

Optisches Multi-Sensor-Messverfahren zur dimensionellen in-line Messung von Strangprofilen im Fertigungsprozess

Der Technischen Fakultät
der Universität Erlangen-Nürnberg
zur Erlangung des Grades

D O K T O R – I N G E N I E U R

vorgelegt von

M. Eng. Johannes Bernstein

Erlangen - 2011

Als Dissertation genehmigt von
der Technischen Fakultät der
Universität Erlangen-Nürnberg

Tag der Einreichung: 24.01.2011

Tag der Promotion: 05.04.2011

Dekan: Prof. Dr.-Ing. habil. Reinhard German

Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. mult. Albert Weckenmann
Prof. Dr.-Ing. Rainer Tutsch

Zusammenfassung

Die Fertigungsüberwachung komplex geformter Strangprofile während des Herstellungsprozesses ist mit steigenden Anforderungen verbunden. Dabei sind die geometrischen Produktmerkmale wie Länge oder Form kontinuierlich zu kontrollieren. Die Halbzeuge aus Stahl, Messing, Aluminium oder Kunststoffen werden aus wirtschaftlichen Gründen für die Herstellung vieler technischer Produkte eingesetzt und müssen daher hinsichtlich ihrer Gestalt überwacht werden. Die heutzutage verwendeten optischen Sensorsysteme können entweder nur geringe Datendichte mit ausreichender Messunsicherheit und Messrate, oder konkave Profilkanten mit unzureichender Messunsicherheit und zu langsam bestimmen. Ein erheblicher technischer Vorteil besteht darin, die singulären Messverfahren in einem optischen Multi-Sensor-Messverfahren zu vereinen. Mit den Prüfaussagen lassen sich Ausschuss- und Nacharbeitsanteile reduzieren und gleichzeitig die Bauteilqualität bezüglich der Gestalt verbessern.

In der vorliegenden Arbeit wird daher ein wissenschaftlicher Beitrag für ein geeignetes optisches Multi-Sensor-Messverfahren zur echtzeitfähigen, präzisen und vollständigen Messung konkaver Strangprofile vorgestellt und gemäß wissenschaftlichen Standards evaluiert. Danach wurde das neue Messverfahren in der realen Fertigungsumgebung verifiziert.

Abstract

Nowadays the process-control of complex extruding is a measuring task with rising requirements. Therefore the geometrical characteristics have to be analysed in-line. Because of economic reasons semi-finished products from steel, brass, aluminium or synthetics are increasingly used in a couple of technical products. The advantage of dimensional accuracy and fastness as well as the possibility of measuring concave products cannot be fulfilled simultaneously. The great data-density of light-section systems for complex profile types is attended by relatively slow and non-accurate measurement results. Shadow systems deliver only two-point information of the widest boundary of the parts what is often not suitable e.g. for concave shapes.

Therefore, this work deals with a scientific contribution for an optical multi-sensorial measurement system which consists of shadow- and light-section-systems as well as suitable methods of analysis for the in-line inspection of concave extruding. The measurement results enable the manufacturing of higher product quality. The combined results enable to influence the process control positively and reduce rework significantly. After successful laboratory results based on scientific metrology standards the method had been evaluated in the shop floor successfully.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl Qualitätsmanagement und Fertigungsmesstechnik (QFM) der Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg.

Mein besonderer Dank gilt Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. mult. Albert Weckenmann, Inhaber des Lehrstuhls QFM, für das entgegengebrachte Vertrauen, die Unterstützung und Förderung meiner Arbeit sowie die Übernahme des Hauptreferates.

Prof. Dr.-Ing. Rainer Tutsch, Inhaber des Instituts für Produktionsmesstechnik der Technischen Universität Braunschweig, danke ich für die Unterstützung sowie die Übernahme des Korreferates.

Darüber hinaus danke ich Prof. Dr.-Ing. habil. Tino Hausotte, Inhaber des Lehrstuhls Fertigungsmesstechnik der Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg, für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes. Ebenfalls danke ich Prof. Dr.-Ing. Reinhard Lerch, Inhaber des Lehrstuhls fürs Sensorik (LSE) der Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg, für die Teilnahme als weiterer Prüfer an der mündlichen Prüfung.

Allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Lehrstuhls QFM – meinen Kollegen –danke ich für die angenehme Arbeitsatmosphäre und die sehr konstruktive und angenehme Zusammenarbeit. Dr.-Ing. Martin Bookjans unterstützte darüber hinaus engagiert beim Korrekturlesen der Arbeit und leistete organisatorische Hilfestellungen.

Die Zuarbeiten der von mir betreuten Studien-, Projekt- und Diplomarbeiter leisteten einen erheblichen Beitrag zum Gelingen dieser Arbeit. Besonderer Dank obliegt in diesem Zusammenhang Dipl.-Ing. Robert Ottlo und Dipl.-Ing. Matthias Storath. Für Ihr herausragendes Engagement möchte ich hierbei ebenso den wissenschaftlichen Hilfskräften Viktorija Seidler und Paul Eisler danken. Die Technischen Angestellten Christian Luca und Helmut Gerschütz leisteten tatkräftige Unterstützung bei handwerklichen Aufgabenstellungen.

Meinen Brüdern, weiteren Verwandten und Freunden danke ich für Ihr Verständnis und die Unterstützung im privaten Bereich während der gesamten Zeit. Besonders großer Dank gilt meinen Eltern, die mir ermöglichten, diesen Weg zu beschreiten.

1	Einleitung	1
2	Aktuelle Messverfahren für die kontinuierliche Halbzeugproduktion	5
2.1	1D – Schattenwurfmessverfahren mit parallelen Lichtstrahlen für 1,5D Messergebnisse	6
2.1.1	Messprinzip und Messmethode	7
2.1.2	Erreichbare Kennwerte und Anwendungsbereiche in der Produktion	9
2.2	2D - Lichtschnittverfahren nach dem Triangulationsprinzip für 2,5D Messergebnisse	9
2.2.1	Messprinzip und Messmethode	11
2.2.2	Erreichbare Kennwerte und Anwendungsbereiche in der Produktion	16
2.3	Offline Messverfahren mit zusätzlichem Handling	18
2.4	Defizite der beschriebenen Systeme	23
3	Zielsetzung und wissenschaftlicher Ansatz	25
3.1	Anforderungen an ein verbessertes Messverfahren für die dimensionelle Fertigungsmesstechnik bei kontinuierlichen Herstellverfahren	25
3.1.1	Allgemeine messtechnische Anforderungen	26
3.1.2	Prozessbedingte Eigenschaften der Messobjekte	28
3.1.3	Spezifische Anforderungen an die Applikation in der Fertigungsumgebung	29
3.2	Theoretische Grundlagen für ein optisches Multi-Sensor-Messsystem	31
4	Realisierung eines optischen Multi-Sensor-Messsystems zur Strangprofilmessung	34
4.1	Kombination der Messverfahren beider Subsysteme	34
4.1.1	Kalibrierverfahren	36
4.1.2	Messdatenfusion	45
4.1.3	Auswerteverfahren	50
4.2	Konzeption des Versuchsträgers	56
4.2.1	Konstruktive Eigenschaften	57
4.2.2	Flexibilität und Variabilität des Messverfahrens	58
4.2.3	Leistungsbeschreibung	59
4.3	Geforderte Eigenschaften bei Sensorauswahl	60

4.3.1	Technische Anforderungen.....	60
4.3.2	Ansteuerung der Hardware.....	64
4.3.3	Robustheit des Messverfahrens gegen prinzipbedingte äußere Einflüsse	66
4.4	Eigenschaften eines geeigneten Beleuchtungsverfahrens	67
4.4.1	Physikalisches Wirkprinzip	68
4.4.2	Optische und andere technische Kenngrößen.....	70
4.4.3	Robustheit gegen prinzipbedingte äußere Einflüsse	71
4.5	Einstellungskonzeption der Lichtquellen und der Sensoren in Abstand und Winkel	76
4.6	Messsoftware	87
5	Untersuchung der messtechnischen Eigenschaften.....	92
5.1	Vorgehensweise.....	92
5.2	Messergebnisse mit dem Messverfahren	92
5.2.1	Modellierte Messunsicherheitsanalyse nach GUM.....	93
5.2.2	Experimentelle Messunsicherheitsanalyse nach VDI 2617-8	96
5.2.3	Wechselwirkungen simulierter Einflussgrößen	97
5.2.4	Auswertung von Reihemessergebnissen mit Gauß-, Hüll- und Pferchkriterium	101
5.2.5	Analyse und Bewertung	102
5.3	Evaluation des Multi-Sensor-Messverfahrens in der realen Fertigungsumgebung	102
5.3.1	Test des Messverfahrens in der realen Fertigungsumgebung.....	103
5.3.2	Messergebnisse, Langzeitstabilität und Reproduzierbarkeit.....	105
5.3.3	Robustheit gegen Einflüsse: Schwingungen, Stäube, Temperatur.....	105
5.4	Bewertung der messtechnischen Eigenschaften.....	108
6	Zusammenfassung und Ausblick.....	112
7	Abkürzungsverzeichnis	114
8	Literatur	115

1 Einleitung

Für die Konformitätsprüfung von Produkten im Rahmen der Qualitätssicherung sowie für die Prozessregelung werden genaue, quantitative Informationen über die Abmessungen und die Gestalt von Werkstücken benötigt [WECKENMANN 1999]. Strangprofile und andere Halbzeuge sind in Walz-, Zieh- oder Press-Prozessen hergestellte, „endlose“ Werkstücke aus Stahl, Messing, Aluminium, Kunststoff u.a. Materialien, welche aus wirtschaftlichen Gründen in vielfältigen Anwendungen bei der Gestaltung und Fertigung technischer Produkte eingesetzt werden (Bild 1). Sowohl in alltäglichen Produkten wie Schlössern und Schienen als auch in Getrieben und Pressstempeln werden diese halbfertigen Teile eingesetzt und hierzu teilweise noch endbearbeitet [INGERSOLL-RAND 1999]. Derzeit gibt der Kunde für diese Strangprofile Längen- und Formtoleranzen von $0,1\text{ mm}$ bis $0,5\text{ mm}$ in einem Messbereich bis 100 mm Querschnittsdurchmesser vor. Die Tendenz geht hin zu immer kleineren Längen- und Formtoleranzen um Nachbearbeitungen und den Ausschussanteil von aktuell bis zu 10% der Produktionsmenge deutlich zu reduzieren. Die dabei produzierten halbfertigen Teile sollen demnach mit minimalen Maßabweichungen vermehrt in Werkzeugen oder als Gehäuseteile eingesetzt werden können und eine gleichbleibend gute Qualität hinsichtlich Ihrer Gestalt besitzen [DIN 55350-12]. Derzeit ist diese Prüfung und Überwachung aufgrund mangelnder Messverfahren häufig nicht zufriedenstellend möglich und gefährdet somit die Wettbewerbsfähigkeit der Hersteller auf dem internationalen Markt.

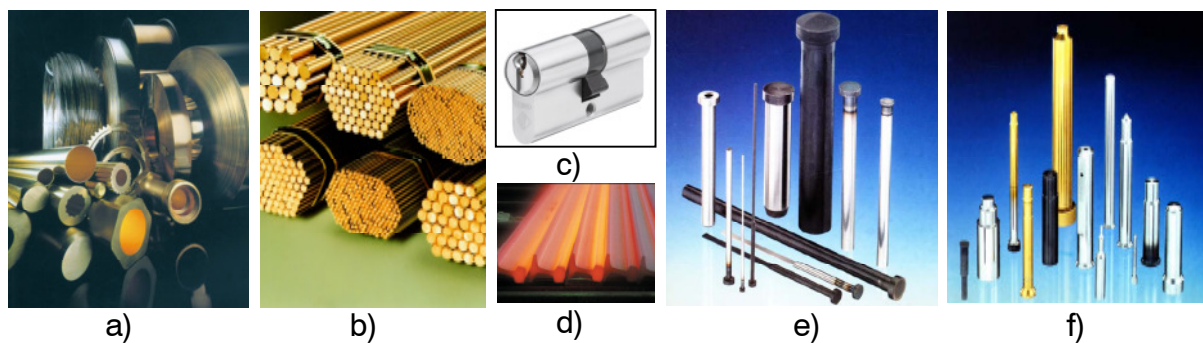


Bild 1: Strangprofile als Halbzeuge für viele technische Endprodukte: a) Messingrohre [KUPFERINSTITUT 2010], b) Rundstangen [KUPFERINSTITUT 2010], c) Schließzylinder [ABUS 2010], d) Eisenbahnschienen [VOEST 2010], e) und f) Pressstempel und Lochbuchsen [MICRONORM 2010]

Daher werden die Halbzeuge heutzutage nach der eigentlichen Urformung in einem energieintensiven Ziehprozess weiterverarbeitet oder anschließend meist spanend nachbearbeitet. Dabei wird das Profil warm glattgezogen, ggf. noch kaltgezogen, teils überdreht und poliert, um die Kundenspezifikationen sicher einhalten zu können. Gemäß der goldenen Regel der Messtechnik sollte für eine Messaufgabe ein dimensionelles Messgerät mit einer Messunsicherheit einer Größenordnung besser als der vorgegebenen Toleranz verwendet werden [BERNDT 1968]. In der vorliegenden Messung wäre demzufolge eine Messunsicherheit von $2 \cdot 10^{-2}\text{ mm}$, besser $1 \cdot 10^{-2}\text{ mm}$ einzuhalten, erst

dann kann die geometrische Maßhaltigkeit nachhaltig überwacht werden [MASING 2007]. Die bisher zur in-line-Prozessüberwachung eingesetzten Messgeräte arbeiten wegen der vielfältigen Anforderungen ausschließlich optisch, da die Messobjekte schnell bewegt, in Ihrer Beschaffenheit pastös oder teilviskos sowie – z.B. bei Messing – bis über $800^{\circ}C$ warm sind [DIEHL 2010]. Daher scheiden taktile Messverfahren im Fertigungsprozess von vorneherein aus [WECKENMANN 2007]. Bei geeigneten optischen Messprinzipien wie dem klassischen Schattenwurfprinzip (Kap. 2.1) erfasst ein Laserscanner das Profil unabhängig von der Lage des Profils im Messbereich.

Am prozessbedingt nicht ruhenden Messobjekt wird in jedem gemessenen Profilquerschnitt die Ausdehnung des, durch aktive Beleuchtung erzeugten, Schattens senkrecht zur Beleuchtungsachse bis zu $1 \cdot 10^{-2} mm$ genau und quasi-kontinuierlich bestimmt, wobei durch zusätzliche Einflüsse die o.g. Messunsicherheit nicht immer sichergestellt werden kann (Kap. 5). Da lediglich die Stelle der maximalen Ausdehnung an einer lokalen Zone gemessen wird, können konkave Profilbereiche mit diesem Messverfahren nicht erfasst werden. Alternativ können für in-line-Messungen konkaver Profilzonen Lichtschnittsysteme eingesetzt werden, die nach dem Triangulationsprinzip arbeiten, jedoch die geforderten Messunsicherheiten besser $1 \cdot 10^{-1} mm$ nicht bereitstellen können (Kap. 2.2). Zudem sind sie für die geforderte Datendichte und die schnelllaufenden Messobjekte häufig zu langsam. Die Messergebnisse werden darüber hinaus von Lageveränderungen des Profilschnitts beeinflusst, wie sie beim Strangpressen unvermeidbar sind [WECKENMANN 2008].

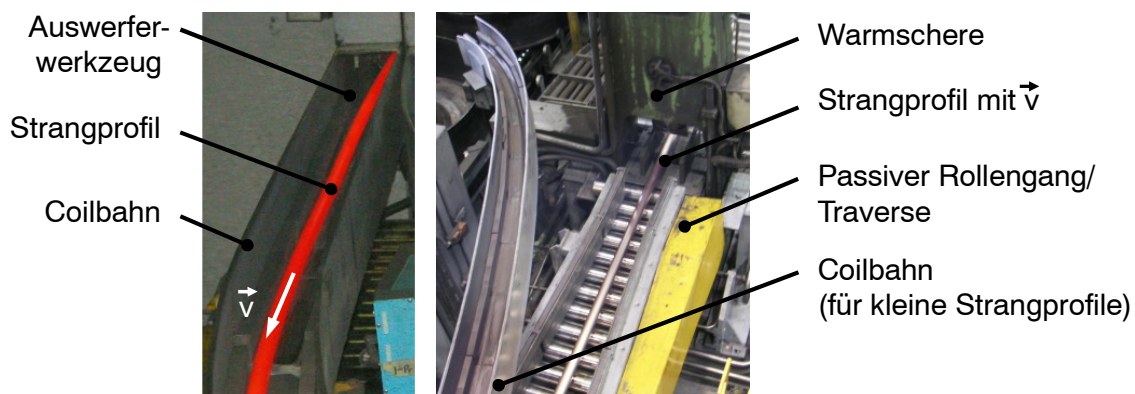


Bild 2: Übliche Messposition in der Strangprofilfertigung; links: Profilauslaufzone, rechts: passiver Rollengang mit angrenzender Warmerschere zur Trennung des Halbzeugs [DIEHL 2010]

Ein optisches Multi-Sensor-Messverfahren für derartige in-line-Messungen kann die Vorteile beider Messverfahren kombinieren und zu erheblich aussagekräftigeren und gleichzeitig genaueren Messergebnissen führen. Jedoch setzt dies geeignete Methoden für die Sensorauswahl, deren Justierung und Kalibrierung, den gemeinsamen Synchronisationsstandard, die Datenfusion sowie die Analyse der Messergebnisse voraus [WECKENMANN 2003]. Zudem herrschen in der vorliegenden Applikation, die erreichbare Messunsicherheit negativ beeinflussende, Werkstattbedingungen vor (Kap. 2. und

Kap. 4.). Die dafür benötigten metrologischen Kenntnisse sind heutzutage in der Fertigungsmesstechnik zu weiten Teilen noch nicht oder nur fraktal vorhanden. Je schwieriger die Nutzung der Messverfahren, die Interpretation der Messergebnisse und auch die hinreichende Rückkopplung der Ergebnisse auf den Herstellprozess sind, desto komplexer liegen die Messdaten im Regelfall vor [WAGNER 2000]. Zudem ist der kontinuierliche Herstellungsprozess von Halbzeugen äußerst empfindlich und schwer beherrschbar [DEPPE 2005]. Kleine Änderungen von den vielfältigen relevanten Parametern wie u.a. Stranggeschwindigkeit, Pressdruck des Stempels, Bolzentemperatur und die Beheizungstemperatur des Pressstempels sowie des Rezipienten sind nicht oder nur in engen Grenzen möglich [DIEHL 2010]. Daher treten heutzutage Ausfälle, Maschinenschäden, hohe Ausschussraten (teils $> 10\%$), regelmäßige Produktionsstillstände oder unsichtbare Gefügeveränderungen im Strangprofil immer wieder auf [DIEHL 2010].

All das beeinträchtigt die Wirtschaftlichkeit empfindlich und kann nur durch optimal abgestimmte Parametereinstellungen minimiert werden. Hierfür sind Messgeräte notwendig, die präzise und objektive Messdaten bereitstellen ohne negative Rückwirkungen auf den Fertigungsprozess mit sich zu bringen. In der vorliegenden Arbeit wird durch die Konzeption eines optischen Multi-Sensor-Messsystems aufgezeigt, dass die Kombination zweier Messverfahren mittels fusionierter Auswertung und ergonomischer Visualisierung erhebliche Vorteile mit sich bringt, was letztlich dazu beiträgt, wettbewerbsfähige Halbzeuge in der Fertigungsindustrie herzustellen.

Für die o.g. Herausforderungen wurden messtechnische Verfahrenslösungen in einem optischen Multi-Sensor-Messverfahren erarbeitet, in Simulation und Versuchen evaluiert sowie in der rauen Fertigungsumgebung verifiziert. Nachstehend sind diesbezüglich der Stand der Technik, die grundlegende Erforschung eines derartigen Messverfahrens, inklusive der Sensorauswahl, der Systemeinstellungen und weiterer Komponenten sowie die erforderliche zeitliche Synchronisation, der Fusionsstandard und die erreichten Messergebnisse aufgeführt. Die zu messenden Strangprofile werden je nach Typ und spezifischer Verwendung mit Geschwindigkeiten über 10 ms^{-1} (beim Drahtziehen bis 100 ms^{-1}) aus dem Auswerfer gepresst und haben Querschnittsdurchmesser von 10 mm bis 100 mm (Bild 2). Unzählige Profilformen und Materiallegierungen sind nach Kundenwunsch im Produktportfolio der Hersteller verfügbar [DIEHL 2010]. Die am häufigsten nachgefragte Querschnittsform ist mit über 60% Produktionsmengenanteil das Rundprofil, da es für Buchsen, Synchronringe in Schaltgetrieben und andere technische Endprodukte in erheblichem Umfang eingesetzt wird. Jedoch bilden auch Standardprofilformen wie Vierkant, Sechskant, Achtkant, T-, H-, L- und Schlossprofile weitere Schwerpunkte der produzierten Pressmenge, bei denen das o.g. Schattenwurfverfahren einige Bereiche konkaver Profile prinzipbedingt nicht erfassen kann (Bild 3).

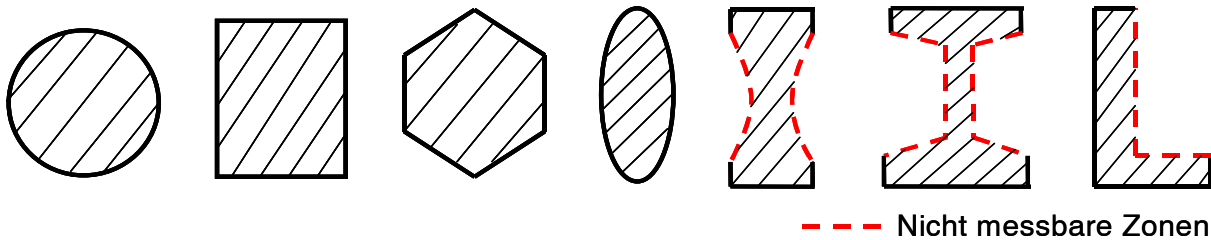


Bild 3: Häufig verwendete Strangprofiltypen mit derzeit nicht durch Schattenwurfsysteme messbaren konkaven Profilbereichen (rot markiert); Verschiedene Querschnittsformen von links nach rechts: Rund-, Vierkant-, Sechskant-, Konvex, Konkav-, Doppel-T-, L-Profil

Messing besitzt z.B. eine spezifische Dichte von ca. $8,9 \text{ kg/dm}^3$ und wird monatlich in einer Menge von mehreren tausend Tonnen in Deutschland produziert [KUPFERINSTITUT 2010]. Aufgrund der positiven Eigenschaften des Werkstoffs wie der Selbstschmierung, nichtrostender Oberfläche und guter Verarbeitungsmöglichkeiten werden Messinglegierungen zunehmend nachgefragt. Dabei entstehen enorme Kosten für auszusondernde Profile in Form von z.B. Energie- und Personalkosten.

Die o.g. und häufig notwendigen Nacharbeiten sehen zwangsläufig vor, das Produkt mit Handlingaufwand auszusondern, erneut einzuschmelzen und danach dem Strangprozess wiederholt zuzuführen [FISCHER 1997]. Die hierfür erforderlichen Induktionsöfen benötigen große elektrische Energiemengen mit den stetig steigenden Kosten wegen des dynamischen Rohölpreises. Dazu kommen erforderliche Reinheitsansprüche an die Legierung, welche durch die beim Auspressen entstehenden Verunreinigungen und Verzunderung durch Beimischung reiner Werkstoffanteile kompensiert werden müssen. In Zeiten steigender Rohstoffpreise von Metallen und Metallschrott stellt dies einen erheblichen Kostenfaktor dar, den sich ein wirtschaftliches Unternehmen in Zeiten internationaler Konkurrenz kaum mehr leisten kann [BAUSER 2001].

Die meisten Profile sind symmetrischen Querschnitts, das Produktionsprogramm enthält jedoch auch asymmetrische Spezialformen [SCHWARZKOPF 2008]. Um die damit verbundenen metrologischen Anforderungen zu erfüllen, entstand der Ansatz für die Erforschung eines Multi-Sensor-Messverfahrens, mit dem verschiedene Profilformen und Halbzeuge grundsätzlich allgemeingültig gemessen werden können sowie allgemeingültige Aussagen zur Messung von Halbzeugen erlangt werden. Dabei spielt ein zugehöriges, spezifisches Kalibrierverfahren eine zentrale Rolle bei neuen Messverfahren [JÄHNE 1996], [WECKENMANN 2009e]. Im Rahmen der durchgeführten Evaluierung des Messverfahrens, auch unter Werkstattbedingungen, werden alle wesentlichen wissenschaftlichen Aspekte und Ergebnisse sowie die Fähigkeiten gezeigt (Kap. 4.).

2 Aktuelle Messverfahren für die kontinuierliche Halbzeugproduktion

Vielfältige Messverfahren kommen für die Messaufgabe kontinuierlicher Halbzeugprüfung hinsichtlich Konformität von Durchmesser und Form in Frage, z.B. auch taktile Messverfahren und insbesondere übliche Handmessmittel oder Lehren [PFEIFER 2010]. Diese scheiden jedoch aufgrund der prozessbedingt nicht ruhenden Messobjekte und rauher Umgebungsbedingungen in der Regel aus [DUTSCHKE 2005]. Die bereits erläuterten Umgebungsbedingungen verhindern auch durchstrahlende in-line Verfahren wie die Röntgen-Computertomographie, akustische Ansätze wie das Ultraschallmessverfahren bei denen die Schallgeschwindigkeiten und die Gradienten nicht hinreichend genau bekannt sind oder den Lasertracer [BAUER 2007]. Andere Verfahren scheitern aufgrund der Randbedingungen an den Gradienten in Luftdichte und -temperatur sowie daran gekoppelt der Schallgeschwindigkeit der Luft. Bei den verbleibenden makrooptischen Ansätzen, wie dem Lichtschnitt- oder dem Schattenwurfverfahren, sind die industriell geforderten Messunsicherheiten unter erschwerten Bedingungen nicht ohne weiteres erreichbar, wenngleich teilweise die Gerätespezifikationen unter Laborbedingungen zunächst erfolgversprechend sind und optische Messverfahren wegen Ihrer Datendichte, Messgeschwindigkeit und Flexibilität häufig Vorteile bieten [TUTSCH 2008].

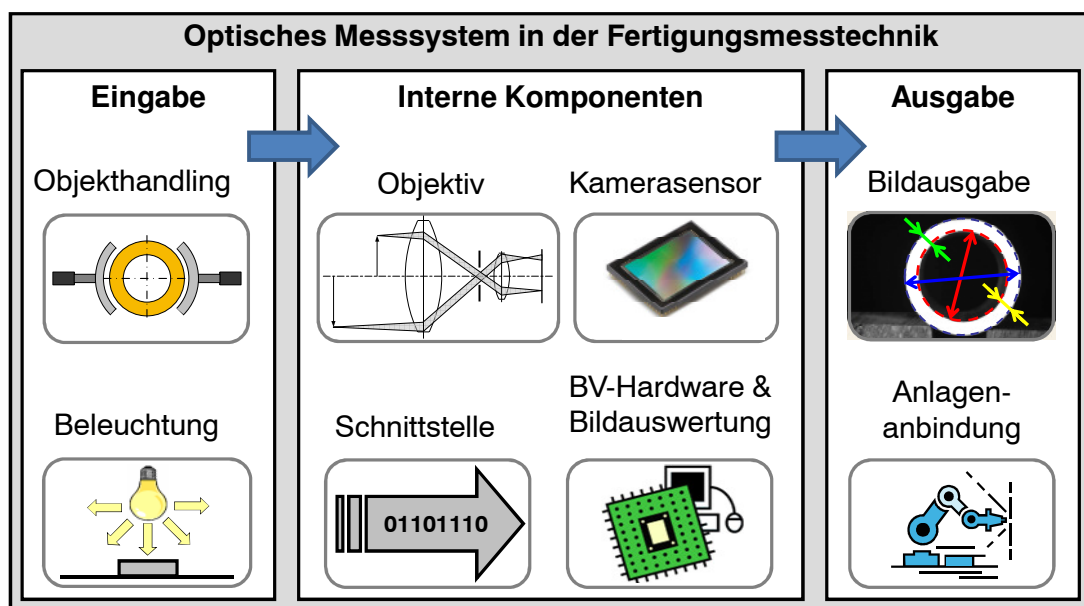


Bild 4: Allgemeiner Aufbau von Kameraprüfsystemen in der Fertigungsmesstechnik

Optische Mess- und Prüfsysteme bestehen in der Regel aus einer Eingabeeinheit, internen Komponenten und einer Ausgabeeinheit (Bild 4), [FABRIMEX 2008]. Das Objekthandling erfolgt im Strangprozess in-line, auf einer aktiven bzw. nachgelagert einer passiven Rollbahn, welche die Profile in Richtung und Lage konstant bewegt und gerichtet führen [MODRICH 2007]. Die Beleuchtung wird in singulär eingesetzten optischen Kamerasystemen durch eine diffuse Lichtquelle, in LSS durch einen Laserfächer

(Kap. 2.2) und in SWS meist durch einen punktförmigen Laser (Kap. 2.1) erreicht. Heute sind dafür wegen ihrer günstigen optischen und bauformbedingten Eigenschaften Diodenlaser im Fertigungsbereich üblich [BASSMANN 2000], [SCHUSTER 2008]. Geringe Baugröße, Robustheit und niedrige Herstellkosten sind bei ausreichender Lebensdauer überdurchschnittlich. Zudem entfällt die Einlaufzeit anderer Laserprinzipien, wie z.B. dem klassischen Gaslaser, Kap. 4.4. Die Kameraobjektive der Lichtschnittsysteme werden häufig durch entozentrische Objektive mit geringer Baugröße sichergestellt, selten durch telezentrische, Kap. 4.3 [POLYTEC 2008]. Als Sensorfeld finden *CCD*-Chips (*CCD*: Couple Charged Device) in dieser Anforderung in beiden Messverfahren bevorzugt Anwendung, insbesondere wegen Ihrer großen Lichtempfindlichkeit im Gegensatz zu *CMOS*-Kameras (*CMOS*: Complementary Metal Oxide Semiconductor).

Die Strahlführungen und die eingesetzten Objektive von Schattenwurfsystemen sind um das Messobjekt positioniert und telezentrisch ausgeführt um parallele Lichtstrahlen im Messfeld zu erzeugen. Die Breite dieses sich bewegenden Lichtvorhangs gibt den Messbereich vor [BA-MESSTECHNIK 2010]. Die Schnittstellen zum Auswerterechner bzw. der Ausgabe werden in vielen Fällen durch elektronische Auswerteeinheiten bereitgestellt. Beim Geräteanschluss an die Rechnerhardware und die eingesetzte Messsoftware werden meist konventionell genormte Schnittstellen großer Übertragungsrate wie *RS 232*, *RS 485*, *RS 422*, Firewire, Ethernet, Camera-Link oder *USB* verwendet (Kap. 4.3.2).

Die Bildauswertung findet häufig mit Hilfe standardisierter oder individuell bereitzustellender Algorithmen und Softwarebausteinen statt, welche teilweise lizenzrechtlich zu erwerben sind [JÄHNE 2005]. Ferner wird die Messsoftware auch für die Ausgabe und die Datenausgabe verwendet. Eine Anpassung der gewerblichen Algorithmen und Quelltexte ist mangels Offenlegung seitens der Hersteller selten möglich, wodurch Bedarf zu individueller Kalibrier- und Messsoftware entsteht [AHLERS 2000]. Die Auswertung und Anbindung an die Prozessregelung der Fertigungsanlage ist nur untergeordneter Gegenstand dieser Arbeit, weshalb lediglich die Konzeption, die grundlegende Funktion und Methodik skizziert wird. Die gesamte Messdatenauswertung muss im Zuge großer Flexibilität modular aufgebaut sein, z.B. da Profilspezifikationen oder Sensoreinstellungen in unregelmäßigen Abständen verändert werden müssen [ABMAYR 2001], [BAUER 2001a].

2.1 1D – Schattenwurfmessverfahren mit parallelen Lichtstrahlen für 1,5D Messergebnisse

Das Schattenwurfverfahren ist bei in-line-Prüfungen weit verbreitet wegen seiner genauen messtechnischen Eigenschaften und einfachen Funktionsweise [BIMBERG 1993]. Dadurch können robuste Messsysteme bereits in mittleren Stückzahlen zu wirtschaftlich interessanten Konditionen bereitgestellt werden. Das dabei erzielte Messergebnis ist ein skala-

res Zweipunktmaß, welches die maximale Querschnittsbreite D des Messobjekts an der Messstelle zum Zeitpunkt der Messung verkörpert. Dadurch ist ein SWS nicht nennenswert beeinflusst von kleinen lateralen Lageveränderungen des Profils, wie sie im Regelfall während der Produktion vorkommen (Bild 5). Kenntnisse über die exakte Position des Profils im Strahlengang sind nicht notwendig, wenngleich diese mit ausgewertet wird. Lediglich die Breite des Messobjekts zusammen mit dem Längenintervall der Profilbewegung darf den Messbereich nicht übersteigen. Aus den gemessenen Längenwerten können durch hohe Messfrequenzen von über 500 Hz auch Kenntnisse der Ausbringungsgeschwindigkeit und der Position des Messgeräts in z -Richtung mögliche dimensionelle Abweichungen detektieren. Eine Folge ist, dass diese Stellen auf dem Produkt später z.B. im Rahmen von Reklamationen grundsätzlich wiedergefunden werden können. Die Effekte von Linsenverzeichnung, Kantenposition und Zeitmarke sowie üblichen Kalibrierunsicherheiten führen.

Dennoch sind geringe Messabweichungen erreichbar. Durch Einsatz mehrerer Sensoren oder Oszillieren, bzw. Rotieren des SWS um das Messobjekt (Bild 6), können $2D$ -Informationen generiert werden, die jedoch wie o.g. nur für runde oder konvexe Profilverformen unter Vernachlässigung der Formabweichung geeignet sind. Durch die prozessbedingte Bewegung des Profils in z -Richtung (Ausbringungsrichtung), welche durch Messung der Profilgeschwindigkeit oder durch Berechnung auf Basis des Umformverhältnisses und der Stempelgeschwindigkeit bekannt sind, können $1,5D$ -Messergebnisse erreicht werden bzw. $2,5D$ -Ergebnisse bei Rundprofilen. Insbesondere über die Zeit und die Temperaturänderung sowie Temperaturgradienten (Wärmeverzug) im Aufbau treten mechanische Bahnabweichungen auf, welche zu Messunsicherheitsbeiträgen führen, die sich negativ auf die Qualität des Messergebnisses auswirken [BA-MESSTECHNIK 2010].

2.1.1 Messprinzip und Messmethode

Das Funktionsprinzip des SWS (Bild 5) basiert meist auf rückgeführten Zeitmessungen mit theoretischen Messunsicherheiten bis $1 \cdot 10^{-11}\text{ s}$. Hierzu wird ein Laserstrahl (Punktlaser) auf einen strahlaufweitenden Kollimator gelenkt (Kap. 4.4.1). Der aufgeweitete Strahl wird parallelisiert und der entstehende, wiederholt bewegte Lichtvorhang durch das Messobjekt unterbrochen. Auf der Gegenseite lenkt ein strahlbündelnder Kollimator dazu Hell-Dunkel-Informationen auf einen punktförmigen Detektor. Dieser wertet die Signale nach Gleichung 2.1 (Kosinusabweichung vernachlässigt) mit der gemessenen Zeit $\Delta t_{\text{Abschattung}}$ über einen Oszillator mittels Zählung auf Basis der Ausschlagmethode und einer Auswerteelektronik aus. Die Zeit entspricht dabei der Dauer, die der Lichtvorhang von dem Messobjekt am Auftreffen auf dem Detektor gehindert wird. Angeschlossen an eine Visualisierung mit der Möglichkeit zur Kalibrierung und Nullstellung, wird die bekannte Bewegungsgeschwindigkeit des Lichtvorhangs mit der gemessenen Abschattungszeit multipliziert und ausgegeben.

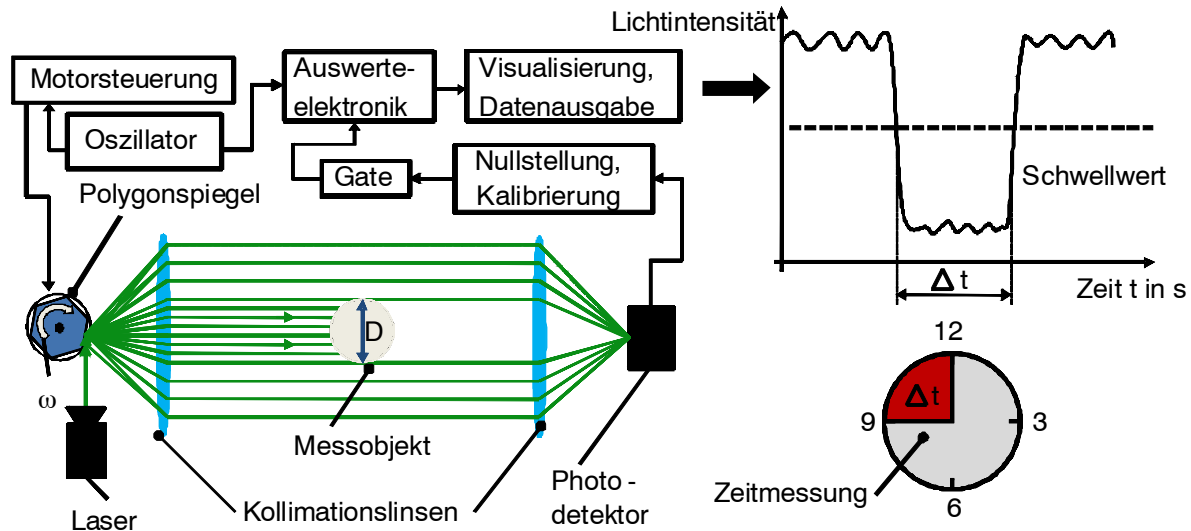


Bild 5: Messprinzip des Schattenwurfverfahrens auf Basis der Zeitmessung des Schattens

Dabei errechnet sich zusammen mit bekannten Gerätekosten die abgeschattete Länge Δl , welche der maximalen Bauteilbreite an der Messstelle entspricht. Damit liegen rückgeführte, skalare Messergebnisse der Längeneinheit Meter [PTB 2009] vor (vernachlässigte Kippabweichung, welche die effektiv gemessene Länge orthogonal zur Beleuchtungsachse beeinflusst):

$$\Delta l = \text{const}_{\text{Schattenwurfsystem}} \cdot \vec{v}_{\text{Lichtvorhang}} \cdot \Delta t_{\text{Abschattung}} \quad (2.1)$$

Solange die Lageänderungsgeschwindigkeit des Messobjekts (bis $5 \cdot 10^{-3} \text{ ms}^{-1}$) deutlich kleiner ist als die Bewegungsgeschwindigkeit des Lichtvorhangs (welche typischerweise um $5 \cdot 10^1 \text{ ms}^{-1}$ liegt) kann der Schwingungseinfluss des Messobjektes vernachlässigt werden. Die erforderliche Lichtstärke des Lasers kann gering sein (z.B. wenige mW), da nur Hell-Dunkel Signale digitalisiert und ausgewertet werden. Der Einfluss durch Infrarotstrahlung auf den lichtempfindlichen Detektor, welchen die meist warmen Strangprofile (z.B. bei Messinglegierungen ca. 800°C) mit sich bringen, ist auch durch zusätzliche Spektralfilter eher gering. Es ist eine feste Verbindung zwischen Sender und Strahlungsempfänger (durch starre mechanische Bauweise, z.B. durch dauerhafte Verstiftung) unablässig. Hierbei ist erfahrungsgemäß ein Rotationsabstand von $180,0^\circ \pm 0,1^\circ$ einzuhalten [BA-MESSTECHNIK 2010]. Dies erspart die kontinuierliche, räumliche Justierung oder Grobkalibrierung des SWS auch über längere Nutzungszeiträume von mehreren Monaten. Eine Feinkalibrierung erfolgt typischerweise über die systematische Korrektur von Δl mittels Linearkalibrierung an mehreren Stützstellen anhand von Meisterwerkstücken oder Normalen (auch Kap. 4.1.1), [BA-MESSTECHNIK 2010]. Zur Erhöhung des Aussagegehalts der Messergebnisse kann entweder ein einzelnes SWS um das Messobjekt herum bewegt werden oder es können mehrere Systeme sein, welche in verschiedenen Winkelstellungen starr ausgerichtet bleiben (Bild 6). Zur Unterdrückung

ungewünschter Spektralbereiche können Filter (z.B. für Infrarote oder ultraviolette Lichtanteile) verwendet werden.

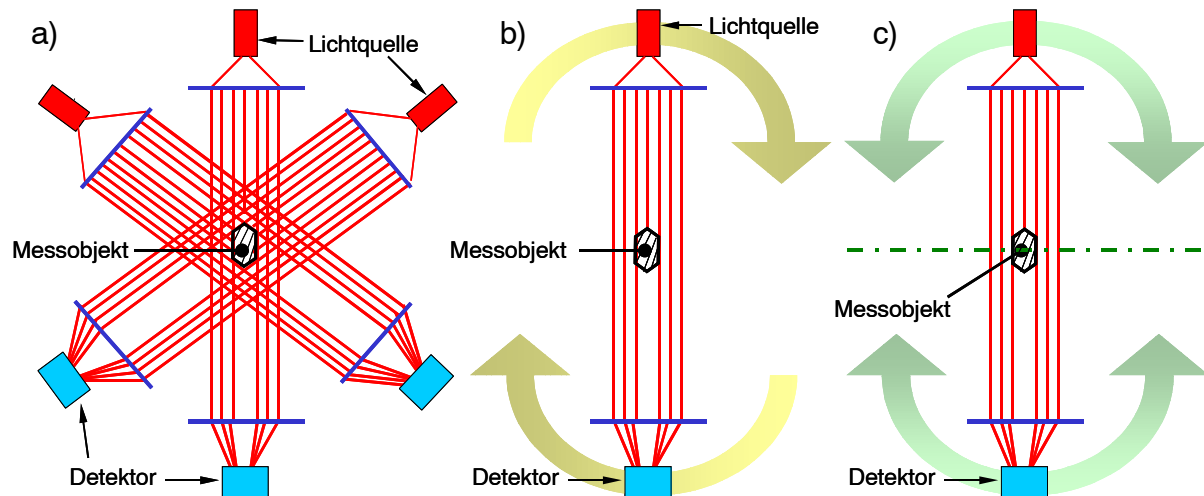


Bild 6: Applikationen des Schattenwurfverfahrens, a) mehrfach, b) rotierend, c) oszillierend

2.1.2 Erreichbare Kennwerte und Anwendungsbereiche in der Produktion

Derzeit werden Messraten singulärer SWS von ca. 600 Hz erreicht. Die Messunsicherheiten liegen bei $10\ \mu\text{m}$ in Messbereichen von 10 mm bis 100 mm, was für herkömmliche Halbzeuge meist ausreicht [WECKENMANN 2009f]. Eine methodisch bedingte Folge des Verfahrens ist, dass konkave Profilformen nicht gemessen werden können. Das skalare Messergebnis kann nur verwertbare Querschnittsaussagen beim Kreis und bedingte Aussagen bei konvexen Mehrkant- und Sonderprofilen liefern. Konkave Profile sind nur eingeschränkt messbar, z.B. wenn äußere geometrische Merkmale ausgewertet werden (Kap. 3.1), [WECKENMANN 1995]. Die Kalibrierkennlinie ist linear und damit einfach beherrschbar (auch Bild 35). Das Messverfahren wird daher meist bei konvexen und symmetrischen Objekten eingesetzt (z.B. Kreis).

