dem Verlauf und einer idealen Kante für die drei Prüfstifte (Objektive <i>TC23004</i>)	160
6.2.2.1	Ergebnis der mittleren Standardabweichung $\bar{\sigma}$ über alle 190 Querschnitt aller Wiederholungen für das Objektiv <i>VS-TC3-65</i>	161
6.2.2.2	Ergebnis der mittleren Standardabweichung $\bar{\sigma}$ über alle 190 Querschnitt aller Wiederholungen für das Objektiv <i>TC23004</i>	162
6.2.3.1	Ergebnis der Standardabweichung über alle Wiederholungen für die Breite und die Länge (Objektiv <i>VS-TC3-65</i>)	164
6.2.3.2	Ergebnis der Standardabweichung über alle Wiederholungen für die Breite und die Länge (Objektiv <i>TC23004</i>)	166
6.2.3.3	Ergebnis der Standardabweichung über alle Wiederholungen für die Flächen (Objektiv <i>VS-TC3-65</i>) mit der Grundlage eines Kreises (σ_K), einer Ellipse (σ_E) und der numerischen Berechnung (σ_N)	168
6.2.3.4	Ergebnis der Abweichungen zur idealen Fläche für die drei Querschnittsflächen (Objektiv <i>VS-TC3-65</i>).	168

6.2.3.5	Ergebnis der Abweichungen zum mittleren Volumen für die drei Querschnittsflächen (Objektiv <i>VS-TC3-65</i>)	169
6.2.3.6	Ergebnis der Standardabweichung über alle Wiederholungen für die Flächen (Objektiv <i>TC23004</i>)	170
6.2.3.7	Ergebnis der Abweichungen zur idealen Fläche für die drei Querschnittsflächen (Objektiv <i>TC23004</i>)	170
6.2.3.8	Ergebnis der Abweichungen zum mittleren Volumen für die drei Querschnittsflächen (Objektiv <i>TC23004</i>)	171
6.2.4.1	Übersicht der Ergebnisse zur Bewertung der Objektive <i>VS-TC3-65</i> und <i>TC23004</i>	172
6.2.4.2	Bewertung der Objektiv-Ergebnisse (<i>VS-TC3-65</i> und <i>TC23004</i>)	176
7.1.1.1	Ergebnisse der Standardabweichung für die Breite, der Länge, der Fläche und des Volumens für ein Polymerstäbchen	179
7.1.1.2	Ergebnisse der Messmittelfähigkeit für alle drei Prüfstifte	179
7.1.2.1	Benötigte Zeit für jeden Prozessschritt	180
7.1.3.1	Übersicht der Varianten zur Volumenbestimmung	183
7.1.3.2	Ergebnisse der Stichprobenstandardabweichung und Volumenabweichung für verschiedene Kombinationen der Volumenvarianten	184
7.2.3.1	Abweichungen zum Sollvolumen mit unterschiedlichen Annahmen	195
7.2.3.2	Abweichungen zum Sollvolumen mit unterschiedlichen Spaltenannahmen	197
7.2.5.1	Eingestellte Parameter für die CT Messungen	201
7.2.5.2	Ergebnis der Volumendifferenzen und Quadrate für jedes aufgenommene Objekt zwischen dem VI und CT	202
7.2.5.3	Ergebnis der Volumendifferenzen und Quadrate mit korrigierter Systematik für jedes aufgenommene Objekt zwischen dem VI und CT	203
7.2.5.4	Ermittelte Standardabweichungen der Systeme (VI und CT)	204
8.2.0.1	Übersicht Eigenschaften für alternative Objektive. <i>TC23004</i> wird momentan verwendet	207

Abbildungsverzeichnis

1.1.1	Graphische Darstellung des Polymerstäbchens neben einem Reiskorn	14
1.1.2	a) Der Extruder fertigt aus dem Wirkstoff-Pulver-Gemisch einen Strang (= Filament); b) Das Filament wird in Polymerstäbchen geteilt; c) Ein Polymerstäbchen nach dem Schneiden.	15
1.1.3	Darstellung von drei Generationen der Polymerstäbchen mit unterschiedlichen Massen und Toleranzen (schwarz). Zusätzlich sind die Messunsicherheiten in den Größenbereich der aktuell eingesetzten Waage eingezeichnet (orange).	16
2.1.2.1	Prinzip einer EMFC Waage; a) Analoge Signalaufbereitung; b) EDK-Regler; c) Digitale Signalverarbeitung [EMFC19]	22
2.2.3.1	Aufbau eines konfokalen Mikroskops mit dem Flureszenzlicht aus der Fokusebene (roter Strahlengang) und dem „Out of Focus“-Licht (gestrichelter Strahlengang) [66]	27
2.2.4.1	Aufbau eines Lichtschnittsensors [36]	29