2.2 2D – Lichtschnittverfahren nach dem Triangulationsprinzip für 2,5D Messergebnisse

Das Lichtschnittverfahren basiert auf dem Prinzip der rückgeführten Verzerrung von gerichteter, makrooptischer Beleuchtung (meist im sichtbaren Teil des Lichtspektrums) auf technischen Oberflächen. Im einfachsten Fall arbeitet das Messverfahren 1D, wodurch es in kontinuierlichen und gleichzeitig zeitkritischen Anwendungen selten eingesetzt wird (Bild 7). Hierbei wird eine Punktlichtquelle zur Beleuchtung und eine Kamera verwendet. Die endliche Auflösung der Kamera und die Winkel- und Abstandsabweichungen und -veränderungen (nach Kalibrierung), z.B. durch Kriechen, führen zu nicht unerheblichen Messabweichungen (Kap. 2.2.2).

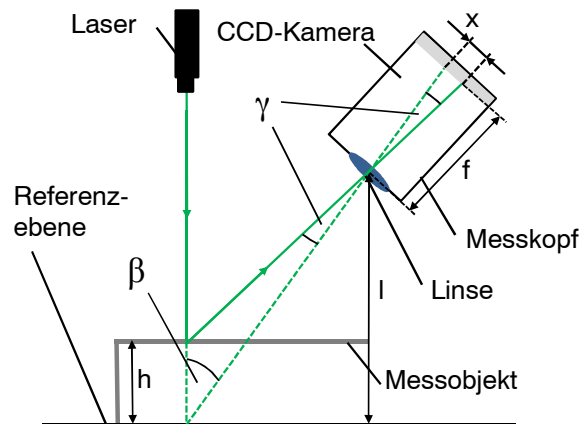


Bild 7: Messverfahren der 1D-Lasertriangulation unter dem Winkel $\beta(x)$, f entspricht der Brennweite

Es reicht jedoch zur Erfassung und Auswertung einzelner Längen (z.B. Höhen, Vertiefungen, Oberflächenveränderungen), Defekterkennung von Profilen oder zur Positionserkennung von bewegten Messobjekten auf Bändern und Rollen. Für die holistische Erfassung von vollständigen Profilzonen ist es nicht geeignet. Es bildet jedoch die Grundlage für die zweidimensionale Anwendung (Bild 8).

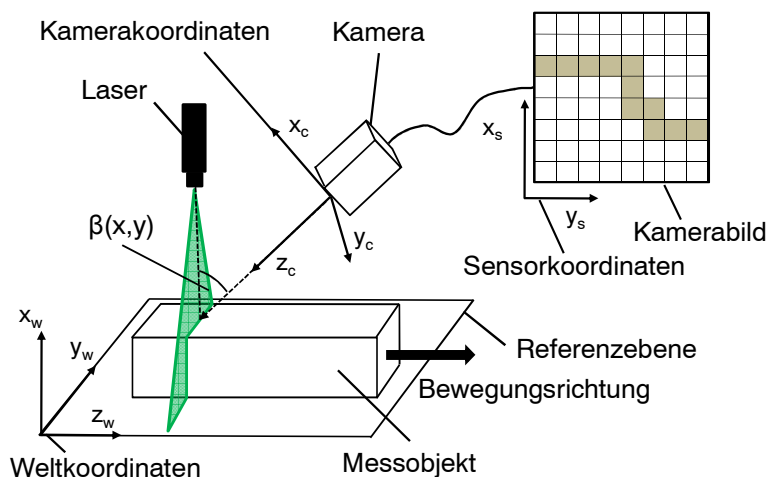


Bild 8: Messverfahren der 2-D Lasertriangulation unter dem Winkel $\beta(x, y)$

Hierbei erfolgen die Beleuchtung und die Auswertung nicht punktwise, sondern flächig und es werden erheblich größere Datenmengen pro Zeit ausgewertet. Sind die Beleuchtungsrichtung bekannt und die Oberflächen einfach gekrümmt sowie die Rauheit nicht erheblich ausgeprägt, kann aus der beobachteten Lichtstreuung (diffus) die Gestalt der Bauteiloberfläche rekonstruiert werden. Hierzu muss diese ortsfest beleuchtet und zudem aus bekannter Position hinsichtlich Winkel und Abstand beobachtet werden. Das Messobjekt kann nur in dem Teilbereich rekonstruiert werden, der von einer Lichtquelle und gleichzeitig von einem zugeordneten Beobachter erreicht werden kann. Das Messergebnis h (entspricht $\Delta h_{\text{gemessen}}$) ist nach Gleichung 2.2 zu berechnen. Dabei haben übliche Beleuchtungssektoren maximal 120° - 150° [TEUTSCH 2006]. Für die Detektion gilt allgemein in Anlehnung an Bild 7 [WECKENMANN 2009d]:

$$h = \frac{\sin \gamma}{\sin(\beta + \gamma)} \cdot \frac{l}{\cos \alpha} \quad \text{mit } \gamma = \arctan \frac{x}{f} \quad (2.2)$$

Dabei sind Winkelabweichungen bekannter und unbekannter Art direkt für die Messabweichungen verantwortlich. Stark wellige Oberflächenpassagen oder Einschnitte können zu lokalen Abschattungen führen und folglich zu nicht messbaren Bereichen. Durch Einstellung und damit verbunden Festsetzung von $\alpha = 90^\circ$ erreicht man eine Vereinfachung der trigonometrischen Zusammenhänge. Typische Beleuchtungs- und Beobachtungswinkel β liegen zwischen 30° bis 60° [STEMMER 2010]. Bei kleineren Winkeln nehmen Sichtbereich und Schärfentiefenbereich stark ab, bei großen Winkeln sinkt die effektive Auflösung (auch Kap. 4.2, Kap. 4.3 und Kap. 4.4). Die charakteristische Bauteilkontur der Exploration ergibt sich durch Rekonstruktion der beobachteten Lichtlinie [BAUER 2001b], [TSAI 1986]. Für ganzheitliche Messergebnisse müssen mehrere LSS fusioniert werden und virtuell als ein ganzheitliches Messsystem betrachtet werden. Die Ergebnisse werden dann in einem gemeinsamen Weltkoordinatensystem (z.B. dem Bauteilkoordinatensystem) zusammengeführt, auf die Längeneinheit Meter rückgeführt, visualisiert und hinsichtlich der geometrischen Merkmale auf die festgelegte Spezifikation hin bewertet [TRÄNKLER 1998], [TROSTMANN 2003].

2.2.1 Messprinzip und Messmethode

Das Lichtschnittverfahren arbeitet nach klassischen Grundsätzen der Koordinatenmesstechnik mit ortsfesten Messpunkten und darauf aufbauenden Formelementen. Das unterscheidet es wesentlich vom o.g. Schattenwurfverfahren, welches mit skalaren Zweipunktmaßen arbeitet. Für einige Anwendungen mit ruhenden Messobjekten werden ausreichend schnelle $1D$ -Ergebnisse durch punktförmige Beleuchter bzw. $1,5D$ bei bewegten Messobjekten erreicht. Für schnelle oder ganzheitliche $2D$ -Messanwendungen könnten Lichtquelle und Beobachter gleichzeitig gerichtet und in wiederholter bzw. periodischer Weise um das Messobjekt bewegt werden. Jedoch bietet sich hierbei in Zeiten preisgünstiger Linienlichtquellen zunehmend die noch schneller arbeitende, linienförmige Beleuchtung und Beobachtung an [DEMANT 2002]. Mit etwas höherem Justage- und Kalibrieraufwand können damit direkt $2D$ -Messergebnisse bei ruhenden bzw. $2,5D$ -Messergebnisse bei bewegten Messobjekten bekannter Bewegung erzielt werden (auch Kap. 4.).

Das häufig als sog. „Laserscanning“ bezeichnete Verfahren funktioniert folglich mittels einer aufprojizierten, bewegten Lichtlinie und nicht mit einem einzelnen fokussierten Lichtpunkt. Hierbei ist der begrenzte Schärfentiefenbereich der Lichtquelle zu beachten und die begrenzte Variierbarkeit des Objektabstandes, um noch ausreichend Licht auf das Messobjekt zu applizieren. Die Bewegungsgeschwindigkeit des Messobjekts sollte zumindest annähernd bekannt sein, um die o.g. $2,5D$ -Erfassung und Bauteilrückführung sicherzustellen.

len. Werden mehrere dieser Systeme konstruktiv kombiniert, eröffnen sich erweiterte Möglichkeiten zur Messung bewegter Messobjekte (mit bis zu 360° rundum). Eine dabei dennoch notwendige ortsfeste Detektion, ein gemeinsames Koordinatensystem, in welchem jede Kamera des OMS enthalten ist, sowie eine aufwendigere, mehrstufige Kalibrierung sind dann zwangsläufig zu verwenden und müssen im Rahmen einer wissenschaftlich fundierten Basis vorliegen.

Die Kalibrierunsicherheit u_{kal} stellt dabei einen maßgeblichen Kontributor für die Messunsicherheit des gesamten OMS und der Messung dar [DEBEVEC 2001]. Diese muss daher wissenschaftlich korrekt und in der Durchführung sorgfältig ausgeführt werden. Als Messunsicherheitsbeitrag zugeordnet verbleiben dabei sich kritischer auswirkende Abweichungen an den Einzelkoordinatensystemen des zu messenden Bauteils, die auftretenden Verzeichnungen der jeweils individuellen Kameralinsen und Strahlengänge, die nicht erreichbaren, völlig homogenen und parallelen, Lichtstrahlen der Beleuchter sowie wie die zwangsläufig entstehenden Lageveränderungen des Profils. All dies beeinflusst das Messergebnis direkt, wodurch hochgenaue Messergebnisse derartiger Systeme für sich genommen heute kaum erreicht werden können [WECKENMANN 2009a]. Dennoch sind Formmessungen und Längenmessungen konkaver und komplexer Profilformen möglich, wenngleich diese für die Einzelmesssysteme ohne Hinzuziehung weiterer Kenntnisse mit $100\ \mu\text{m}$ Messunsicherheit bei einem Messbereich von $100\ \text{mm}$ nur bedingt genau sind.

Zur Auswertung von Konturen mittels digitaler Verfahren werden diese typischerweise an den Kameras in Grauwerten erfasst [PROSILICA 2009]. Ein Schwellwert dient der Klassifizierung einzelner Bildpunkte, indem ein festgesetzter Grauwert als nicht zugehörig oder ab diesem Schwellwert als zugehörig interpretiert wird (Bild 9).



Bild 9: Schwellwertverfahren zur Detektion der ermittelten Lichtlinie auf dem Kamerasensor, a) Bildung des Schwerpunkts zeilenweise; b) Bildung des Schwerpunkts spaltenweise

Dieser Vorgang der Abtastung und Klassifizierung führt zu einem binärisierten Bild. Dieser Schwellwert kann theoretisch jeden beliebigen Grauwert (der im Farbraum existiert) annehmen, bei einem $8\ \text{Bit}$ Verarbeiter somit $255\ (2^8-1)$ Stufen. Ein sinnvoller Wert ist der häufig verwendete $50/50$ Schwellwert, der die gesamte Kontrastbreite in gleich viele Teile gleicher Werte pro Bereich unterteilt und dann davon gleich viele als 0 oder 1 deklariert [HECHT 2001]. Bei 255 Stufen wäre somit der Wert 128 der Umschlagpunkt von schwarz

(0-127) auf weiß (Stufe 128-255). Je nach Anwendung und Helligkeitsverteilung des Bildes werden andere Aufteilungen gewählt (z.B. 70/30 bei besonders hellen oder dunklen Umgebungslichtverhältnissen).

Die Ermittlung des Schwerpunkts in zwei Richtungen für regelmäßige Segmentabstände ermöglicht dann die Rückführung von Linien (Bild 9). Auch sind nicht nur rein statische, sondern ebenso dynamische oder sogar partiell lernfähige Schwellwertverfahren möglich, deren Erarbeitung und Verifizierung nicht ein zentraler Gegenstand dieser Arbeit sein konnte, da dies für die weiteren Untersuchungen keine oder nur untergeordnete Relevanz hat. In der vorliegenden Arbeit wurde in laborgebundenen Vorversuchen der statische 50/50 Schwellwert als meist ausreichend geeignet befunden und es sind zudem bei sich ändernden Lichtverhältnisse ggf. Modifikationen durchgeführt worden (Kap. 5.1). Diese Einstellungen werden unter zusätzlicher Anwendung von den auch in Vorversuchen positiv evaluierten Autobelichtungseinstellungen in den gesamten Untersuchungen verwendet. (auch Kap. 4. und Kap. 5.). Darüber hinaus ist die Verwendung adaptiver Filter ein weiteres Mittel um die Qualität der Binärisierung unter erschwerten Lichtverhältnissen durchzuführen. Mit dem Sub-Pixeling-Verfahren können mit dem eher weniger präzisen Lichtschnittverfahren auch emulierte Auflösungen erreicht werden, die feiner als die physikalische sind. Je nach Anwendung sind theoretisch beliebig viele Zwischenabstufungen über den Grauwert als weitere Zusatzinformation möglich.

Bei beleuchtungskritischen Aufgaben der Halbzeugindustrie werden nie mehr als *8 Bit* (256 Stufen) theoretisch und praktisch deutlich weniger (etwa 2 bis 5 Zwischenstufen sind realistisch) zwischen zwei physikalischen Bildpunkten erzielt [BAUER 2003]. Hintergrund dabei ist, dass eine Objektkante im Allgemeinen ohnehin nicht ideal scharf abgebildet wird, sondern aufgrund von Beugung und gegebenenfalls Defokussierung als stetiger Helligkeitsübergang erkannt wird, der sich über mehrere Pixel erstrecken kann. Gerade diese Unschärfe bietet die Möglichkeit, die Position der Kante durch Anwendung einer Interpolation auf Bruchteile eines Pixels (Subpixels) genau zu bestimmen, indem zwischen den Punkten interpoliert wird oder die Zwischeninformationen durch entsprechende Verfahren weiter aufgelöst werden, in Anlehnung an [LERCH 2006]. Dabei können drei verschiedene Subpixelverfahren eingesetzt werden, die unterschiedliche Vorgehensweisen zur Steigerung der Bildauflösung bereitstellen (Bild 10). Bei der Kantenerkennung in Binärbildern werden zwei benachbarte und unterschiedlich binärisierte Pixel herangezogen. Der Pixelwert 1 entspricht bereits dem abgebildeten Prüfobjekt. Nimmt man nun an, dass die Kante des Objektes nicht abrupt abgebildet worden sein kann, sondern über einen Pixel erst ansteigt, so lässt sich die Angabe der Kante im halben Subpixelbereich machen. Auf diese Weise wird die Auflösung des Bildes um das zweifache gesteigert. Es ist ersichtlich, dass hierbei kein Schwellwert anwendbar ist.

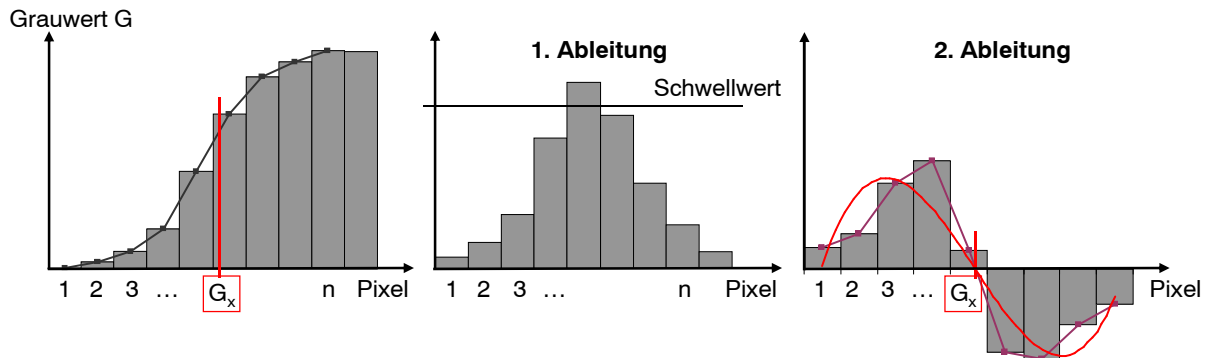


Bild 10: Sub-Pixeling-Verfahren zur interpolierten Auflösungssteigerung von Kameramesssystemen durch die Funktionierung der 1. und 2. Ableitung von angrenzenden Grauwerten über $G_x(n)$

Daher kann jeder Schwarz/Weiß-Übergang eine potentielle Kante sein, weshalb diese Methode im relativen Vergleich unzuverlässiger einzuschätzen ist. Im Sinne bester Messunsicherheit und Messstabilität ist es somit zweckmäßiger, die Kantenantastung im Grauwertbild durchzuführen. Eine allgemeine Vorgehensweise bei der relativen Kantendetektion beginnt mit der Bestimmung der ersten Ableitung des diskreten eindimensionalen Helligkeitsverlaufs. Wird im Gradientenverlauf ein definierter Schwellwert überschritten, so wird in diesem Pixelbereich eine Kante vermutet. Dafür wird zunächst die zweite Ableitung (Bild 10, rechts) gebildet. Anschließend wird die kontinuierliche Funktion der zweiten Ableitung durch Interpolation, beispielsweise durch die iterative Anwendung der kubischen Interpolation, geschätzt. Mit der Voraussetzung, dass die Wendepunkte des Linienprofils die Kanten des aufgenommenen Objekts darstellen, können deren Orte anhand der Nulldurchgänge der zweiten Ableitung ermittelt werden. Dabei ist die Nullstelle des approximierten Graphen so genau wie möglich zu bestimmen. Die Ableitung des Grauwertverlaufs wird stark vom Rauschen des Bildes beeinflusst, weshalb es beim Subpixeling nach dem Schwerpunktverfahren von Vorteil ist, dass in diesem Fall keine zweite Ableitung gebildet werden muss. Nach einer groben Vorselektierung einer Kante im Grauwertprofil über lokal adaptive Intensitätsschwellen werden die Anfangs- und Endpixeladressen sowie die Pixelanzahl n der Kante bestimmt.

Das lokaladaptive Schwellwertverhalten bewirkt, dass die Entscheidungsschwelle in Bildregionen mit geringem Hintergrundanteil bezüglich der Bildfläche erhöht wird, damit z.B. helle Störungen (Lichtreflexe) die Schwelle nicht erreichen. Umgekehrt wird in Bildregionen mit geringem Objektanteil die Schwelle gesenkt, so dass dunkle Störungen (z.B. lokale Schatten) die Schwelle nicht erreichen. Über die Anfangs- und Endpixeladressen (1 bis n) wird die erste Ableitung des Grauwertprofils ermittelt. Anschließend wird der Flächenschwerpunkt ermittelt und dessen subpixelgenaue Ortskoordinate G_x in die geometrische Kantenposition umgerechnet. Ein linearer Filter zur Minimierung des Bildrauschens steigert die Stabilität bei der Kantenfindung. Mit diesen Vorkehrungen lassen sich in der industriellen Bildverarbeitung realistische Auflösungssteigerungen um den Faktor drei bis fünf erreichen. Darüber hinaus ist das Subpixelverfahren als ein fundiertes Schätzver-

fahren einzustufen, womit sich die Anbindung an absolute Messwerte, etwa zur Bestimmung des Abstands zweier Kanten in Weltkoordinaten, als schwierig und von vielen äußeren Störfaktoren beeinflusst erweist (Bild 11 zeigt den regulären Fall).

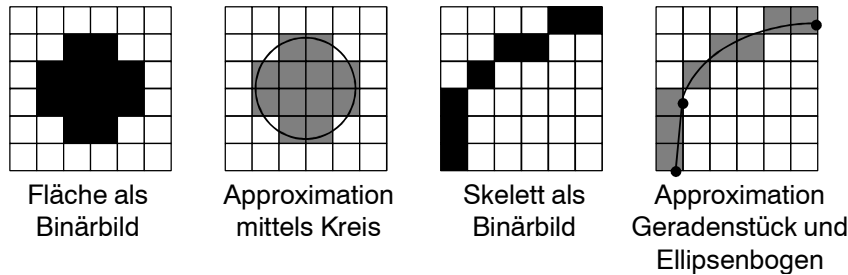


Bild 11: Beispiele zur Auswertung von Kanten mittels Interpolation des Grauwertgradienten

Zur funktionsorientierten Auswertung muss auf Basis einer Kalibrierung auch noch der Bilddatensatz in geometrische Merkmale wie Länge, Form und/oder Lage überführt werden. Hierzu werden Vektoren berechnet oder für einfachere Anwendungen nur Vergleichswerte ausgegeben. Um die Daten in-line-fähig und somit sehr schnell verarbeiten zu können, ist die Überführung in Formteilelemente „Kreis“, „Teilkreis“, „Gerade“, „Teilgerade“ notwendig, aus denen Messzonen üblicherweise häufig aufgebaut sind. Zum Auffinden der Distanz von Punkten oder Elementen bei beschriebenen Linienzügen, welche Punktepaaire der Form (x_n, y_n) beinhalten, wird im Regelfall die Hessesche Normalform verwendet. Hierbei sei $P_{x/y}$ der Punkt und $x_{1/2}$ sowie $y_{1/2}$ Punkte auf dem Formelement Gerade.

$$d_{\text{Gerade}} = \frac{[P_x \cdot (-y_2 + y_1) + P_y \cdot (x_2 - x_1) - x_1 \cdot (-y_2 + y_1) - y_1 \cdot (x_2 - x_1)]}{\sqrt{(-y_2 + y_1)^2 + (x_2 - x_1)^2}} \quad (2.3)$$

Die Distanz von Kreisen d_{Kreis} ergibt sich typischerweise aus dem Zusammenhang:

$$d_{\text{Kreis}} = \sqrt{(P_x - x_M)^2 + (P_y - y_M)^2} - r \quad (2.4)$$

Manchmal müssen Lotfußgeraden detektiert werden um klassische algorithmische Operationen durchzuführen oder Bereiche der optischen Aufnahme zu erkennen.

$$d_{\text{Lot}} = \frac{[P_x \cdot (x_2 - x_1) + P_y \cdot (y_2 - y_1) - x_1 \cdot (x_2 - x_1) - y_1 \cdot (y_2 - y_1)]}{\sqrt{(y_2 - y_1)^2 + (x_2 - x_1)^2}} \quad (2.5)$$

Wenn zu den äußersten Punkten nun die Lotfußpunkte auf die Formgerade konstruiert werden, können damit die Randpunkte bestimmt werden. Die Koordinaten der Lotfußpunkte bestimmen sich für x_L nach:

$$x_L = x_1 + \frac{P_x \cdot (x_2 - x_1) + P_y \cdot (y_2 - y_1) - x_1 \cdot (x_2 - x_1) - y_1 \cdot (y_2 - y_1)}{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \cdot (x_2 - x_1) \quad (2.6)$$

bzw. für y_L :

$$y_L = y_1 + \frac{P_x \cdot (x_2 - x_1) + P_y \cdot (y_2 - y_1) - x_1 \cdot (x_2 - x_1) - y_1 \cdot (y_2 - y_1)}{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \cdot (y_2 - y_1) \quad (2.7)$$

Häufig werden auf Basis von linearer Regression Formelemente aus x_n, y_n gebildet und auch Werte dieser Formelemente, z.B. die Steigung einer Geraden, ermittelt:

$$\begin{aligned} \sum e^2_i &= \sum (y_i - (a + b \cdot x_i))^2 = \sum (y_i - \hat{y}_i)^2 \rightarrow \min! \Rightarrow \\ \Rightarrow b_{Gerade} &= \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}; \quad \text{mit } a = \bar{y} - b \cdot \bar{x} \end{aligned} \quad (2.8)$$

Dabei ist der Regressionskoeffizient b_{Gerade} z.B. die Lösung für die Steigung der Geraden. Der Achsenabschnitt a kann dann auf Basis der klassischen Geradengleichung berechnet werden. Es sind häufig die bildverarbeitenden Komponenten, welche die Messgeschwindigkeit des eingesetzten Lichtschnittverfahrens begrenzen.

2.2.2 Erreichbare Kennwerte und Anwendungsbereiche in der Produktion

Derzeitige Systeme, die im Messbereich von 10 mm bis 100 mm nutzbar wären, arbeiten typischerweise mit Auflösungen um einstellige $\times 10^3$ Pixel [FABRIMEX 2008]. Die goldene Regel der Messtechnik besagt, dass die 5- bis 20-fache Auflösung als die tolerierbare Messunsicherheit angesetzt werden muss. Demnach unterscheiden sich zudem erforderliche Auflösung und angestrebte Messunsicherheit um den Faktor 5 bis 10 [BERNDT 1968]. Demnach sollte die Auflösung zumindest besser sein als $5 \cdot 10^3$ kleinste Teilungen, was meist mit der Strukturauflösung gemeint ist. Bei Verwendung von zweifachem Subpixeling und den Kenntnissen darüber, dass der Messbereich in 99 % aller Fälle nur zu höchstens $2/3$ ausgenutzt wird, kann eine Auflösung von $2 \cdot 10^3$ Pixel kaum noch als ausreichend gelten [BA-MESSTECHNIK 2010]. Doch selbst bei den nahe dieser Grenze auszuwertenden Datenmengen liegen die erreichbaren Wiederholraten derzeit meist bei kleiner 20 Hz [PELGRIMS 2004], [STEMMER 2010]. In Ausnahmefällen sind bis zu 1000 Hz möglich, dann mit erheblichem Mehraufwand und größerer Bauart.

Der maximale Datenstrom von den Sensoren für die Messauswertung ist prinzipbedingt begrenzt, wenngleich die zu übertragende Informationsmenge meist groß ist. Da die Auflösung des Beobachters bei einem flächigen Sensor der Quadratwurzel der Messrate indirekt proportional folgt, muss derzeit die Kameraauflösung oftmals grenzwertig gewählt werden um Messraten im zweistelligen Frequenzbereich, wie sie in der vorgestellten Applikation unablässig sind, zu ermöglichen. Selbst bei einer Messrate von 20 Hz wird bei einem mit 10 ms^{-1} bewegten Strangprofil lediglich alle $0,5 \text{ m}$ ein Messdatensatz erzeugt. Die Messunsicherheiten sinken dabei häufig nicht direkt proportional zur Auflösungssteigerung, da eine Vielzahl von Einflüssen durchgehend bestehen. Derzeit sind ca. $200 \mu\text{m}$ Messunsicherheit bei Messbereichen bis 100 mm erreichbar

[HOFFMANN 2007], [SCHUSTER 2008]. Dennoch werden heute die Lichtschnittsensoren nach dem Scanningverfahren bereits in vielfältigen in-line Anwendungen eingesetzt, z.B. in der Kfz-Reifenkontrolle [BAUER 2007].

Die Lageveränderungen des Messobjekts und die sonstigen Einflüsse in kontinuierlichen Fertigungsverfahren bringen maßgebliche Defizite mit sich, da das Messsystem in einem ortsfesten Weltkoordinatensystem (WKS) auswertet (Bild 12). Es ändern sich dann jedoch die räumlichen Gegebenheiten bezüglich der Winkel und Abstände, welche die Basis der Rückführung in das WKS auf Grundlage vorausgegangener Kalibrierung sind. Ein einzelnes Messsystem kann lediglich ca. 150° Umfangswinkel der Bauteilkontur erfassen, theoretisch maximal bis 180° mit dann sehr ungünstigen Beleuchtungsverhältnissen in den Randbereichen (Bild 60).

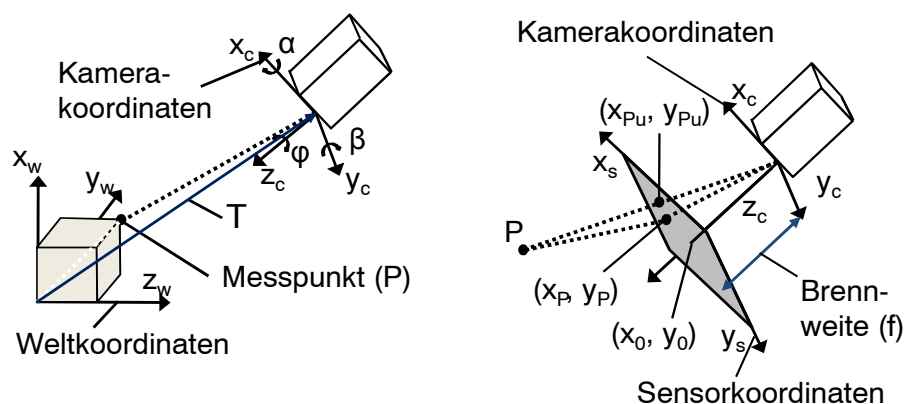


Bild 12: Transformation von ortsfesten Kamera- in Weltkoordinaten beim Lichtschnittverfahren

Daher müssen für vollständige Umfangsmessungen mehrere Messsysteme eingesetzt und deren Messergebnisse fusioniert werden. Die Kalibrierung dauert im Vergleich zum Schattenwurfverfahren relativ lang, da Koordinatensysteme definiert, zueinander ausgerichtet und zusammengeführt werden müssen. Die Auswertung der Messergebnisse ist rechenintensiv und bezüglich diverser Randbedingungen wie Winkel- und Abstandskonstanz nicht ohne strukturierte Berechnungsmethoden durchführbar. Multi-Sensor-Lichtschnittverfahren werden daher zunehmend, wenngleich immer noch vergleichsweise selten, in der industriellen Messtechnik verwendet [PFEIFER 2007].

Häufig wird die benötigte Messunsicherheit jedoch direkt mit der Vorgabetoleranz gleichgesetzt [HESSE 2004], was methodologisch nicht korrekt ist und die Fähigkeit des Prozesses überbewertet. Im OMS muss die Auflösung der verwendeten Sensoren deutlich besser sein als die zu erreichende Messunsicherheit von $0,1 \text{ mm}$ bei einem vorzuhaltenden Messbereich von 10 mm bis 100 mm . Daher sind 2 Megapixel (MP) für eine Auflösung von $50 \mu\text{m}$ anzustreben, wenn möglich ist, dass bei voll binärisierten digitalen Kamerabildern ein Subpixeling von Faktor 2 innerhalb der Messung immer möglich und damit vollständig rückführbar ist. Mit noch vertretbarem Rechenaufwand sind Interpolationsfaktoren bis ca. 5 funktionsfähig [ABMAYR 2001].

Bei lichtkritischen Umgebungsbedingungen, durch Eigenleuchten der Messobjekte und unregelmäßigem Fremdlicht sowie häufigen Verschmutzungen sind erweiterte Subpixelingverfahren nicht ratsam [HECHT 2001]. Aus Gründen der gleichzeitig selten auftretenden Maßverkörperungen in diesen Applikationen über 100 mm und den ebenso geforderten hohen Bildwiederholraten, werden für die Evaluation rauer in-line Messverfahren Kameras mit einer Breitenauflösung von 1 bis 5 Megapixel verwendet und auf Subpixeling größer Faktor 2 verzichtet [PROSILICA 2009]. Die Möglichkeit im OMS besteht, erhöhtes Subpixeling und weitere Methoden zur Bildaufbereitung zu verwenden oder nachträglich einzusetzen.

In die Ausprägungsrichtung der Höhe (nicht lateral) sind lediglich effektive Verkörperungen von maximal 40 mm zu erwarten (entspricht der Auswanderung der Linienverzerrung bei üblichen Einstellungen und Beleuchtungswinkeln). Daher reichen für die o.g. physikalische Auflösung von $40\text{ }\mu\text{m}$ rund 2 Megapixel aus [STEMMER 2010].

2.3 Offline Messverfahren mit zusätzlichem Handling

In der Fertigung werden wegen der Erschwernisse o.g. Messverfahren zwangsläufig auch Offline-Messsysteme eingesetzt unter Inkaufnahme erheblicher anderer Nachteile, welche nachstehend ebenfalls genannt werden. Stationäre Kamerasysteme sind in diversen Bauarten marktüblich, (Bild 13 bis Bild 15), [SCHUMANN 1998], [SCHWIEDER 2006].

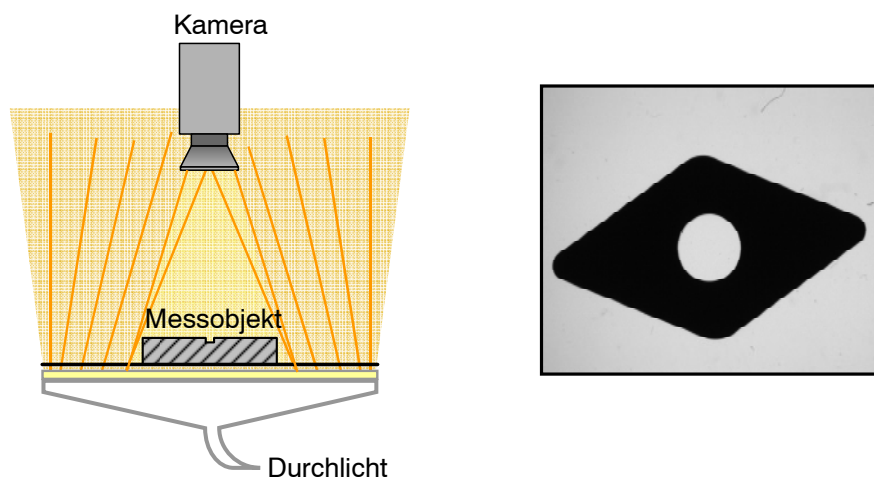


Bild 13: Durchlichtverfahren zur Konturbestimmung, rechts: Beispiel Wendeschneidplatte

Kamerasysteme ohne gerichtete Beleuchtung werden häufig derart eingesetzt, indem nach der eigentlichen Fertigung die Messobjekte aus der Fertigungslinie herausgenommen und mit einem zusätzlichen Handling ruhend vor diese Beobachtungssysteme gebracht werden. Dabei kann für die messtechnische Untersuchung eines Querschnitts nur die Stelle herangezogen werden, an der das Messobjekt vom Strang abgetrennt wurde (meist sägend). Dennoch wird dieses Verfahren noch recht häufig in Stichproben kleiner Losgrößen angewendet, um die Robustheit des

Prozesses und die Maßhaltigkeit der Teile zu beurteilen (Kap. 3.1.2). Die Beleuchtung erfolgt dabei anwendungsorientiert mit Durchlicht, Auflicht, *LED*-Ringlicht oder sogar mit indirekten Beleuchtungslösungen [BLANC 2001]. Es werden eine Reihe von Bauformen mit unterschiedlichen Kameratechnologien wie *CCD* und *CMOS*-Chipsätzen sowie verschiedenen Objektive (u.a. Mikrolinsen zur weiteren Lichtführung auf den Mikrochip), eingesetzt, woraus Vor- und Nachteile, z.B. der erreichbaren Lichtstärke und der Linsenverzeichnung, ableitbar sind [ENGEL 2006]. Die Bauteilquerschnitte der Messobjekte werden häufig mittels telezentrischer, seltener mittels entozentrischer Objektive beobachtet und mit einer Referenzkontur verglichen, was selten metrologische Ergebnisse, sondern meist nur diskrete Prüfaussagen der Form „in Ordnung (i. O.)“, „nicht in Ordnung (n. i. O.)“ erlaubt. Beim Durchlichtverfahren wird auf der Gegenseite zum Messobjekt ausgewertet und die Kontur abgewandt der Beleuchtung bestimmt (Bild 13). Da zumindest bei telezentrischen oder kalibrierten Messsystemen kaum Verzerrungs- oder Vergrößerungsfaktoren zu berücksichtigen sind (unter 0,01 %) und auch keine Koordinatentransformation stattfindet, ist die Methode in der Industrie verbreitet, gilt als robust und relativ schnell [DOBMANN 2005]. Die Beleuchtung findet gerichtet statt, sodass lediglich die reflektierten Anteile ausgewertet werden. Der Vorteil ist die Strukturtiefe der Oberfläche, allerdings kann die Außenkontur des Messobjekts nicht mit sonderlich geringen Messabweichungen bestimmt werden. Sie muss durch Fokusvariation manuell, teil- oder vollautomatisch nachjustiert werden (Bild 14).

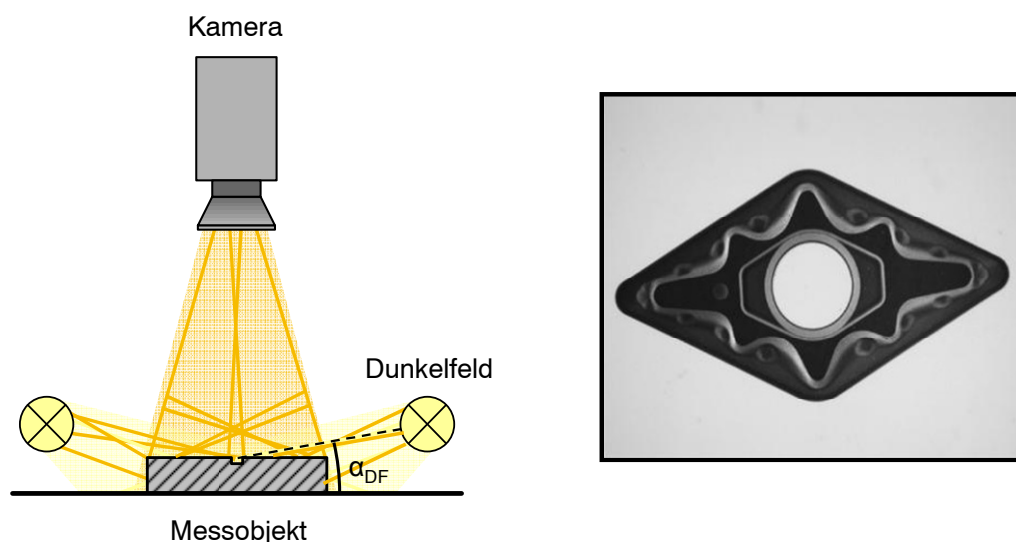


Bild 14: Dunkelfeldbeleuchtung mit Kamerasystem, rechts: Beispiel Wendeschneidplatte

Bei der klassischen Ringlichtbeleuchtung sitzt im Gegensatz zur Dunkelfeldbeleuchtung die Lichtquelle hinter der Austrittsöffnung der Kameralinse. Somit wird der Auftreffwinkel wesentlich steiler und die Strukturtiefe maximal. Der Kontrast zur Auffindung der Konturaußenkante wird schwächer (Bild 15). Beim indirekten Gegenlicht wird über eine zusätzliche Strahlführung die Beleuchtung mit der Beobachtung strahlgerichtet und hinsichtlich einer telezentrischen Wirkung vereint.

Die gerichtete Auflichtbeleuchtung besitzt einen Schwerpunkt in ihrer Abstrahlcharakteristik, wobei diese sehr verschieden sein kann (kugel- bis keulenförmig). Stärker als bei der diffusen Beleuchtung machen sich schon geringe Abweichungen der Lichteinfallrichtung oder des -winkels – z.B. durch das Vorhandensein einer Vorzugsrichtung – in den Abbildungseigenschaften bemerkbar, indem Helligkeit und Kontrast variieren [BAUER 2001a]. Mit Hilfe der gerichteten Beleuchtung lassen sich Kanten und Oberflächenstrukturen von vorzugsweise matten Profilen durch die ausgeprägte Schattenbildung gezielt hervorheben, was in der Strangprofilfertigung meist jedoch nicht sinnvoll ist, da hier nur die wesentlichen Längen- und Formmerkmale und keine Oberflächenkennwerte ausgewertet werden. Zudem ist eine bewusste Übersteuerung der Abbildung zur lichttechnischen a priori Bildverarbeitung realisierbar, wodurch Rechnerkapazitäten eingespart werden können.

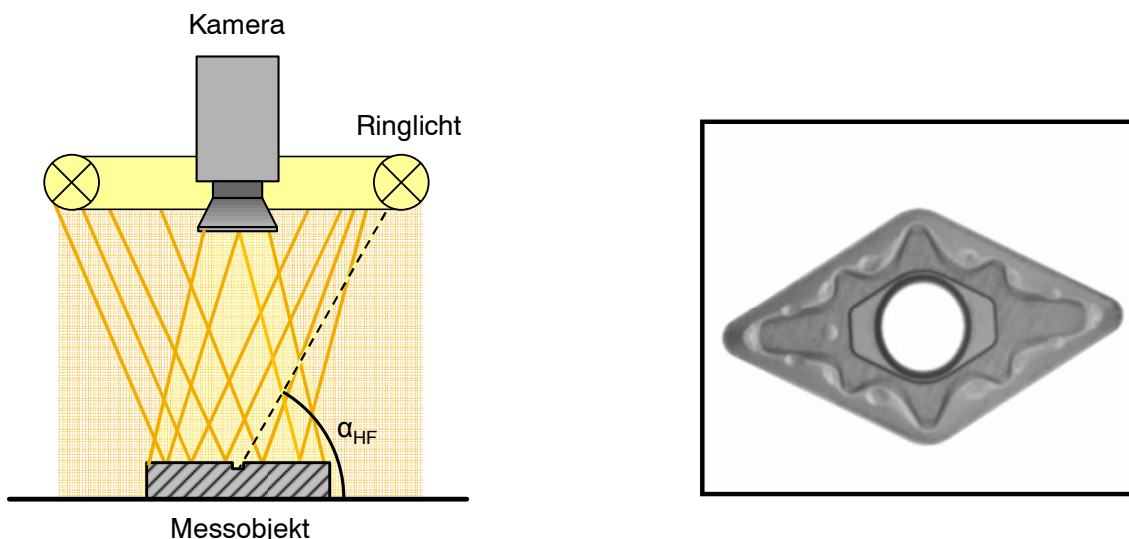


Bild 15: Ringlichtbeleuchtung mit Kamerasystem, rechts: Beispiel Wendeschneidplatte

Eine besondere Form des Auflichts stellt die koaxiale Beleuchtung dar. Ein Strahlteiler (halbdurchlässiger Spiegel) vor dem Objektiv lenkt einen Teil des Lichts von der telezentrischen Beleuchtungseinheit auf das Objekt und dann auf die Kamera. Das von dort reflektierte Licht wird auf die Kameralinse gelenkt. Das koaxiale Auflicht entspricht einer Hellfeld-Auflichtbeleuchtung, der halbdurchlässige Spiegel fungiert zudem als Polarisationsfilter. Basierend auf dem polarisationsoptischen Wirkungsprinzip erfolgt die gleichmäßige Ausleuchtung stark reflektierender Oberflächen ohne Schatten. Wesentlicher Nachteil der koaxialen Beleuchtung ist der erhebliche Lichtverlust, da nur ein geringer Anteil der ausgestrahlten Lichtintensität tatsächlich zur Kamera gelangt. Beim ersten Lichtdurchgang (Beleuchtung auf das Messobjekt) werden am Strahlteiler nur ca. 50 % der Beleuchtungsintensität zum Objekt abgelenkt. Der zweite Lichtdurchgang (Reflexion der Bauteilumrisse in das Objektiv) lässt ebenfalls etwa nur 50 % des Lichts durch. Letztlich erreichen maximal 25 % der Ausgangsintensität die Kamera, was in lichtkritischen Anwendungen wie der Strangprofilfertigung häufig nicht ausreichend ist (Auswahl von Off-

line-Verfahren für Fertigungsanwendungen, Bild 16). Die klassischen Profilprojektoren verlangen eine abweichungsbehaftete Aufspannung in Winkel und Abstand und lassen nur zeitintensive Auswertungen an kaum reproduzierbaren Messstellen zu. Dabei helfen Schablonen und telezentrische Optiken, die Einflussgrößen zu minimieren und die Messergebnisse vergleichbar zu machen.