2.2.4.2	Aufbau mit einer Streifenlichtprojektion [Not07, S. 220]	31
3.3.0.1	Konstruktionszeichnung des optischen Aufbaus, mit einer Kamera, einem Objektiv, dem Handhabungssystem und der Beleuchtung (von links nach rechts)	37
3.3.0.2	Graphische Darstellung des Handhabungssystems, das das Objekt an einer Nadel mit Vakuum hält und mit Hilfe eines Motors um die Längsachse des Objektes gedreht wird	38
3.3.0.3	Graphische Darstellung einer Objektaufnahme mit markierter Breiten- und Längenmessung	38
4.1.1.1	Graphische Darstellung unterschiedlicher Beleuchtungsarten [45][S. 49]	44
4.1.1.2	Graphische Darstellung der Verzeichnung [45][S. 161]	45
4.1.1.3	Graphische Darstellung der Auswirkung einer MTF einer Optik auf die Abbildung [45][S. 161]	46
4.1.1.4	Graphische Darstellung eines USAF Targets [54]	47

4.1.1.5	Graphische Darstellung von drei unterschiedlichen MTF-Charakteristiken [H N14][S. 398]	48
4.1.1.6	Graphische Darstellung der Nadelspitze mit Objekt. Der rote Pfeil symbolisiert, dass die Position variieren kann	50
4.1.1.7	Graphische Darstellung eines optimal ausgerichteten Objekts (a) und einem um einen Winkel α verkippten Objektes (b)	51
4.1.1.8	Graphische Darstellung der Nadelspitze ohne V-Nut (links) und mit V-Nut und Objekt (rechts)	52
4.1.2.1	Links: Graphische Darstellung eines optimalen Kantenübergangs. Rechts: Graphische Darstellung der Grauwerte der optimalen Kante entlang der x-Achse (rot), sowie die erste (blau) und zweite Ableitung (grün) der Messwerte.	55
4.1.2.2	Links: Graphische Darstellung eines unscharfen Kantenübergangs. Rechts: Graphische Darstellung der Grauwerte der unscharfen Kante entlang der x-Achse (rot), sowie die erste (blau) und zweite Ableitung (grün) der Messwerte.	56
4.1.2.3	Graphische Darstellung der Grauwerte der scharfen (blau) und unscharfen Kante (rot) entlang der x-Achse, sowie die Wendepunkte beider Kanten (scharfe Kante Wendepunkte türkis; unscharfe Kante Wendepunkte orange)	57
4.1.3.1	Graphische Darstellung eines Kreisquerschnittes mit maximaler (rot), minimaler (blau) und mittlerer Breite (grün), sowie mit Überlagerungen einer Sinusfunktion der 1.,2. und 5. Ordnung (violett, türkis, schwarz)	59
4.1.3.2	Graphische Darstellung des Verhältnisses zwischen dem Volumen der Querschnitte mit der überlagerten Sinusfunktion und dem Volumen des Kreis-Querschnittes aufgetragen über die Periodenlänge n ($k = 1$ (blau, Kreis); $k = 3$ (rot, Stern); $k = 5$ (grün, Raute))	60
4.1.3.3	Graphische Darstellung des Balkendiagramms der Fehleranteile für die Breite und der Länge, abhängig von der Querschnittsfläche	62
4.1.3.4	Skizze eines Objektes mit 15° -Schnittkantenwinkeln auf beiden Seiten	63
4.1.4.1	Graphische Zusammenhang zwischen den Standardabweichungen τ_b und τ_ℓ für eine maximale Volumenabweichung von 2,5%	65
4.1.4.2	Graphische Darstellung des Querschnittes einer Ellipse mit den Halbachsen $100\ \mu\text{m}$ und $110\ \mu\text{m}$ (blau), sowie die Messpunkte bei den Aufnahmen mit 30° -Winkelschritten (links) und mit 15° -Winkelschritten (rechts)	68

4.1.4.3	Graphische Darstellung des Querschnittes einer Ellipse mit den Halbachsen $100\ \mu\text{m}$ und $110\ \mu\text{m}$ (blau), sowie die Messpunkte bei den Aufnahmen mit 10° -Winkelschritten (links) und mit 5° -Winkelschritten (rechts)	68
4.1.4.4	Graphische Darstellung des Zusammenhangs der Fläche zur Anzahl der Winkelschritte mit der festgelegten Ellipsenfläche (gelb), der Grundlage für einen Kreis (rot, Raute), Ellipse (blau, Stern) und der numerischen Berechnung (grün, Kreis)	70