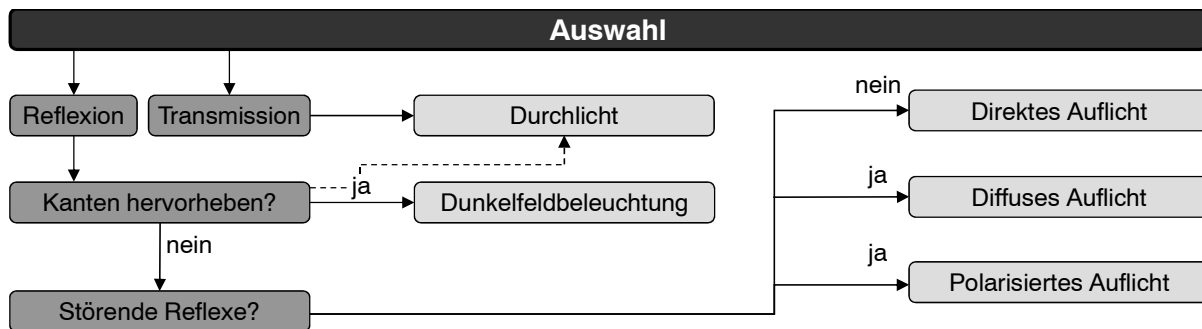


Bild 16: Auswahl und Eignung optischer Offline-Messverfahren [SCHUHMANN 1998]

Ein entscheidender Nachteil ist allen o.g. Offline-Methoden gemein: Die Messung erfolgt nach Aussteuerung der Profile aus dem eigentlichen Kernprozess und ist damit im Regelfall zeit-, prozess- und platzkritisch. Außerdem können nur lokale Profilzonen betrachtet werden, was nicht im Sinne der 100 %-Prüfung und der lückenlosen Nachweispflicht gegenüber Endkunden gemäß heute üblichen Qualitätsmanagementsystemen ist. Werden die Messobjekte von Hand gemessen, werden diese dann noch in Wasser abgeschreckt, was zu Verzug und Gefügeveränderungen am Messobjekt führt und die Vergleichbarkeit der Ergebnisse mindert. Ein konkretes Verfahren im Feld ist, bei jedem Pressvorgang oder in spezifizierten Losgrößen, ein Endstück aus der Linie herauszunehmen, welches nach Abkühlung mittels Messschieber erfasst wird [KEFERSTEIN 2008].

Auch hierbei wird nur ein skalares Längenmaß einer nicht reproduzierbaren Messstelle erfasst, mit allen metrologisch bekannten Nachteilen des handgeführten Messschiebers wie: Bedienerinfluss, Verkippung (Abbesches Komparatorprinzip), Ablesabweichungen, Bedienerinfluss, Temperaturabhängigkeit der Dimension und Skalenabweichungen [PFEIFER 1998]. Das Messen von konkaven Profilzonen, Radien oder Teilsegmenten des Querschnitts ist hierbei ebenfalls messprinzipbedingt nicht möglich. Die Ergebnisse des Messschiebers sind nur sehr begrenzt aussagekräftig [TRÄNKLER 1998]. Folglich ist eine Prozessregelung zur vollständigen technischen Rückverfolgbarkeit bei Produktmängeln bzw. dimensionellen Abweichungen von der geometrischen Produktspezifikation wirtschaftlich oftmals notwendig [DIN EN ISO 14253-1]. Die Auswertung erfolgt bei Profilprojektoren und anderen Offline-Kameramesssystemen häufig mit Messsoftware, wobei teilautomatisch am ruhenden Messobjekt gemessen wird, bzw. an Randstücken, welche für diese Zwecke vorher abgetrennt wurden. Eine holistische Konformitätsprüfung ist so unmöglich, bzw. nur in weiten Grenzen anhand von Erfahrungswissen und empirisch durchführbar (Auswerteoberfläche beispielhaft in Bild 17).

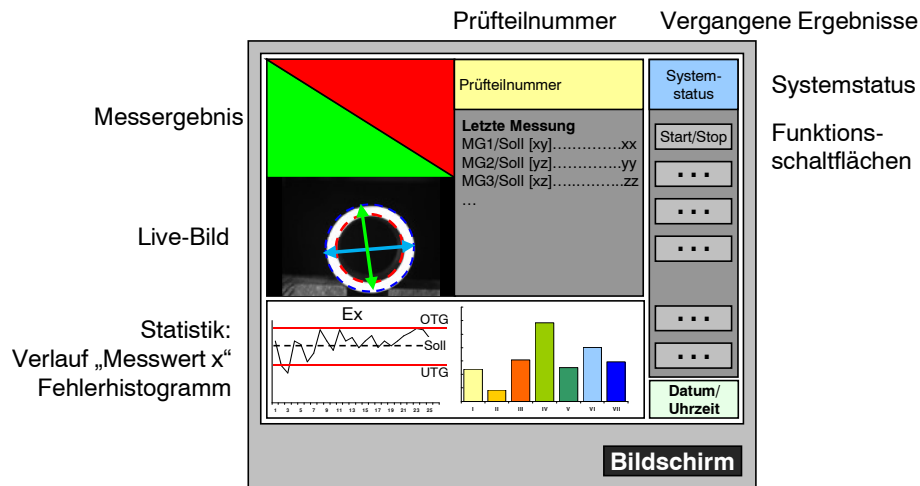


Bild 17: Auswertung stationärer Kameramesssysteme für die Halbzeugfertigung, MG: Messgerät

Alle Offline-Messverfahren müssen zwangsläufig in der Aussteuerzone an erkalteten Messobjekten angewendet werden. Sie sind technisch sowohl hinsichtlich der erfolgten Gefüge- und Gestaltveränderung (mit der Temperaturänderung) als auch bezüglich der Vergleichbarkeit mehrerer Messungen zweifelhaft, da z.B. der Bedienerinfluss groß ist. In der Regel belaufen sich die Gesamtkosten eines optischen Offline-Messplatzes trotz aller Nachteile auf sechsstelligen Eurobeträge [FABRIMEX 2008], [DIETRICH 1998], [DGZFP 2007]. Zudem sind die o.g. zusätzlichen Zeitaufwendungen langfristig kostenintensiv. Profilprojektoren und deren Ergebnisse sind von den verwendeten Schablonen und der Aufspannung abhängig, die Messzeit ist groß. Die Messung mittels Handmesszeugen ist aus wirtschaftlicher sowie technischer Sicht künftig nicht mehr wettbewerbsfähig. Die üblichen Strangpresslängen, z.B. von Messingstangen, betragen oftmals *15 m* bis *80 m* pro Pressung. Dabei fällt das Reststück von ca. *200 mm* Länge immer als Ausschuss an.

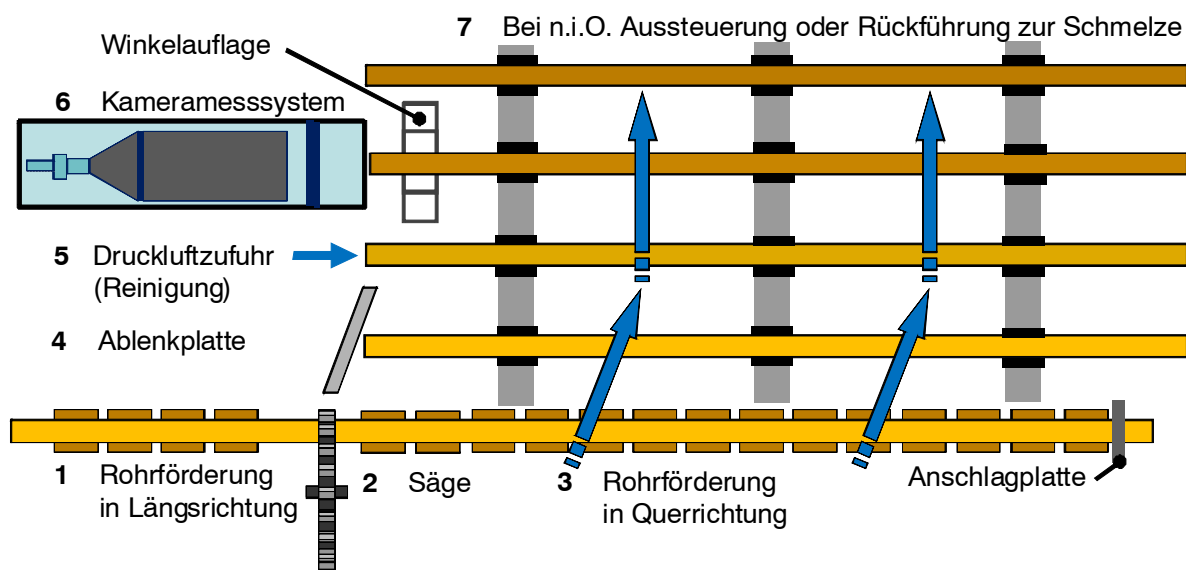


Bild 18: Positionierung eines Offline-Kameramesssystems (Bild 13 bis Bild 15) im Materialfluss der Halbzeugherstellung, in sieben Schritten; Hier: stranggepresste Rohre aus Messinglegierungen

Daher fallen bei diesem Vorgehen bereits standardmäßig 0,25 % bis 1,3 % nachzuarbeitender Ausschuss bezogen auf die Pressmenge an. Dieser muss durch Rückführung zum Einschmelzprozess im Soll kalkuliert werden, was einen Kostenfaktor darstellt. Eine Profilpositionierung mit dem Vorgang des Ein- und Ausschleusens der Messobjekte ist in Bild 18 dargestellt. Dabei werden die Halbzeuge (hier: Rohre) angesteuert, abgesägt, quergefördert und dann ruhend gemessen. Dazu ist eine Winkelaufklage für die Ausrichtung der Messobjekte zur Kameraachse notwendig [FITZGIBBON 1998]. Dieser Vorgang beeinflusst die Qualität der Messung erheblich. Nach dem Messvorgang werden die Teile wieder eingesteuert und dem weiteren Herstellungsprozess der Halbzeugfertigung zugeführt. Der bauliche, räumliche und logistische Aufwand ist beträchtlich und somit sowohl einmalig wie auch teilweise kontinuierlich, z.B. in Form von Instandhaltungsarbeiten, vorhanden [REUTER 2008]. Die Messung kann durch prinzipbedingt auftretenden Schmutz, Sägegrat, anfallende Messingspäne und multi-frequente Schwingungen unterschiedlicher Amplitude in großem Maße negativ beeinflusst werden.

2.4 Defizite der beschriebenen Systeme

Die beschriebenen Messverfahren haben singular eingesetzt erhebliche technische Nachteile, die zu teils mangelhaften Messergebnissen führen. Die Kostenvorteile in der Anschaffung sind im Rahmen wirtschaftlicher Kalkulationen selten der Grund, sofern die Fehlerkosten berücksichtigt werden. Gesamtprojekte zur Bildverarbeitung enthalten zudem nicht systemgebundene Anteile, die oft weitaus höher liegen, sodass das vermeintlich „teure“ angewandte Messverfahren nur eine untergeordnete Kostenquelle darstellt (Bild 19), [SCHWARZKOPF 2008].

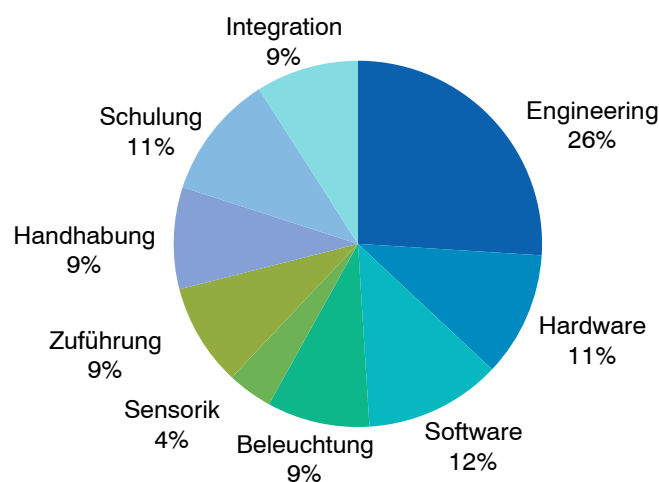


Bild 19: Kostenverteilung zu Projekten der optischen Fertigungsmesstechnik [BAUER 2001a]

Dies verhindert die weitere Verbesserung der Produktqualität und widerspricht den Forderungen präventiver Qualitätssicherungssysteme im Rahmen des modernen Qualitätsmanagements. Kein einzelnes, derzeit auf dem Markt befindliches Messsystem kann alle benötigten Anforderungen erfüllen, die heutzutage in der Strangprofilfertigung

gestellt werden, um im Prozess präzise Produkte bei ausreichender Produktionsgeschwindigkeit ohne zeitlichen Verzug auf deren geometrische Gestalt zu prüfen [WECKENMANN 2009b]. Das Lichtschnittverfahren (auch die Variante für 2,5D) sowie das Schattenwurfverfahren (auch mit mehreren stehenden oder periodisch bewegten Sensorköpfen) sind heutzutage singulär nicht in der Lage, die Anforderungen der Fertigungsindustrie nach Datendichte und Messunsicherheit gleichzeitig zu erfüllen [DIEHL 2010]. Die möglichst kurze Kalibrierzeit, einfache Bedienung und niedrige Gesamtkosten sind für Messsysteme grundsätzlich immer anzustreben [DEPPE 2001]. Um 360° Rundum-Messungen zu ermöglichen, reicht ein singuläres LSS nicht aus.

Ein zusammengefasster Vergleich von Lichtschnitt-, Schattenwurf- und Offline-Messverfahren ist in Tabelle 1 dargestellt. Trotz des erheblichen Aufwandes nimmt die Integration von optischen Messsystemen im Normalfall nur einen Anteil kleiner 10 % der Gesamtkosten ein. Daher sollte für ein zukunftsweisendes, neuartiges Fertigungsmessverfahren ein in-line Messverfahren zu bevorzugen sein (Bild 19), [BAUER 2001a]. Demnach muss die Messung am warmen Messobjekt mit weitgehend beliebigen und konkaven Querschnittsformen direkt durchführbar und anhand der Profilspezifikationen zur Konformitätsprüfung verwendbar sein. Die Zahl der fusionierten Einzelmesssysteme begrenzt derzeit die damit überproportional steigende Rechenzeit, Beherrschbarkeit der Justierung und Kalibrierung, notwendige Rüstzeit bei Profiltyp- oder Profilgrößenwechsel und die erforderliche Robustheit der ausschließlich spezifisch bereitzustellenden Softwarelösungen [WECKENMANN 2009d].

Tabelle 1: Vergleich der Spezifikationen von singulärem Schattenwurf- und Lichtschnittverfahren, exemplarische Angaben für einen großen Teil derzeit verfügbarer singulärer Messsysteme

	Schattenwurfverfahren	Lichtschnittverfahren
Dimension des Messergebnisses	1 Dimensional (Abstand zweier Punkte)	2 Dimensional (lateral und vertikal)
Messbereich	von 1 bis 450 mm	Länge x Höhe 13 mm x 13 mm bis 250 mm x 165 mm
Auflösung bezogen auf den Messbereich	ca. 10^{-4} 0,1 bis ca. 10 μm	ca. 10^{-3} 10 bis ca. 150 μm
erreichbare Messunsicherheit (abhängig vom Messbereich)	von 1 bis 30 μm (1 bis 450 mm)	von 10 bis 100 μm (13 x 13 bis 250 x 165 mm)
Messrate	typ. 500 Hz	von 25 bis 100 Hz
Einfluss von Lageveränderungen auf das Messergebnis	nein	ja
geeignet für konkave Profile	nein: weil nur ein Zweipunktabstand ermittelt wird	ja: weil der gesamte erfasste Profilschnitt ausgewertet werden kann

3 Zielsetzung und wissenschaftlicher Ansatz

Ziel der vorliegenden wissenschaftlichen Arbeit ist es, ein gesichertes Konzept für den Aufbau eines optischen Multi-Sensor-Messsystems (OMS) bereitzustellen, bestehend aus einem SWS und mehreren LSS, sowie einem geeigneten Auswerteverfahren zur in-line Erfassung von konkaven Halbzeugen. Dies umfasst auch ein mechanisches Aufbau- und Einstellverfahren, ein individuelles Kalibrierverfahren sowie eine konzeptionell erarbeitete Softwareunterstützung für die methodische Analyse und funktionsorientierte Bewertung der Messergebnisse. Eine Anbindung an den Herstellprozess für Zwecke der Prozessregelung sollte heute möglichst immer optional gegeben sein. Messergebnisse sind Informationen, welche ohne Kenntnisse über deren Zustandekommen und deren Unsicherheit wertlos sind [WECKENMANN 2009f]. Daher muss eine Messunsicherheitsanalyse an häufig gefertigten Profiltypen (Rundprofil, Kantprofil), durchgeführt sowie weitere fundierte messtechnische Eigenschaften untersucht und Ergebnisse zum Abweichungsverhalten des Verfahrens bei konkaven Profilformen erarbeitet werden.

3.1 Anforderungen an ein verbessertes Messverfahren für die dimensionelle Fertigungsmesstechnik bei kontinuierlichen Herstellverfahren

Ein wesentlicher Aspekt für ein verbessertes optisches Messverfahren ist die nachweisbare Kombination der messtechnischen Vorteile gegenüber den bisherigen und singulären Verfahren. Das neue optische Multi-Sensor-Messverfahren, bestehend aus Schattenwurf- und Lichtschnittverfahren, muss nachweislich zur Verbesserung der Produktqualität bei der Herstellung von Strangprofilen geeignet sein (Bild 20).

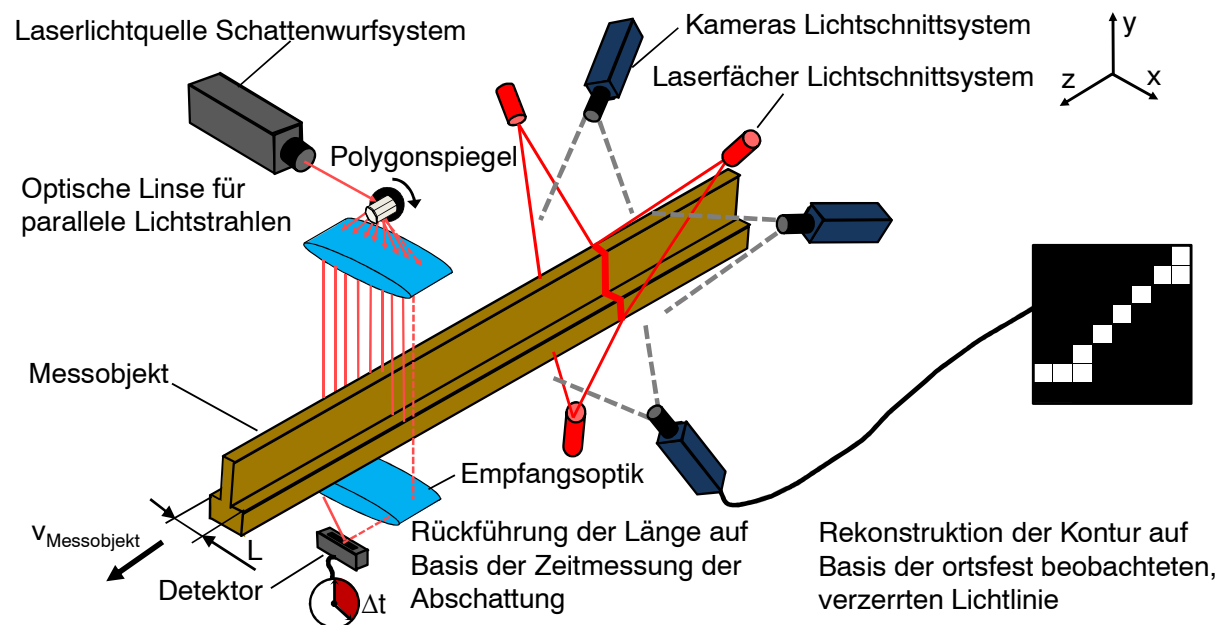


Bild 20: Vereinfachtes Messprinzip des zu erforschenden OMS mit den beiden Messebenen

Derzeit noch nicht verfügbare optische Multi-Sensor-Messsysteme wären in der Lage, Strangprofile oder ähnliche, kontinuierlich hergestellte Produkte genau und gleichzeitig ganzheitlich zu messen. Zudem besteht dabei die Möglichkeit der in-line Fähigkeit [BOSCH 2004], [WECKENMANN 2009c]. Ein neuartiges optisches Multi-Sensor-Messverfahren muss idealerweise in-line fähig sein und nach Kap. 2.1 und Kap. 2.2 ein multiples Lichtschnitt- sowie mindestens ein singuläres Schattenwurfsystem auswerteseitig konstruktiv verbinden um 360° -Rundummessungen zu leisten, bei Messunsicherheiten besser $100\ \mu\text{m}$ in Messbereichen von $10\ \text{mm}$ bis $100\ \text{mm}$. Daher muss ein OMS aus mindestens drei LSS und einem SWS aufgebaut werden um holistische Ergebnisse zu leisten, die den Mehrwert aus beiden singulären bisherigen Systemen kombinieren. Die Ergebnisse müssen auch auf andere in-line Messobjekte und eine andere Sensorauswahl weitgehend übertragbar sein. Die Messergebnisse müssen in einer Form vorliegen, dass sie für weitere Prozessregelaufgaben verwendet werden können. Die Messzeit muss mit maximal rund $50\ \text{ms}$ pro Bild sehr kurz sein und die Messrate mindestens $20\ \text{Hz}$ betragen, was eine Kundenanforderung der Branche zur Qualitätsüberwachung darstellt.

Die o.g. Verfahrenskomponenten müssen zusammenarbeiten und durch Kombination zu verbesserten sowie erweiterten Messergebnissen hinsichtlich Messunsicherheit und Datendichte führen. Das Messverfahren muss zum Einen prototypisch im Laboratorium unter vordefinierten Randbedingungen qualifiziert werden und zum Anderen auch in der realen Fertigung zeigen, dass es robust, präzise und gleichzeitig prozessneutral arbeitet und somit weit besser mehr Potenzial bereitstellt als bisherige Messverfahren. Das prototypische optische Multi-Sensor-Messverfahren setzt sich serienkalkuliert kostenmäßig im Schwerpunkt aus Sensor- und Softwarekosten zusammen (ca. $50\ % - 80\ %$ der Gesamtkosten). Eine zugehörige Bedienersoftware sollte idealerweise die gesamte Visualisierung, die Messdatenauswertung und die Konformitätsbewertung unterstützen und a priori sowie a posteriori begleiten, eine Anbindung an den Herstellprozess ermöglichen und robust sein (Kap. 4.6.), [BAUER 2003]. Das ist heutzutage nicht möglich und daher auch nicht auf dem Markt käuflich zu erwerben. Ein ähnliches Messverfahren zur beschriebenen Datenfusion mehrerer gleicher und gleichzeitig ebenfalls unterschiedlicher optischer Messverfahren und der Messdaten ist in der in-line Metrologie derzeit nicht bekannt.

3.1.1 Allgemeine messtechnische Anforderungen

Zu den messtechnischen Anforderungen gehört u.a. eine anwendungsorientierte Datendichte von Informationen zur Konformitätsprüfung von Profiltypen (Bild 21). Hinzu kommt eine aufgabengerecht große Messgeschwindigkeit bei gleichzeitig geringer Messunsicherheit von weniger als $100\ \mu\text{m}$ für Messbereiche bis $100\ \text{mm}$ Profilquerschnitt. Die mit einem dafür zu konzipierenden Prototypen erzielten Messergebnisse müssen

nachweisbare Aussagen zu den Anforderungen an die Lichtquellen und Sensoren, die Anordnung der Lichtquellen und Sensoren, zur erreichbaren Messunsicherheit und Messrate sowie zur erforderlichen zeitlichen Synchronisation der Subsysteme beinhalten [WECKENMANN 2009a]. Die Messung muss den gemäß Kundenanforderungen für typische Profilgeschwindigkeiten von 10 m/s mit mindestens 20 Hz Wiederholrate operieren, was bei der vorgestellten Bewegungsgeschwindigkeit der Messobjekte einem Messergebnis alle $0,5 \text{ m}$ in z-Richtung (Ausbringungsrichtung) entspricht. Es sollte grundsätzlich möglich sein, die Messrate zu einem späteren Zeitpunkt auch noch zu erhöhen. Dies stellt die Mindestanforderungen für Prüfaussagen in modernen Fertigungsstraßen dar [DIEHL 2010]. Darüber hinaus sind mehrere Teilsysteme als echte Koordinatenmesssysteme und mindestens ein SWS für die konstruktiv erzielbare, geringe Messunsicherheit in Kombination zu verwenden.

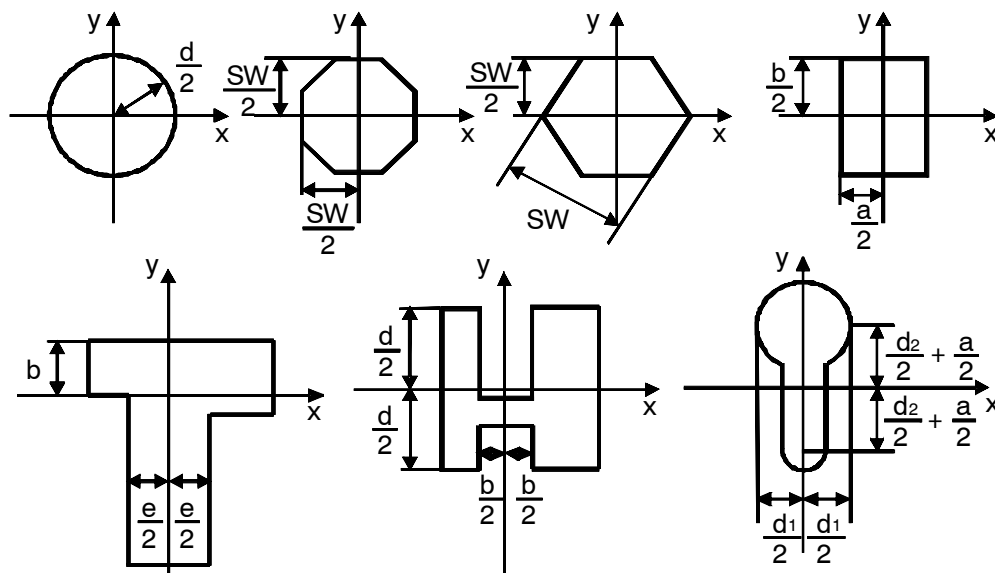


Bild 21: Häufig produzierte Profilformen und deren wesentliche geometrische Merkmale (vereinfacht): Rund-, Achteck-, Sechseck-, Viereck-, T-, H-, Schlossprofil (SW: Abk. für die Schlüsselweite); einige Profilquerschnitte können auch nichtsymmetrisch aufgebaut sein

Die Messung von konkaven Strangprofilen und deren Sonderbauformen (Schlüsselprofil, Mehrkantprofil, H-Profil, asymmetrische Profilformen) muss prinzipiell sichergestellt sein. Die Profilmessung von 360° rundum ist ein wesentlicher Bestandteil zur Qualitätssicherung des gesamten Fertigungsprozesses und zur Erfüllung der steigenden Kundenanforderungen. Die Analyse von Profildurchmesser, Teillängen (z.B. das Schenkelmaß beim L-Profil), der Parallelität von Profilflanken sowie der Rechtwinkligkeit muss bereitgestellt sein (Bild 21). Die Geradheit und einzelne Konturradien sind zum heutigen Zeitpunkt für die meisten Kunden sekundär relevant, jedoch in naher Zukunft möglicherweise zunehmend von Bedeutung und sollten prinzipiell mit auswertbar sein [BA-MESSTECHNIK 2010].

3.1.2 Prozessbedingte Eigenschaften der Messobjekte

Die Profilttemperaturen liegen im Herstellprozess z.B. bei Messingstrangprofilen im Bereich von $680\text{ }^{\circ}\text{C}$ bis zu $840\text{ }^{\circ}\text{C}$ [DIEHL 2010], [BAUER 2001a] und damit knapp unter dem Schmelzpunkt des Werkstoffs. Je nach Legierungszusammensetzung variieren sie bei Messing um bis zu $\pm 80\text{ }^{\circ}\text{C}$. Die teils im Minutentakt wechselnden Profilgrößen und Profiltypen (mehr als 100 Varianten sind möglich) erschweren diese Bedingungen zusätzlich. Die zu messenden Profilgrößen liegen im Messbereich von 10 mm bis 100 mm , wobei Rundprofile den größten Umfang einnehmen, bei denen während der Umformung in der Umformzone vereinfacht für das Pressverhältnis V und den Eintritts-/Austrittsquerschnitt gilt [BEITZ 2001], [BAUSER 2001]:

$$V = \frac{A_0}{A_s} = \frac{\frac{\pi \cdot D_0^2}{4}}{\frac{\pi \cdot D_s^2}{4}} = \frac{D_0^2}{D_s^2} \quad (3.1)$$

Die gemäß dem Umformverhältnis und der Kontinuitätsgleichung (Gleichung 3.1) errechneten Austrittsgeschwindigkeiten aus Matrizengröße zu Barrenvolumen, liegen meist zwischen 1 ms^{-1} und 10 ms^{-1} . In Sonderanwendungen wie dem Drahtziehen werden sogar Profilgeschwindigkeiten bis zu 100 m/s erreicht [BAUSER 2001]. Die je nach Legierungszusammensetzung wechselnde Werkstoffzusammensetzung (z.B. bei Messing: bleihaltig, bleifrei, unterschiedlicher Kupfergehalt usw.) führen zu unterschiedlichen Absorptions-, Reflexions und Emissionskoeffizienten in Abhängigkeit der Wellenlänge des auftreffenden Lichts. Auch das darf das geeignete Messverfahren nicht signifikant negativ beeinflussen. Teilweise bewegen sich die Messobjekte auch seitlich im ganzen Strang mit wenigen mm , dabei meistens periodisch und weitgehend harmonisch [DIEHL 2010]. Diese lateralen Profilbewegungen von mehreren Millimetern sind maßgebliche Randbedingungen, bei denen die einwandfreie technische Funktion des Messverfahrens in der realen Fertigungsumgebung gewährleistet sein muss. Es ist jedoch unvermeidlich, dass die Stränge sich bei Maschinenstörungen zeitweise sogar unkontrolliert aufschwingen, was zum seitlichen Ausschlagen des Profils um bis zu $0,5\text{ m}$ (!) führen kann, aber dennoch keinesfalls zur Beschädigung des realisierten optischen Multi-Sensor-Messverfahrens führen darf. Es gilt vereinfacht Gleichung 3.2 für die Lage $s(t)$, die abgeleitete Bewegung und deren Beschleunigung des Stranges mit $s_{\max}$ für die maximale Amplitude [BRONSTEIN 2008]:

$$\begin{aligned} s(t) &= s_{\max} \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot t + \varphi_0) \\ \dot{s}(t) = v(t) &= s_{\max} \cdot \omega \cdot \cos(2\pi \cdot f \cdot t + \varphi_0) \\ a(t) = \dot{v}(t) = \ddot{s}(t) &= -s_{\max} \cdot \omega^2 \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot t + \varphi_0) \end{aligned} \quad (3.2)$$

Die frei werdende Infrarotstrahlung der Messobjekte in der Auslaufzone darf nicht zum bedingten oder vollständigen Ausfall des Multi-Sensor-Messverfahrens führen, welches im Auslaufbereich implementiert sein muss. Die Verzunderung der Messobjektoberfläche, die

regelmäßig entstehende Zinkoxidwolke zur Pressstempelreinigung des Rezipienten sowie die prozessbedingten Längsriefen auf der Strangprofiloberfläche dürfen das Messverfahren in seinen Messergebnissen und den Prüfaussagen hinsichtlich der Konformität des Halbzeuges nicht signifikant beeinflussen. Eine Schwindungskorrektur des Messobjektes über die Ausbringung in z-Richtung muss ebenfalls vorgenommen werden. Insgesamt stellt dies u.a. Herausforderungen an die Sichtbereiche der Kameras, welche aufgrund enger Taktzeiten und der erforderlichen Kalibrierprozeduren in der optischen Messtechnik nicht bei jedem Profilwechsel verstellt werden können [WECKENMANN 2007]. Dabei sind, um die Beschneidung von Teilbildern zu verhindern, zwangsläufig Bildbereiche automatisiert auszuwählen, damit der Kamerabildbereich optimal ausgenutzt wird (sog. „Bildbereichsabschaltung“). Dies führt zur Senkung der Rechenzeit, jedoch auch zur Verringerung der effektiven, für die Messung zur Verfügung stehenden, Auflösung und muss deshalb individuell angepasst werden (Bild 22), [PROSILICA 2009].

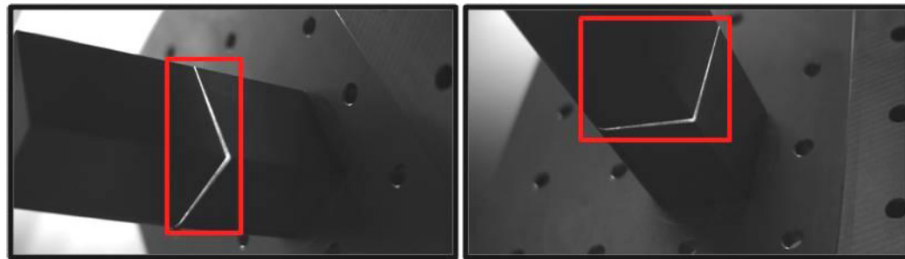


Bild 22: Kameraaufnahmen einer Lichtlinie auf einem Messobjekt (hier: Vierkantform) in verschiedenen rotatorischen Ausrichtungen; links und rechts: effektiver Bildbereich umrahmt dargestellt

3.1.3 Spezifische Anforderungen an die Applikation in der Fertigungsumgebung

Unter Werkstattbedingungen, bei denen das Messsystem betrieben werden muss, treten einmalige und wiederkehrende Stöße, tieffrequente Schwingungen und große Mengen elektrisch leitfähigen Graphitstaubs auf. Die Partikel kommen von den Graphitbahnen, auf denen die Strangprofile nach der Urformung beschädigungsfrei geführt werden um weiterverarbeitet und schließlich zwischengelagert zu werden.

Die wechselnde Feuchte der Fertigungsumgebung (z.B. über die Tages- und Jahreszeit) ist ähnlich kritisch wie die schwankende Umgebungstemperatur innerhalb des Dreischichtbetriebes, bei welcher das realisierte Messverfahren bestehen muss. In vielen Fertigungsanwendungen sind ähnliche Bedingungen mit vergleichbaren thermodynamischen Folgen für technische Systeme zu erwarten [LEIPERTZ 2005]. Der unregelmäßige Personalwechsel kann sich im Bereich der Messbedienung auf das OMS vor Ort auswirken [MASING 2007]. Dabei wird der Bedienerinfluss auf die Messunsicherheit häufig unterschätzt [PESCH 2003]. Die Einbausituation ist eng, da meist kaum Raum verbleibt, wenn dieser nicht von vorneherein eingeplant wird. Ein maximal

vorhandener Bauraum von ca. 1 m^3 , die erforderlichen Kabelführungen und die Verschlauchung für Zusatzanbauten bedingen zusätzliche Erschwernisse [DEPPE 2005]. Aufgrund des o.g. Graphitstaubs sind elektrische Komponenten hermetisch zu kapseln bzw. in dafür geeigneten Filterschränken zu verstauen, wofür ein spezifischer Wartungsplan erforderlich ist (auch Kap. 5.3.3).

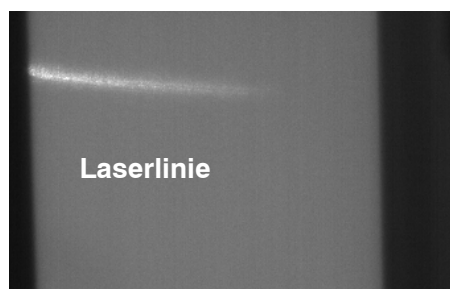
Bei allen Sensorsystemen, welche im unmittelbaren Umfeld der Strangprofilpresse und deren Ausbringung untergebracht sind, reicht die passive Kühlung durch freie Konvektion meist nicht aus [BÖSWIRTH 2007]. Selbst aktive Luftkühlung ist wegen dem mangelndem Temperaturgefälle zwischen Umgebungsluft, Sensoroberflächen und den warmen Messobjekten kaum zielführend. In klassischen Fertigungshallen beträgt die Temperatur in den Sommermonaten bis zu 40°C [DIEHL 2010]. Optische Sensoren dürfen meist nicht wärmer als 50°C werden, um ausreichend rauscharme Messdaten zu liefern. Dadurch verbleibt eine Temperaturdifferenz von rund 10°C , die für Kühlzwecke meist viel zu gering ist (auch Kap. 5.3.3). Die dann zwangsläufig erforderlichen Fluidkühlungen (z.B. Öle, Emulsionen oder Wasser) mit offenen oder geschlossenen Kühlkreisläufen sind in der Applikation mit mehreren Sensoren komplex aufgebaut. Außerdem sind diese Kühlverfahren grundsätzlich robust gegen Leckage und wartungsarm zu konzeptionieren. Die dann zusätzlich notwendigen Verschlauchungen üben meist maschinendynamische Rückwirkungen auf die Sensorhalterungen und das Rahmenwerk des Messsystems aus oder forcieren Schwingungskopplungen. Somit stellt auch das Kühlsystem eine, für die Evaluation des OMS entscheidende, Anforderungskomponente dar. Ohne diese erfüllten Anforderungen und Eigenschaften kann das Messverfahren nicht als unter realen Bedingungen verifiziert gelten [WECKENMANN 2007], (Tabelle 2).

Tabelle 2: Wesentliche Anforderungen und bereitzustellende Eigenschaften des OMS

Anforderungen an:	Bereitzustellende Eigenschaften:
Messunsicherheit	$< 100\text{ }\mu\text{m}$
Messbereich	10 mm bis 100 mm
Zu bestimmende Merkmale	Länge (Durchmesser, Abstand), Form (Rundheit, Winkligkeit)
Ausreichende Messdatenrate	20 Ergebnisse pro s, dabei ca. 1000 Messpunkte pro Datensatz
Kompakte Bauweise	Abmessungen des Messsystems: ca. $0,8\text{ m}$ Breite, $1,2\text{ m}$ Tiefe, Höhe frei
Viele zu messende Profilformen	alle Standardprofilformen (Rund, Mehrkant, T-, L-, H, Schlossprofil)
Keine Rückwirkungen auf das Messobjekt	keine messbaren Einflüsse auf die Messobjekttemperatur oder -form
Berührungslose Messung	aufgrund der Bewegung des Messobjekts und der Temperatur
Mechanische Schwingungsfestigkeit	Amplituden bis 1 mm und Frequenzen von 1 Hz bis 5 Hz treten auf
Fremdlichtstabilität	es wirkt Störlicht durch IR-Strahlung auf das Messsystem ein
Robustheit gegen Wärmeeinwirkung	Abführung der eintretenden Wärmemengen (z.B. durch Kühlverfahren)
Automatische Kalibrierfähigkeit	mit Hilfe der Messsoftware ist die Kalibrierung weitgehend zu automatisieren
Sehr kurze Kalibrierzeit	es stehen bei Profilwechsel im Prozess ca. 300 s zur Verfügung
Kurze Einbau-/Ausbauzeit des Messsystems	Einbau-/Ausbauzeiten in Wartungspausen max. 3 bis 4 Stunden
Automatische Messauswertung	die Messauswertung muss ohne weiteren Personalaufwand funktionieren
Visualisierung aller Messergebnisse	Die Messergebnisse und die Konformitätsprüfung sind zu visualisieren
Fehleingabesicherheit und Abbruchsicherheit	Normenkonformes Softwaredesign, Ergonomie und Abbruchsicherheit
Flexible Einstellbarkeit des Messsystems	Die Sensoren müssen in Abstand und Winkel einstellbar sein
Anbindung an Prozessregelung	Die Messdaten müssen für einen Leitrechner der Fertigung kompatibel sein

3.2 Theoretische Grundlagen für ein optisches Multi-Sensor-Messsystem

Das realisierte OMS soll mindestens ein SWS tragen, um die laufende Selbstkalibrierung des optischen Gesamtsystems zu ermöglichen und um die geringe Messunsicherheit bereitzustellen. Das SWS arbeitet mit einer Lichtleistung von 1 mW bis 5 mW und rotem Licht aus Halbleiterdioden der Wellenlänge 652 nm . Ein einzelnes LSS ist wie o.g. für vollständige Konturmessungen nicht geeignet [ASUNDI 1999]. Daher wird als Kompromiss aus Aufwand und technischem Nutzen ein dreifaches LSS eingesetzt, was die minimale Anzahl für eine 360° Messung darstellt (auch Kap. 2.2.2). Rote Laser mit ca. 650 nm Wellenlänge werden aus wirtschaftlichen Gründen in den prototypischen Verfahrenstests eingesetzt, wobei auch eine Machbarkeitsanalyse in Form von Vorabtests erarbeitet wurde. Somit ist sichergestellt, dass die Infrarotstrahlung warmer Messobjekte von rund 800°C (durch Eigenleuchten) die Messergebnisse nicht signifikant beeinflussen und kaum überblenden. Wegen der notwendigen Lichtempfindlichkeit müssen hochauflösende und empfindliche Kamerasysteme als Beobachter eingesetzt werden [ANDOR 2008]. Das Ergebnis ist in Bild 23 links ersichtlich, das oxidierte Profilstück in Bild 23, rechts.



Testprofil mit 800°C



Testprofil nach der Messung

Bild 23: Testmessung an einem warmen Probekörper (hier: Messing, 800°C), Feststellung des Kontrasts; links: warmes Profil mit darauf projizierter Lichtlinie, rechts: Profil bei Raumtemperatur

Die Einstellung aller Kameras und Beleuchter muss aus o.g. Gründen variabel sein (auch Kap. 4.3 und Kap. 4.4). Alle Lichtschnittbeleuchter und -beobachter müssen in Abstand und Winkel in mehreren Freiheitsgraden zum Messobjekt und zueinander einstellbar sein. Zumindest die Lichtquellen müssen fein und reproduzierbar justierbar sein, um wesentliche Winkelabweichungen mit negativen Folgen für das Messergebnis bereits in der Entstehung zu vermeiden (Kap. 4.5).