4.1.4.5	Graphische Darstellung des Zusammenhangs der Abweichung zur theoretischen Fläche mit unterschiedlichen Halbachsen ($b=110\ \mu\text{m}$ (grün, Kreis) ; $b=120\ \mu\text{m}$ (rot, Raute); $b=150\ \mu\text{m}$ (blau, Stern)) . .	70
4.1.4.6	Graphische Darstellung der Standardabweichungen der Breiten über unterschiedliche Winkelschritte für die drei Prüfstifte ($96TPI =$ rot, Raute; $72TPI =$ blau, Stern; $56TPI =$ grün, Kreis)	73
4.1.4.7	Graphische Darstellung der Standardabweichungen der Länge über unterschiedliche Winkelschritte für die drei Prüfstifte ($96TPI =$ rot, Raute; $72TPI =$ blau, Stern; $56TPI =$ grün, Kreis)	74
4.1.4.8	Graphische Darstellung des Querschnittes des Prüfstiftes $72TPI$ mit einer Winkelschrittenanzahl von 50 ($= 3,6^\circ$; a) und von 20 ($=9^\circ$; b). Die blaue Markierung entspricht der gemessenen Breite und die rote einem optimalen Kreis.	75
4.2.1.1	Graphische Darstellung der Häufigkeitsverteilung für das Gewicht des nominalen Maßes bei 50 Messungen (blau). Das Minimalgewicht beträgt $1000,4\ \mu\text{g}$ (rot), das Maximalgewicht $1001,7\ \mu\text{g}$, das mittlere Gewicht $1000,9\ \mu\text{g}$ und die Standardabweichung über die 50 Wiederholungen $0,23\ \mu\text{g}$	77
4.2.1.2	Graphische Darstellung der Häufigkeitsverteilung für das Gewicht eines Polymerstäbchens bei 50 Messungen (blau). Das Minimalgewicht beträgt $50,5\ \mu\text{g}$, das Maximalgewicht $51,7\ \mu\text{g}$, das mittlere Gewicht $51,05\ \mu\text{g}$ (rot) und die Standardabweichung über die 50 Wiederholungen $0,25\ \mu\text{g}$	77
4.2.2.1	Graphische Darstellung des Messaufbaus mit dem Terahertz-Spektroskopie-System vom <i>Fraunhofer ITWM, Kaiserslautern</i>	79
4.2.2.2	Graphische Darstellung der Laufzeitmessung an einer Position. Aufgetragen ist dabei die Amplitude über der Zeit in Pikosekunden	79
4.2.2.3	Graphische Darstellung des Terahertz-Signals mit maximaler, minimaler Amplitude und der Amplitude, die durch den Tisch ausgelöst wird (oben). Zusätzliche Darstellung der Position der Amplituden im Aufbau (unten).	80
4.2.2.4	Graphische Darstellung der Laufzeit entlang des Filaments	81

4.2.2.5	Ausschnitt des Grauwertverlaufs einer CT-Aufnahme eines Polymerstäbchens	82
4.2.2.6	Ausschnitt eines Querschnittes nach der 3 D-CT-Rekonstruktion eines Polymerstäbchens	82
4.2.2.7	Ausschnitt eines Längsschnittes nach der 3 D-CT-Rekonstruktion eines Polymerstäbchens	83
4.2.2.8	Ausschnitt nach der 3 D-CT-Rekonstruktion eines Polymerstäbchens an verschiedenen Positionen entlang der Längsachse mit kompakten Material	83
4.3.2.1	Skizze des Aufbaus einer Röntgenröhre [41]	87
4.3.6.1	Abbildung des Objektträgers mit dem Objekt für die <i>FIB</i> -Messungen	94
4.3.6.2	Abbildung der kompletten Probe 2 mit dem <i>FIB</i>	95
4.3.6.3	Abbildung eines kleinen Bereiches des Objektes mit einer Vergrößerung von 650 (Probe 2)	95
4.3.6.4	Abbildung des Objektes mit dem <i>FIB</i> (links) und dem MirkoCT (rechts) sowie der Zuordnung der Ausbuchtungen	96
4.3.6.5	Oberflächenvergleich zwischen einem Objekt, das kurz vor der <i>FIB</i> -Messung aus dem Zylinder herausgeholt wurde (links, Probe 1) und der Probe, die vier Wochen außerhalb des Glaszylinders aufbewahrt wurde (rechts, Probe 2)	97
5.1.0.1	Graphische Darstellung des 2D-Kamera-Konzepts; links: Frontsicht, in der die Länge des Objektes gemessen wird; rechts: seitliche Ansicht des optischen Aufbaus mit Beleuchtung, Objekt und Kamera sowie den horizontalen Lichtstrahlen durch die telezentrische Beleuchtung; für jeden Konturpunkt (grün) wird über alle Winkelschritte die Querschnittsfläche bestimmt	100
5.1.0.2	Übersicht des Konzepts in Form eines Flussdiagramms; rot = Kommentar, grün = Daten, die benötigt und mit dem Vorgang erreicht werden	101
5.1.0.3	Übersicht des 2D-Kamera-Konzepts in Form eines Flussdiagramms (blau = Kriterien, gelb = Abschnitte werden im Folgenden genauer erläutert)	102
5.2.0.1	Graphische Darstellung des Objektes auf der Halterung mit drei markierten Bereichen: rot = nicht messbar; grün = Breiten-Bereich (B-Bereich); blau = Schnittkanten-Bereich (S-Bereich).	104
5.2.0.3	Graphische Darstellung der Detektion der Objektkante O, der Objektkante im rechten Bereich OBr und im linken Bereich OBl . . .	104
5.2.0.2	Übersicht des Programmablaufs in Form eines Flussdiagramms; gelb = Abschnitte werden im Folgenden genauer erläutert	105
5.2.2.1	Übersicht der Volumenberechnung in Form eines Flussdiagramms .	107

5.2.3.1	Graphische Darstellung der Detektion der Kantenpunkte im rechten B-Bereich. Ein Suchbereich wird in dem Bereich aufgespannt (a) und das Ergebnis der gefundenen Kantenpunkte dargestellt (b). Ein vergrößerter Ausschnitt des Ergebnisses ist in c) zu sehen. Die rot markierten Punkte werden in der weiteren Berechnung nicht verwendet.	108
5.2.3.2	Graphische Darstellung einer scharfen Kante (links) und einer unscharfen Kante (rechts), sowie das Ergebnis der Filterung mit unterschiedlichen Filtergrößen (2, 4 und 6) [59]	109
5.2.3.3	Graphische Darstellung des Projektionsgraphen und Berechnung des Filtergraphen [59]	110
5.2.3.5	Graphische Darstellung der Berechnungsmaske für die Berechnung der Pixelwerte, wenn der Suchbereich einen Rotation zum Pixelraster aufweist [59]	110
5.2.3.4	Graphische Darstellung einer Kante mit Rauschen, sowie die Ergebnisse der Filterung mit einer <i>FilterHalfSize</i> 1 (links) und 2 (rechts) [59]	111
5.2.4.1	Schematische Darstellung des optischen Aufbaus zur Überprüfung der Breite entlang der Objektachse	112
5.2.4.2	Ausschnitt der Aufnahme eines Polymerstäbchens auf einer Durchlichteinheit	113
5.2.4.3	Graphische Darstellung der Breite entlang der Objektachse. Die im Abschnitt 5.2, Seite 103, definierten Bereiche sind farbig markiert: blau = S-Bereich, grün = B-Bereich, rot = nicht messbar.	113
5.2.4.4	Übersicht der Breitenmessung im B-Bereich in Form eines Flussdiagramms	114
5.2.4.5	Graphische Darstellung der Detektion der Kantenpunkte für den rechten S-Bereich	115
5.2.4.6	Graphische Darstellung der Schnittkanten zwischen den B- und S-Bereichen links (a) und rechts (c)	116
5.2.4.7	Graphische Darstellung der Länge ℓ_B der B-Bereiche, sowie dem nicht messbaren Bereich	116
5.2.4.8	Graphische Darstellung der Schnittkantenantastung auf der rechten Objektseite	116
5.2.4.9	Übersicht der Längenmessung im SL-Bereich in Form eines Flussdiagramms	117
5.2.4.10	Graphische Darstellung der Längendetektion im rechten S-Bereich. Parallele Linie durch jeden Kantenpunkt zur Objektkante (a); Schnittpunkt dieser Linie mit der Schnittkante B-S-Bereich (b); Abstand des Schnittpunktes mit dem Kantenpunkt (c).	118

5.2.4.11	Graphische Darstellung der Winkeldetektion zwischen der Objektkante und der Schnittkante (= 98,84°)	118
5.3.3.1	Darstellung des Handhabungssystems, bestehend aus einem Motor / Encoder, einem Vakuumanschluss und einer Halterungsvorrichtung, an der das Objekt mit Vakuum gehalten wird	121
5.3.3.2	Darstellung der Seitenansicht der Halterungsvorrichtung. Es kann die horizontale Objektposition im Bild angepasst (orange) und der Drehmittelpunkt des Objektes justiert werden (grün)	122