Das Messverfahren muss in der Auswertung ermöglichen, die schnelle Bewertung des gemessenen Strangprofils im Vergleich zu einer Sollkontur (gemäß den vorgegebenen Spezifikationen) zu leisten. Dabei sind im Hinblick auf die Messdatenverarbeitung Überlappbedingungen zwischen den ortsfesten Lichtschnittmessdaten a priori vorzuschlagen und einzuhalten. Da es anhand der Messdaten keinen Anhaltspunkt dafür gibt, wo der Überlapp beginnt und endet, wird auf die Berechnung aus dem angrenzenden Bildteil zurückgegriffen. Somit muss das Kontursegment nochmals in die Bereiche unterteilt werden, in denen erwartungsgemäß der Überlapp liegt, und in jene, welche nicht zur

Fusion beitragen (Bild 37). Zur anschließenden Registrierung und Ausrichtung der Datensätze wird somit das Kontursegment in Zonen oder Linientripel unterteilt. Die ersten zwei Punkte sind die Randpunkte R_1 und R_2 , wobei R_1 dem größeren Wert für x , y und R_2 dem kleineren zugeordnet wird. Für die fehlenden zwei Punkte sind weitere Berechnungen durchführen. Zuerst wird der Anteil v des vollen Umfangswinkels κ , der das Umfangssegment einschließt, bestimmt nach:

$$v = \ddot{U}(\%) \cdot |\kappa| \quad (3.3)$$

Mit dem Vektor zum Mittelpunkt des Formelements und der entsprechenden Rotationsmatrix ergeben sich die beiden gesuchten Abschlusspunkte $x_{3/4}$, $y_{3/4}$. Der erste ergibt sich, bei positivem Überlappwinkel mit R_1 und negativem für R_2 .

$$R_3 = \begin{pmatrix} x_{R3} \\ y_{R3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(v) & -\sin(v) \\ \sin(v) & \cos(v) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_{R1} - x_M \\ y_{R1} - y_M \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x_M \\ y_M \end{pmatrix} \quad (3.4)$$

$$R_4 = \begin{pmatrix} x_{R4} \\ y_{R4} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(-v) & -\sin(-v) \\ \sin(-v) & \cos(-v) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_{R2} - x_M \\ y_{R2} - y_M \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x_M \\ y_M \end{pmatrix} \quad (3.5)$$

Damit kann der gewünschte Überlapp des Umfangs durch die Linienzüge $R_1 - R_3$ und $R_2 - R_4$ ausgedrückt werden. Bei einigen besonderen Profilen wie z.B. dem Schlossprofil ist diese Berechnung etwas trivialer möglich, da der Überlappwinkel im Programm bereits direkt gewählt werden kann. Eine der Kameras muss als Masterkamera bestimmt und die Messdatensätze der anderen beiden Kameras mit der jeweiligen Seite zeitgleich getriggert aufgenommen und fusioniert werden. Sollten nur zwei Überlappungen bestehen, wird derjenige Kameradatensatz gewählt, welcher sich mit den beiden anderen überlappt. Somit kann fundiert angenommen werden, dass durch die Grobregistrierung, bei der die Datensätze weitgehend angenähert werden bevor sie endgültig fusioniert werden, entsprechende Datensätze schon nah genug beieinander liegen. Dies ist in der messtechnischen Realisierung algorithmisch unterstützt (Kap. 4.5). Um die dafür benötigte Rechenzeit zu minimieren, ist dieser Algorithmus für jedes Profil a priori festzulegen. Somit sind zusammengehörige Formelemente dadurch gefunden, dass der Abstand zueinander geringer ist als zu den verbleibenden. Dazu werden die Schwerpunkte $S_{Kx,y}$ der Formen für (x_{Rn}, y_{Rn}) berechnet und die Abstände verglichen, was mit folgender Gleichung bestimmt werden kann:

$$S_{Kx,y} = \begin{pmatrix} x_{R2} + \frac{x_{R1} - x_{R2}}{2} \\ y_{R2} + \frac{y_{R1} - y_{R2}}{2} \end{pmatrix} \quad (3.6)$$

Wenn nur zwei überlappende Bereiche vorhanden sind, wird ein Kameradatensatz als Modell festgelegt und die anderen beiden Datensätze der LSS an diesem ausgerichtet. Aus den Schwerpunkten der jeweils korrespondierenden Elemente (x_{Sn}, y_{Sn}) kann die Länge des Translationsvektors P_T als Schwerpunktdistanz d_s bestimmt werden.

$$d_s = \sqrt{(x_{s1} - x_{s2})^2 + (y_{s1} - y_{s2})^2} \quad (3.7)$$

Zur Bestimmung der Rotation wird folgende Rotationsmatrix für R_R benötigt:

$$R_{Rn} = \begin{pmatrix} \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) \\ \sin(\alpha) & \cos(\alpha) \end{pmatrix} \quad (3.8)$$

Da aus den Randpunkten die Richtung des Vektors erkenntlich ist und sich damit in bestimmten Fällen eine Rotation um 180° ergeben würde, muss über die Steigung m_x geprüft werden, ob beide Vektoren in die gleiche Richtung zeigen:

$$m_x = \frac{y_{R2} - y_{R1}}{x_{R2} - x_{R1}} \quad (3.9)$$

Die Steigung kann ebenfalls für eine große Anzahl von Punkten auf Basis der linearen Regressionsanalyse berechnet werden (Gleichung 2.8). Daraus können nun die angepassten Koordinaten aller Messpunkte errechnet werden.

$$P_{neu} = S_{Kx,y} + R_{Rn} \cdot (P_{alt} - S_{Kx,y}) + T_{Kx,y} \quad (3.10)$$

Dabei entspricht $S_{Kx,y}$ dem Ergebnis aus Gleichung 3.6, R_{Rn} der Rotationsmatrix und $T_{Kx,y}$ dem Verschiebungsvektor. Wenn dabei ein Segment eines Kameradatensatzes verschoben wird, müssen auch die anderen, zusammengehörigen Datenelemente in gleichem Maße transformiert werden. Das Vorgehen für die Datenfusion baut auf die vorgestellten Ziele zur effektiven Verbindung der Datensätze auf (Kap. 4.1.2). Mindestens drei LSS und ein SWS sind notwendig, um die Zielsetzung zu holistischen Messergebnissen an Strangprofilen zu realisieren.

Dabei sind in einem ersten Schritt geeignete Sensoren, Objektive, Auswerteinheiten, Peripheriegeräte und Methoden aufzubereiten. Daher kann für das Lichtschnittverfahren z.B. kein quasi-telezentrisches Objektiv verwendet werden, da es zu große Abmessungen besitzt [THÖNIß 2006]. Ebenso ist ein kurzlebiger und aktuell nur eingeschränkt entwickelter Blau- oder Grünlaser auch aus Sicherheitsgründen kaum einsetzbar, (Kap. 4.4), [DIN EN 60825-1]. Die Lebensdauer ist bei der Wahl der Sensoren zudem zu berücksichtigen, z.B. sind Laser im roten Wellenlängenbereich langlebiger als blaue. Ein viertes oder fünftes LSS zu verwenden ist ebenfalls nicht direkt zielführend, ähnlich wie ein zweites oder drittes SWS einzusetzen, da der wissenschaftliche Aussagegehalt nicht unbedingt verbessert wird. Es ist eher mit folgenden Nachteilen verbunden: aufwendigere Justierbarkeit, steigende Anfälligkeit und Auswertezeit sowie erhebliche Mehrkosten. Wie bei allen Messverfahren müssen die Gesamtkosten für den Einsatz (Anschaffung, Betrieb, Wartung, Energiebedarf, usw.) in einem möglichst günstigen Verhältnis zum Nutzwert liegen [HOFFMANN 2007]. Das rudimentäre Konstruktionskonzept zum OMS wird nachstehend beschrieben (Bild 24).

4 Realisierung eines optischen Multi-Sensor-Messsystems zur Strangprofilmessung

Als Kompromiss aus Aufwand, Bauraum und Kosten muss ein Prototyp hergestellt werden, welcher den wissenschaftlichen Ansatz des Messverfahrens verfolgt und mit dem sich das geschilderte Vorhaben sowohl realisieren als auch evaluieren lässt.

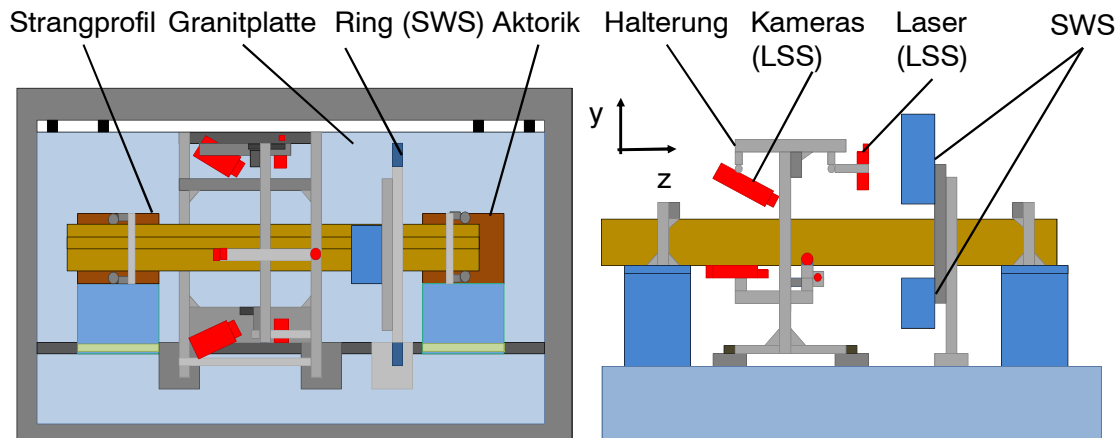


Bild 24: Prototypischer Aufbau des Konzepts aus Bild 20; links: Draufsicht, rechts: Seitenansicht

Korrosionsfreiheit ist bei widrigen Umgebungsbedingungen und chemisch aggressiven Stäuben eine relevante Nebenbedingung, wodurch z.B. klassische Stähle als Rahmenmaterial ungeeignet erscheinen [BEITZ 2001]. Die erforderliche mechanische Langzeitstabilität erfordert ein Gestell aus nicht kriechenden oder relaxierenden Werkstoffen mit gleichzeitig guter Wärmeleitfähigkeit für geringe thermische Gradienten und folglich minimalen mechanischen Verzug. Ein geeigneter Werkstoff ist – wie oftmals für Anwendungen in der Metrologie – hochlegiertes Aluminium [BAEHR 2008]. Durch die gute Wärmeleitfähigkeit sind o.g. Einflüsse auf ein Minimum reduziert und folglich nur in relativ geringem Ausmaß zu erwarten.

4.1 Kombination der Messverfahren beider Subsysteme

Das vorgestellte Messverfahren basiert auf der kontinuierlichen Selbstkalibrierung beider Sub-Systeme. Damit geht einher, dass die LSS am genaueren skalaren Schattenwurfdatensatz kontinuierlich systematisch kalibriert werden (Bild 25). Dabei wird synchron und in regelmäßigen zeitlichen Abständen während des in-line Messprozesses eine Selbstkalibrierung durchgeführt. Die Gesamtkontur des fusionierten Datensatzes der drei Lichtschnittssysteme wird mit dem Messergebnis des SWS an der Stelle maximaler Bauteilbreite kombiniert [WECKENMANN 2009b]. Das skalare Längenmessergebnis des SWS korrigiert den ortsfesten Messdatensatz des LSS systematisch mit synchronisierter Messrate. Somit kann die Datendichte der LSS (mit der Möglichkeit konkave Konturen in Länge und Form zu messen) genutzt werden, um die Geometrie präzise mit geringer Messunsicherheit zu bestimmen.

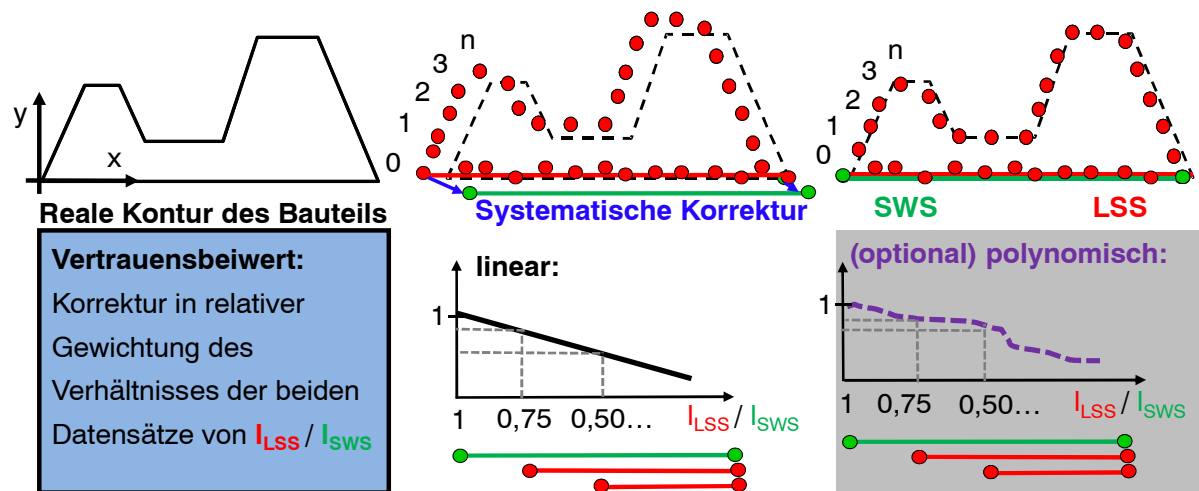


Bild 25: Datenfusion der Einzeldatensätze von LSS und SWS durch systematische Korrektur des weniger genauen, jedoch mit Koordinaten arbeitenden, LSS am skalaren Zweipunktmaß des SWS

Die erfolgende systematische Korrektur kann im einfachsten Fall durch einen einzigen Korrekturbeiwert, welcher z.B. in laborgebundenen Versuchen ermittelt wird, unterstützt werden. Dieser ist meist in gewissem Umfang abhängig von der räumlichen Größe des Messobjekts, da damit gleichwohl auch der absolute Abweichungsbetrag zwischen SWS und LSS zunimmt.

Eine weitere Möglichkeit besteht darin, weiter von der Stützstelle des SWS entfernte Bereiche weniger stark und nahe Bereiche stärker zu korrigieren. Der Verlauf zwischen den Stützpunkten kann dabei linear oder polynomisch extrapoliert und folglich bei der Fusion interpoliert werden. Nachteilig ist hierbei die versuchsgebundene und auf Expertenwissen basierende, profilabhängige Ermittlung realistischer Korrekturverteilungen. Negative Folge ist jedoch der erheblich höhere Rechenaufwand für die Datenfusion, besonders wenn der Grad der polynomischen Extrapolation größer 3 wird. Da im in-line gebundenen OMS die Auswertezeit eine kritische und zentrale Rolle spielt, sind weitere Tests zur systematischen Korrektur – um mehr als die lineare Approximation – nur begrenzt durchgeführt worden. Im Weiteren sind diese daher auch kein zentraler Bestandteil der vorgestellten Arbeit und der Messergebnisse. Dennoch werden bereits mit der Linearwertmethode erhebliche Verbesserungen der Messunsicherheiten erreicht (Kap. 5). Mit weiter fortschreitender Rechnertechnologie scheint die zusätzliche Erweiterungsmöglichkeit dann eher gegeben.

Vor der Kombination von LSS und SWS werden drei singuläre LSS untereinander zu einem Datensatz verbunden, der dann als geschlossener Messdatensatz nach außen tritt. Hierzu sind Überlappbedingungen einzuhalten und Einstellregeln zu beachten, um die Datenqualität des LSS bestmöglich sicherzustellen für die systematische Korrektur mit dem SWS. Von besonderer Wichtigkeit hinsichtlich der konstruktiven Kombination der Messdaten mit geringer Messunsicherheit ist zudem ein Kalibrierverfahren für das optische OMS, welches nachstehend erläutert wird.

4.1.1 Kalibrierverfahren

Die Kalibrierung ist ein wichtiger Vorgang und Bestandteil jeder Messung. Damit ist sie ein entscheidender Aspekt zur Erreichung des Ziels, reproduzierbare und genaue Messergebnisse ermitteln und auswerten zu können. Jegliche Abweichungen finden sich als systematischer Abweichungsanteil in Form der sog. Kalibrierunsicherheit u_{kal} in jedem auf Basis dieser Kalibrierprozedur ermittelten Messergebnisses sowie in dessen Bewertung wieder [PTB 2009]. Die Kalibrierung der drei LSS erfolgt auf Basis einer gemeinsamen Kalibrierung in einem gemeinsamen WKS (Bild 26 und Gleichung 4.1), [TSAI 1987a], [TSAI 1987b].

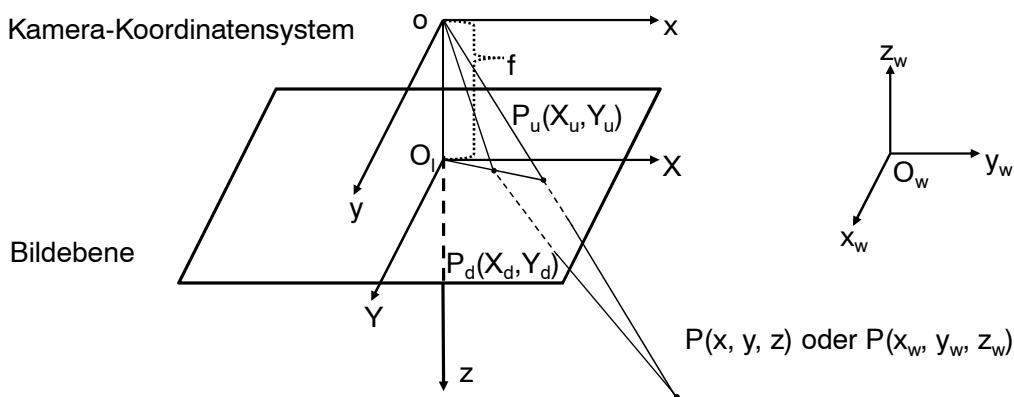


Bild 26: Skizze des WKS für die Einzelbeobachter in x, y und z

Dabei werden für alle Kamerasensoren des LSS Zuordnungen hergestellt zwischen dem Bildkoordinatensystem und dem WKS, welches häufig das Koordinatensystem des Bauteils sein kann oder beliebig später in dieses transformiert werden kann. Verschiedene wissenschaftliche Ansätze bauen auf diesen Erkenntnissen mit ähnlichen Detailverfahren erfolgreich auf [WILLSON 1995], [ZHANG 2000], [MIAN 2006b], [TUTSCH 2006]. Dazu müssen die einzelnen Parameter (welche ebenso in verschiedenen Koordinatensystemen ermittelt worden sein können) umgerechnet werden (Kap. 4.2.). Die kalkulatorische Kalibrierprozedur des vorgestellten Messverfahrens setzt sich aus mehreren rechnerischen Teilschritten zusammen (Gleichungen 4.1 bis 4.11). Die mehrstufige Kalibrierung beginnt mit der Verzeichnungskorrektur der einzelnen Kameras und der Errechnung eines Güteparameters der Kalibrierung, z.B. dem „normalized calibration error“ (NCE), [TSAI 1986]. Dieser gibt an, wie groß die Verzeichnungskorrektur im Verhältnis zur vorhandenen Verzerrung während der Kalibrierung war und gibt Hinweise darauf, mit welcher Wahrscheinlichkeit die Kalibrierung ausreichend genau für die anschließende Messung ist. Ähnliche und abgewandelte wissenschaftliche Arbeiten sind in [HEIKKILA 1997] zu finden. Dafür wird ein Kalibriernormal benötigt, welches Konturmerkmale (wie z.B. schwarze Punkte auf weißem Grund) trägt. Dafür kann z.B. eine geätzte Glasplatte oder eine bedruckte Aluminiumplatte verwendet werden. In Vorversuchen hat sich ein Punktraster von $15 \cdot 15$ Punkten in konstanten Abständen der Mittelpunkte von 4 mm und Durchmessern von 2 mm als Optimum herausgestellt, der Kalibrierbereich beträgt dann

etwas mehr als 60 mm Kantenlänge. Kleinere Abweichungen von diesen getroffenen Zahlenwerten ändern am Verfahren nichts. Werden deutlich mehr Punkte und feinere Abstände gewählt, wird die Kalibrierung zeitintensiver und die später vorgestellte vollautomatische Kalibrierung funktioniert nicht zuverlässig genug (u.a. mangels ausreichender Strukturauflösung). Sind es deutlich weniger oder kleinere Punkte, so sinkt die Merkmalsdichte und gleichzeitig steigt die Kalibrierunsicherheit u_{kal} im überproportionalen Maße [MARESCH 2006]. Das Vorgehen ist systematisch in Bild 27 dargestellt.

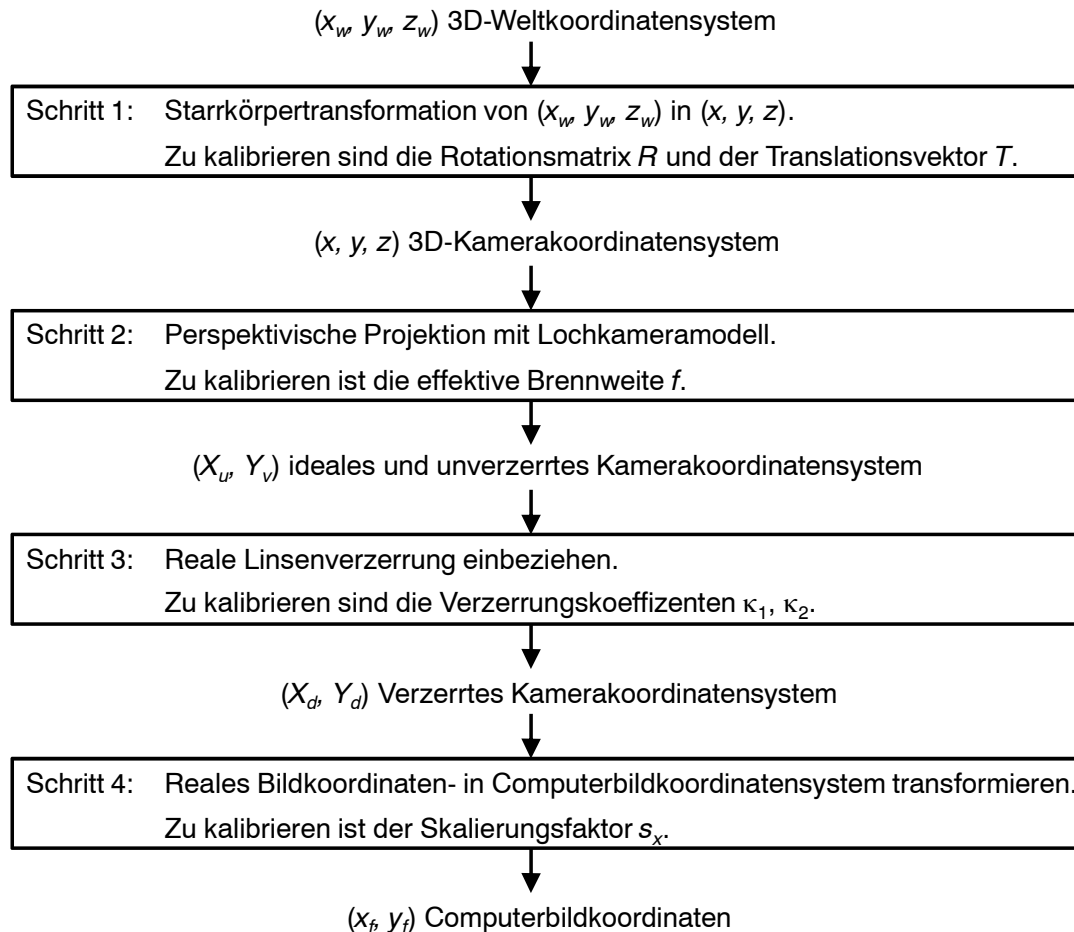


Bild 27: Zusammenhang der Einzelsysteme mit dem gemeinsamen WKS

Die Umrechnung von den einzelnen Kamerakoordinaten in Weltkoordinaten wird über die folgenden Gleichungen durchgeführt [TSAI 1986]:

$$\begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \end{bmatrix} = R \cdot \begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{bmatrix} + \vec{T} \text{ mit } (X_i, Y_i, Z_i) = (X_c, Y_c, Z_c) \quad (4.1)$$

Die intrinsischen Koordinaten und deren zugehörige Indexes werden in der Literatur sowohl mit i und c benannt (Gleichung 4.1). Die Rotationsmatrix zur Überführung in Weltkoordinaten ist dabei definiert als:

$$R = \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 \\ r_4 & r_5 & r_6 \\ r_7 & r_8 & r_9 \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

Der Verschiebungsvektor als translatorischer Umrechnungsanteil ergibt sich zu:

$$\vec{T} = \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

Die einzelnen Rotationsanteile r_n der Matrix um die Rotationswinkel R_x und R_y können wie folgt ausmultipliziert dargestellt werden:

$$\begin{aligned} r_1 &= \cos(R_y) \cdot \cos(R_x) \\ r_2 &= \cos(R_x) \cdot \sin(R_x) \cdot \sin(R_y) - \cos(R_x) \cdot \sin(R_z) \\ r_3 &= \sin(R_x) \cdot \sin(R_z) + \cos(R_x) \cdot \cos(R_x) \cdot \cos(R_z) \sin(R_y) \\ r_4 &= \cos(R_y) \cdot \sin(R_z) \\ r_5 &= \sin(R_x) \cdot \sin(R_y) \cdot \sin(R_z) + \cos(R_x) \cdot \cos(R_z) \\ r_6 &= \cos(R_x) \cdot \sin(R_y) \cdot \sin(R_z) - \cos(R_z) \cdot \sin(R_x) \\ r_7 &= -\sin(R_y) \\ r_8 &= \cos(R_y) \cdot \sin(R_x) \\ r_9 &= \cos(R_y) \cdot \cos(R_y) \end{aligned} \quad (4.4)$$

Der Verzeichnungsanteil ergibt sich aus X_i für X_u (unverzerrt, da nicht korrigiert) nach:

$$X_u = f \frac{X_i}{Z_i} \quad (4.5)$$

Und Y_u (unverzerrt, da nicht korrigiert) bildet sich nach:

$$Y_u = f \frac{Y_i}{Z_i} \quad (4.6)$$

Das korrigierte (verzerrte) Punktetriple liegt dann für X_d bei:

$$X_d = X_u(1 - kr^2) \quad (4.7)$$

und für Y_d bei:

$$Y_d = Y_u(1 - kr^2) \quad (4.8)$$

Der rotierte Anteil r ergibt sich mit k als Koeffizient der Linsendistorsion trivial zu:

$$r = \sqrt{X_d^2 + Y_d^2} \quad (4.9)$$

In der Gesamtheit bleibt nach Rotation für X_f als endgültige Bildkoordinate:

$$X_f = \frac{S_x X_d}{d_z} + C_x \quad (4.10)$$

und für Y_f :

$$Y_f = \frac{Y_d}{d_y} + C_y \quad (4.11)$$

Die Gleichungen 4.1 bis 4.11 werden auch nachstehend in Kap. 5.2.1 verwendet. Dabei ist dx , dy die Distanz zwischen angrenzenden Sensorelementen in x- und y-Richtung. Sie können als Kamerakonstanten betrachtet werden und hängen von der Chipgröße sowie der physikalischen Auflösung ab. Die Punkteplatte muss in ihrer Beschaffenheit bekannt sein (Größe, Durchmesser, Abstand, Anzahl) und die Binärisierung der Grauwerte (z.B. 8 Bit) technisch beherrscht werden, auf die in Kap. 2.2.1 grundlegend eingegangen wurde. Eine dafür angefertigte Kalibrierplatte wurde auf einem deutlich genaueren optischen Messgerät (Videocheck UA der Werth Messtechnik GmbH, erreichte Messunsicherheit ca. $0,5 \mu\text{m}$) referenziert (Bild 28). Durch Referenzieren lässt sich – trotz hochgenauer Herstellung durch Spezialdrucker auf Metall oder Ätzen in Glas – das Kalibrieren zusätzlich verbessern, da Abweichungen konstruktiv für die Kamerakalibrierung verwendet werden.

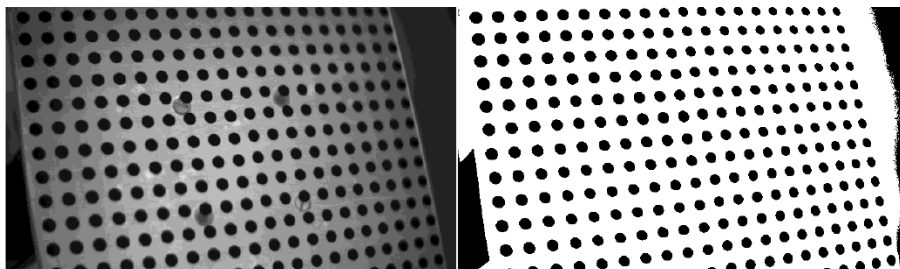


Bild 28: Kalibrierplatte mit Kreiselementen; links: Graubild 8 Bit, rechts: binärisiertes Bild, von allen Kameras des OMS fest ausgerichtet aufgenommen (da 2D-Betrachtung kann $z=0$ gesetzt werden)

Durch die Kenntnisse der Abweichungen der Punkteverteilung und deren Durchmesser sowie konstruktives Einpflegen über die Kalibriersoftware (Kap. 4.6), wurden in Versuchen diese vorzeichenhafteten Abweichungen des Kalibrierergebnisses und der Güteparameter der Kalibrierung (NCE) um 2 % bis ca. 9 % verbessern. Das Kalibrierverfahren muss wie o.g. anforderungsbedingt sehr schnell durchlaufen werden (ca. 300 s). Eine manuelle Kalibrierung ist daher unmöglich. Damit wird auch die Anforderung hochgenauer Herstellung vermindert. Die vollautomatische Variante setzt voraus, dass zur weiteren Verarbeitung die Punkte nach der Binärisierung zweiachsig und eindeutig nummeriert sowie bezüglich Ihrer Lage gespeichert werden. Dazu muss eine automatische Schwerpunkterkennung des Flächenschwerpunkts, eine abweichungsminimale Zuordnung und eine Speicherung von vielen Punkten (hier: 225) in weniger als 300 s erfolgen. In Bild 29 ist die Nummerierung der realisierten Kalibrierung, eingebettet in die bereitgestellte Messsoftware erkennbar (Kap. 4.6).

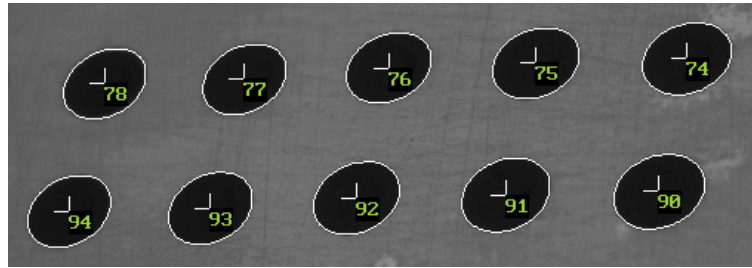


Bild 29: Visualisierung der ermittelten Kreismittelpunkte auf der detektierten Kalibrierplatte

Eine weitere Anforderung ist, den Ursprung des WKS in den Schwerpunkt des Bauteils zu legen (auch Kap. 4.6). Nach der eigentlichen physikalischen Kalibrierung wird optional noch eine systematische Korrektur des LSS durch eine zusätzliche Kalibrierung an Meisterwerkstücken durchgeführt (dieser Schritt muss nur für eine Erstkalibrierung nach Wiederaufbau des Messsystems durchgeführt werden). Dabei sind die erreichbaren Verbesserungen der Messergebnisse deutlich (Kap. 5.2.2). Durch die Marker auf der Kalibrierplatte des Lichtschnittsystems können vollautomatisch die Registrierung, Nummerierung, Sortierung und Zuweisung der Punkte durchgeführt werden. Die Kalibrierzeit kann damit von üblichen dutzenden Minuten oder wenigen Stunden auf in-line taugliche *5 min (300 s)* reduziert werden (Kap. 5.3), [WECKENMANN 2009c].

Eine Alternative zur Kalibrierung mittels o.g. Kalibrierplatte ist die Kalibrierung mit Theodoliten (Bild 30), z.B. anhand einer Halterung welche mit feinen metallischen Drähten ($< 0,1\text{ mm}$ Durchmesser) bestückt ist. Theodoliten sind Winkelmessinstrumente, welche häufig auch in der Geodäsie eingesetzt werden. Sie erfassen Horizontalwinkel, Zenitwinkel und Vertikalwinkel und werden mittels eines Stativs lotrecht aufgestellt. Mittels mehrerer Libellen können diese nivelliert werden. Ein Zielfernrohr mit Strichkreuz dient zur Anvisierung des zu erfassenden Objektes. Auf Basis von Winkeltrigonometrie im Raum können Ortsbeziehungen zwischen den anvisierten Objekten errechnet werden. Bei Beleuchtung der Drähte mit bereits justierten Laserfächern werden feine Lichtpunkte im Raum erzeugt, welche dann als Kalibrierpunkte erkennbar werden und im Weiteren dazu zu dienen, Lagepunkte im Raum zu markieren. Jedoch disqualifizieren verschiedene o.g. Randbedingungen dieses Verfahren für viele Arbeiten in der Fertigung.

Die Theodoliten sind zu unhandlich, zu groß und die Lichtverhältnisse vor Ort zu kritisch. Die sich errechnende Gesamtunsicherheit der Kalibrierung ist durch Abweichungen in Positionierung und Wärmeverzug innerhalb der Optiken mit erreichten $50\text{ }\mu\text{m}$ für eine technische Machbarkeit grenzwertig gering, insbesondere wenn das kalibrierte Messverfahren insgesamt nur Messunsicherheiten von $100\text{ }\mu\text{m}$ erreichen soll [BARTSCH 2001]. Die Kalibrierung mit Drähten ist wegen der physikalisch deformierbaren und leicht in Luftschwingungen zu versetzenden Drähte lediglich labortauglich und kann zudem mit den beengten Platzverhältnissen und notwendigen Rundumsichtbereichen häufig nicht adäquat durchgeführt werden. Dafür liegen ohne weitere Umrechnung extrinsische Weltkoordina-

ten im Bezug auf ein ortsfestes Koordinatensystem vor. Durch das dabei aufgespannte Dreieck gemäß Gleichungen 4.12 bis 4.14 kann die Lage in einem WKS festgelegt und als Nullpunkt für weitere Messungen auf dem Kamerachip herangezogen sowie für die Skalierung übernommen werden (Bild 31). Eine ortsfeste Länge muss hierzu bekannt sein.

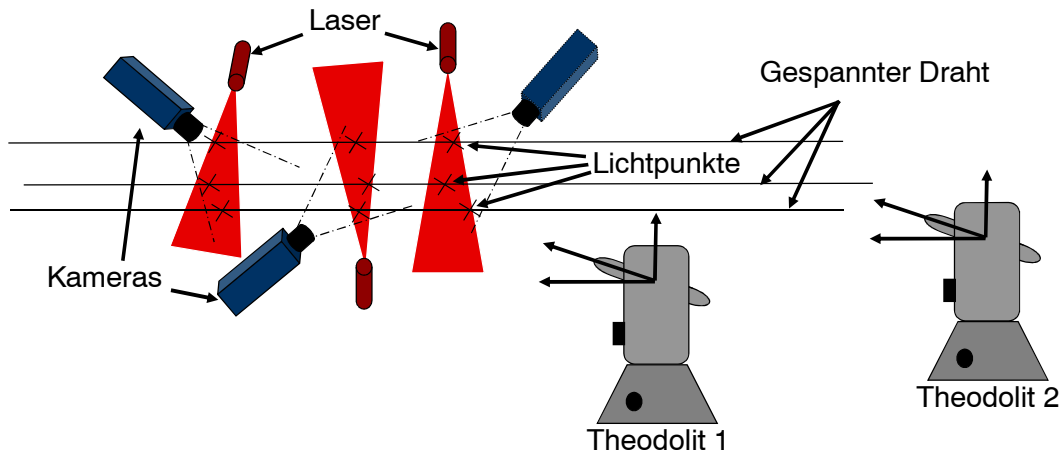


Bild 30: Kalibrierverfahren mittels ortsfester Beobachtung von Punkten im Raum durch Theodoliten

$$\alpha = 180^\circ - \gamma_{IA} - \gamma_{IIA} \quad \text{und} \quad \beta = 180^\circ - \gamma_{IB} - \gamma_{IIB} \quad (4.12)$$

$$\frac{L}{\sin \alpha} = \frac{a_1}{\sin \gamma_{IIA}} = \frac{a_2}{\sin \gamma_{IA}} \quad \text{und} \quad \frac{L}{\sin \beta} = \frac{b_1}{\sin \gamma_{IIB}} = \frac{b_2}{\sin \gamma_{IB}} \quad (4.13)$$

Mit den mittels der Theodoliten bestimmten Winkeln α , β , γ_n und den Größen a_1 , a_2 , b_1 , b_2 aus Gleichung 4.13 ergibt sich nach einigen Umformungen die Länge AB durch:

$$\left\{ \begin{aligned} (\overline{AB})^2 &= a_1^2 + b_1^2 - 2a_1b_1 \cdot \cos(\gamma_{IA} - \gamma_{IB}) \\ (\overline{AB})^2 &= a_2^2 + b_2^2 - 2a_2b_2 \cdot \cos(\gamma_{IIB} - \gamma_{IIA}) \end{aligned} \right\} \quad (4.14)$$

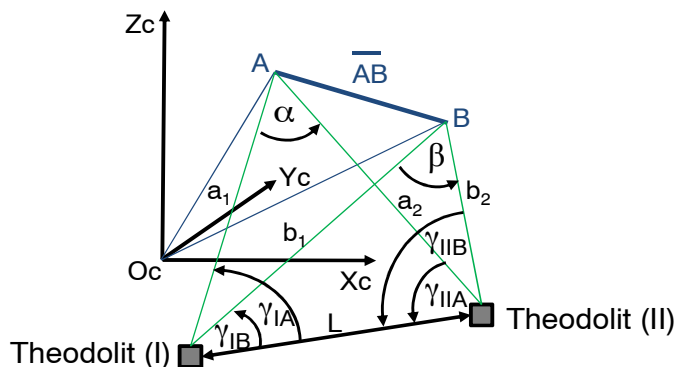


Bild 31: links: Detektion dreier Lichtpunkte im Raum; rechts: Aufspannung eines virtuellen Dreiecks für die Kalibrierung des LSS innerhalb des OMS, Errechnung des WKS [PAPULA 2000]

Im weiteren Verlauf dieser Arbeit und für die Messsoftware wird jene Kalibrierung unterstützt, welche aus o.g. Gründen mittels der binärisierten Kalibrierplatte mit charakteristischer Punktverteilung durchgeführt wird. Hergestellt wurde dieses individualisierte und mit

einem optischen Koordinatenmessgerät referenzierte Normal auf einem hochauflösenden Monochrom-Laserdrucker (Druckauflösung 2400 DPI). Der vorhandene Punktabstand und die Punktgröße sind jeweils variabel zwischen 1 mm und 4 mm (mit den o.g. besten Ergebnissen für 2 mm) hergestellt worden. Zur Kalibrierung müssen mindestens 9 Punkte verwendet werden, um die $8\text{ Freiheitsgrade (DOF)}$ aus der Kalibrierung zu definieren. Eine größere Anzahl von Punkten ist wegen des größeren Aussagegehaltes theoretisch besser, wobei mit zunehmender Zahl das Verfahren ab ca. 200 Punkten eine Sättigung der Kalibriergüte (NCE) erfährt. Der NCE sollte jedoch höchstens 2 oder kleiner sein [PROSILICA 2009]. Danach steigen lediglich der Zeitaufwand und die Wahrscheinlichkeit von Ausreißern oder Bedienfehlern überproportional an. Zudem werden die Punkte dann dimensionell klein ($< 1\text{ mm}$ Durchmesser d) und eng gereiht ($< 2\text{ mm}$ Abstand a). Wegen der begrenzten physikalischen Kameraauflösung hat dies technische Nachteile der Detektion zur Folge. Alle zur Kalibrierung herangezogenen Punkte sollten gleichmäßig verteilt und dennoch im scharfen Bereich der Kameras liegen [WECKENMANN 2009a]. Die Festlegung eines Koordinatensystems erfolgt gemäß Bild 32 parallel zu den Abstandsminima der Punktreihen anhand von Randmarkern (nachstehend auch in Bild 72).

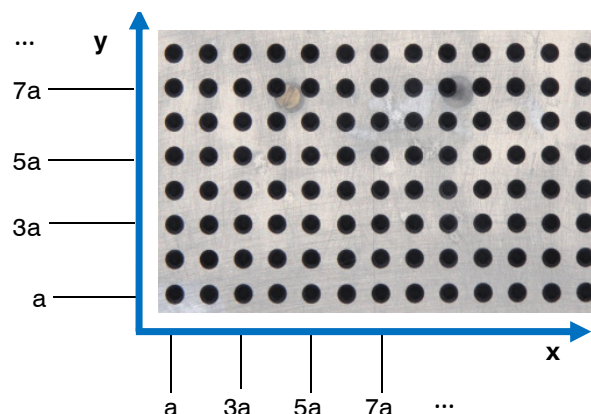


Bild 32: Festlegung eines zweiachsigen Koordinatensystems für die Messung (nach Kalibrierung)

Abweichungsbehaftete Abstandsdifferenzen, die prinzipbedingt unvermeidbar vom verwendeten Printgerät verursacht werden, wurden in Versuchen mit dem o.g. Referenzmessgerät Videocheck UA (Werth Messtechnik GmbH) referenziert. Die dabei ermittelten Abweichungen liegen bei Punktdurchmesser und -abstand im Bereich von $1 \cdot 10^{-3}\text{ }\mu\text{m}$ und sind teilweise systematisch verteilt. Die Anteile zufälliger Abweichungen sind um ca. eine Größenordnung geringer und liegen damit im Vorgabebereich der „Goldenen Regel nach Berndt“ [MASING 2007], [WECKENMANN 1995]. Die bekannten systematischen Abweichungen werden dann hinsichtlich einer sinkenden Kalibrierabweichung u_{kal} in der eigens dafür erstellten Kalibriersoftware konstruktiv verwendet (auch Kap. 4.6), um die Gesamtunsicherheit der Kalibrierung zu verringern. Die gesamte Kalibriersoftware für das optische Messverfahren ist in der Hochsprache Visual Basic.NET modular realisiert, wie es häufig empfohlen wird [KOFLEDER 2008]. Die Kalibrierung des SWS erfolgt separat in einem Unterprogramm und wird durch die in Kap. 4.6 vorgestellte grafische Benutzeroberfläche der

Messsoftware unterstützt. Aufgrund der prinzipbedingten Robustheitsanforderungen erscheint eine Rekalibrierung der Kalibrierplatte lediglich im Rahmen von Überwachungsmessungen notwendig und muss nicht vor jeder Messung durchgeführt werden. Der softwaregestützte Ablauf der kontinuierlichen Selbstkalibrierung am SWS ist in Bild 33 skizziert.

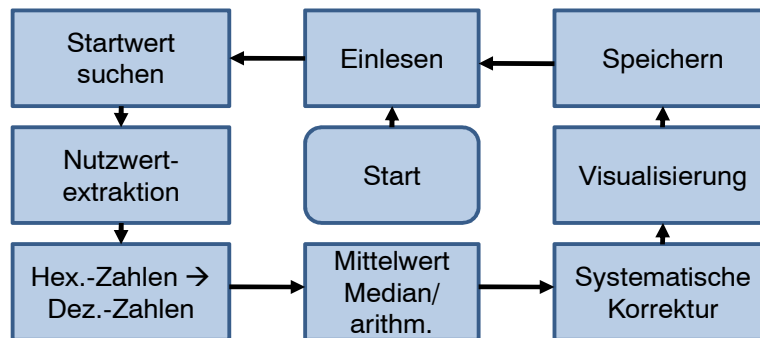


Bild 33: Kontinuierliche Kalibrierung am Schattenwurfverfahren, Zeitbedarf < 50 ms

Für das SWS wird eine Zweistufenkalibrierung mit mindestens zwei Meisterwerkstücken durchgeführt. Die damit erhaltenen Stützstellen (z.B. 10 mm und 50 mm für einen Messbereich bis 100 mm), können auch durch höhere Ordnungen mit einem Polynom vom Grad n modelliert werden, was dann eine größere Zahl von Stützstellen voraussetzt. Grundsätzlich müssen die Kalibrierkörper zuvor referenziert werden, um die unweigerlich vorhandenen Abweichungen der Referenzwerkstücke berücksichtigen zu können und die Kalibrierunsicherheit u_{kal} zu minimieren (Bild 34).