5.3.3.3	Graphische Darstellung des optischen Aufbaus mit orthogonal ausgerichtetem Handhabungssystem (a) und einem Ausschnitt der dazugehörigen Strichgitteraufnahme (oben, rechts), sowie um einen Winkel α verkipptem Handhabungssystem (b) mit der dazugehörigen Strichgitteraufnahme (unten, rechts)	123
5.3.3.4	Graphische Darstellung des Kalibrierungsfaktors über der y-Position wenn das Handhabungssystem orthogonal zur Grundplatte positioniert ist (rot) und wenn es um einen Winkel $\alpha = 2,4^\circ$ verkippt ist (blau)	124
5.3.3.5	Schematische Darstellung der Winkelbereiche mit Beispielbildern, die vermessen werden können (grün) und der Bereich, der durch das Handhabungssystem verdeckt wird (rot)	125
5.3.3.6	Graphische Darstellung der Dreheinheit mit Markierungen der Winkel, sowie dem Koordinatensystem (a) und ein Ausschnitt aus der Aufnahme mit markierten Koordinatensystem (b)	126
5.3.3.7	Darstellung der Standardabweichungen über alle Winkel für die x- (blau, Kreis) und y-Positionen (rot, Raute)	126
5.3.4.1	Eine Aufnahme mit einem entozentrischen (links) und einem telezentrischen Objektiv (rechts) [35]	128
5.3.4.2	Graphische Darstellung der Berechnung des Telezentriefehlers . . .	129
5.3.4.3	Graphische Darstellung einer Abbildung mit unterschiedlich großen Objekten (a) und einer Skizze des optischen Aufbaus mit diesen Objekten (b)	129
5.3.4.4	Graphische Darstellung des Zusammenhangs der gemessenen Breite in Pixel und der Sollbreite in μm	131
5.3.4.6	Graphische Darstellung des Zusammenhangs der berechneten Breite über unterschiedliche Kamerapositionen entlang der optischen Achse. Einmal berechnet mit einem Kalibrierungsfaktor von 2,5 μm (rot) und einmal mit der Korrekturfunktion (blau).	131

5.3.4.5	Graphische Darstellung des Zusammenhangs der berechneten Breite über unterschiedliche Winkelschritte. Einmal berechnet mit einem Kalibrierungsfaktor von 2, 5 μm (rot) und einmal mit der Korrekturfunktion (blau).	132
6.1.1.1	Graphische Darstellung der Breitenänderung über unterschiedliche <i>ContrastTreshold</i> -Werte für das <i>VS-TC3-65</i> (blau; links = Kreuz, rechts = Stern) und das <i>TC23004</i> -Objektiv (rot; links = Kreis, rechts = Raute)	137
6.1.1.2	Graphische Darstellung der Breitenänderung über unterschiedliche <i>FilterHalfSize</i> -Werte für das <i>VS-TC3-65</i> (blau; links = Kreuz, rechts = Stern) und das <i>TC23004</i> -Objektiv (rot; links = Kreis, rechts = Raute)	137
6.1.1.3	Graphische Darstellung des Linienpaares 9.0 des USAF mit den ROIs für die Kontrastberechnung (Objektiv <i>VS-TC3-65</i>)	138
6.1.1.4	Graphische Darstellung des Kontrastes über die Linienpaare für die vertikalen (rot) und horizontalen Linien (blau) (Objektiv <i>VS-TC3-65</i>)	139
6.1.1.5	Graphische Darstellung des Linienpaares 9.0 des USAF mit den ROIs für die Kontrastberechnung (Objektiv <i>TC23004</i>)	139
6.1.1.6	Graphische Darstellung des Kontrastes über die Linienpaare für die vertikalen (rot) und horizontalen Linien (blau) (Objektiv <i>VS-TC3-65</i>)	140
6.1.1.7	Graphische Darstellung des Targets mit der Detektion zweier Linien und ihrem Abstand für das Objektiv <i>VS-TC3-65</i>	141
6.1.1.8	Graphische Darstellung des Targets mit der Nummerierung der Linien für das Objektiv <i>VS-TC3-65</i>	142
6.1.1.9	Graphische Darstellung des Targets mit der Detektion zweier Linien und ihrem Abstand für das Objektiv <i>VS-TC3-65</i>	142
6.1.1.10	Graphische Darstellung der Pixelauflösung für jeden horizontalen Punktabstand zwischen den Linien 2 und 1 (rot), den Linien 2 und 3 (grün) und den Linien 2 und 4 (schwarz), sowie der optimalen errechneten Auflösung (<i>VS-TC3-65</i>)	143
6.1.1.11	Graphische Darstellung der Pixelauflösung für jeden vertikalen Punktabstand zwischen den Linien 4 und 1 (rot), den Linien 4 und 2 (orange), den Linien 4 und 3 (grau), den Linien 4 und 5 (grün) und den Linien 4 und 6 (violett), sowie der optimalen errechneten Auflösung (<i>VS-TC3-65</i>)	144

6.1.1.13	Graphische Darstellung des Breitenverlaufs links (Kreis) und rechts (Kreuz) neben der Halterung entlang der y-Achse für die linke (blau), mittlere (grün) und rechte (rot) x-Position für den Prüfstift 72TPI (mit dem Objektiv VS-TC3-65)	144
6.1.1.12	Schematische Darstellung der Aufnahmen zur Überprüfung der Verzeichnung mit einem Prüfstift. Diesen an drei x-Positionen (links, mittig, rechts) an mehreren y-Positionen aufnehmen und die Standardabweichung der Breite für jede x-Position ermitteln.	145
6.1.1.14	Schematische Darstellung der Aufnahmen zur Überprüfung der Verzeichnung mit einem Prüfpin. Es werden die Aufnahmen mit derselben y-Position und unterschiedlichen x-Position verglichen (mit dem Objektiv VS-TC3-65).	146
6.1.1.15	Graphische Darstellung des Breitenverlaufs, auf der linken Seite der Halterung, links (blau), mittig (rot) und rechts (grün) im Bild (mit dem Objektiv VS-TC3-65)	147
6.1.1.16	Graphische Darstellung des Targets mit der Nummerierung der horizontalen und vertikalen Linien (TC23004)	148
6.1.1.17	Graphische Darstellung der Pixelauflösung für jeden horizontalen Punktabstand zwischen den Linien 3 und 1 (blau), den Linien 3 und 2 (rot), den Linien 3 und 4 (grün), den Linien 3 und 5 (cyan) und den Linien 3 und 6 (violett), sowie der optimalen errechneten Auflösung (TC23004)	148
6.1.1.18	Graphische Darstellung der Pixelauflösung für jeden vertikalen Punktabstand zwischen den Linien 5 und 1 (blau), den Linien 5 und 2 (rot), den Linien 5 und 3 (grün), den Linien 5 und 4 (cyan), den Linien 5 und 6 (violett), den Linien 5 und 7 (schwarz), den Linien 5 und 8 (ocker) und den Linien 5 und 9 (pink), sowie der optimalen errechneten Auflösung (TC23004)	149
6.1.1.19	Graphische Darstellung des Breitenverlaufs links (Kreis) und rechts (Kreuz) neben der Halterung entlang der y-Achse für die linke (blau), mittlere (grün) und rechte (rot) x-Position für den Prüfstift 72TPI (mit dem Objektiv TC23004)	150
6.1.1.20	Graphische Darstellung des Breitenverlaufs links (links), mittig (grün) und rechts (rot) im Bild (mit dem Objektiv TC23004) . . .	151
6.2.1.1	Aufnahme des Kalibriertargets (links) mit einer Zeichnung der Abmaße (rechts); $W_m = 0,3 \text{ mm}$; $H_m = 0,1 \text{ mm}$; $W_S = 0,20 \text{ mm}$ [55] .	153
6.2.1.2	Darstellung der Anschlagpositionen der Grundplatte zur Volumenvermessung (links) und zur Target-Aufnahme (rechts)	153
6.2.1.3	Darstellung des Kalibriertargets in der Halterung auf der Grundplatte	154

6.2.1.4	Graphische Darstellung der detektierten Eckpunkte (lila) mit Hilfe der Kalibrierung von <i>Cognex</i> für das Objektiv <i>VS-TC3-65</i>	154
6.2.1.5	Graphische Darstellung der detektierten Eckpunkte (lila) mit Hilfe der Kalibrierung von <i>Cognex</i> für das Objektiv <i>VSTC23004</i>	155
6.2.1.6	Graphische Darstellung der Aufnahme des Prüfstiftes <i>72TPI</i> mit eingezeichneter <i>ROI</i> (Objektiv <i>VS-TC3-65</i>)	156
6.2.1.7	Graphische Darstellung der Grauwerte der Kante entlang der y-Achse (rot), der ersten (blau) und der zweiten Ableitung (grün) der Messwerte. (Objektiv <i>VS-TC3-65</i>)	157
6.2.1.8	Graphische Darstellung der Grauwerte der Kante entlang der y-Achse (rot) sowie die ideale Kanten (blau). Die Wendepunkte für den Grauwertverlauf (magenta) und der idealen Kante (cyan) sind mit Kreisen markiert (Objektiv <i>VS-TC3-65</i>)	158