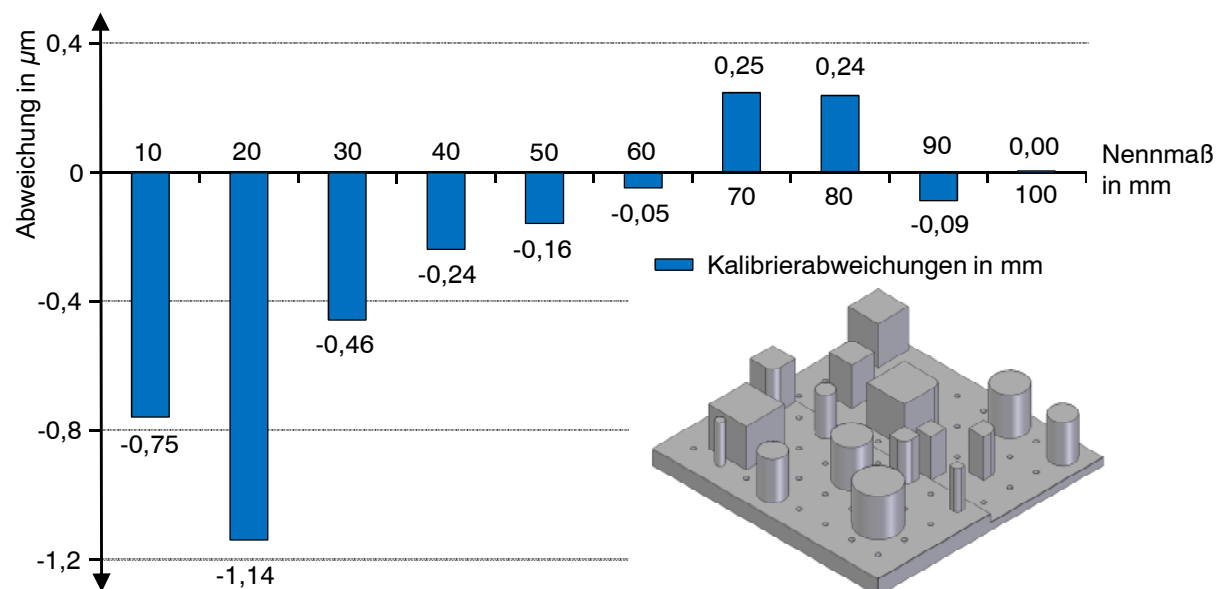


Bild 34: Überhöhte Abweichungsdarstellung der verwendeten Meisterwerkstücke nach Kalibrierschein in 10 mm-Schritten [PTB 2009], rechts unten: eigens erstellte Prüfkörper verschiedener Profilformen und unterschiedlicher Größen von 10 mm bis 100 mm (auf Montageplatte)

Das Kalibrierverfahren, die Korrektur und der Erhalt der kalibrierten Kennlinie des Schattenwurfverfahrens sind prinzipiell in Bild 35 skizziert. Individuell erstellte Kalibrierkörper zur systematischen Korrektur werden darüber hinaus verwendet, um einzelne geometrische Merkmale der Gesamtkalibrierung gesondert zu prüfen. Sie bestehen aus Edelstahl und sind in vielfältigen Profilformen erstellt worden, z.B. in den Formen Rund, Vierkant, Sechskant, Achtkant.

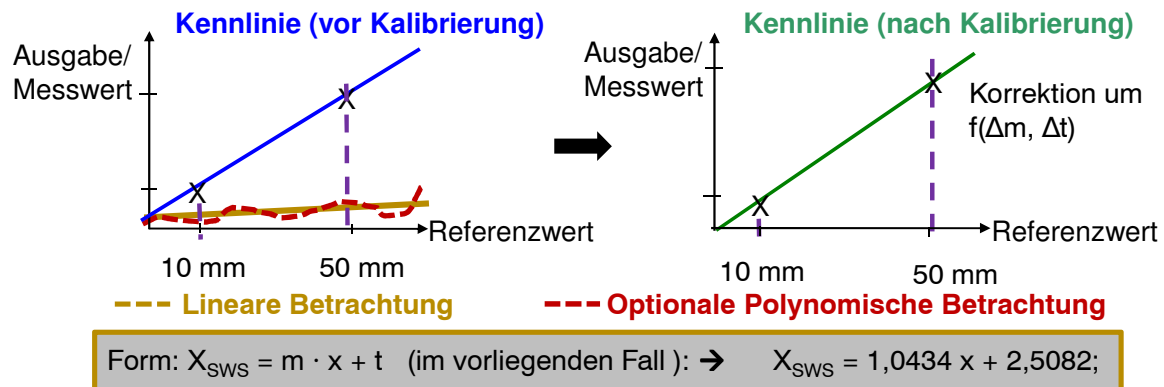


Bild 35: Kalibrierverfahren des SWS; mit eigens erstellten Prüfkörpern ermittelte systematische Korrekturgerade der Form $y = mx + t$; charakteristische Kalibrierkennwerte m und t (linearisiert)

Die gesamte Kalibrierung der Messeinrichtung muss aus Zeitgründen vollautomatisch funktionieren, was eine vollständig softwarebasierte Lösung voraussetzt. In wiederkehrenden Abständen können Überwachungsmessungen mit bekannten Werkstücken durchgeführt werden, um die Kalibrierung zu verifizieren und ggf. zu wiederholen [DIN ISO 15530-3]. Für die Steigung m der Korrekturgerade lagen bei dem verwendeten SWS die festgestellten Werte um $1,043 \text{ mm}$ und für t bei $2,508 \text{ mm}$.

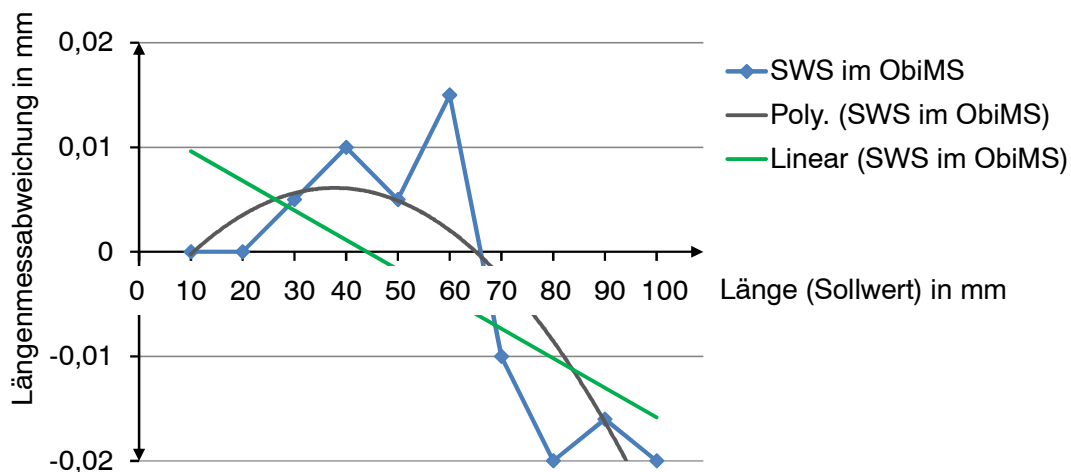


Bild 36: Messabweichungen mit dem SWS unter äußeren Einflüssen nach Kalibrierung, ermittelt in Schritten von 10 mm (auch wiederholte Messung)

Die dann verbleibenden, erreichten Messunsicherheiten bei äußeren Einflüssen (welche realistisch sind und auch in der späteren Evaluation herrschen, wie Schwingung,

Fremdlicht, Schmutz) des singulären SWS sind in Bild 36 dargestellt. Dabei ist das Verhalten des Messsystems nach Kalibrierung dargestellt sowie zwei Fälle: die linear und die polynomisch ($n = 2$) modellierte Abweichungskennlinie des singulären Messsystems, wie sie wahlweise für die systematische Korrektur des optischen Multi-Sensor-Messsverfahrens eingesetzt werden.

4.1.2 Messdatenfusion

Auf Basis der gemeinsamen Kalibrierung kann die weit verbreitete *RANSAC/NURBS* oder *ICP*-Datenfusion (iterative closest point) verwendet werden um die Fusion der Messdaten auf Basis der Grob- und Feinregistrierung vorzunehmen, welche heute die üblichen Verfahren darstellen [FISCHLER 1981]. Zunächst werden die o.g. a priori Schritte zur Datenvorverarbeitung wie Auslesen und Sortieren durchgeführt. Zur Segmentierung der Profile in überlappende und nicht überlappende Bereiche eignet sich die Vorgehensweise, die auf dem *RANSAC*-Algorithmus basiert [NÜCHTER 2006]. Dieses Verfahren errechnet aus dem Datensatz jeweils gesuchte Ersatzformelemente und wendet den Algorithmus auf diese an. Zur Berechnung eines Kreises werden z.B. mindestens drei beliebige Punkte aus den Messdaten herausgenommen um den Mittelpunkt sowie den Radius zu konstruieren. Dabei wird aus einem Datensatz nach dem Registrieren der Zugehörigkeiten auf Basis des beschriebenen Sortierverfahrens Formelementzonen (z.B. Kreis oder Linienabschnitte) als „Consensus Set“ festgelegt und iterativ auf Abstandminima untereinander geprüft. Als Nächstes wird der Abstand zu den anderen Messpunkten errechnet und dabei überprüft, wie viele in einem vorgegebenen Streuband liegen. Wenn genügend Punkte (einstellbarer Wert) gefunden wurden, die diese Bedingung erfüllen, ergibt dies das lokale Ausgleichselement (Kreis oder Gerade), [ROGERS 2000].

Die erläuterte Methode macht den gesamten Algorithmus besonders schnell und gleichzeitig robust gegen Ausreißer, was in der vorgestellten Messaufgabe essentiell ist und in den späteren Fusionstests verdeutlicht wird. Ein weiterer Vorteil dieser Methode besteht darin, dass die Messdaten vor der Weiterverarbeitung nicht sortiert werden müssen, sondern direkt in die Kalkulation einfließen können. Eine exemplarische Auswertung dreier Datensätze mit dem alternativ verwendbaren *ICP*-Algorithmus ist in Bild 37 dargestellt. Im Einzelfall kann optional entschieden werden, ob die erhöhte aufzuwendende Zeit hierfür adäquat erscheint oder nicht. In dem vorgestellten, bekanntermaßen sehr zeitkritischen, in-line Messverfahren kann auch nur eine Feinregistrierung ausreichen und Übergang in Ausgleichsformelemente, da nur *2D*-Betrachtungen vorliegen. Dann bietet sich auch der o.g. *RANSAC*-Ansatz zur Festlegung der Linienformelemente (aus den Punktformelementen für *2D*-Konturen) an, um schnell zu Lösungen zu gelangen (Regression mit üblichen Methoden mit Umwegen des o.g. Koordinatenachsentauchs ist auch möglich). Dies wird iterativ solange wiederholt, bis ein Abbruchkriterium erfüllt ist. Dieses basiert auf dem Verhältnis der letzten Iteration und der

aktuellen. Daher muss ein lokales Optimum nicht automatisch das globale absolute Optimum sein. In Experimenten und softwaregestützten Simulationen stellte sich heraus, dass die klassische Regressionsrechnung und ggf. der *RANSAC* für die vorliegenden Aufgaben erheblich schneller arbeitet als der *ICP*, weniger Rechnerauslastung verursacht und teils mit geringeren Restabweichungen funktionieren, weshalb dieser Ansatz im Rahmen der Arbeit verwendet wurde.

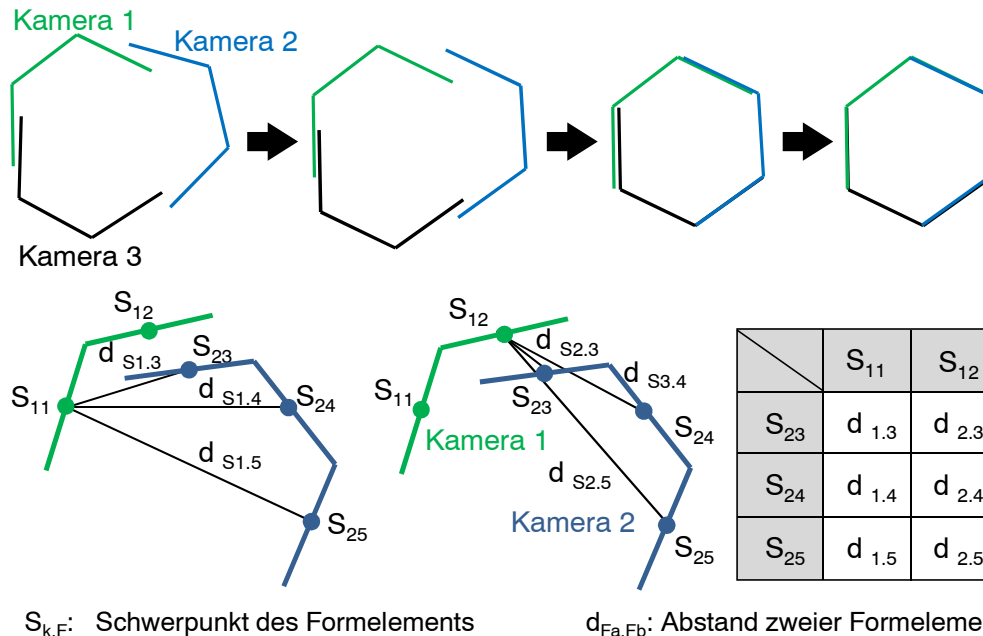


Bild 37: Datenfusion dreier Kamerabilder mit dem OMS durch Feinregistrierung im Überlappbereich und Fusion; prinzipielles Vorgehen der Feinregistrierung (hier: am Beispiel Sechskantprofil)

Jedoch sind durch Voreinstellung, von für die Auswertung zu verwendender Punktzahl und verschiedenen Ausreißerkriterien, in Simulationen erhebliche Zeitersparnisse bis Faktor 30 im Vergleich zum *ICP*-Verfahren erzielt worden. Dazu ist die Robustheit gegen Ausreißer in softwaregestützten-Simulationen als besser ermittelt und im Messbetrieb bestätigt worden. Die Ausrichtung kann jedoch auch mit einem optionalen *ICP*-Algorithmus realisiert werden, welcher entsprechend der Vorgehensweise aus [PULLI 1999] die Elemente wiederum iterativ aneinander annähert (Bild 37, oben). Hierbei wird Kamera 1 und Kamera 3 an Kamera 2 mit Hilfe des *ICP*-Algorithmus ausgerichtet, grobregistriert und feinregistriert. Daraufhin wird überprüft, zwischen welchem Überlapp die größte und die kleinste Abweichung besteht. Das Segment, an dem beide anliegen, wird iterativ erneut ausgerichtet, so dass die Abweichung sich auf beide Abschnitte gleichermaßen aufteilt. Der Vorgang wird so oft wiederholt, bis die Restabweichung sich den Vorgaben entsprechend gleichmäßig auf die unterschiedlichen Segmente verteilt hat. Ein Abbruch des Algorithmus tritt ein, sobald die Verbesserung in der Iterationsfolge gegen ein vorher vereinbartes, frei wählbares, Abbruchkriterium konvergiert.

Oft wird die Bedingung verwendet, dass die Optimierung fünfmal hintereinander unter einem bestimmten Näherungswert bleiben muss, um als final konvergiert zu gelten. Dies ist ein gewählter Wert und dient als Anhaltspunkt. Daraus folgt allerdings, dass dieser Schritt mehr Rechenzeit benötigen wird, da gleich zwei iterative Verfahren ineinander verschachtelt sind. Dieser Algorithmus und die endgültige Fusion sind nicht zwingend notwendig, sondern dienen Optimierungszwecken. Die größten Herausforderungen bestehen in zeitkritischen Anwendungen wie hier einerseits darin, dass die Messpunkte auf Grund der unterschiedlichen Abstände und Beobachtungswinkel nicht äquidistant, d.h. im gleichen Abstand zueinander, auf dem Profil verteilt sind. Dies führt zusätzlich zu einer unterschiedlichen Anzahl der Messpunkte, z.B. auf den Seiten S_{11} , S_{12} (Bild 37). Andererseits kann es vorkommen, dass bei Abrundungen an den Kanten eine Kamera eventuell die Seite etwas länger erfasst als die andere.

All das macht einen Punkt-basierten Ansatz wie den *ICP*-Algorithmus unpraktisch, da dieser eine gleiche Punktzahl von beiden Partnerelementen fordert, wobei je zwei Punkte korrelieren müssen [SHIBLA 2004]. Zudem ist diese Variante erheblich langsamer als sog. „feature-basierte“ Ansätze, bei denen meist lediglich die einzelnen Formmerkmale fusioniert werden. Die zeitliche Kritikalität der Datenfusion folgt dabei ähnlichen Komplexitäten, wie sie in Lese-, Sortier- und Auswertelgorithmen vorkommen. In guter Näherung kann etwa von einer Komplexität $K \sim x^n$ ausgegangen werden [MARESCH 2006] wie in Kap. 5.4. Die Komplexität entspricht dabei prinzipiell der Verarbeitungszeit t_V und ist nahezu direkt proportional zur Punktzahl n . Folglich führt dies für große n zu großem Zeitbedarf und damit verbundenen Einschränkungen in in-line Messverfahren, auch für die Selbstkalibrierung (Bild 25).

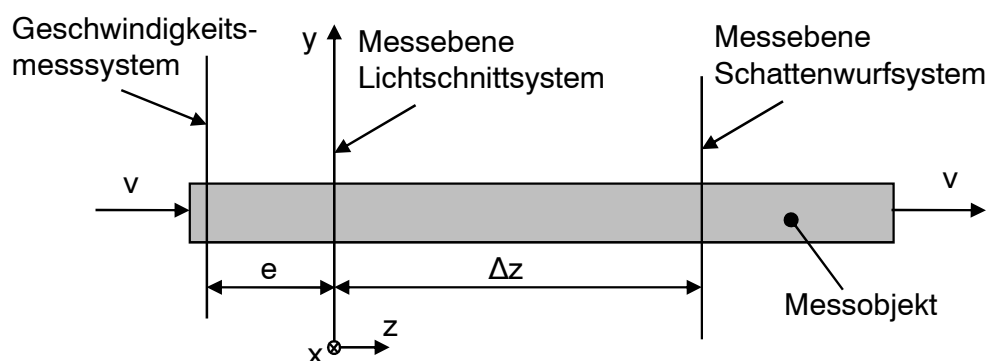


Bild 38: Zeitliche Verzögerung bei z-Profilbewegung zwischen beiden Subsystemen; dynamische Korrektur des Versatzes; Abhängigkeit von dem Integral der mittleren Objektgeschwindigkeit v , dem Abkühlgradienten und der damit verbundenen Schwindung der Profillegierung $K_{\text{Schwindung}}$

Der räumliche Versatz in Ausbringungsrichtung (Bild 38) ist als zeitlicher Unterschied zu berücksichtigen, wobei der aus dem konstruktiven Aufbau bekannte Wegunterschied Δz dem Integral der ebenso bekannten Ausbringungsgeschwindigkeit v_{z_Profil} entspricht (optische Messung auf Basis der Korrelation von Oberflächensegmenten):

$$\Delta z = \text{const}; \quad \bar{v}(t_{\Delta z}) = \dot{s} \text{ (gemessen durch Geschwindigkeitsmesssystem);} \quad (4.15)$$

Durch Linearisierung dieses Zusammenhangs – was aufgrund des trägen und gleichförmig bewegten Profilstranges zulässig ist – kann für sehr kleine Δv_z linearisiert und nach Δt (für damit auch kleine Δz) umgestellt werden zu:

$$\bar{v}_M(t_{\Delta z}) = \frac{1}{\Delta z} \cdot \int_{z_0}^{\Delta z_{\max}} \bar{v}(\Delta z) \cdot ds \quad (4.16)$$

$$\begin{aligned} \text{mit } t_{\Delta z} \rightarrow 0; \text{ und } \bar{v}(\Delta z) &\approx \bar{v}_M \Rightarrow \\ \Rightarrow t_{\Delta z} &\cong \left(\frac{\Delta z}{\bar{v}_M} + \frac{e}{\bar{v}_M} \right) - \frac{e}{\bar{v}_M} = \frac{\Delta z}{\bar{v}_M} \end{aligned} \quad (4.17)$$

Dieser Zeitunterschied wird im Messverfahren als Verzögerungszeit der Messdatenverarbeitung (Kap. 4.1.3) berücksichtigt und kontinuierlich zusammen mit der Ausbringungsgeschwindigkeit aktualisiert [BERNSTEIN 2010a].

$$L_{t0} = L_{t\Delta z} \cdot k_{\text{Schwindung}(\Delta t)} \quad (4.18)$$

Darüber hinaus kann ein Faktor $k_{\text{Schwindung}}$ berücksichtigt werden, der dem Abkühlgradienten und der Schwindung der Profillegierung während dieser Zwischenzeit von 0,05 s bis 0,5 s bei einem Δz von rund 0,5 m entspricht und somit die Fusionsunsicherheit weiter senkt. Dieser Faktor $k_{\text{Schwindung}}$ kann bis zu einem Δt von ca. 100 ms vernachlässigt werden, was durch vergleichsweise hohe Messraten des eingesetzten Geschwindigkeitsmesssystems von größer 10 Hz erreicht wird (Bild 38).

Die Mindestpunktanzahl des o.g. RANSAC-Algorithmus pro Datensatz ist die Anzahl an Punkten, welche benötigt wird, um eine Form als gültig zu erkennen. Diese hängt von der erwarteten Messpunktanzahl (pro Form) und den zu erwartenden Ausreißern ab. Mit der Auswahl weniger Punkte kann der Zeitbedarf reduziert werden [CANTZLER 1981]. Eine Möglichkeit ist dann, die Kurve mit einem „Non-Uniform Rational B-Spline“ (NURBS) zu berechnen, da hierbei jeder einzelne Knotenpunkt eigens gewichtet werden kann. Besondere Eignung ergibt sich für Freiformflächen, welche im Rahmen der Arbeit keine zentrale Rolle spielten. Folglich können die Messpunkte von Kamera 1 (von links nach rechts) weniger gewichtet und bei Kamera 2 umgekehrt berücksichtigt werden. NURBS sind Kurven, die auf Grund von bewerteten Knotenpunkten Formen approximieren. Diese beruhen auf B-Splines, welche verwendet werden um beliebig viele Kontrollpunkte für die Kurve zu verwenden und gleichzeitig den Grad des Splines beschränken zu können [MIAN 2006a]. Der Begriff „Non-Uniform“ beinhaltet, dass die Datenpunkte nicht äquidistant verteilt sein müssen und das „Rational“, dass die einzelnen Punkte gewichtet werden können. Ein weiterer Vorteil dieser Methode ist, dass der Einfluss von jedem Messpunkt auf die Kurve nur lokal ist [ROGERS 2000] und es kein Überspringen wie bei einer polynomischen Lösung gibt. Die Gewichtung der Messpunkte erfolgt über den Faktor i_w . Wenn

dieser Wert größer 1 ist, wird die Kurve näher an den Messpunkt herangeführt. Für einen Wert zwischen 0 und 1 vermindert sich der Einfluss des Punktes [FONTANELLI 2007].

Im vorliegenden Fall würde man die Punkte von Kamera 1 von links aus mit einer absteigenden Gewichtung belegen. und die der Kamera 2 von rechts aus (Bild 37). Damit gehen die Punkte mit größerer Messabweichung weniger in den Kurvenverlauf ein als die mit einer geringeren Abweichung. Welche Kamera von welcher Seite gewichtet wird, muss vorher festgelegt werden. Damit erhält der genaueste Messpunkt den Wert 1 und die anderen Punkte jeweils eine geringere Gewichtung. Theoretisch ist möglich, noch stärkere Gewichtungen zu vergeben [MIAN 2006b] und auch die Vergabe abhängig vom Beobachtungswinkel und der Profilgröße zu machen. Dies vergrößert jedoch die Rechenzeit und führte in Tests nur zu bedingt besseren Ergebnissen [GOCH 2008]. Danach werden die Messdaten der Kameras in einem Vektor zusammengefasst. An Stellen, an denen kein Überlapp vorhanden ist, wird genau so vorgegangen, nur die Kombination der Datenmengen entfällt. Nun müssen noch die Daten aller Kameras zu einem Kontrollpunkt-Vektor zusammengefasst werden. Dafür werden alle sortiert und die gewichteten Vektoren mit u zwischen den definierten Schranken a und b aneinander gefügt. Danach muss zu keinem Zeitpunkt mehr sortiert werden. Ein *NURB*-Spline (*NURBS*) vom Grad p ist grundsätzlich definiert als:

$$C(u) = \frac{\sum_{i=0}^n N_{i,p}(u) w_i P_i}{\sum_{i=0}^n N_{i,p}(u) w_i} \quad a \leq u \leq b \quad (4.19)$$

P_i sind dabei Kontrollpunkte, im vorliegenden Fall Messpunkte. Die Gewichtungen w_i und die Basis-Spline Funktion N_i auf welcher der Knotenvektor U definiert ist [KURAZUME 2002], müssen hierfür erst noch erstellt werden.

$$U = \left\{ \underbrace{a, \dots, a}_{p+1}, u_{p+1}, \dots, u_{m-p-1}, \underbrace{b, \dots, b}_{p+1} \right\} \text{ mit } u \in [a, b]; \quad (4.20)$$

Nun kann durch Substitution mit:

$$R_{i,p}(u) = \frac{N_{i,p}(u) w_i}{\sum_{j=0}^n N_{j,p}(u) w_j} \quad (4.21)$$

Und den Gewichtungen w_i die *NURBS*-Kurve grundlegend vereinfacht werden zu:

$$C(u) = \sum_{i=0}^n R_{i,p}(u) P_i \quad (4.22)$$

Die Basisfunktion ergibt sich dann für die Bedingungen:

$$N_{i,0}(u) = \begin{cases} 1 & \text{falls } t_i \leq t \leq t_{i+1} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (4.23)$$

Nach einigen trivialen Umformungen ergibt sich:

$$N_{i,p}(u) = \frac{(t - t_i)N_{i,p-1}(u)}{t_{i+p-1} - t_i} + \frac{(t_{i+p} - t)N_{i+1,p-1}(u)}{t_{i+p} - t_{i+1}} \quad (4.24)$$

Hierbei sind t die Knotenpunkte aus dem Knotenvektor U . Angegeben muss der Grad des *NURBS* sein, welcher in der Regel kubisch gewählt wird (3. Grad). Höhere Grade führen zu steigender Rechenzeit und nur bedingt genaueren Kurvenverläufen für einfache Formelemente. Darüber hinaus werden die Messpunkte mit ihren zugehörigen Gewichtungen benötigt [ROGERS 2000]. Durch eine systematische Korrektur und eine Feinkalibrierung kann für viele Merkmale wie o.g. auf die endgültige Fusion teilweise oder ganz verzichtet werden. Die Datenfusion muss einen Überlappbereich von mindestens 8 - 10 % des Umfangs zwischen mehreren Datensätzen erreichen um die Erfordernis von optimalen Sensoreinstellungen (Kap. 4.2.2), die Auswertung der geometrischen Merkmale (Kap. 4.1.3) und die Visualisierung zu leisten. Die Fusion des Lichtschnittverfahrens und des Schattenwurfverfahrens erfolgt durch Ersetzen des Hauptlängenmaßes und systematischer, kontinuierlicher Korrektur des Merkmalswertes Gesamtlänge um den vorzeichenbehafteten Betrag b [VDI/VDE 2617-8]. Zudem können die dazwischenliegenden Bereiche profilspezifisch linear oder polynomisch approximiert korrigiert werden, was im Rahmen der Arbeit nicht weiter vertieft werden soll, da der Ansatz aus Gründen der rechnergestützten Verarbeitungszeiten derzeit nicht realisierbar ist. Die Korrektur um den Festwert, bzw. linear interpoliert, führt bereits zu erheblich verbesserten Ergebnissen und reicht in den meisten Fällen vollkommen aus. Durch Reduktion der zur Verfügung stehenden Messpunkte für die Datenfusion kann so die Rechenzeit erheblich verkürzt werden. Im nächsten Schritt wird der fusionierte Datensatz metrologisch korrekt auf die Längeneinheit Meter rückgeführt um belastbare Ergebnisse in Bauteilkoordinaten zu erhalten.

4.1.3 Auswerteverfahren

Die Auswertung erfolgt profilformgerecht mit individueller Visualisierung, wodurch für jedes Profil auch eigene Einstellungen vorzusehen sind. Die Option das Messverfahren, an eine kontinuierliche Visualisierung angebunden werden zu können, ist eine Kundenanforderung (Kap. 1 und Kap. 2). Es können diverse wissenschaftliche Kriterien angelegt werden, um Formelemente rückzuführen [DIN 1319-1]. Für die Durchmesserermittlung von Rundprofilen sind die Auswertekriterien: Gauß, Hüll- und Pferchkriterium implementiert. Dies entspricht dem, was in der Fertigungsmesstechnik in den meisten Fällen ausreicht, um auch funktionsbezogene Toleranzen und Spezifikationen zu prüfen [DIN EN ISO 1101]. Darüber hinaus kann die Winkligkeit, die Geradheit und die Parallelität ausgewertet und ausgegeben werden. Die diesbezüglich gültigen Normen und Stan-

dards wie das „Vocabulaire international des termes fondamentaux et généraux de métrologie“ [VIM 2008] sowie Anmerkungen des „Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement“ (*GUM*) wurden hierbei konstruktiv berücksichtigt. Die Datenkontur wurde mittels der zur Verfügung stehenden Bildpunkte von den Kameras als Koordinatenwerte eingelesen und mittels o.g. Schwellwertverfahren in die Messsoftware (Kap. 4.6) extrahiert. Daraufhin müssen diese Messdaten sortiert und entsprechend der bereits erläuterten Abläufe aufbereitet werden. So findet z.B. auch eine bildbezogene Bereichseingrenzung a priori statt (Bild 39). Dabei wird eine relevante Zone um den physikalischen Bildbereich, die sog. „region of interest“ gebildet, welche exklusiv für die weitere Messung betrachtet wird.

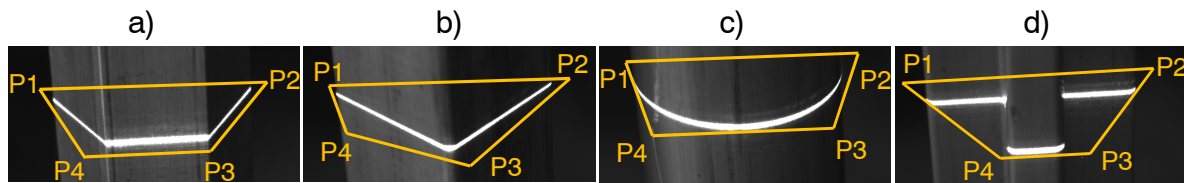


Bild 39: Festgelegtes Messfeld; Reduktion der Kalibrierzeit und der Messauswertung durch optimierten effektiven Bildbereich für die Auswertung; a) Sechskant-, b) Vierkant-, c) Rund-, d) T-Profil

Durch den kleineren effektiven Bildbereich wird Auslesezeit bis zu 1 ms pro Bild gespart (vgl. auch Bild 22). Danach werden daraus vollautomatisch fusionierte Elemente (Bild 37, oben) und daraus geometrische Einzelmerkmale gebildet. Diese einzelnen geometrischen Merkmale sind im wesentlichen Kreissegmente und Teilgeraden (Strecken). Auf Ihrer Basis werden dann durch ausschließliches Verbinden der Punkte ganze Profilobjekte rückgeführt, die über die o.g. Kalibrierung in ihrer Ausprägung bereits der Längeneinheit Meter entsprechen. Dieses Vorgehen standardisiert die Messprozedur und entspricht einem zeitoptimalen, in der Koordinatenmesstechnik üblichen, Vorgehen [WECKENMANN 1992]. Soll- und Istkontur können sowohl gleichzeitig als auch einzeln visualisiert werden. Die zu messenden Merkmale können unabhängig voneinander dargestellt und automatisch abgespeichert werden. Die häufig benötigte Rundheit bestimmt sich mit dem Maximal- und Minimaldurchmesser nach:

$$\frac{D_{\max} - D_{\min}}{2} = r_{\max} - r_{\min} \quad (4.25)$$

Die Formabweichung Exzentrizität wird in % ausgewertet nach [DIN V ENV 13005]:

$$\frac{s_{\max} - s_{\min}}{s_{\max} + s_{\min}} = \frac{\sqrt{(x_{\text{au\ss en}} - x_{\text{innen}})^2 + (y_{\text{au\ss en}} - y_{\text{innen}})^2}}{r_{\text{au\ss en}} - r_{\text{innen}}} \quad (4.26)$$

Die gesamte Kalibrier- und Auswertprozedur erfolgt mittels Softwareunterstützung (Kap. 4.6). Die Auswertung findet kontinuierlich im laufenden Fertigungsprozess statt. Dennoch können Messwerte wahlweise in Historien abgelegt sowie a posteriori nachbe-

reitet werden, um entweder zu einem späteren Zeitpunkt verwendet oder nachträglich auf Basis neuer Erkenntnisse analysiert zu werden (Visualisierung der Messergebnisse ist in Kap. 4.6 beschrieben). Dazu werden vier Vektoren berechnet (Bild 39).

$$\vec{v}_{12} = \begin{pmatrix} P_2x - P_1x \\ P_2y - P_1y \end{pmatrix} \quad (4.27)$$

$$\vec{v}_{23} = \begin{pmatrix} P_3x - P_2x \\ P_3y - P_2y \end{pmatrix} \quad (4.28)$$

$$\vec{v}_{34} = \begin{pmatrix} P_4x - P_3x \\ P_4y - P_3y \end{pmatrix} \quad (4.29)$$

$$\vec{v}_{41} = \begin{pmatrix} P_1x - P_4x \\ P_1y - P_4y \end{pmatrix} \quad (4.30)$$

Daraus werden folgende, für weitere Operationen notwendige, Hilfsvektoren gebildet:

$$\vec{n}_{12} = \begin{pmatrix} v_{12}y \\ -v_{12}x \end{pmatrix} \quad (4.31)$$

$$\vec{n}_{23} = \begin{pmatrix} v_{23}y \\ -v_{23}x \end{pmatrix} \quad (4.32)$$

$$\vec{n}_{34} = \begin{pmatrix} v_{34}y \\ -v_{34}x \end{pmatrix} \quad (4.33)$$

$$\vec{n}_{41} = \begin{pmatrix} v_{41}y \\ -v_{41}x \end{pmatrix} \quad (4.34)$$

$$\vec{v}_{P_{Mess}P_{Eck}} = \begin{pmatrix} P_{Eck}x - P_{Mess}x \\ P_{Eck}y - P_{Mess}y \end{pmatrix} \quad (4.35)$$

Damit können die Distanzen ermittelt werden und durch die Punkte sind die nachstehenden elementgebundenen Abstände festgelegt.

$$d_{PMessP1} = \vec{v}_{PMessP1} \cdot \vec{n}_{12} \quad (4.36)$$

$$d_{PMessP2} = \vec{v}_{PMessP2} \cdot \vec{n}_{23} \quad (4.37)$$

$$d_{PMessP3} = \vec{v}_{PMessP3} \cdot \vec{n}_{34} \quad (4.38)$$

$$d_{PMessP4} = \vec{v}_{PMessP4} \cdot \vec{n}_{41} \quad (4.39)$$

Der untersuchte Messpunkt liegt dann in dem Bereich, wenn für alle vier gilt:

$$d_{PMessPEck} \leq 0 \quad (4.40)$$

Daraufhin können die Punkte mittels von Auswerteverfahren (Heapsort, Quicksort, Bubblesort, Linesort u.a.) sortiert, segmentiert und dann softwareunterstützt anhand von

Regressionsgeraden als Formelemente ausgewertet werden [MARESCH 2006]. Vorab wird anhand eines Toleranzbandes bestimmt, ob die Punkte grundsätzlich zugehörig sind oder nicht (Bild 40). Dabei sind z.B. die Koordinatenachsen zu tauschen, wenn beim linearen Regressionskriterium ungünstige Abhängigkeiten zwischen x - und y - Achsenabschnitt ermittelt werden. Sind wie in L-, T-, H- oder anderen Profilen wie dem Schlossprofil überlagernde Strukturen auszuwerten, so werden die Auswertungen mehrstufig vollzogen.

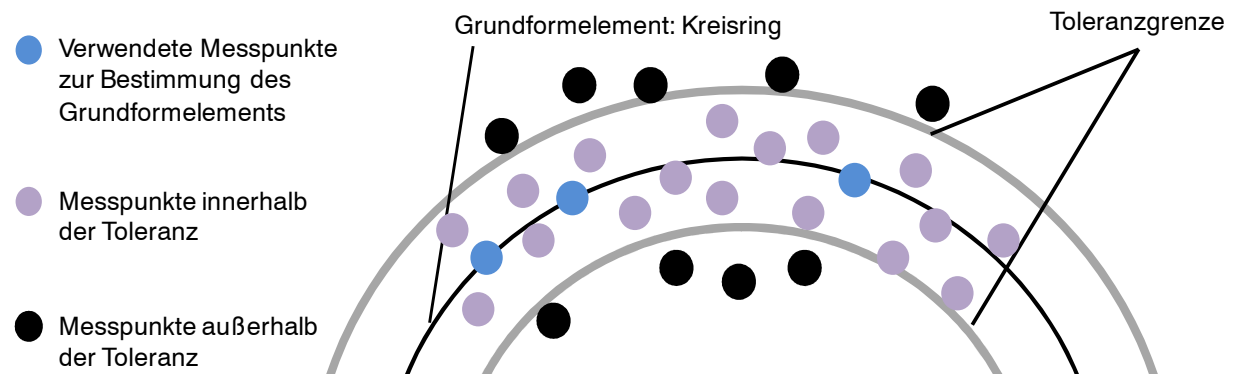


Bild 40: Toleranzbereich zur Anerkennung detektierter Punkte für die Messauswertung

Zunächst werden in einem ersten Schritt die umzeichnenden Eckpunkte um den Flächenschwerpunkt als Randpunkte festgelegt, um die für die Regression verwendeten Punktsegmente zu klassifizieren. Dies geschieht, indem in den durch die Spezifikation zu erwartenden Zonen für diese Eckpunkte nach jenen am weitesten vom Flächenschwerpunkt (Bild 41) des Messobjektes entferntesten Punkten gesucht wird.

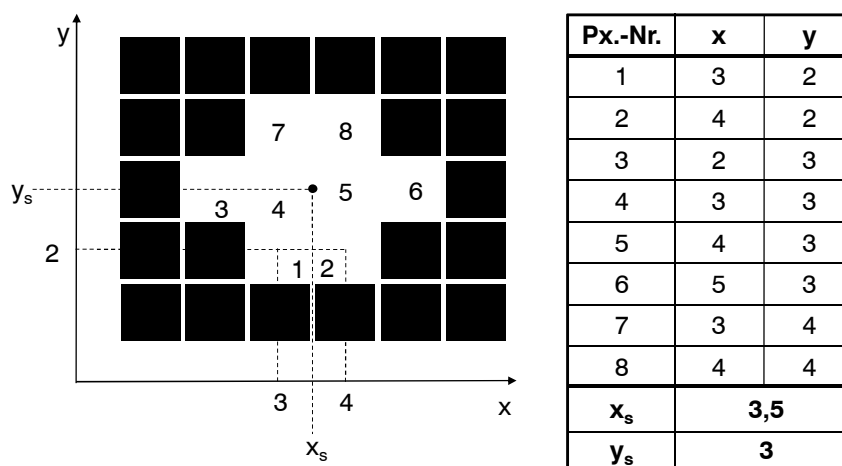


Bild 41: Beispielhafte Schwerpunktbestimmung (x_s , y_s) der Messdaten an einem fiktiven Bauteil

In einem zweiten Schritt werden dann die Zwischenstützpunkte in zu erwartenden Winkelbereichen (Kreiszeiger um den Schwerpunkt mit aufsteigendem Winkelwert gegen den Uhrzeigersinn) ermittelt. Durch Anwendung des Regressionkriteriums – alternativ kann der o.g. RANSAC-Algorithmus verwendet werden – auf diese Teilbereiche und Verschneidung der einzelnen Liniensegmente oder Teilkreise (Hüll-, Kreis, Pferchkriterium), werden die den Messdatensatz charakterisierenden Formelemente gebildet. Diese wer-

den dann für die Bestimmung der geometrischen Merkmale (Länge, Längentoleranz, Geradheit, Parallelität, Rechtwinkligkeit und Eckenradien) verwendet. Auf Basis dieser Ergebnisse erfolgen die Visualisierung, der Soll-/Ist-Vergleich und die Bewertung der Messergebnisse hinsichtlich Konformität. Anhand des o.g. Regressionskoeffizienten b wird entschieden, ob die Regression nach Bildung der zugehörigen Umkehrfunktion die Funktionalität getauscht, ausgewertet und mittels Rücktausch zurückgegeben werden muss. Dies ist der Fall, sofern die Lage der Ausgleichsgeraden quasi-parallel zu einer Achse ist und folglich die Regressionsgüte nicht ausreichend ist.

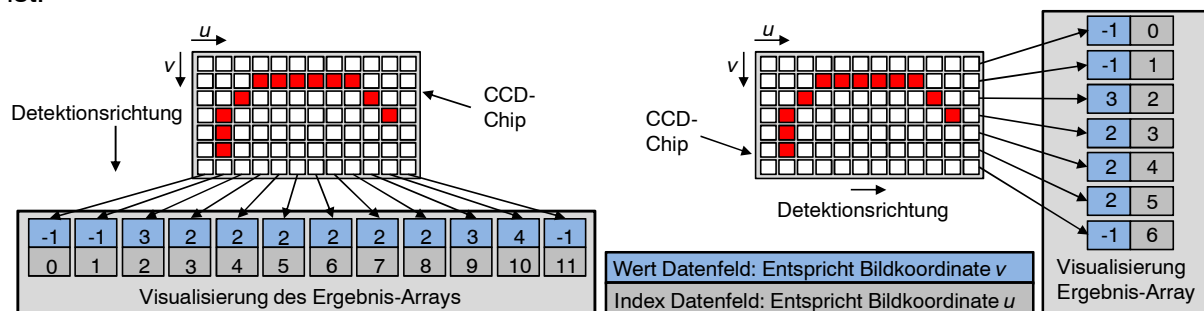


Bild 42: Doppeltes Auslesen (zeilen-/spaltenweise) der LSS-Bilder zur Informationsmaximierung

Werte deutlich abweichend von 1 für b sind aus Gründen der dann schlechten rechnerischen Güte zu vermeiden. Das Prinzip folgt der linearen Regressionsrechnung mit der Option von Parametertausch für Grenzwertprobleme, welche bei Quasiparallelität zu einer Hauptachse auftreten können. Die Güte nimmt somit von 45° aus hin zu Quasi-Parallelen der Achsen des Koordinatensystems nichtlinear und asymmetrisch zur abhängigen Achse der hinterlegten Funktion seiner asymptotischen Grenzen ab [BRONSTEIN 2008]. Dies wird durch Tausch der Achsen, bzw. Bildung der Umkehrfunktion bestmöglich begrenzt. Für beide Fälle wird die Quadratsumme der Residuen e^2 (Gleichung 2.8) minimiert und der bessere Fall verwendet. Dann erfolgt der Rücktausch. Die Berechnung der Längen erfolgt mittels Lotpunkten orthogonaler Vektoren von einer Geraden auf die Gegenüberliegende, bzw. gemäß den gängigen Verfahren zur Bestimmung von Parallelität und Geradheit.

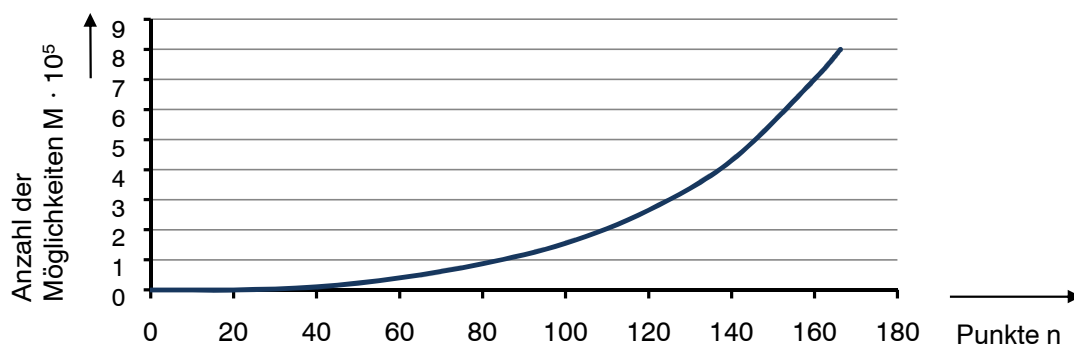


Bild 43: Nichtlinearer Anstieg der Komplexität bei steigender Punktzahl n durch die exponentiell steigende Zahl der entstehenden kombinatorischen Möglichkeiten M (hier: Anwendung im OMS)

Zur Klassifizierung der Punkte in einzelne Elemente müssen diese vorsortiert werden, wofür geeignete Sortierverfahren notwendig sind (auch Kap. 5.4). Der Quicksort-Algorithmus bildet für die vorliegenden Anforderungen des Messverfahrens den besten Kompromiss aus Schnelligkeit, Eindeutigkeit, Stabilität und Zuverlässigkeit. Das WKS der Messdaten sollte aus Kundensicht mit dem des Bauteils übereinstimmen (Bild 41), [DEMANT 2002]. Das Auslesen des Kamerachips ist durch zeilen- und spaltenweises Selektieren und arithmetisches Mitteln (speziell bei quasiparallelen Messobjektkonturen zu einer Matrixreihe) genauer möglich (Bild 42). Daneben führen Effekte wie z.B. „Blooming“ häufig zu schlechten Bildern. Für alle Profiltypen sind die vorgestellten Verarbeitungsschritte gültig, wobei für einige die Komplexität M deutlich größer aufgrund großer n wird (Bild 43). Die Zahl verwendeter Punkte einer Einstellung ist nichtlinear proportional zur benötigten Auswertezeit, von der in dieser Applikation wie o.g. mit rund $20 \cdot 10^{-3} \text{ s}$ (pro Bild) wenig zur Verfügung steht. Diese Zusammenhänge wurden in vergleichbaren Fragestellungen bereits untersucht [NÜCHTER 2006]. So ist das H-Profil z.B. das anspruchsvollste Standardprofil, u.a. wegen der multiplen Hinterschneidungen und der großen Umfangswinkligkeit von $720^\circ (8 \cdot 90^\circ)$, (später auch Bild 61). Der theoretische Zeitbedarf des Auswerteverfahrens ist in Bild 43 zu erkennen. Ab ca. 150 Punkten/Bild steigt folglich die Komplexität (äquivalent der Zeitbedarf) überproportional.

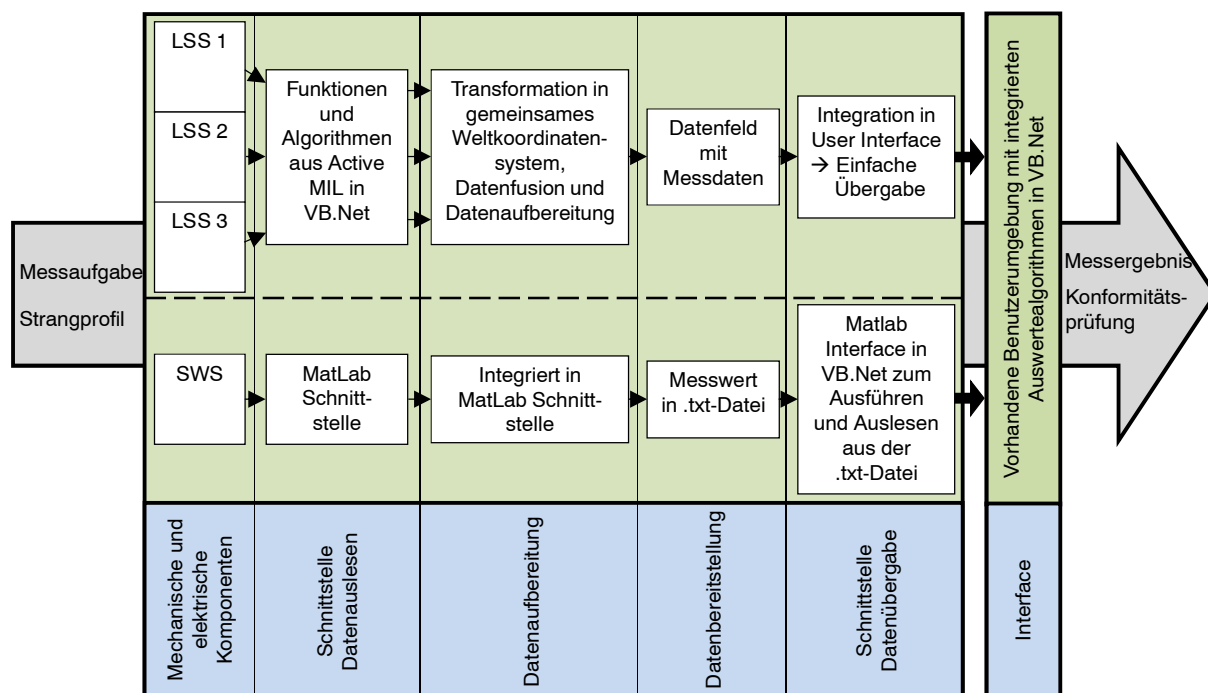


Bild 44: Ablauf der Messdatenverarbeitung mit dem OMS: Messaufgabe zum Messergebnis (teilweise vereinfacht, Messfrequenz 25 Hz); LSS: Lichtschnittsystem, SWS: Schattenwurfsystem

Die eigentliche Datenverarbeitung folgt dem Prinzip der Rückführung von Einzelpunkten in Formelemente anhand derer die Messauswertung durchgeführt wird. Dabei werden alle Punktwolken auf Kreise, Teilkreise, Strecken und Geraden rückgeführt und auf Basis

dieser die Konformitäten festgestellt oder anhand ihres Schwerpunkts (Bild 37). In Anlehnung an Bild 37 ist in Bild 44 ersichtlich, wie die Verarbeitungsschritte und die Funktionsweise darauf aufbauen.

4.2 Konzeption des Versuchsträgers

Insgesamt sind mindestens acht optische Sensorkomponenten, bestehend aus sechs Einzelkomponenten (drei Kameras, drei Laserfächer) des Lichtschnitt-Subsystems und zwei (Lichtsender und optischer Detektor) des Schattenwurf-Subsystems vorhanden. Diese müssen positionierbar und mechanisch steif verbunden, gleichzeitig jedoch in Rotation und Translation fein verstellbar sein. Die Kabelführungen und die Rechneranbindung sind im Sinne einer variablen Einstellung des Messverfahrens anwendergerecht vorzusehen (auch Kap. 4.2.2). Wegen der zu vermeidenden fertigungstechnischen Beeinträchtigungen und der thermischen Wärmestrahlung der Messobjekte müssen kleine räumliche Abmessungen und ausreichende optische Abstände kombiniert werden. Dennoch erfordert die o.g. erforderliche Messunsicherheit, dass die Sensoren, prinzipbedingt durch Strahlengang und effektive Auflösung im Messfeld, nicht zu weit vom Messobjekt entfernt sein dürfen [LASER COMPONENTS 2010]. Deren Lage muss ebenso in Abstand und Winkel reproduzierbar sowie mechanisch präzise eingehalten werden (Kap. 4.2.1). Der prototypische Versuchsträger wurde am Lehrstuhl Qualitätsmanagement und Fertigungsmesstechnik der Universität Erlangen-Nürnberg im Zeitraum von 2007 bis 2010 realisiert (Bild 45).

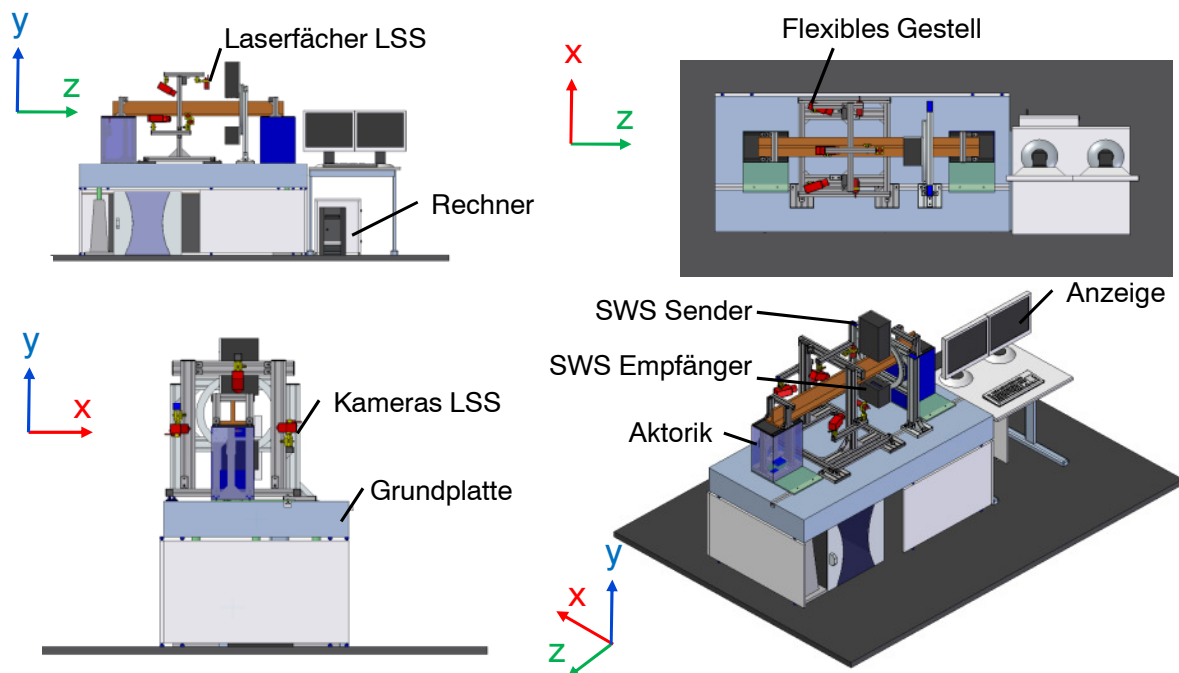


Bild 45: Konstruktive Realisierung für das optische Multi-Sensor-Messverfahren mit aufgelegtem T-Profilstück von 1,5 m Länge; Darstellung in drei Ansichten; rechts unten: isometrische Darstellung

4.2.1 Konstruktive Eigenschaften

Der zur Verfügung stehende Bauraum für das optische Multi-Sensor-Messsystem (OMS) beträgt in den typischen Anwendungen max. 1 m^3 (Breite: $0,8\text{ m}$ und Tiefe sind mit 1 m sind begrenzt, die Höhe meist nicht). Die mechanischen Steifigkeiten bei gleichzeitigen minimalen werkstoffseitigen Temperaturgradienten im Aufbau und nichtrostende Eigenschaften erfüllen Aluminiumlegierungen. Aus wirtschaftlichen Gründen und wegen der Flexibilität wurde für den Verfahrensprototyp ein Standardbaukasten modularer Rahmenprofile gewählt. Diese zeichnen sich durch schnelle Montage, einfache Verstellung und steife Verbindungen in verschiedene Raumrichtungen aus, was der Ausrichtungsqualität der Lichtquellen zu Gute kommt (Bild 46 und Bild 47), [SCHÄFTER+KIRCHHOFF 2010].



Bild 46: Prototyp des OMS; oben: Seitenansicht, unten links und rechts: Schrägansichten

Ein für spätere Evaluationen (Kap. 5.3) notwendiges Kühlverfahren des OMS muss so beschaffen sein, dass die freiwerdenden Energiemengen durch die Strahlung der Messobjekte abgeführt werden können. Dabei ist zu jedoch sicherzustellen, dass die

Strahlengänge nicht abgeschattet werden und dennoch erhebliche Wärmeanteile (insbesondere durch Strahlung) mittels Kühlkörpern direkt abgeschirmt werden. Verfahrenskonzepte mit Luftkühlung führen die zu Wärmemengen nicht ausreichend ab, wodurch eine Fluidkühlung erforderlich wird [PROFOS 1992]. Wegen der einfachen Verfügbarkeit und der großen Wärmekapazität ist Wasser anderen Medien, wie z.B. Öl, vorzuziehen. Ein geschlossenes Kühlverfahren zum Messverfahren mit externen Wärmetauschern kann für seriennahen Betrieb aus Gründen der geringeren Kosten empfohlen werden, (Kap. 5.3.3), [BA-MESSTECHNIK 2010]. Um realistische Verhältnisse im Laboratorium zu erzeugen, kann eine Aktorik das Profil zweiachsig mit $1\text{ Hz} - 5\text{ Hz}$ und mehreren mm Amplitude bewegen [WECKENMANN 2008].

4.2.2 Flexibilität und Variabilität des Messverfahrens

Alle Beleuchtungen und Sensoren der Lichtschnittsysteme sind in vier Freiheitsgraden (drei Winkeln und dem Objektstand) einstellbar vorgesehen, da sonst viele Profiltypen nicht gemessen werden können oder im anderen Fall weite Teile des effektiven Beobachtungsbereichs ungenutzt bleiben (Bild 47).

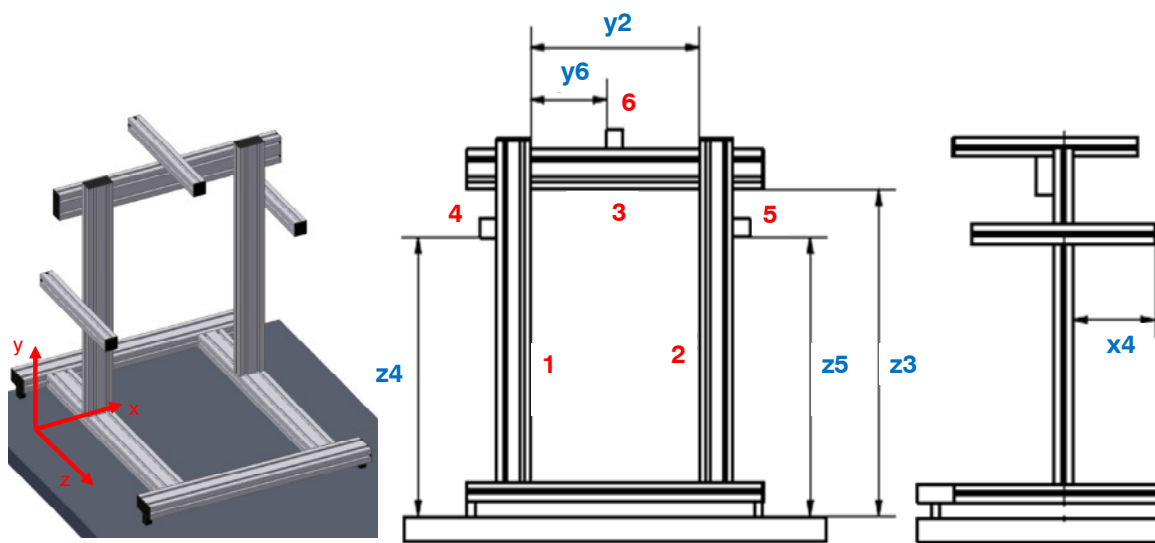


Bild 47: Einstellbares prototypisches Gestell zum OMS mit den geometrischen Geräteachsen x , y und z und Komponentenverstellbereichen $1, 2, n \dots$; Konzept adaptierbar für andere Anwendungen

Das SWS muss zumindest im Ganzen frei um das Messobjekt rotierbar und arretierbar sein (Bild 48). Die Kabelführungen müssen sämtliche Sensorbewegungen am Gestell zulassen. Die o.g. Schärfentiefenbereiche der optischen Systeme sind bestmöglich auszunutzen. Alle Systeme müssen frei per Hand einstellbar sein, mit der Option, zu einem späteren Zeitpunkt motorische Verstellungen bedarfsorientiert nachzurüsten. Ein Mindestabstand, ein Maximalabstand, sowie diverse Parameter sind bestmöglich einzuhalten (Kap. 4.5). Die Kabelführungen müssen die Bewegungen zulassen, dürfen aber zu keinem Zeitpunkt den Messbereich abschatten oder die Profilbewegung behindern. Dabei

müssen Messobjekte zwischen 10 mm und 100 mm durchweg mit Messunsicherheiten $< 100\text{ }\mu\text{m}$ trotz Profilschwingungen, Fremdlicht und umgebenden Stäuben ermittelt werden.

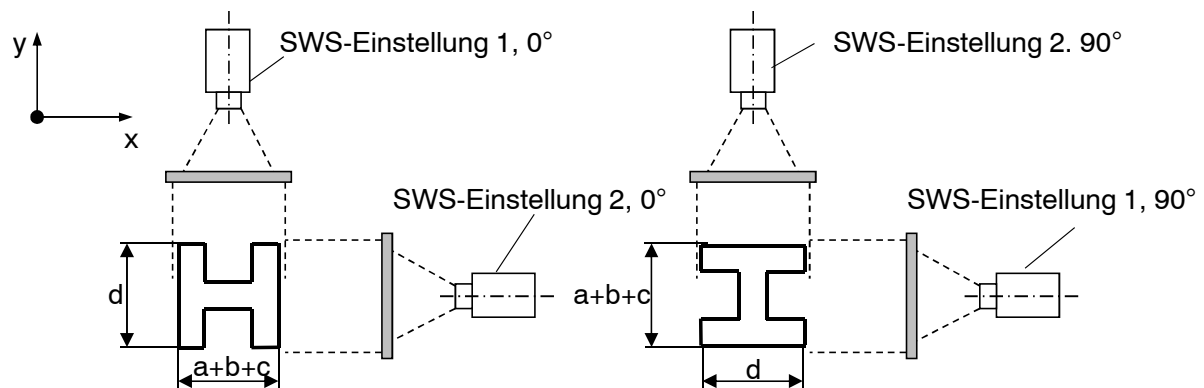


Bild 48: Einstellverfahren SWS (hier: H-Profil); zwei Einstellungen für zwei zu bestimmende Hauptmaße ($a + b + c$, d) zur systematischen Korrektur, Verkippung vernachlässigt (auch Bild 21)

4.2.3 Leistungsbeschreibung

Das OMS verfügt über drei LSS, welche in ihren Beleuchtungseinheiten jeweils hohe regulierbare Lichtleistung (hier: 58 mW) günstiger Wellenlänge (hier: 658 nm) bereitstellen (Kap. 4.4). Der Öffnungswinkel ergibt sich aus Mindestabstand und bereitzustellende Linienlänge (hier: 40°), der Zenit des Schärfentiefenbereiches liegt dann entsprechend (hier: in 240 mm Entfernung zum Strahlaustritt). Die Beobachtungseinheit besitzt lichtempfindliche CCD-Kameras mit breitbandigem Bildformat (hier: 1920×1080 Pixel) bei einer hohen Bildwiederholrate (hier: 20 fps). Das SWS stellt hohe Messfrequenzen (hier: 500 Hz) bereit, wobei immer eine runde Anzahl (hier: 25) Datensätze arithmetisch gemittelt und mit einem Datensatz des LSS kombiniert werden (Kap. 4.1.6). Durchgeführte Versuche, statt einer arithmetischen Mittelung den Median der Messwerte bzw. andere statistische Verfahren zu verwenden, waren nicht zielführend. Daher wurde der arithmetische Mittelwert als ausreichende Methode festgelegt mit der Option, auch den Median einzustellen, der robuster gegen Ausreißer wirkt. Die Messzeit des vorgestellten optischen Multi-Sensor-Messverfahrens in dem realisierten prototypischen Aufbau, bei typischer Einstellung, beträgt $< 35 \cdot 10^{-3}\text{ s}$. Die Kameras sind mit Objektiven für o.g. Referenzabstand von 240 mm , integrierten Bandfiltern nach dem Interferenzprinzip gegen ultravioletes sowie infrarotes Licht ausgestattet, um Fremdlicht weitgehend vom Nutzlicht fernzuhalten. Eine automatische Belichtung und Kontrasteinstellung der Kameras stellt bestmögliche Verhältnisse bei erschwerten o.g. Umgebungsbedingungen sicher.

Das SWS funktioniert eigenständig (auch bedarfsweise autonom vom LSS) mit ähnlichen Wellenlängen (hier: 652 nm) und geringen Lichtleistungen (hier: 1 mW). Das hier eingesetzte Subsystem der Baureihe DO-100 der BA-Messtechnik GmbH arbeitet mit einem empfindlichen Fotodetektor kurzer Belichtungszeit. Das in Kap. 4.1.1 beschriebene lineare

Korrekturverfahren mittels Kennlinie (mit Offset- und Steigungskorrektur) erreicht hierbei Messunsicherheiten von kleiner $10\ \mu\text{m}$ innerhalb eines Messbereichs von $100\ \text{mm}$ (Prinzip in Bild 36). Dies wurde in einer eigenen Messunsicherheitsanalyse validiert (Kap. 5.2.1.). Zum SWS gehören ein 19“-Rack mit dafür vorgesehenen Schnittstellenkästen und weitere Peripheriegeräte sowie einige Spezialkabel und Applikationshilfen (z.B. Adapter), auf die im Rahmen dieser wissenschaftlichen Arbeit nicht weiter eingegangen wird. Die Messsoftware (Kap. 4.6) arbeitet mit einem *Microsoft Windows®*-PC (hier: Betriebssystem: *Windows XP® mit Servicepack 3*) als Auswerterechner, welcher über Gig-Ethernet-Anschluss verfügt. Darauf wird *MATLAB® 2009*, *Visual Basic.Net® 2009* und die *MIL Library® 9.0* als Basis für eine eigene Messsoftware verwendet. Die MIL-Bibliothek von Matrox gilt als eine der modularsten und leistungsfähigsten Entwicklungsbibliotheken für Bildbearbeitung [MIL 2009]. Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Messsoftware ist mit geringem Adaptionaufwand in ähnlichen Messsystemen vergleichbar zu implementieren.

4.3 Geforderte Eigenschaften bei Sensorauswahl

Die Sensoren des OMS müssen alle dauerlauffähig sein. Große Lichtempfindlichkeit sowie eine prinzip- und bauartbedingte Robustheit gegen Staub, Schmutz, Feuchte und Temperatur müssen gegeben sein.

4.3.1 Technische Anforderungen

Die optischen Eigenschaften der Kameras und der Objektive müssen für den Einsatzzweck ausgelegt werden, wobei verschiedene Bauformen von Objektiven verwendbar sind. Telezentrische Objektive sind typischerweise voluminös gebaut und besitzen im Strahlaustrittsquerschnitt mindestens die Querschnittsfläche des zu messenden Objekts (hier $> 100\ \text{mm}$). Trotz Ihrer teils günstigen optischen Eigenschaften (z.B. großer Lichtstärke) scheiden telezentrische Objektive mangels erforderlichen Bauraumes für die Realisierung des prototypischen Messverfahrens aus (Funktionsweise in Bild 49).

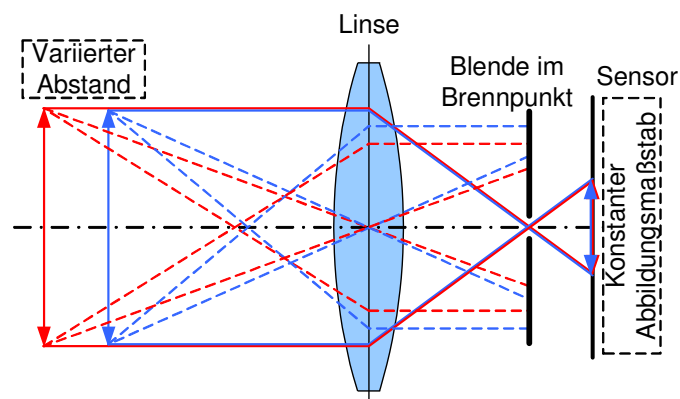


Bild 49: Telezentrisches Objektiv für optische Messsysteme, blau: Nahpunkt, rot: Fernpunkt

Entozentrische Objektive sind meist deutlich kleiner und haben einen anderen optischen Strahlengang. Sie neigen jedoch eher zur Linsenverzeichnung und sind aufgrund der geringeren Eintrittsfläche lichtschwächer, was häufig Zusatzanforderungen an die Belichtung, längere Belichtungszeiten und eine noch exaktere Kalibrierstrategie notwendig macht (Kap. 4.1.1 und Kap. 4.6 in Bild 50), [THÖNIß 2006].

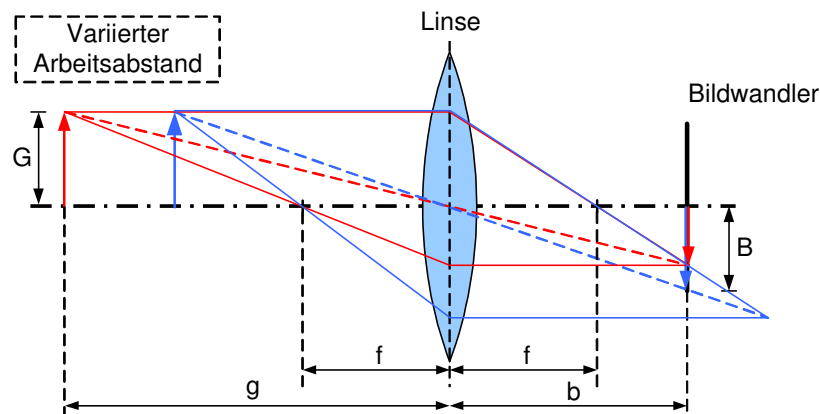


Bild 50: Entozentrisches Objektiv, blau: Nahpunkt, rot: Fernpunkt; B entspricht der Bildgröße, G der Objektgröße, g der Gegenstandsweite, b dem Bildabstand und f der Brennweite

Entscheidend ist jedoch eine große Schärfentiefe zur Befähigung des Messverfahrens für große Objekte (hier: bis 100 mm Querschnitt) bzw. große Tiefenschärfenbereiche hinsichtlich der optischen Achse (hier: ca. $\pm 50\text{ mm}$), Skizzierung der Schärfentiefe in Bild 51. Wegen der Summe Ihrer positiven Eigenschaften werden in der vorliegenden Realisierung letztlich entozentrische Kameraobjektive verwendet [PENTAX 2010].

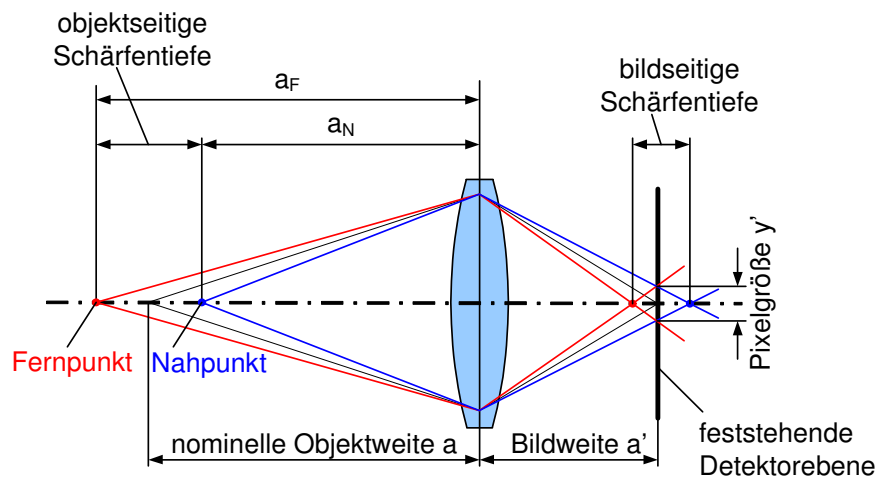


Bild 51: Schärfentiefenbereich einer typischen Kameraanordnung [THÖNIß 2006], a_F entspricht dem Abstand des Fernpunkts, a_N dem Abstand des Nahpunkts

Die Lichtempfindlichkeit der Beobachter ist für ein LSS sehr wichtig wegen der zu erwartenden Interferenz mit der abgestrahlten Infrarotstrahlung des Messobjekts (Kap. 4.4.3). Daher muss die Quanteneffizienz der lichtempfindlichen Sensorschicht besonders hoch sein [ABRAMOWITZ 2010]. Der häufig in Prozent angegebene Parameter entspricht dem

Anteil der einfallenden Photonenanzahl n_P , welcher in verwendbare Elektronen n_E umgewandelt wird.

$$Q_E = \frac{n_E}{n_P} \quad (4.41)$$

Die Quanteneffizienz ist abhängig von der Wellenlänge des Lichts, dem Füllfaktor und vom Substratmaterial. Da jedoch für die Bildsensoren meist Silizium verwendet wird, ist die o.g. Abhängigkeit für das vorgestellte Messverfahren vernachlässigbar. Die Empfindlichkeitsbandbreite typischer Bildsensoren umfasst das sichtbare Spektrum zwischen $\lambda = 400 \text{ nm}$ bis 1000 nm [KODAK 2006]. Im Allgemeinen besitzt ein Bildsensor sein Maximum an Quanteneffizienz im grünen Lichtspektrum (ca. 500 nm) und verfügt im Wesentlichen über geringere Effizienz im roten ($> 700 \text{ nm}$). In den meisten Fällen wird bei Sensoren in Datenblättern nicht die absolute, sondern lediglich die relative Quanteneffizienz in Bezug auf den Maximalwert angegeben [FUEZESSY 1996].

Ein weiteres Sensorkriterium ist das sog. Sättigungssignal: Dieses entspricht der maximalen Anzahl der photoinduzierten Ladungen, die im Potentialtopf eines Bildelements gesammelt werden können, und wird auch „Full-Well-Capacity“ („FWC“) oder „Saturation Signal“ genannt. Große FWC-Werte bedeuten, dass der Sensor einen großen Helligkeitsbereich erfassen kann, da einzelne Pixel intensiver beleuchtet werden können bis sie in Sättigung gehen. Die laterale Ausdehnung eines Pixels und damit die Größe des Potentialtopfes ist dafür ein wesentliches Kriterium. Die Pixelgröße wird für quadratische Bildelemente anhand der Kantenlänge quantifiziert und liegt typischerweise zwischen $4 \mu\text{m}$ und $20 \mu\text{m}$ mit zunehmend kleiner werdender Tendenz.

Die Auflösungs- bzw. Bittiefe, also die Anzahl der Grauwertstufen im Bild, hängt von den Digitalisierungsstufen beim Auslesen des Sensors ab. Wird die Gesamtanzahl der Elektronen die ein Pixel aufnehmen kann (FWC) und damit der Spannungswert in $256 (2^8)$ einzelnen Stufen digitalisiert, so ergibt sich die typische Auflösungstiefe von 8 Bit . Für anspruchsvollere Aufgaben sind auch Auflösungstiefen bis zu 12 Bit oder 16 Bit erstrebenswert. Die feinere Abtastung erfordert jedoch einen großen FWC-Wert, um eine ausreichende Zuverlässigkeit durch notwendige Ladungsunterschiede zwischen den Bitstufen bei der Diskretisierung zu gewährleisten [LERCH 2006]. Große Bittiefen können aufgrund längerer Auswertezeiten negative Auswirkungen auf die erreichbare Bildrate pro Sekunde (*fps*) besitzen. In der vorgestellten Realisierung waren 20 fps gefordert. Entscheidend hierfür ist der sog. Pixel- bzw. Auslesetakt in *MHz*, mit dem die Pixelladungen am Ausgang erscheinen [ENGEL 2006]. Unabhängig vom Hersteller kann das Signal-/Rauschverhalten des Kamerasensors quantifiziert werden. Dabei kann das am Ausgangssignal detektierte Rauschen in sensorabhängige und -unabhängige Faktoren unterteilt werden. Ein vom Sensor unabhängiger Rauschfaktor ist dabei das Schrotrauschen der Photonen (sog. „Shot-Noise“). Dieses ist durch die statistische Fluktuation des Auf-

prallzeitpunktes von Photonen auf den Detektor bedingt. Das vom Sensor unabhängige Ausleserauschen (sog. „Read-Noise“) liegt an der Auswerteelektronik und ist eine Kombination des Systemrauschens, welches durch den Prozess, Ladungsträger in ein Spannungssignal zu konvertieren und der anschließenden Digitalisierung im Analog-/Digital-Wandler bedingt ist (Gleichungen 4.42 bis 4.46). Im Folgenden ist n die Signalstärke, η die Quanteneffizienz, t die Belichtungszeit und A die Pixelfläche der lichtempfindlichen Sensorschicht.

$$Total\ Noise = \sqrt{read\ noise^2 + dark\ noise^2 + shot\ noise^2 + FP\ noise^2} \quad (4.42)$$

$$DR = 20 \cdot \lg\left(\frac{FWC}{read\ noise}\right) \quad (4.43)$$

$$SNR = \frac{n_{Signal}}{n_{Rauschen}} \quad (4.44)$$

$$SNR \approx \sqrt{t \cdot A \cdot \eta} \quad (4.45)$$

$$SNR \approx \frac{t \cdot A \cdot \eta}{\sqrt{n_{Sensor}^2 + n_{readout}^2}} \quad (4.46)$$

Das Ausleserauschen entspricht dem Grundrauschen der Kamera, welches auch besteht, wenn keine Aufnahme erfolgt. Um ein zuverlässiges Ausgangssignal zu erhalten, muss das Grundrauschniveau durch eine entsprechende Anzahl photogenerierter Ladungen um ein vielfaches überlagert werden. Deshalb ist – wenn ein Sensor ein hohes Ausleserauschen besitzt – die Quanteneffizienz nicht unmittelbar als Indiz für die Kamerasensitivität heranzuziehen [PROSILICA 2009]. Die Rauschanteile des Sensors, „Dark Noise“ und „Fixed Pattern Noise“ sind bei geringem Lichteinfall dominant, während bei größerer Lichtintensität und längerer Integrationszeiten das Gesamttrauschen hauptsächlich auf dem Schrot- bzw. Photonenrauschen basiert. Ein großer Dynamikumfang gewährleistet durch das breitere Graustufenfenster geringere Verluste von Bildinformationen [STEMMER 2010]. Auch für die Kantenerkennung von abgebildeten Objekten ist diese Kenngröße somit auch für die Sensorauswahl im vorgestellten Verfahren von Bedeutung. Das Maß für die Qualität eines Nutzsignals, das von einem Rauschsignal überlagert ist, wird durch das Signal-Rausch-Verhältnis, das sog. „Signal-Noise-Ratio“ (SNR), charakterisiert. Dieser Kennwert quantifiziert die Güte eines Messsignals, weshalb ihm große Bedeutung zukommt. Allgemein gilt für das Signal-Rausch-Verhältnis der Quotient zwischen dem Nutz- bzw. Eingangssignal n_{Signal} und seinem Rauschanteil $n_{Rauschen}$ (Gleichung 4.44), [MODRICH 2007]. Typischerweise verfügen *CCD*-Kameras über geringeres Rauschen und bessere Lichtempfindlichkeit mit folglich besserem Kontrastverhältnis und Lichtstärke [ANDOR 2008]. *CMOS*-Kameras sind dafür schneller auszulesen und komfortabler anzusteuern. Eine Übersicht der Vor- und Nachteile ist in Tabelle 3 dargestellt. Die grundlegende Funktionsweise von *CCD* und *CMOS* ist in Bild 52 skizziert.

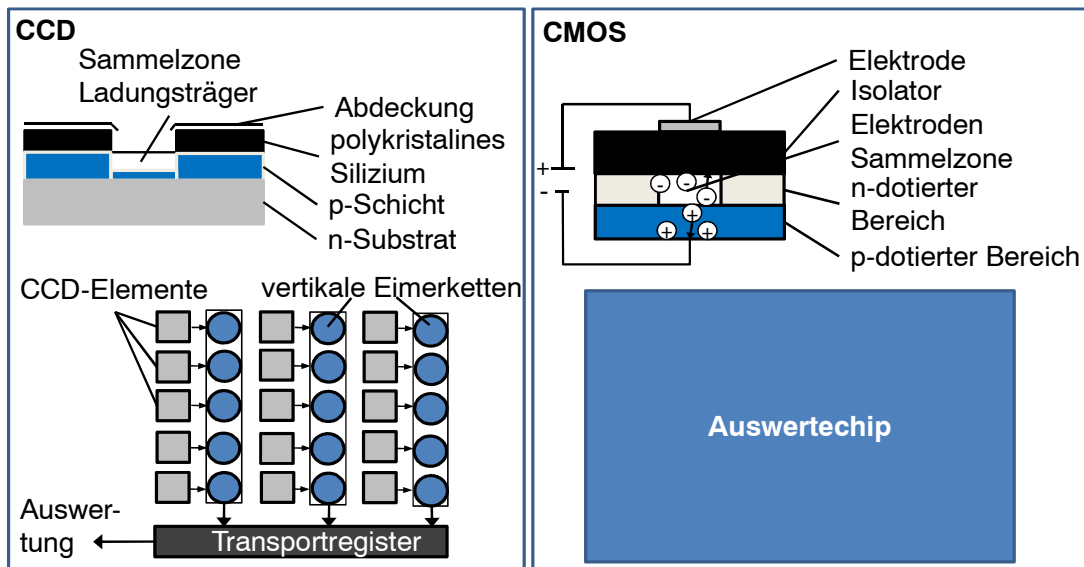


Bild 52: Gegenüberstellung der Funktionsweise von den beiden üblichen Funktionsprinzipien von Kamerachips, links: *CCD*, rechts: *CMOS*

Die im gezeigten Messverfahren eingesetzten *CCD*-Kameras des LSS sind mit *GiG-E* Anschlüssen ausgestattet, um große Datenübertragungsraten bis $1 \cdot 10^3$ MBit abzudecken und in Zeiten zunehmender Gerätevirtualisierung für künftige Updates und Erweiterungen im Bereich der Schnittstellenverbesserungen ausreichend kompatibel zu bleiben. Das vorgestellte Verfahren kann auch mit anderen Anschlusstechnologien realisiert werden.

Tabelle 3: Vergleich der wesentlichen Eigenschaften von *CCD*- und *CMOS*-Technologie

CCD	CMOS
+ Kleinste Pixelgrößen	+ Pixelweises Auslesen möglich
+ Geringes Rauschen	+ Breiter Dynamikbereich
+ Geringer Dunkelstrom	+ Geringe Störempfindlichkeit
+ ~100 % Füllfaktor (bei FF-CCD)	+ Großer Betriebstemperaturbereich
+ Ausgereifte Technologie	+ Spezifische Funktionsintegration
+ Hohe Lichtempfindlichkeit	+ Hohe Bildwiederholraten
+ Elektronische Global Shutter	+ Kompakte Systemgröße
+ Besserer Fertigungsprozess	+ Blooming ausgeschlossen
+ Hohe Ausgangsuniformität	+ Geringer Strombedarf
+ Geringe Anzahl von Verstärkern	+ Vergleichsweise günstig
- Blooming- und Smear-Effekte	- Geringer Füllfaktor
- Kein pixelweiser Zugriff möglich	- Geringe Lichtempfindlichkeit
- Geringere Bildwiederholraten	- Prinzipiell höheres Rauschen
- Vergleichsweise teuer	- Geringere Bildqualität
- Geringerer dynamischer Umfang	- Global-Shutter umständlich zu integrieren

4.3.2 Ansteuerung der Hardware

Die Sensoren werden über eine geräteseitig eingeprägte physikalische *IP*-Adresse angesprochen. Das SWS wird über die *RS 232*-Schnittstelle direkt angesteuert und ausgele-

sen. Zudem muss für alle Sensorsysteme ein ausreichender, fertigungsgerechter Bauraum für die Schnittstellenkästen vorgesehen sein, z.B. in einem staubdichten 19“-Rack, welches auch in einiger Entfernung zum Messsystem platziert sein kann. Ein konventioneller PC-Anschluss über z.B. *RS 232* reicht für das SWS aus, da die Datenmengen vergleichsweise gering sind. Die LSS sind wegen der großen Datenraten über *Gig-E*-Kabel angebunden und werden mittels eigenständig konzipierter Messsoftware gesteuert. Alternativ geeignete Schnittstellensysteme für Multi-Sensor-Messverfahren sind in Tabelle 4 dargestellt [LANSCH 2007].

Die drei LSS sind über ein individuelles Triggerkabel hardwareseitig getriggert, welches eine Kamera als Masterkamera und die anderen Beiden als synchrongesteuerte Nebenkameras qualifiziert. Die Masterkamera dient dabei als zentraler Impulsgeber für die anderen beiden Lichtschnittkameras, welche direkt zusammen mit der Masterkamera auslösen, sodass eine quasi-gleichzeitige und stabile Datenaufnahme gewährleistet werden kann. Andere mögliche Messsystem-Komponenten, welche softwareseitig synchron gesteuert werden, sind grundsätzlich möglich, jedoch sind ungleichförmige zeitliche Verzögerungen von 1 ms bis zu 5 ms (wie sie dann oftmals auftreten) nicht akzeptabel [BLANC 2001].