6.2.1.9	Graphische Darstellung der Aufnahme des Prüfstiftes <i>72TPI</i> mit eingezeichneter <i>ROI</i> (Objektiv <i>TC23004</i>)	158
6.2.1.10	Graphische Darstellung der Grauwerte der Kante entlang der y-Achse (rot), der ersten (blau) und der zweiten Ableitung (grün) der Messwerte. (Objektiv <i>TC23004</i>)	159
6.2.1.11	Graphische Darstellung der Grauwerte der Kante entlang der y-Achse (rot) sowie die ideale Kanten (blau). Die Wendepunkte für den Grauwertverlauf (magenta) und der idealen Kante (cyan) sind mit Kreisen markiert. (Objektiv <i>TC23004</i>).	159
6.2.2.1	Graphische Darstellung der Querschnitte an einem Objekt, an denen die Breiten b_i über alle Wiederholungen berechnet werden . . .	161
6.2.3.1	Graphische Darstellung der Standardabweichungen für die Breiten der linken (grün, Kreis) und rechten (blau, Stern) Seite neben der Halterung, abhängig von der Winkelposition für den Prüfstift <i>72 TPI</i> , aufgenommen mit dem Objektiv <i>VS-TC3-65</i> . Die rote Linie markiert die theoretisch maximale Standardabweichung, die oben berechnet wurde.	164
6.2.3.2	Graphische Darstellung der Standardabweichungen für die Breite und Länge für die drei Prüfstifte sowie die maximalen theoretische Werte	165
6.2.3.3	Graphische Darstellung der Standardabweichungen für die Breiten abhängig von der Winkelposition auf der linken (blau, Stern) und der rechten Seite der Halterung (grün, Kreis) für den Prüfstift <i>72 TPI</i> , aufgenommen mit dem Objektiv <i>TC23004</i> . Die rote Linie markiert die theoretisch maximale Standardabweichung, die oben berechnet wurde.	165

6.2.3.4	Graphische Darstellung der Standardabweichungen für die Breite und Länge für die drei Prüfstifte sowie die maximalen theoretische Werte (Objektiv <i>TC23004</i>)	166
6.2.3.5	Graphische Darstellung der Flächen mit der Querschnittsgrundlage eines Kreises (blau), einer Ellipse (rot) oder der numerischen Berechnung (grün) für das Objektiv <i>VS-TC3-65</i> für die linke (Kreis) und rechte (Kreuz) Seite neben der Halterung	167
6.2.3.6	Graphische Darstellung der Flächen mit der Querschnittsgrundlage eines Kreises (blau), einer Ellipse (rot) oder der numerischen Berechnung (grün) für das Objektiv <i>TC23004</i> für die linke (Kreis) und rechte (Kreuz) Seite neben der Halterung	169
6.2.4.1	Graphischer Zusammenhang zwischen den Standardabweichungen τ_b und τ_ℓ für eine maximale Volumenabweichung von 1%. Darstellung der Ergebnisse mit dem <i>VS-TC3-65</i> (rot) und <i>TC23004</i> (grün) Objektiv für die Auswertung der drei Prüfstifte (linke Seite = Kreis; rechte Seite = Kreuz).	174
7.1.2.1	Darstellung der Prozesspunkt-Parallelisierung für die drei Auswertepunkt <i>IMSShell</i> (Bildaufnahme, Bild speichern; orange), <i>Test-Tool</i> (Bildauswertung; blau) und <i>Halcon</i> (Volumenberechnung; grün) für alle sieben Rotationsposition. Eine Zeiteinheit entspricht 79 ms.	181
7.1.3.1	Graphische Darstellung des Handhabungssystems um die Filamente mit Hilfe einer Rasierklinge in kleine Stäbchen zu unterteilen . .	182
7.1.3.2	Graphische Darstellung des Zusammenhangs zwischen dem Schnittkantenwinkel und der Abweichung zwischen dem theoretischen Volumen und der Querschnittsannahme einer Ellipse (blau, Kreis) und der numerischen Flächenberechnung (rot, Rechteck)	185
7.1.4.1	Übersicht des Messablaufes für die Bestimmung des Korrelationskoeffizienten in Form eines Flussdiagramms	186
7.1.4.2	Graphische Darstellung der Abhängigkeit zwischen dem Volumen und dem Gewicht für 77 Polymerstäbchen mit der Querschnittsannahme eines Kreises (blau) und einer Ellipse (rot). Das Bestimmtheitsmaß liegt bei 99,55% (Ellipse: 99,75%) und der Korrelationskoeffizient bei 99,78% (Ellipse: 99,87%)	187
7.2.1.1	Darstellung des Messaufbaus mit dem CT, bestehend aus einem Detektor, einer Röntgenröhre und einer Halterung für das Objekt .	189
7.2.1.2	Messaufbau für die CT-Messungen mit Hilfe eines Karbonstabs und Mosy, in dem das Objekt positioniert werden kann	190
7.2.1.3	Darstellung der Startkontur eines Polymerstäbchen mit den Suchregionen für den ISO50-Algorithmus	192

7.2.2.1	Graphische Darstellung der Volumina in Abhängigkeit des Aufnahmestartpunktes der CT-Messung	193
7.2.3.1	Aufnahme mit dem VI-System. Ausbuchtungen am Objektrand sind erkennbar und werden an den Querschnittspunkten detektiert	194
7.2.3.2	Graphische Darstellung des Breitenverlaufs mit der Annahme 1 (konstante Breite, blau), Annahme 2 (Ausbuchtung 6 μm Höhe, rot) und Annahme 3 (Ausbuchtung 30 μm , grün)	195
7.2.3.3	Graphische Darstellung des Breitenverlaufs mit der Annahme 1 (konstante Breite, blau), Annahme 2 (Ausbuchtung 6 μm Höhe, rot) und Annahme 3 (Ausbuchtung 30 μm , grün)	196
7.2.3.4	Aufnahme eines Polymerstäbchens mit dem <i>FIB</i> . Das Objekt ist entlang der Längsachse aufgebrochen (links). Die typische Struktur von Polymer ist in der höheren Vergrößerung in der Spalte erkennbar (rechts).	197
7.2.3.5	Darstellung eine Polymerstäbchens mit einer Spalte (rot) und den Parameter Höhe h und Grundseite c	197
7.2.3.6	Graphische Darstellung des Volumens mit der Annahme 1 (keine Spalte, blau), Annahme 2 (Spaltenhöhe h 30 μm und Grundseite c 10 μm , rot) und Annahme 3 (h 50 μm und c 10 μm , grün)	198
7.2.4.1	Darstellung der Kreismessung an unterschiedlichen Positionen an einer CT-Aufnahme eines Poylmerstäbchens	199
7.2.4.2	Darstellung der maximalen Radiusabweichung am Beispiel von zwei Kreisen	199
7.2.4.3	Graphische Darstellung der maximalen Radienabweichungen für die gefitteten Kreise entlang des Polymerstäbchens	200
7.2.5.1	Ausschnitt der 3 D Rekonstruktion des Objektes Nr. 1	202
7.2.5.2	links: Ausschnitt einer 2D Aufnahme mit dem CT des Objektes in Mosy; rechts: 3 D Rekonstruktion mit deutlichen Artefakten . .	203
8.3.0.1	Skizze des Prozesses: Das Objekt wird platziert, geschnitten und um 180° inspiziert. Das Objekt kann anschließend zur Waage transportiert, entsorgt oder zur Weiterverarbeitung entnommen werden. Im roten Bereich kann das Objekt nicht vermessen werden (Halterung im Bild), die Aufnahmen im grünen Winkelbereich können ausgewertet werden	209
A.3.0.1	Abbildung des Aufbaus, bei dem das Polymerstäbchen zwischen zwei Zylindern eingeklemmt wird.	214
A.3.0.2	Abbildung des Aufbaus mit drei Kameras, ohne Dreheinheit des Polymerstäbchens.	214

A.3.0.3	Abbildung des Aufbaus mit einem optischen LED Lichtbandmikrometer.	215
A.3.0.4	Abbildung des Aufbaus mit einem Konfokalmikroskop (links) und Darstellung einer Punktwolke für die Aufnahme bei 0° (rechts). . .	215
A.5.0.1	Strahlenverlauf eines entozentrischen Objektivs. Objekte, die näher an dem Objektiv positioniert sind, werden größer abgebildet, als wenn der Abstand zwischen Objekt und Objektiv größer ist [Sill][S. 8]	217
A.5.0.2	Strahlenverlauf eines telezentrischen Objektivs. In einem definierten Bereich kann das Objekt auf der optischen Achse positioniert werden und wird ohne Größenänderung auf dem Kamerasensor abgebildet [Sill][S. 9]	217
A.5.0.3	Strahlenverlauf eines bi-telezentrischen Objektivs. In einem gewissen Bereich kann das Objekt auf der optischen Achse positioniert werden und wird ohne Größenänderung auf dem Kamerasensor abgebildet [Sill][S. 9]	218