Tabelle 4: Vergleich derzeitiger Kameraschnittstellen für ein OMS in Anlehnung an [LANSCH 2007]

	Kameraschnittstellen			
	CameraLink	USB 2.0	FireWire	GigE
Standardisierte Schnittstelle?	Ja (basierend auf Channel Link)	Ja, globaler Standard	Ja (IEEE-1394, DCAM-Protokoll)	Ja (GigE-Vision mit GenICam)
Maximale Datenrate	255 MB/s (Base) - 680 MB/s (Full)	60 MB/s	50 MB/s (Typ a) 100 MB/s (Typ b)	Bis zu 125 MB/s (theoretisch)
Verbindungstyp	Point-to-Point	Master-Slave (sternförmig)	Peer-to-Peer (ringförmig)	Point-to-Point oder LAN
Interface Karte	Framegrabber	USB-Karte oder Motherboard	IEEE-1394-Karte oder Motherboard	GigE-Karte oder Motherboard
I/O Synchronisation	Echtzeitfähig	Nicht echtzeitfähig	Ja, durch IEEE-1394-Steckkarte	Ja, anwendungs-spezifisch,
Verbindungskabel	MDR-26-pin (LVDS)	4pin Twisted Pair Shielded (STP)	4/6pin STP, Cat5	RJ-45, Cat5E, Cat6, Cat7
Maximale Kabellänge	10 m	bis zu 30 m (mit Repeater)	5m (Typ a) 100 m (Typ b)	100 m
Integrierte Stromversorgung	Optional	Ja	Ja	Optional
Plug & Play-Fähigkeit	Nicht gegeben	Gegeben	Gegeben	Gegeben
Multi-Kamera-Support (Anzahl)	Ja, mit mehreren Framegrabbern	Nein	Ja	Ja
Verfügbarkeit	Sehr gut	Gut	Sehr gut	Sehr gut

Dies ist insbesondere ein Aspekt, wenn lediglich max. 50 ms pro Datensatz zur Verfügung stehen, die Profile sich mit 10 ms^{-1} bewegen und die zeitliche Synchronisation umgerechnet bis zu 50 mm (in z-Richtung) abweicht. Die Belastung des PC-Auswerterechners mit zusätzlichen Rechenoperationen ist zudem ein weiterer Nachteil, zumindest sofern die rechnerischen Auslastungsgrenzen erreicht werden. Im Allgemeinen ist für den in-line Messbetrieb die ökonomische Rechnerauslastung ein wesentliches Ziel.

4.3.3 Robustheit des Messverfahrens gegen prinzipbedingte äußere Einflüsse

In Herstellprozessen von Halbzeugen (Walzwerke, Strangprofilanlagen, Rohrpressen) werden erhebliche Wärmemengen freigesetzt, u.a. durch Infrarotstrahlung des Produkts, zu erwarten. Neben der thermischen Belastung der Messgeräte durch die langwellige Infrarotstrahlung ist eine daraus abgeleitete Folge, dass es ebenso zu negativen Beeinflussungen des nutzbaren Lichts des LSS von 658 nm führen kann (auch Kap. 3.2). Nach [BGHW 2010] wird hierbei zwischen dem sog. „nahen Infrarot“, „mittlerem Infrarot“, bzw. „fernem Infrarot“ unterschieden. Der gesamte Bereich reicht von 780 nm bis hin zu $1.000.000\text{ nm}$ [DIN 5031-7]. Der z.B. in der Strangprofilfertigung von den Führungsbahnen abgeriebene und elektrisch leitfähige Graphitstaub kann Ausfälle des realisierten Prototyps provozieren. Durch Verschmutzungen der strahlführenden Bauteile (Linse und Filter der Kameras, Optiken der Laser) werden die Messergebnisse ggf. auch negativ beeinflusst (Kap. 5.3.3).

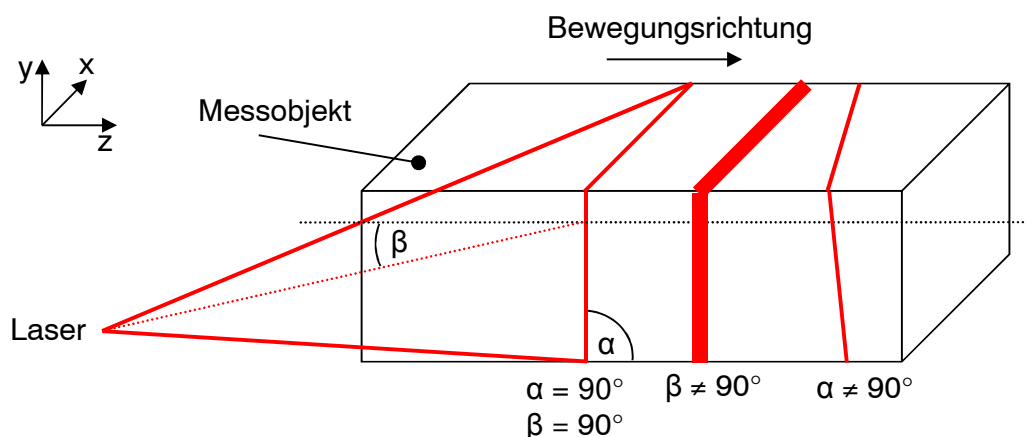


Bild 53: Winkelabweichungen von der zweifach orthogonalen (empfohlenen) Einstellung zur Erzeugung der Laserlinie beider rotatorischer Freiheitsgrade (α , β); Folge: Messabweichungen

Eine Einflussquelle für Abweichungen bei optischen Systemen sind unbekannte Winkelabweichungen der Komponentenpaare Lichtquelle und Beobachter (Bild 53). In Bild 54 ist der reale Fall von rotatorischen (a), bzw. translatorischen (b) Abweichungen zweier angrenzender und überlappender Lichtlinien überhöht dargestellt. Hierbei ist diese Situation für den zweidimensionalen Fall der Verkipfung dargestellt. Die Folge ist, dass neben der Änderung der räumlichen Verhältnisse auch der Schärfentiefbereich verlassen wird und eine weitere negative Einflussgröße auf die Messung entsteht.

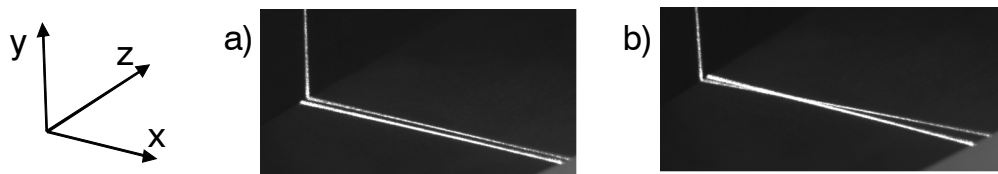


Bild 54: Verkipfung (a) und Verdrehung (b) überlappender Laserfächer mit den Lichteffekten

Dieser Effekt darf die Robustheit des OMS jedoch nicht wesentlich beeinträchtigen, da im rauen Einsatz Störgrößen unvermeidbar sind und Kalibrierungen nur in unregelmäßigen Abständen (bei Werkzeugwechseln) durchgeführt werden können. Eine Einstellung mit orthogonalen Restabweichungen von weniger als $0,5^\circ$ muss durch einen erfahrenen Bediener unter Anwendung eines Winkelmessers (z.B. nach dem goniometrischen Prinzip) erreicht werden, um die Anforderungen aus Kap. 3.1.1 einzuhalten. Durch entsprechende Untersuchungen wurde der Einfluss für das Messergebnis bei kleinen Restabweichungen als nicht nennenswert festgestellt (Kap. 5).

4.4 Eigenschaften eines geeigneten Beleuchtungsverfahrens

Die Lichtquellen müssen konstante und hohe Lichtleistungen mit homogener Lichtverteilung bereitstellen [SCHÄFTER+KIRCHHOFF 2010]. Eine gaußförmige Lichtverteilung über die Strahlbreite stellt den Normalfall üblicher Linienlaser dar, ist jedoch für die Erzeugung einer gleichmäßigen Lichtlinie nicht optimal geeignet. Daher werden rechteckverteilte Liniengeneratoren verwendet, welche konstant verteilte 58 mW Lichtleistung leisten. Deren feine Einstellbarkeit, die geringe Strahlaufweitung und die homogene Leistungsverteilung sind weitere wesentliche Kenngrößen, so dass der Schärfentiefenbereich mit 80 mm bei einem Arbeitsabstand von 240 mm ein sehr guter Wert ist. Der große Schärfentiefenbereich ist erforderlich, damit auch konkave Zonen oder stark gekrümmte Profilbereiche in weiten Grenzen optimal ausgeleuchtet werden können. Bei zu kleinem Schärfentiefenbereich, Abweichungen in dem Winkel β (der zweiten Achse) sowie folglich größer, dabei entstehender effektiver Auswanderung des Beleuchters, ergeben sich negative Auswirkungen für die Messung.

Die Linienbreite soll dabei möglichst gering sein und beträgt bei dem Prototypen $0,15\text{ mm}$ mit einem Fächerwinkel von 40° und resultierend etwa bei 200 mm Länge. Der anzustrebende Arbeitsabstand ist konstant (hier: 240 mm). Für den Messbereich bis 100 mm ergibt sich damit zum Einen die Möglichkeit, zeitweise näher zum Messobjekt heranzugehen (sofern erforderlich) und zum Anderen bei seitlichen Profilschwingungen über genügend Reserve der Lichtlinie hinsichtlich kleiner Profilschwüngen zu verfügen. Der Strahlengang der verwendeten Strahlquellen ist in Bild 55 skizziert. Andere Strahlengänge hinsichtlich Öffnungswinkel und Kohärenzlänge sind mit dem optischen Multi-Sensor-Messverfahren ebenfalls grundsätzlich anwendbar.

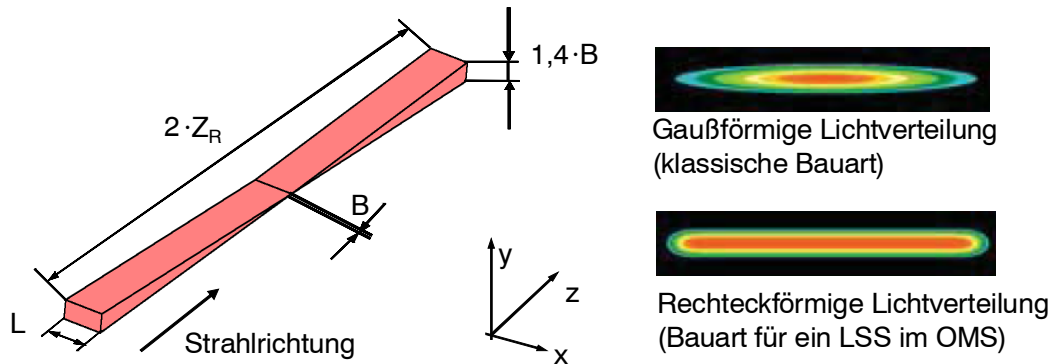


Bild 55: links: Schärfentiefenbereich eines Laserfächers symmetrischer Form, Idealbereich an der schmalsten Stelle der Strahltaile, B entspricht dem Raleigh-Bereich, $2 \cdot Z_R$ dem Schärfentiefenbereich eines Linienfächers (Breite L); rechts: Lichtverteilung quer [SCHÄFTER+KIRCHHOFF 2010]

Vorzeichenbehaftete Abweichungen von der idealen Winkeinstellung lassen sich nicht vollständig vermeiden und ermitteln. Winkelabweichungen können auch während der Messung zunehmend entstehen, z.B. durch Setzverhalten, Drieffekte oder Vibrationen, was zu Abweichungen führt (Bild 56). Die Ergebnisse lassen sich auch normiert angeben und darstellen, die Maximalabweichung liegt für den Einzelpunkt theoretisch bei etwa bis zu $80 \mu\text{m}$ bei großen ($D_{\text{Profil}} > 30 \text{ mm}$) und $30 \mu\text{m}$ bei kleinen Profilquerschnitten.

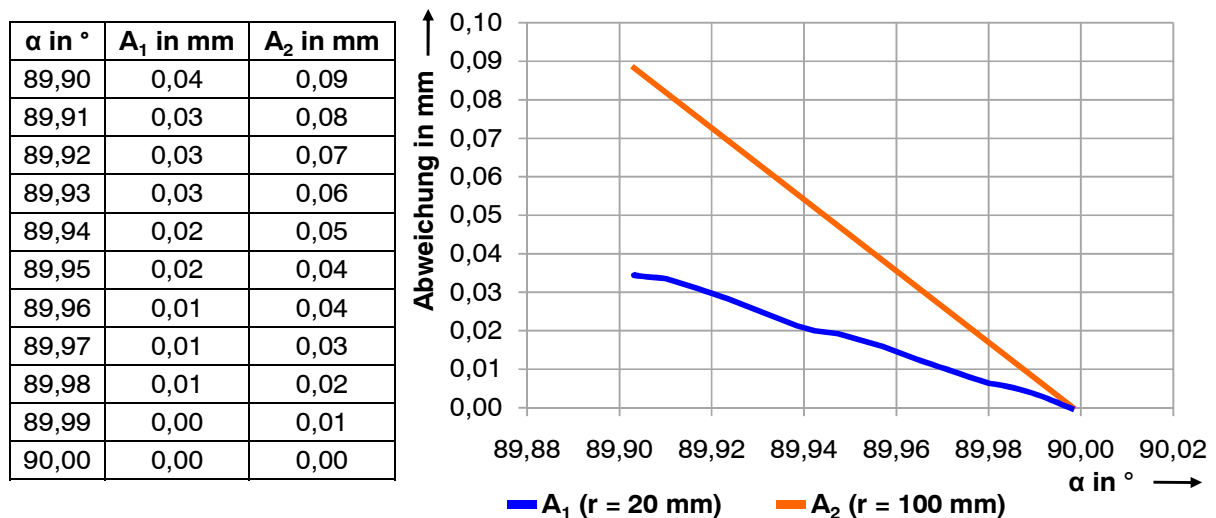


Bild 56: links: Werte A_1 für die Profilgrößen 20 mm und A_2 für 100 mm ; rechts: „Kosinusfehler“ als resultierende Messabweichung

4.4.1 Physikalisches Wirkprinzip

Die große Kohärenzlänge des Lichts und die monochromatische Ausprägung qualifiziert den Laser („Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation“) für die Verwendung in der Längenmesstechnik o.g. Beleuchtungsvorhabens. Laserlichtstrahlung kann durch Gas-, Festkörper- und Halbleiterlaser bereitgestellt werden. Gas- und Festkörperlaser

scheiden aufgrund des Preises, der Einlaufzeit und der benötigten Baugröße meist aus (Tabelle 5), [HECHT 2001], [SCHÄFTER+KIRCHHOFF 2010].

Tabelle 5: Vergleich einiger Möglichkeiten zur gerichteten Beleuchtung für das OMS

	He-Ne	Ar ⁺	Festkörperlaser	Diodenlaser
Laseraktives Medium	Gas (Helium-Neon)	Gas (Argon-Ionen)	Festkörper (Nd ⁺ , Yb ⁺)	Verschiedene Halbleitermaterialien
Wellenlänge	633 nm	514,5 nm, 488 nm	1064 nm, 1030 nm	von 635 nm bis 1550 nm
Wirkungsgrad	ca. 0,1 %	0,05 bis 2,5%	2 % bis 3 %	25 % bis 30 %
Vorteile	Gut stabilisierbar, Lebensdauer, preisgünstig	frequenzstabil, Kohärenzlänge	Gute Strahlqualität	Günstig, klein, Wirkungsgrad, Lebensdauer
Nachteile	Wirkungsgrad, Zündspannung	Große Bauform, teuer	Geringer Wirkungsgrad	Schlechtere Strahlqualität
Anwendung in der Messtechnik	Haushaltsgeräte, Laserdrucker, Barcodescanner	Elektrooptische Forschung, Pumpquellen	Geringe Bedeutung in der Messtechnik	Maschinenintegriert, bei geringem Bauraum

Außerdem verhindern die teils mangelnde Lichtstabilität bei umgebenden Temperaturschwankungen bessere Eignung für das Messverfahren und Ihr Vorteil, der Pulsbetrieb wie beim CO₂-Laser, ist im vorliegenden Fall nicht erstrebenswert. Der Gaslaser arbeitet zudem oft mit großer Wellenlänge, welche nachträglich mit zusätzlichem Aufwand ins sichtbare Licht überführt werden müsste. Ausnahmen dahingehend stellen z.B. der HeNe- und der Ar⁺-Laser dar, die jedoch auch große Bauarten ausweisen. Bei der Anforderung an den zu entwickelnden Lösungsansatz sind Halbleiterlaser (sog. Diodenlaser) wegen der geringen Baugröße, großen erreichbaren Lichtleistungen, gutem optischen Wirkungsgrad und ausreichend guter Strahlqualität bei kaum vorhandener Einlaufzeit am besten geeignet [TRÄNKLER 1998], [HOFFMANN 2007]. Dabei werden Halbleiterschichten durch Anlegen einer äußeren Spannung zur stimulierten Lichtemission angeregt, welche strahlgerichtet werden kann (Bild 57).

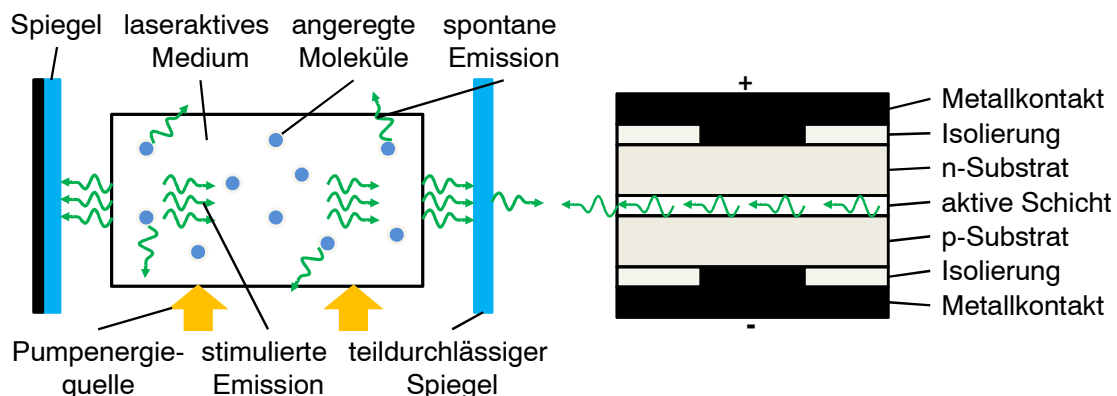


Bild 57: links: Funktionsprinzip der stimulierten Emission zur Erzeugung von Laserlicht im gezeigten OMS; rechts: Laseraktives Halbleitermedium mit mehrschichtigem Aufbau

Im einfachsten Fall besteht ein Diodenlaser aus einer Einzeldiode und einer Kollimationsoptik zur Strahlführung [BIMBERG 1993]. Eine Laserdiode, wie diese in Halbleiterlasern eingesetzt wird, ist ein mit der Leuchtdiode verwandtes Halbleiter-Bauteil, welches im Betrieb Laserstrahlung in Form von monochromatischem Licht abgibt [KEFERSTEIN 2008]. Dazu wird ein p - n -Übergang mit starker Dotierung bei großer Stromdichte betrieben. Die Art des Halbleitermaterials bestimmt hierbei die emittierte Wellenlänge (Tabelle 5).

4.4.2 Optische und andere technische Kenngrößen

Laserbauarten für strukturierte Beleuchtung, wie sie im LSS verlangt werden, sind mit verschiedenen Wellenlängen erhältlich. Sie liegt im Fall von Halbleiterlasern in vielen Fällen im nahen Infrarot und roten Wellenlängenbereich (s.o.), jedoch werden mittlerweile auch blaue, grüne und ultraviolett emittierende Laserdioden hergestellt. Deren Lebensdauer liegt jedoch mit rund 500 Stunden wesentlich unterhalb den ca. $5 \cdot 10^3$ Stunden roter Bauarten liegt. Im roten Wellenlängenbereich sind diese von ca. $650 \pm 10 \text{ nm}$ bis ca. 100 mW mit guten Strahlparametern bezüglich Homogenität des Strahls, geringem Speckling und Kohärenz des Lichts verfügbar. Die gleichmäßige Lichtverteilung über die Linienlänge charakterisiert die Hauptanforderung für einen Linienlaser, der im vorliegenden Messverfahren einzusetzen ist. Hierbei ist die leistungsstarke Beleuchtung in den Randbereichen des Strahls wichtig, welche für den Überlapp und die durchzuführende Datenfusion entscheidend sind. Eine rechteckverteilte Lichtausbeute ist optimal, auf dem Markt verfügbare Systeme haben prinzipbedingt jedoch meist gaußförmige Strahlprofile [LASER COMPONENTS 2010]. Der Strahlwinkel ergibt sich aus dem Abstand des optischen Mediums und der gewünschten Beleuchtungsgröße, welche ca. 10 % größer sein sollte als der bereitzustellende Messbereich [WECKENMANN 2009c].

Die Wellenlänge ist zwangsläufig als konkurrierendes Ziel zur erreichbaren Lebensdauer und der Humangefährlichkeit zu betrachten. Bei den derzeit am besten beherrschten Dioden (rot), ist die erwartete Lebensdauer mit ca. $5 \cdot 10^3$ Stunden oftmals ausreichend. Jedoch liegt das Nutzlicht auf dem Spektrum des Lichts unweit vom Störlicht des Messobjekts entfernt, welches ein Eigenleuchten im infraroten Bereich erreicht. Die Lichtfarbe blau wäre hierbei durch den größeren Wellenlängenabstand (ca. 420 nm) besser geeignet, jedoch sind diese mit nur rund 500 Stunden Lebensdauer behaftet und um ein Vielfaches teurer [POLYTEC 2008]. Dazu kommt die erschwerte Strahlführung, mindere Strahlqualitäten und die Gefahr von Augenschäden durch den mangelnden Lidschlussreflex des Menschen das Auftreffen des blauen Lichts mit der Netzhaut. Folglich sind bei dieser Wahl erweiterte Sicherheitsvorkehrungen zu beachten und einzuhalten [MAX-PLANCK-INSTITUT 2010]. Die Lichtfarbe des grünen Wellenlängenspektrums ist ein Kompromiss aus o.g. Aspekten. Durch Frequenzverdopplung nahinfraroter Wellenlängen, die bereits seit längerem erforscht ist,

werden Wellenlängen um ca. 520 nm erreicht. Dabei verfügen diese Dioden über eine kürzere Lebensdauer als jene, welche rotes Licht emittieren [STEMMER 2010]. Die Kosten liegen somit ebenfalls deutlich über denen roter Laserdioden. Darüber hinaus sind die wissenschaftlichen Erfahrungen damit bisher begrenzt, wodurch die Produktreife für das in dieser Arbeit vorgestellte optische Multi-Sensor-Messverfahren nicht gegeben erschien.

Die wissenschaftlichen Erkenntnisse des hier gezeigten Verfahrens sind jedoch in vollem Umfang auf grüne oder blaue Beleuchtungen übertragbar. Durch die eigens durchgeführten Vorversuche gemäß Bild 23 wurde zudem deutlich, dass der erzielbare Kontrast im realen Einsatzfall trotz der o.g. optischen Eigenschaften des roten Lichts ausreichend ist [WECKENMANN 2009b]. Daher wurde für die weitere Konzeption und Realisierung ein roter Diodenlaser mit 58 mW Lichtleistung, rechteckverteilter Strahlführung und optischem Öffnungswinkel von 40° , nominalem Objektstand von 240 mm und einer Linienbreite von 200 mm bereitgestellt. Neben dem Messbereich von 100 mm sind so 50 mm pro Seite für Profilbewegungen und die systematischen sowie zufälligen, unbekannten Restabweichungen der Winkeleinstellungen vorhanden und somit eine ausreichende Reserve gewährleistet.

Dies entspricht Laserschutzklasse $3B$ und setzt Schlüsselregelungen, präventive räumliche Abschirmungen und Schutzbrillen für die Justierung voraus [BGHW 2010]. Hinsichtlich der Beleuchtung ist das SWS wie o.g. prinzipbedingt erheblich einfacher aufgebaut. Hierbei werden rote Punktlaser mit ca. 1 mW eingesetzt, welche auch bezüglich der für das Messergebnis weniger relevanten Strahlqualität im Rahmen dieser Arbeit nicht vertiefend behandelt werden, zumal der Einfluss aus o.g. Gründen als kaum entscheidend für das gezeigte Verfahren einzustufen ist.

4.4.3 Robustheit gegen prinzipbedingte äußere Einflüsse

Die thermischen Einflüsse auf das gezeigte in-line Messverfahren sind maßgeblich für die technische Konzeption. Daher kann die Robustheitsauslegung zwangsläufig Auswirkungen auf das Messverfahren haben. Die bereits erwähnte Infrarotstrahlung des nahen und fernen Infrarots spielt für die thermischen Auswirkungen eine kleinere Rolle, entscheidend ist der mittlere Bereich des Infrarotspektrums im Wellenlängenbereich von 3.000 nm bis 50.000 nm [DIN 5031-7]. Der dabei entstehende negative Einfluss auf die Bilddetektion und in Folge auch auf das Messergebnis wird durch geeignete Lichtquellen und eine automatische Belichtungskorrektur bzw. durch optische Filter weitgehend beherrscht [THÖNIß 2006], [PENTAX 2010]. Die Einflussgröße von Speckling ist in der vorliegenden Anwendung nicht nennenswert, da durch die Relativbewegung des Profils die charakteristische Ausprägung von Mustern auf der rauen Bauteiloberfläche unterbunden wird. Um den roten Laser als geeignet zu bestätigen, wurde ein Vorversuch erfolgreich durchgeführt (Bild 23). Jedoch sind sekundäre Effekte, besonders die erheblichen Wärmemengen,

welche auf das OMS gestrahlt werden, unvermeidbar. In Bild 58 sind die auftretenden Temperaturen durch Wärmeeintrag im Abstand von 100 mm mit einem Thermoelement überschlägig ermittelt worden, um den Wärmeeinfluss hinsichtlich Größe und Wirkung abzuschätzen. Da die Kameras und Sensoren bereits ab 45°C mit deutlich zunehmendem Photonenrauschen und ab 50°C mit Schutzabschaltung reagieren, muss hierfür ein geeignetes Kühlverfahren entwickelt werden.

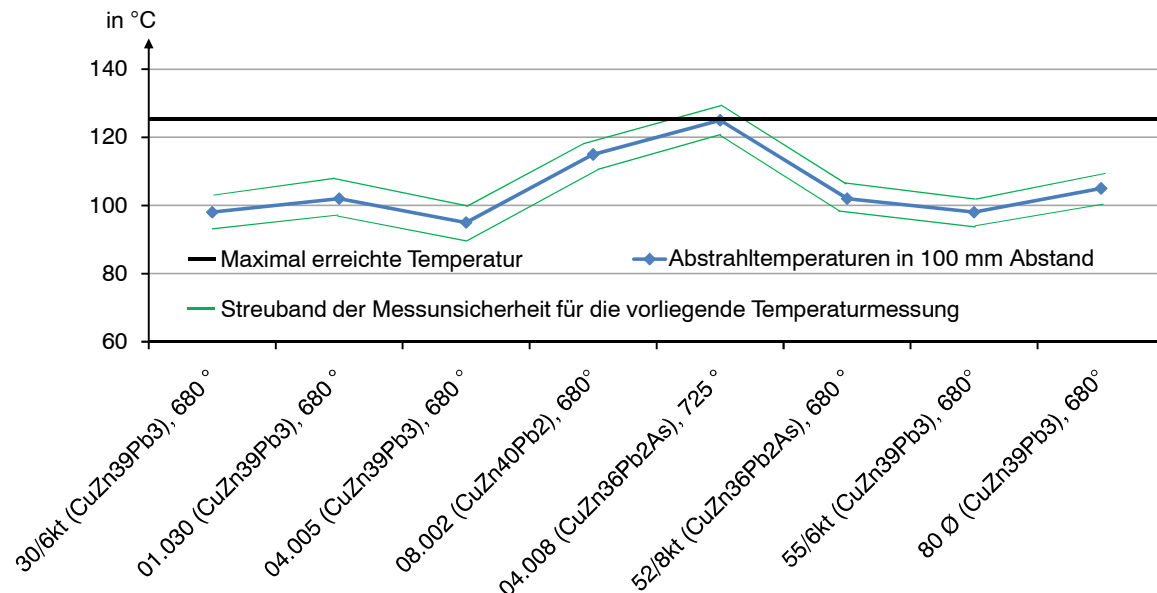


Bild 58: Temperaturen im Abstand von 100 mm in der Strangprofilfertigung, verschiedene Legierungen und Durchmesser bis 80 mm ; blau: Maximalgrenze der erreichten Temperatur

Dieses darf das OMS technisch nicht negativ beeinflussen [BÖSWIRTH 2007]. Dafür sind Kühlkörper für die Sensoren (Kap. 5.3.3) sowie Kabel-, Schlauch- und Strömungsverteilungskonzepte vorzuhalten. Das Kühlverfahren muss konzeptioniert und nach Realisierung evaluiert werden, da ohne dessen Funktionsbeweis eine realistische Evaluation des OMS nicht vollzogen werden kann. Technische Schwächen am Kühlverfahren führen automatisch zu Mängeln am Messergebnis und zu teilweisen oder vollständigen Ausfällen sowie Schäden an dem realisierten Prototypen.

Aus Gründen des mangelnden Temperaturgefälles zwischen Umgebungsluft und Sensortemperatur (nur wenige Kelvin Differenz, da es in der Halle im Sommer bis zu 40°C hat und die Sensoren nur bis ca. 50°C einsetzbar sind) werden in der vorgestellten Applikation grundsätzlich fluidbasierte Kühlverfahren notwendig [LEIPERTZ 2005]. Dabei sind die entstehenden Druckverluste im Leitungssystem zu berücksichtigen, da kein Teilkanal zu wenig Kühlwirkung erhalten darf. Hierzu wurde eine Auslegung nach üblichem Vorgehen der Strömungsmechanik kalkuliert und entsprechend aufgebaut, Gleichung 4.47 und Bild 59. Es wurde nach den geltenden Regeln und Sicherheitsfaktoren von 5 für raue Anwendungen überdimensioniert (auch Bild 87), [BEITZ 2001].

$$\Delta p_{ges} \approx \Delta p_{Zulauf} + \Delta p_{Common Rail} + \dots \sum \Delta p_{Einzel}; (hier : n = 10) = f(c_n, l, d, \lambda, \zeta); \quad (4.47)$$

Daneben sind die üblichen thermodynamischen und strömungsmechanischen Grundsätze zu beachten, um bei gegebenen Maximaltemperaturen die Auslegung des Kühlsystems durchzuführen (auch Gleichung 5.14). In derartigen Umgebungen herrscht teilturbulente Zugluft, weil die warmen Messobjekte durch lokale Thermik um das Objekt, auch umgebende Luftmassen in Bewegung setzen. Der Durchfluss des Kühlmediums ist daher auf die maximal zu erwartende Energiemenge auszulegen.

Dies ist beim heißesten und gleichzeitig größten Messobjekt ($\varnothing 100 \text{ mm}$) zu erwarten, weshalb ein Vorversuch mit einem Luftfühler an der Fertigungslinie ausgewertet wurde (Bild 58). Im vorliegenden Fall des realisierten Messverfahrens beträgt die erforderliche Kühlwassermenge rund 5 Liter pro Minute. Ein dabei bereits einkalkulierter, thermischer Sicherheitsfaktor von 5 sichert gegen zeitweise Druckschwankungen, Streuungen der Wasser-Zulauftemperatur sowie reale Abweichungen zur theoretischen Auslegung. Mittels Einstellhähnen kann bedarfsweise jeder einzelne Kühlkreislauf separat eingestellt werden. Ein gemeinsames Hauptventil am Wasseranschluss dient zur Voreinstellung der Gesamtwassermenge. Die Auslegung des Kühlverfahrens ist prinzipiell auf ähnliche Messverfahren übertragbar, wobei dann die Durchflüsse und die Zahl der Strömungszweige entsprechend anzupassen ist.

Für die ersten Tests während der Validierung wurde ein offenes Kühlsystem gewählt, welches an den Hauptwasseranschluss/-ablauf anzubinden ist. Die Kühlkörper sind für jeden Sensorkopf separat montiert. Beim LSS bestehen diese aus doppelwandigen, geschweißten Edelstahlrohren, die jeweils einen gegenüberliegenden Zu- und Ablauf besitzen. Somit ist sichergestellt, dass bei ausreichender Kontaktzeit des Kühlmediums zur Wandung die Durchströmung druckverlustminimal ist. Bei montiertem Kühlkörper können die bildgebenden Sensoren dennoch separat davon ein- und ausgebaut werden (Kap. 3.2), was eine Grundanforderung eines Wartungsverfahrens darstellt. Das SWS wird mit Aluminiumkühlkörpern betrieben, welche aus dem Vollen gefräst sind und durch den großen Wärmeübergangskoeffizient von Aluminium geringe thermische Verspannungen zur Folge haben und gleichzeitig gut spanend bearbeitbar sind.

Das Konzept des Kühlverfahrens sowie die konstruktive Auslegung und Realisierung ist im Wesentlichen auf andere Kühlkörper-Werkstoffe und ähnliche geometrische Randbedingungen übertragbar. Die integrierte Konstruktion des integrierten OMS mit dem Wasserkühlsystem ist in Bild 59 dargestellt. Das Kühlsystem verfügt insgesamt über einen Strömungsverteiler, 10 Einzelkühlkreisläufe, 20 Schlauchstücke, einen Strömungssammler und 10 Einstellventile für jeden Teilkreislauf (Bild 59).

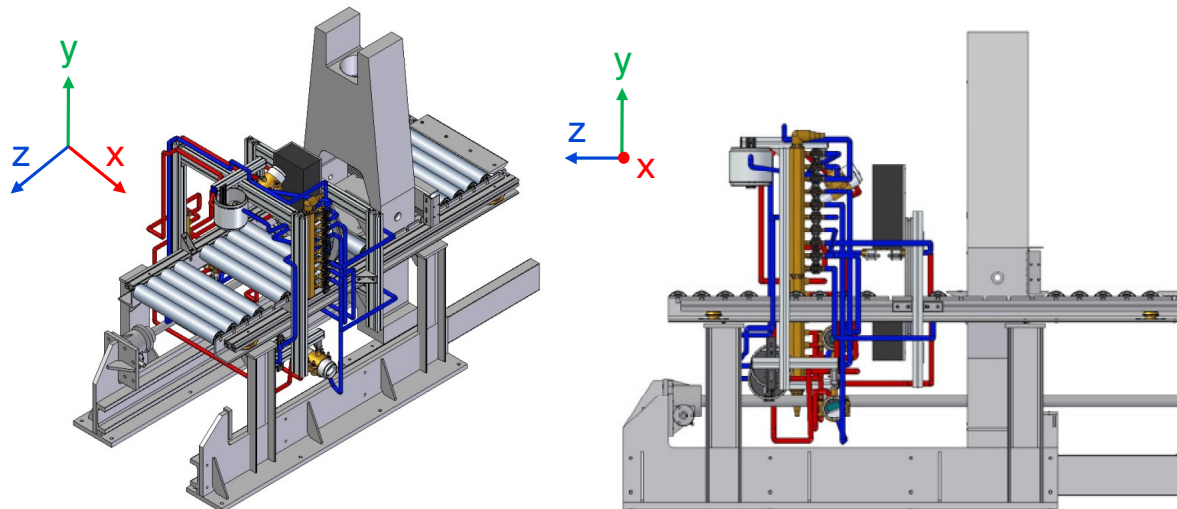


Bild 59: OMS mit Kühlverfahren im Einbauzustand unter Werkstattbedingungen im passiven Rollengang mit Zulauf und Ablauf; links: isometrisch, rechts: Seitenansicht (genauer Kap. 5.3.1)

Die Strömungsteiler/-sammler sind nach dem sog. Common-Rail-Prinzip ausgeführt, um das durchströmende Medium druckverlustminimal und homogen zu führen und zu verteilen (Bild 86), [BARTSCH 2001]. Auch werden hierbei kein Staub oder andere Verunreinigungen der Umgebungsluft – wie dies bei klassischen Luftkühlungsverfahren der Fall ist – parasitär zugeführt. Als Kühlmedium kann Wasser eingesetzt werden, was dann jedoch die vollständige hermetische Dichtheit trotz thermischer Gradienten und folglich Wärmespannungen voraussetzt. Auch Öle oder andere Kühlmedien sind mit abweichenden thermischen Eigenschaften verwendbar, was aus Umweltschutzgründen jedoch geschlossene Kühlkreisläufe bedingt, welche mit einem weiteren externen Wärmetauscher zu bestücken sind. Im vorliegenden Fall wurde für die Evaluation (Kap. 5.3) ein offenes Wasserkühlkonzept mit einem Fluidverbrauch von rund 300 Liter pro Stunde eingesetzt. Die positiven Testergebnisse zum Kühlverfahren sind in Kap. 5.3.3 erläutert. Ein weiterer Einfluss sind die mechanischen Schwingungen, welche bei schwankender Presskraft der Strangpresse von bis zu $3,5 \cdot 10^4 \text{ kN}$ (äquivalent 3500 t) unweigerlich entstehen.

Um direkte Auswirkungen auf das Messergebnis zu vermeiden, muss das geeignete OMS Dämpfungselemente aufweisen, welche die mechanischen Auswirkungen auf ein Minimum reduziert. Es empfehlen sich aufgrund der vorteilhaften Reibungskennlinie insbesondere viskose oder teilviskose Dämpfer mit geringem Haftgleiteffekt um den Schwingungsnullpunkt, wie sie auch für die vorgestellte Evaluation verwendet werden. In einem zweiten Schritt können softwaregebundene Filtermechanismen aufgrund einer Wissensbasis – über die Schwingungseigenschaften die auftretenden Vibrationen am Beobachter in Frequenzspektrum und Amplitude – teilweise kompensieren. Hierbei hat sich der Hochpassfilter mit großer Flankensteilheit ($> 12 \text{ dB}$) und Grenzfrequenzen um 10 Hz als zusätzlicher Kompensator für geeignet erwiesen, wobei die vorgestellten Messergebnisse bereits ohne diesen Zusatzmechanismus erreicht wurden.

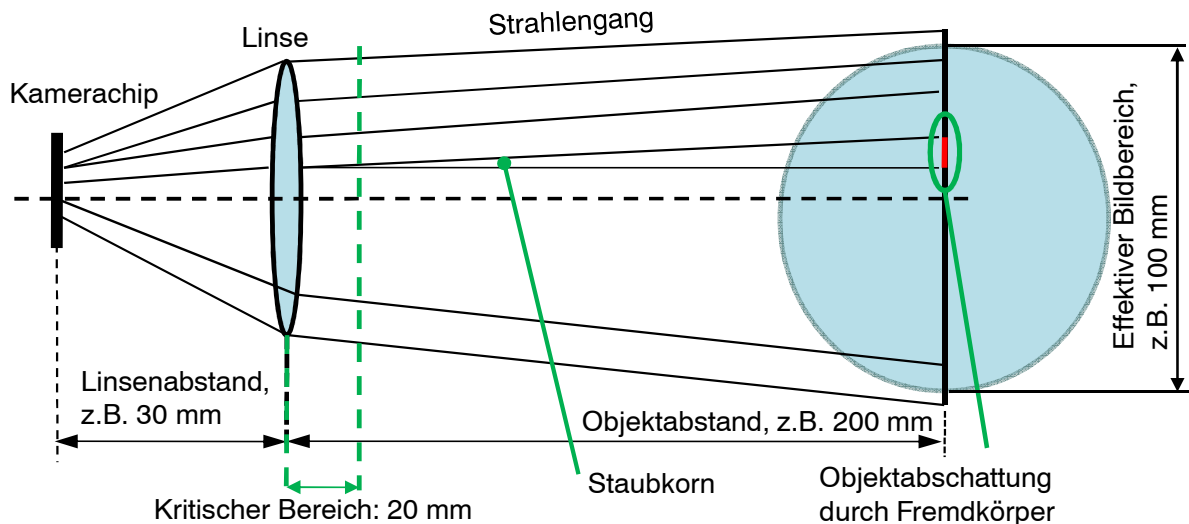


Bild 60: Abschattung des Strahlengangs einzelner Kameras bei dem realisierten Messverfahren, u.a. durch einzelne Fremdpartikel (hier: Staub, jahreszeitabhängiger Feuchtebeschlag und Oxidpartikel)

Durch das Wissen über bewegte Teile relativ zum Beobachter und angewandte Filterverfahren (in regelmäßiger Aktualisierung über jeweils $10 - 20 \text{ fps}$) wird der Einfluss effektiv minimiert. Das optimale Einstellungskonzept von Lichtquellen und der Sensoren in Abstand und Winkel ist dabei ebenso entscheidend (Kap. 4.5).

Staubkörner können langfristig zu Verschmutzung der strahlführenden Teile (Linsen, Lichtaustritt Laserfächer oder auch dem telezentrischen Objektiv des SWS) führen (Kap. 2.1 und Kap. 4.3.1). Durch regelmäßige Reinigungszyklen gemäß einem individuellen Wartungsverfahren (in Ansätzen erläutert in Kap. 5.3.3) kann dieser Einfluss minimiert werden. Dennoch können verbleibende Partikel zwischen Linse und Messobjekt grundsätzlich zu einzelnen, punktuellen Abschattungen bei der Bilddetektion führen. Diese sind abhängig von den Strahlparametern des Beobachters wie Brennweite, Vergrößerung etc. und der Größe des Staubkorns sowie dessen Abstand zur Linse als Dunkelfleck dargestellt (Prinzip dargestellt in Bild 60). Der Einfluss tritt zunehmend in Bereichen nahe des Linseneintritts (kritischer Bereich ca. 20 mm vor der Linse) und bei Partikeln in großer Zahl bzw. dichten Stäuben auf. Dies kann optional durch Einblasen von Zugluft mit einigen ms^{-1} in Querrichtung (oft als sog. „Sperrluft“ bezeichnet) und erhöhtem Abstand des Beobachters vom Messobjekt sowie damit geringerer Staubbelastung in unmittelbarer Nähe zum Objektiv gelöst werden. Darüber hinaus sind die Lärmbelastung durch die ständigen Luftströmungen für die Messbediener und die ebenfalls entstehende Unterdruckbildung als negativ genannt worden. Wegen der zudem nicht mehr homogenen Abkühlung der in der Nähe befindlichen Halbzeuge und den folglich auftretenden Form- und Gefügeveränderungen ist diese Maßnahme als ungeeignet festgestellt worden. Messbare Einflüsse waren auch ohne Anwendung dieser Ansätze (Kap. 5.3.1), auch während der realen Evaluation, nicht mehr feststellbar.

4.5 Einstellungskonzeption der Lichtquellen und der Sensoren in Abstand und Winkel

Es sollte ein Justagekonzept in Form eines Assistenzsystems vorliegen, welches die Einstellung der einzelnen Sensoren und der Beleuchter hinsichtlich der optimalen Kombinierbarkeit unterstützt. So hat in Abhängigkeit zu der zu messenden Profilgröße und zum Profiltyp eine Einstellung aller Sensoren und Beleuchter des LSS zu erfolgen (Kap. 4.5). Sämtliche Algorithmen und teilautomatischen Einstellkonzepte sollten spezifisch ausgelegt und verfügbar sein. Diese können vor und während der Kalibrierprozedur am Auswerterechner durch Eingabe der Profilspezifikationen genutzt werden.

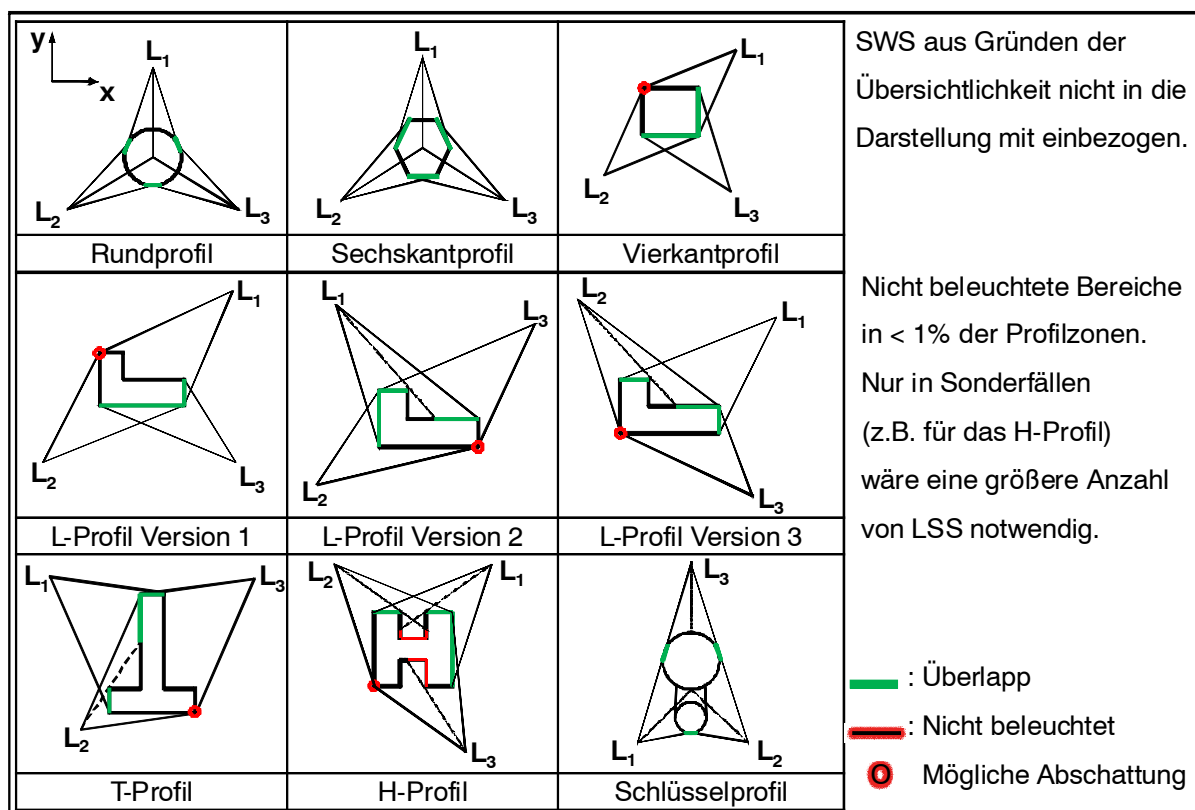


Bild 61: Einstellverfahren der häufigsten unterschiedlichen Profiltypen mit zugehörigen Abschattungs-bereichen gültig für Laser und Kameras des eingesetzten LSS im OMS (Einstellung des SWS aus Gründen der Übersichtlichkeit in dieser Darstellung nicht vorhanden)

Der Beobachtungswinkel und der Überlappungsbereich sind dabei entscheidende Größen. Hierbei sind die Winkel und Abstände stets so einzustellen, dass der Bereich unbeleuchteter und gleichzeitig unbeobachteter Bereiche (um das Profil) minimal ist. Außerdem sind dazu in den Überlappzonen einzelne Überlappungswinkel von rund 10° (entspricht etwa relativen 7 % bis 10 % der Linienlänge) für die Datenfusion einzuhalten um die abweichungsminimale Datenfusion zu ermöglichen ohne zu große Bereiche „doppelt“ zu beleuchten. Das SWS muss zudem im Winkel um die z-Achse rotiert werden können in der Weise, dass es zur kontinuierlichen Kalibrierung durch systematische

Korrektur des Hauptmaßes konstruktiv beitragen kann [WECKENMANN 2010a]. Ein softwaregebundenes Assistenzsystem zur Auswahl des zu messenden Profiltyps und den dann ausgegebenen Einstellwerten wurde dafür bereitgestellt (Bild 61). Bei Messobjekten wie dem L-Profil muss abhängig von den wichtigsten zu messenden Merkmalen eine Fallunterscheidung in der Berechnung gemacht werden, um optimale Einstellparameter zu erhalten. Die Grundeinstellungen hierbei basieren für alle Profile auf dem Rundprofil. Exemplarisch wird im Folgenden für das L-Profil der Ablauf zur Überlappberechnung und im Rückwärtsschritt die Ausgabe der Einstelldaten skizziert. Durch die in Bild 62 links dargestellten Parameter für das L-Profil (hier: a_L , b_L , c_L und d_L) lässt sich die Einstellung ausreichend genau charakterisieren. Auf der rechten Seite ist erkennbar, wie die verschiedenen Winkel bei Beleuchtung und Beobachtung zu trigonometrischen Gleichungen führen. Diese beschreiben die Einstellung eindeutig, sofern notwendige Fallunterscheidungen beachtet werden. Um die Gerätekonstanten innerhalb des theoretischen Beleuchtungskonzeptes teilweise einzubinden wird zumindest der Abstand wesentlicher Komponenten und abschattungsgefährdeter Konstruktionselemente zum Boden eingeführt (Bild 63). Diese Einstellwerte und die dabei zu erreichenden Grenzen, sind bei anderen Profiltypen meist gleich oder zumindest ähnlich wählbar, wodurch das Konzept Allgemeingültigkeit für Multi-Sensor-Messverfahren besitzt.

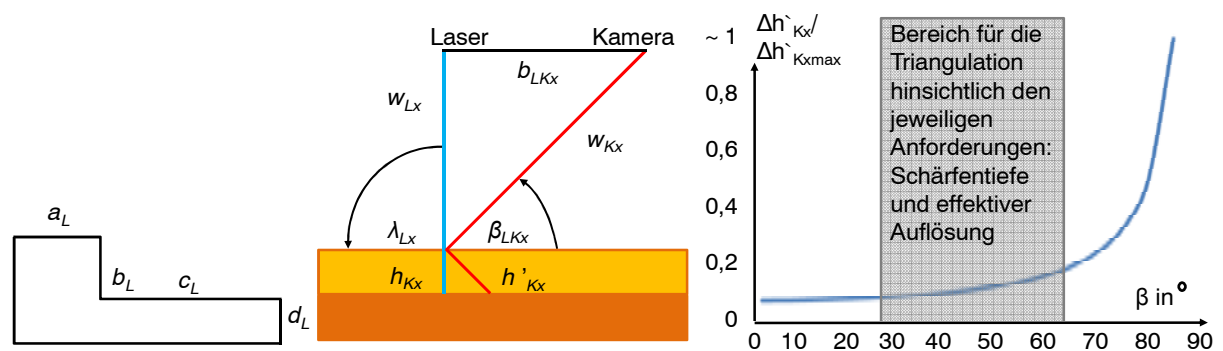


Bild 62: links: L-Profil mit Parametern a_L , b_L , c_L , d_L in Frontansicht, Mitte: Beleuchtung/Beobachtung des Profils mit zugehörigen Abständen w_{Lx} , b_{LKx} , w_{Kx} , h_{Kx} , h'_{Kx} und Winkeln λ_{Lx} sowie β_{LKx} (Seitenansicht), rechts: Auswirkung Kamerawinkel β in Bezug auf den Bildteil in der Mitte

Außerdem sind für die Einsatzgrenzen auch die Schärfiefenbereiche von Laser und Kameras, die Überlappbereiche von ca. 7 - 10 % sowie die Mindestabstände von 200 mm wegen der Wärmeentwicklung der Messobjekte zu berücksichtigen. Ausgabewert für eine finale Einstellempfehlung ist auch die erreichte Linienbreite am Messobjekt bezüglich Beleuchtung und Beobachtungsstrecke und die mechanischen Anforderungen, Kabelführungen, gegenseitige Abschattung der Sensoreinheiten etc. Zuerst muss der erforderliche Mindestabstand ermittelt werden, wofür eine Fallunterscheidung notwendig ist. Dabei gilt für den 1. Fall gemäß Bauteilgeometrien nach Bild 62, links:

$$b_L + d_L \geq (a_L + c_L) \cdot \tan(\varepsilon_{L1}) \quad (4.48)$$

Eine Pseudovariablen in Form des Hilfsparameters k_{hx} wird in Gleichung 4.49 und den darauf folgenden Betrachtungen eingeführt. Aus Gründen der Übersichtlichkeit werden nicht alle Parameter und dafür zu bildenden Hilfsdreiecke in allen Details geklärt:

$$k_{h1} = \frac{a_L + c_L}{2 \cdot \cos(\varepsilon_{L1})} \quad (4.49)$$

$$y_{h1} = \frac{a_L + c_L}{2} \cdot \tan(\varepsilon_{L1}) \quad (4.50)$$

$$y_{h2} = \frac{b_L + d_L}{2} - y_{h1} \quad (4.51)$$

$$k_{h2} = y_{h2} \cdot \sin(\varepsilon_{L1}) \quad (4.52)$$

$$w_{L1,eff} = x_{L1} - k_{h1} - k_{h2} \quad (4.53)$$

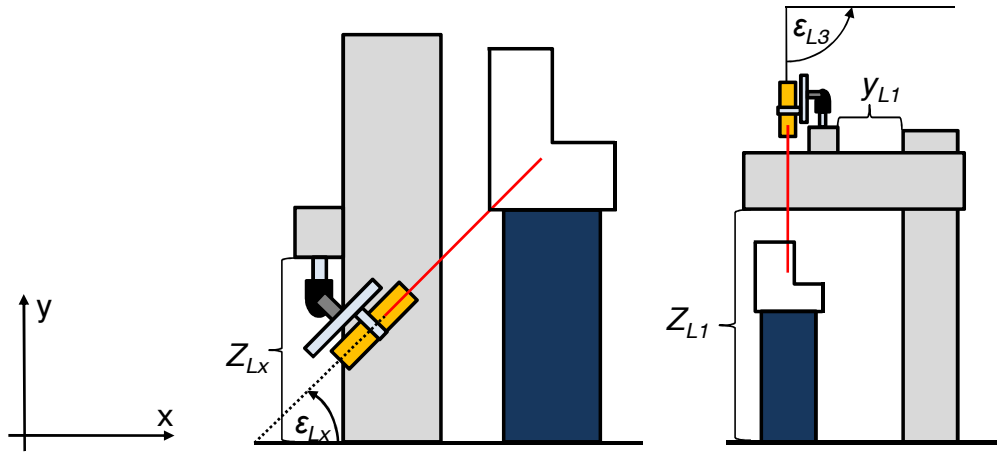


Bild 63: Konstruktionsspezifische Zusatzparameter Z_{Lx} , Z_{L1} , ε_{L3} , ε_{Lx} , y_{L1} links: seitlicher Laserfächer, rechts: Laserfächer von oben (blau markiert: die Halterung und die Profilaktorik des Messobjekts)

Für den 2. Fall aus Bild 62 links gilt:

$$b_L + d_L < (a_L + c_L) \cdot \tan(\varepsilon_{L1}) \quad (4.54)$$

$$k_{h1} = \frac{b_L + d_L}{2 \cdot \sin(\varepsilon_{L1})} \quad (4.55)$$

$$y_{h1} = \frac{b_L + d_L}{2 \cdot \tan(\varepsilon_{L1})} \quad (4.56)$$

$$y_{h2} = \frac{a_L + c_L}{2} - y_{h1} \quad (4.57)$$

Nun sind die Beobachtungswinkel und die Berechnungen der Einstellparameter für Laser 1 in dieser Variante wie folgt zu berechnen (Bild 64), für den 1. Fall:

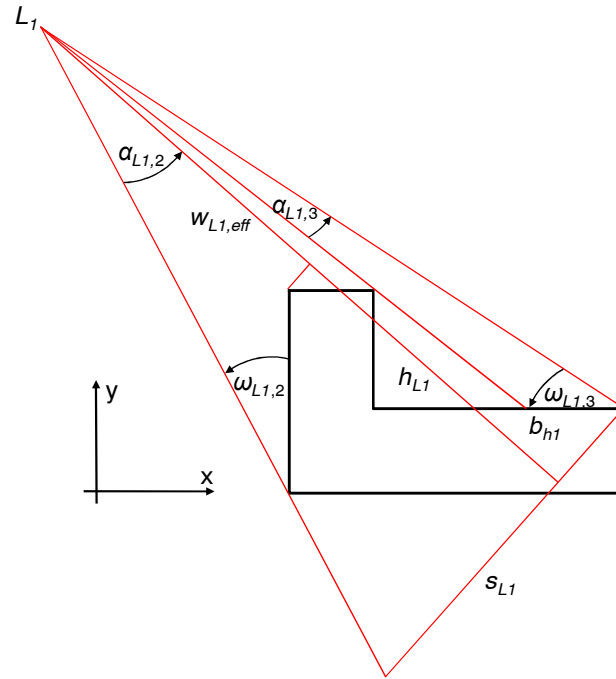


Bild 64: Einstellsituation mit den Winkeln $\alpha_{L1,2}$, $\alpha_{L1,3}$, $\omega_{L1,2}$, $\omega_{L1,3}$ und den Abständen $w_{L1,eff}$, h_{L1} , b_{h1} , s_{L1} zu Laser 1 (L_1) des LSS im OMS

$$k_{h2} = y_{h2} \cdot \cos(\varepsilon_{L1}) \quad (4.58)$$

$$w_{L1,eff} = x_{L1} - k_{h1} - k_{h2} \quad (4.59)$$

$$a_L \leq \frac{a_L + c_L}{2} \quad (4.60)$$

$$k_{h3} = \sqrt{\left(\frac{b_L + d_L}{2}\right)^2 + \left(\frac{c_L - a_L}{2}\right)^2} \quad (4.61)$$

$$c_{L1,1} = \sqrt{x_{L1}^2 + k_{h3}^2 - 2 \cdot x_{L1} \cdot k_{h3} \cdot \cos\left[\arcsin\left(\frac{b_L + d_L}{2 \cdot k_{h3}}\right) - \varepsilon_{L1}\right]} \quad (4.62)$$

$$\alpha_{L1,1} = \arcsin\left\{\frac{k_{h3}}{c_{L1,1}} \cdot \sin\left[\arcsin\left(\frac{b_L + d_L}{2 \cdot k_{h3}}\right) - \varepsilon_{L1}\right]\right\} \leq 20^\circ \quad (4.63)$$

Für den möglicherweise existenten 2. Fall gilt:

$$a_L \leq \frac{a_L + c_L}{2} \quad (4.64)$$

$$k_{h3} = \sqrt{\left(\frac{b_L + d_L}{2}\right)^2 + \left(\frac{c_L - a_L}{2}\right)^2} \quad (4.65)$$

$$c_{L1,1} = \sqrt{x_{L1}^2 + k_{h3}^2 - 2 \cdot x_{L1} \cdot k_{h3} \cdot \cos\left[90^\circ + \arctan\left(\frac{-c_L + a_L}{b_L + d_L}\right) - \varepsilon_{L1}\right]} \quad (4.66)$$

$$\alpha_{L1,1} = \arcsin \left\{ \frac{k_{h3}}{c_{L1,1}} \cdot \sin \left[90^\circ + \arctan \left(\frac{-c_L + a_L}{b_L + d_L} \right) - \varepsilon_{L1} \right] \right\} \leq 20^\circ \quad (4.67)$$

Dieser Grenzwinkel wurde aus Erfahrungswerten zu 20° festgelegt (Gleichung 4.63), wobei flache Einstellwinkel kleiner 30° bereits selten empfehlenswert sind (Bild 62).

$$c_{L1,2} = \sqrt{x_{L1}^2 + r_{L1}^2 - 2 \cdot x_{L1} \cdot r_{L1} \cdot \cos(\varepsilon_{L1} + \eta_{L1})} \quad (4.68)$$

$$\alpha_{L1,2} = \arcsin \left[\frac{r_{L1}}{c_{L1,2}} \cdot \sin(\varepsilon_{L1} + \eta_{L1}) \right] \leq 20^\circ \quad (4.69)$$

$$\omega_{L1,1} = \varepsilon_{L1} - \alpha_{L1,1} \quad (4.70)$$

$$\omega_{L1,2} = 180^\circ - \alpha_{L1,2} - (90^\circ + \varepsilon_{L1}) \quad (4.71)$$

Bei dieser und auch bei einigen anderen Profilformen muss die notwendige Schärfentiefe (entspricht der zu beleuchtenden Strecke orthogonal zum Laserfächer) berechnet werden, um zu überprüfen, ob der Arbeitspunkt des Lasers im Schärfentiefbereich liegt. Die Werteberechnung für den Laser 2 errechnet sich gleichartig (Bild 65).

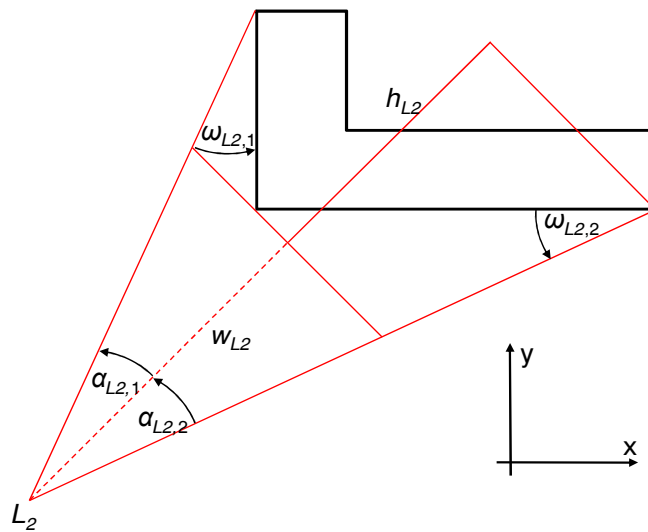


Bild 65: Einstellsituation des Lasers 2 (L_2) des LSS (exemplarisch) im OMS mit den jeweiligen Freiheitsgraden; hierbei eingezeichnete Winkel $\alpha_{L2,1}$, $\alpha_{L2,2}$, $\omega_{L2,1}$, $\omega_{L2,2}$ und die Abstände w_{L2} , h_{L2}

Im Rahmen der verfahrensbedingten Herleitungen sind auch Hilfsparameter zu berechnen, auf deren Einzeichnung aus Gründen der Übersichtlichkeit in den Bildern 62 bis 70 teilweise verzichtet wurde. Für Arbeiten im Laboratorium empfiehlt sich die Verwendung der dabei erstellten softwaregestützten Werkzeuge. Für andere Multi-Sensor-Messaufgaben der Fertigungsmesstechnik kann die Automatisierung mittels motorischer Linearführungen, einzelnen oder auch überlagerten Rotationspositionieren bzw. Hexapoden anwendungsgerecht sein. Für Messobjekte mit geometrisch gleichverteilten Ausprägungen hinsichtlich der Querschnittsform gilt für den 1. Fall:

$$a_L \leq (b_L + d_L) \cdot \tan(\varepsilon_{L1}) \quad (4.72)$$

$$h_{L1} = c_{L1,2} \cdot \cos(\alpha_{L1,2}) - w_{L1,eff} \quad (4.73)$$

Im hierbei möglichen 2. Fall gilt für „eher breit geformte“ a_L :

$$a_L > (b_L + d_L) \cdot \tan(\varepsilon_{L1}) \quad (4.74)$$

$$h_{L1} = c_{L1,1} \cdot \cos(\alpha_{L1,1}) - w_{L1,eff} \quad (4.75)$$

Die Beleuchtungsbreite ist auch hier gleich wie im 1. Fall mit:

$$a_L \leq (b_L + d_L) \cdot \tan(\varepsilon_{L1}) \quad (4.76)$$

Mit Hilfe des Sinussatzes ergibt sich nach einigen trivialen Umformungen:

$$s_{L2} = \frac{\sin(\alpha_{L1,1} + \alpha_{L1,2}) \cdot c_{L1,2}}{\sin(90^\circ - \alpha_{L1,1})} \quad (4.77)$$

Im 1. Fall ist vorzugehen nach:

$$a_L > (b_L + d_L) \cdot \tan(\varepsilon_{L1}) \quad (4.78)$$

$$s_{L2} = \frac{\sin(\alpha_{L1,1} + \alpha_{L1,2}) \cdot c_{L1,1}}{\sin(90^\circ - \alpha_{L1,2})} \quad (4.79)$$

Wie schon bei der o. g. Berechnung wird auch hier die gesonderte Kontrollbedingung geprüft und somit ermittelt, ob sich ein zusätzlicher Überlapp ergibt. Dabei stellt sich nachstehend der wiederum 1. Fall dar mit:

$$b_L \geq c_L \cdot \tan(\varepsilon_{L1} - \alpha_{L1,1}) \quad (4.80)$$

Im Grenzfall ist der Überlapp gleich Null. Im sich ergebenden 2. Fall:

$$b_L < c_L \cdot \tan(\varepsilon_{L1} - \alpha_{L1,1}) \quad (4.81)$$

Nun ergibt sich ein zusätzlicher Überlapp. Zusätzlich wird der Einstellwinkel sehr groß. Daher muss eine weitere Unterscheidung im 2.1. Fall durchgeführt werden:

$$a_L < \frac{a_L + c_L}{2} \quad (4.82)$$

Dabei ist wieder mehrfach zu unterscheiden in den damit 2.1.1. Fall:

$$b_L + d_L \geq (c_L - a_L) \cdot \tan(\varepsilon_{L1}) \quad (4.83)$$

$$b_{h1} = c_L - \frac{b_L}{\tan(\varepsilon_{L1} - \alpha_{L1,1})} \quad (4.84)$$

$$c_{L1,3} = \frac{b_L}{\sin(\varepsilon_{L1} - \alpha_{L1,1})} \quad (4.85)$$

$$b_{h2} = \sqrt{b_{h1}^2 + (c_{L1,1} + c_{L1,3})^2 - 2 \cdot b_{h1} \cdot \sqrt{(c_{L1,1} + c_{L1,3}) \cdot \cos(180^\circ - \varepsilon_{L1} + \alpha_{L1,1})}} \quad (4.86)$$

$$\alpha_{L1,3} = \arcsin\left(\frac{b_{h1}}{b_{h2}} \cdot \sin(180^\circ - \varepsilon_{L1} + \alpha_{L1,1})\right) \quad (4.87)$$

$$\omega_{L1,3} = \varepsilon_{L1} - \alpha_{L1,1} - \alpha_{L1,3} \quad (4.88)$$

Wenn es einen zusätzlichen Überlapp gibt, kann auch die Berechnung der Höhe abweichen. Zum Abschluss fehlt noch der Fall für große Einstellwinkel. Welche Werte dies bezeichnet, hängt in diesem Zusammenhang maßgeblich von Profilform und Profilgröße ab. Diese Schritte und die weiteren Regeln zeigen, weshalb eine Softwareassistenz für das Einstellverfahren unumgänglich scheint, da eine Reihe von Nebenanforderungen zu Fallunterscheidungen und rechnerischen Schritten führt.

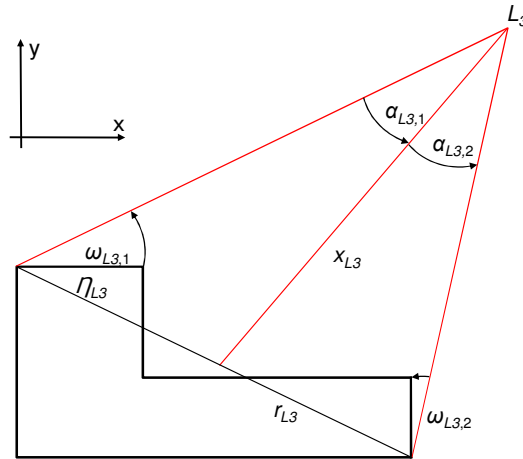


Bild 66: Einstellsituation mit den Winkeln $\alpha_{L3,1}$, $\alpha_{L3,2}$, $\omega_{L3,1}$, $\omega_{L3,2}$ und den sich ergebenden Abständen x_{L3} , r_{L3} , η_{L3} zu Laser 3 (L_3) des LSS im OMS

Der gegensätzliche 2.1.2. Fall gestaltet sich demnach zu:

$$b_{h1} = c_L - \frac{b_L}{\tan(\varepsilon_{L1} + \alpha_{L1,1})} \quad (4.89)$$

$$c_{L1,3} = \frac{b_L}{\sin(\varepsilon_{L1} + \alpha_{L1,1})} \quad (4.90)$$

$$b_{h2} = \sqrt{b_{h1}^2 + (c_{L1,1} + c_{L1,3})^2 - 2 \cdot b_{h1} \cdot \sqrt{(c_{L1,1} + c_{L1,3}) \cdot \cos(180^\circ - \varepsilon_{L1} - \alpha_{L1,1})}} \quad (4.91)$$

Wenn es einen zusätzlichen Überlapp gibt, kann auch die Berechnung der Höhe abweichen und folglich eine weitere Fallunterscheidung notwendig machen, welche in dem o.g. Assistenzwerkzeug hinsichtlich ihrer Plausibilität kontrolliert wird.

Im Fall 2.2 wäre nach vorausgegangenen Ansätzen:

$$\alpha_{L1,3} = \arcsin \left(\frac{b_{h1}}{b_{h2}} \cdot \sin (180^\circ - \varepsilon_{L1} - \alpha_{L1,1}) \right) \quad (4.92)$$

$$\omega_{L1,3} = \varepsilon_{L1} + \alpha_{L1,1} - \alpha_{L1,3} \quad (4.93)$$

$$a_L \geq \frac{a_L + c_L}{2} \quad (4.94)$$

Die Berechnung entspricht hierbei der für Fall 2.1.1. Die Berechnung der Werte für den Laser 3 stellt sich gemäß Skizze in Bild 66 dar. Diese ist im Wesentlichen gleich wie bei Laser 1 und Laser 2.

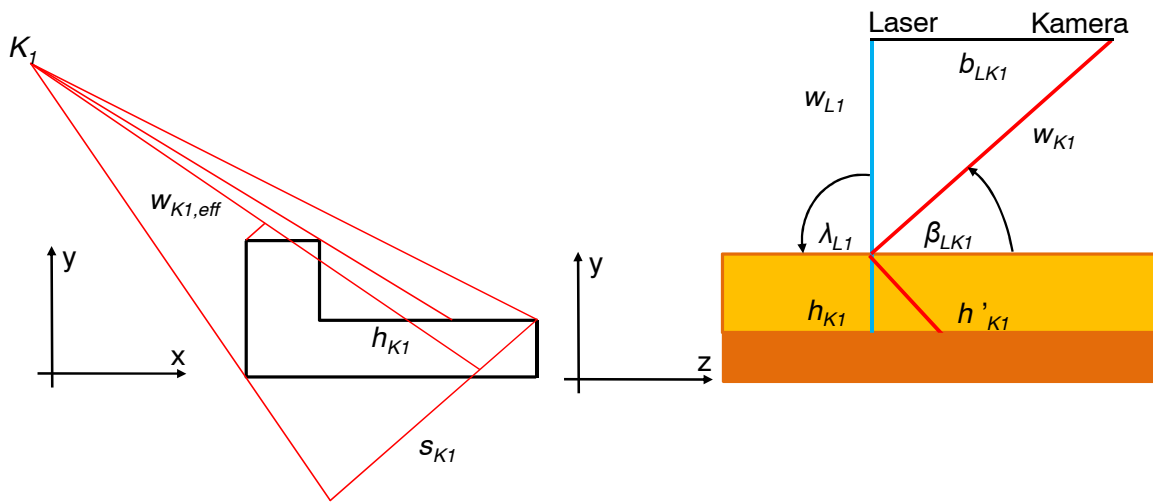


Bild 67: Einstellsituation mit den Winkeln λ_{L1} , β_{LK1} und den Abständen b_{LK1} , w_{K1} , h_{K1} , h'_{K1} , $w_{K1,eff}$, s_{K1} zu Kamera 1 (K_1) des LSS, links: Frontansicht, rechts: Seitenansicht

Eine Unterscheidung ergibt sich bei der Berechnung der Einstellparameter. Der größte Unterschied ist dabei, dass dieser Sensor meist nach oben zeigend montiert werden muss und nicht wie bisher mit Tendenz zur Ausrichtung nach unten. Diese Randbedingung ist erforderlich und erwähnenswert, da sonst die Halterung des Lasers 3 mit der des Laser 1 mechanisch kollidieren würde. Dies muss überprüft werden, indem die z-Werte von Laser 1 und Laser 3 verglichen werden. In dem hier vorgestellten teilautomatisierten Einstellverfahren wird dies automatisch geprüft und ggf. eine visuelle Warnung für den Anwender ausgegeben. Aus dem Aufbau und dem Hilfswinkel sowie der Hilfsstrecke folgt anschließend der Einstellwinkel. Die Berechnung der Werte für Kamera 1, 2 und 3 errechnet sich analog zu der Darstellung in Bild 67:

$$\gamma_{L3} = \arctan \left(\frac{h_A + i_A}{w_{L3} + r_L + w_A - l_A} \right) \quad (4.95)$$

$$k_{L3} = \frac{h_A + i_A}{\sin(\gamma_{L3})} \quad (4.96)$$

$$\varepsilon_{L3} = \gamma_{L3} + \arccos\left(\frac{y_{A,ges}}{k_{L3}}\right) \quad (4.97)$$

Die Höhe z_{Ln} stellt sich folgendermaßen ein:

$$z_{L3} = g_A + \frac{b_L + d_L}{2} + x_{L3} \cdot \sin(\varepsilon_{L3}) + (w_A - l_A) \cdot \sin(\varepsilon_{L3}) - (i_A + h_A) \cdot \cos(\varepsilon_{L3}) - o_A - q_A - a_A \quad (4.98)$$

Hierbei ist zu beachten, dass:

$$z_{L3} + a_A \leq z_{L1} \quad (4.99)$$

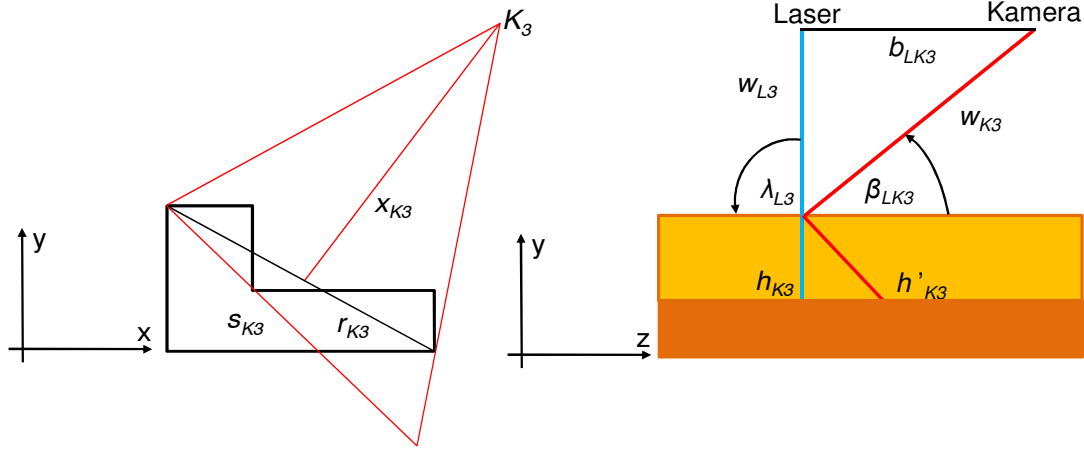


Bild 68: Einstellsituation mit den Winkeln λ_{L3} , β_{LK3} und Abständen s_{K3} , r_{K3} , x_{K3} , h_{K3} , h'_{K3} , w_{L3} , w_{K3} , b_{LK3} zu Kamera 3(K_3) des LSS im OMS; links: Frontansicht, rechts: Seitenansicht

Die inverse Kontrolle der Überlappberechnung zeigt, dass der Überlapp $\ddot{U}_{Lx}$ auf Grund der Berechnungen für Laser und Kamera der Gleiche ist. Er ergibt sich aus:

$$\ddot{U}_{L1} = a_L + b_L + d_L + b_{h1} \quad (4.100)$$

$$\ddot{U}_{L2} = a_L + b_L + c_L + d_L \quad (4.101)$$

$$\ddot{U}_{L3} = a_L + b_L + c_L + d_L \quad (4.102)$$

Die einzelnen Überlappungen ergeben sich zu:

$$\ddot{U}_{L1/L2} = \ddot{U}_{K1/K2} = b_L + d_L \quad (4.103)$$

$$\ddot{U}_{L1/L3} = \ddot{U}_{K1/K3} = a_L + b_L + d_L + d_{h1} \quad (4.104)$$

$$\ddot{U}_{L2/L3} = \ddot{U}_{K2/K3} = 0 \quad (4.105)$$

Bei diesem Profiltyp ist es mit dem bestehenden System nicht möglich, eine Überlappung zwischen allen Sensoren zu realisieren (Bild 61) wobei sich der prozentuale Überlapp entsprechend ergibt. Die Berechnung der Werte für die Kameras erfolgt gemäß Darstellungen (Bild 68 und Bild 69). In Bild 70 ist erkennbar, wie und um welche Parameter der

exzentrischen, mechanischen Befestigung sich die Formulierungen noch gerätespezifisch erweitern lassen. Dabei besitzen die Gleichungen 4.43 bis 4.103 weiterhin Gültigkeit und können um diese Parameter erweitert werden.

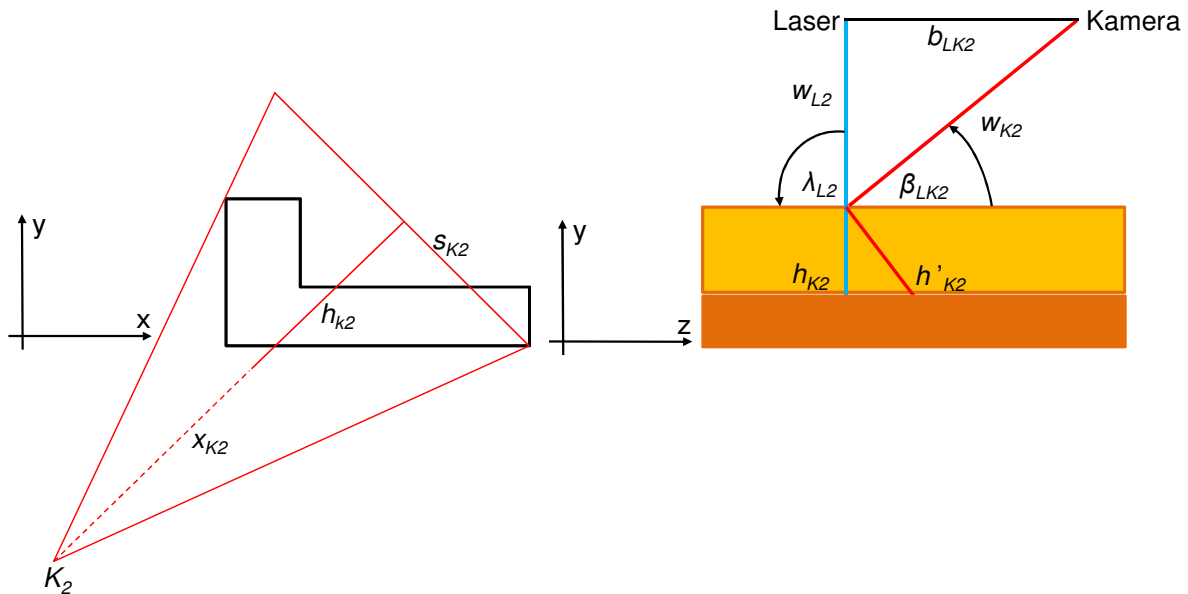


Bild 69: Einstellsituation mit den Winkeln λ_{L2} , β_{LK2} und Abständen s_{K2} , x_{K2} , h_{K2} , h'_{K2} , w_{L2} , w_{K2} , b_{LK2} zu Kamera 2 (K₂) des LSS im OMS; links: Frontansicht, rechts: Seitenansicht

Die Justierung der Sensoren muss nicht völlig exakt vorgenommen werden, bzw. zwischen Profilwechseln verändert werden (Tabelle 6). Es können jedoch die Messergebnisse und Messbereiche in erheblichem Umfang optimiert werden, Bedienfehler vermieden und die Zeiten zur Justage und Kalibrierung merklich verringert werden, wenn entsprechend eingestellt wird. In Versuchen im Laboratorium waren deutliche Unterschiede nach Verwendung einer derartigen Positionier- und Ausrichtestrategie in Form von reproduzierbaren und schnelleren Messergebnissen feststellbar.

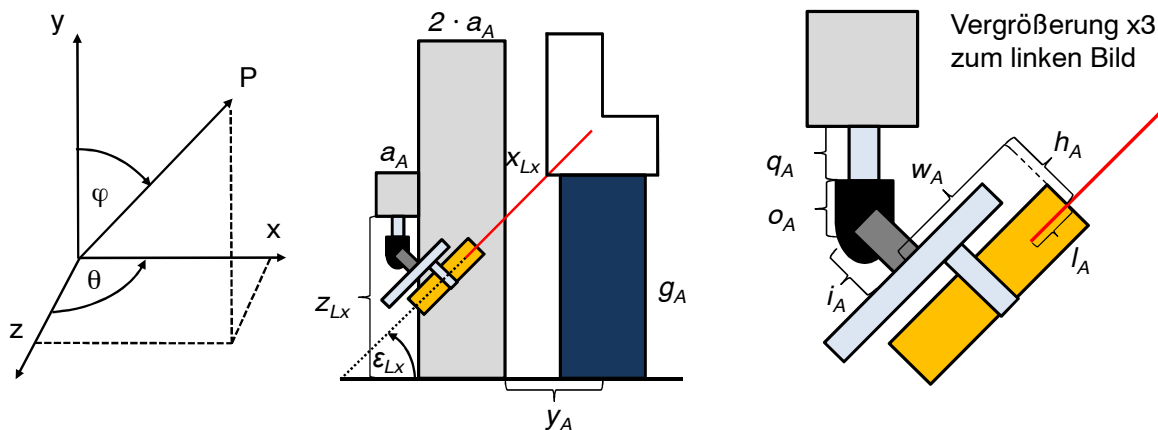


Bild 70: Erweiterte geometrische Montagesituation der Sensoren und deren Halterungen anhand eines Lasers des LSS im OMS, links: Umrechnung in extrinsische Polarkoordinaten, Mitte und rechts: Winkel ε_{Lx} und Abstände z_{Lx} , a_A , x_{Lx} , y_A , g_A , q_A , o_A , i_A , w_A , h_A , l_A (blau markiert: die Halterung und Profilaktorik des Messobjekts); a_{A1} entspricht der Breite des Montagerahmens (auch Bild 47)

Die Umrechnung der intrinsischen räumlichen Parameter, welche zu den Beziehungen von Beleuchtern (LSS-Laserfächer) und den Beobachtern (LSS-Kamerasysteme) gehören, erfolgt nach Bild 70 in extrinsischen Koordinaten, welche nach dem dafür aufgespannten Koordinatensystem durch rechnerische Umformungen in Polarkoordinaten überführt werden (links). Damit ist zum Einen der wissenschaftlich fundierte, weitgehend allgemeingültige Zusammenhang der Einstellung in Bezug auf charakteristische Winkel und Ortsbeziehungen, zum Anderen die leichte Einstellbarkeit (von außen zugänglich), mit den dafür einzustellenden Parameter in Abstand und Winkel gegeben. Die Einhaltung der Größen kann mit Winkelmessern und Abstandsnormalen, bzw. Maßbändern ausreichend genau vorgenommen werden, da es sich nur um Richtwerte handelt, welche eine relative Abweichung der Größen zum vorgeschlagenen Wert von mehreren Prozent ohne kaum merkliche Einflüsse zulassen. Das vorliegende Verfahren und das zugrunde liegende Konzept ist damit auch auf andere ähnliche optische Multi-Sensor-Messverfahren übertragbar.

Tabelle 6: Auszug der Einstellparameter (LSS) in Abhängigkeit der Profilgröße a für die L-Form (Bild 47, Bild 63, Bild 70): Abstandswerte für x_n, y_n, z_n und Polarkoordinatenwinkel $\varphi_{Lx, Kx}$ und $\theta_{Lx, Kx}$

Profilgröße	Einstellparameter Laser in mm			Einstellparameter Kamera in mm		
$a = 30 \text{ mm}$	$x_4 = -141,0$	$y_2 = 484,5$	$z_4 = 50,1$	$x_4 = 141,0$	$y_2 = -2,0$	$z_4 = 50,1$
	$x_5 = -133,1$	$y_6 = 262,2$	$z_5 = 218,7$	$x_5 = 133,1$	$y_6 = -61,0$	$z_5 = 259,2$
	$x_6 = -141,0$	$z_3 = 767,3$		$x_6 = 141,0$	$z_3 = 602,5$	
$a = 50 \text{ mm}$	$x_4 = -141,0$	$y_2 = 504,5$	$z_4 = 50,1$	$x_4 = 141,0$	$y_2 = 24,4$	$z_4 = 50,1$
	$x_5 = -133,1$	$y_6 = 272,2$	$z_5 = 218,7$	$x_5 = 133,1$	$y_6 = -47,8$	$z_5 = 264,2$
	$x_6 = -141,0$	$z_3 = 787,3$		$x_6 = 141,0$	$z_3 = 612,5$	
$a = 70 \text{ mm}$	$x_4 = -141,0$	$y_2 = 524,5$	$z_4 = 50,1$	$x_4 = 141,0$	$y_2 = 50,8$	$z_4 = 50,1$
	$x_5 = -133,1$	$y_6 = 282,2$	$z_5 = 218,7$	$x_5 = 133,1$	$y_6 = -34,6$	$z_5 = 269,2$
	$x_6 = -141,0$	$z_3 = 807,3$		$x_6 = 141,0$	$z_3 = 622,5$	
$a = 100 \text{ mm}$	$x_4 = -141,0$	$y_2 = 55,4$	$z_4 = 50,1$	$x_4 = 141,0$	$y_2 = 90,4$	$z_4 = 50,1$
	$x_5 = -133,1$	$y_6 = 297,2$	$z_5 = 218,7$	$x_5 = 133,1$	$y_6 = -14,8$	$z_5 = 276,7$
	$x_6 = -141,0$	$z_3 = 837,3$		$x_6 = 141,0$	$z_3 = 637,5$	
Winkel	$\varphi_{L1} = 90^\circ$	$\theta_{L1} = 90^\circ$		$\varphi_{K1} = 90^\circ$	$\theta_{K1} = 90^\circ$	
	$\varphi_{L2} = 315^\circ$	$\theta_{L1} = 270^\circ$		$\varphi_{K2} = 315^\circ$	$\theta_{K1} = 270^\circ$	
	$\varphi_{L3} = 180^\circ$	$\theta_{L1} = 0^\circ$		$\varphi_{K3} = 180^\circ$	$\theta_{K1} = 0^\circ$	

Damit können die Messobjekte vollständig beleuchtet werden, obwohl dies bei manchen Profiltypen nur erschwert möglich ist (Bild 61). Eine Rekalibrierung des OMS gemäß Kap. 4.1.1 ist nach Verstellung der Sensoren grundsätzlich immer erforderlich, wobei nicht jedesmal alle Schritte der Kalibrierprozedur durchlaufen werden müssen. Dies hängt vom Umfang der durchgeführten Justierung ab und davon, ob sich mehrere Abstände und Winkel der Sensoren verändert haben, die Profilgröße deutlich geändert zur Vormessung geändert hat und ob dann ausschließlich die Beleuchter oder zusätzlich auch die Beobachter anders einzustellen sind [WECKENMANN 2010b].

4.6 Messsoftware

Die Messsoftware sollte aufgrund der Anforderungen und der notwendigen inhaltlichen Komplexität in Hochsprache ausgeführt werden [JAEHNE 2005], [KOFER 2008]. Im Fall des hier vorgestellten messtechnischen Prototypen wurde dies mittels Softwareunterstützung in der Hochsprache *Microsoft Visual Basic.NET 2009* realisiert. Der strukturelle Messablauf ist in Bild 71 dargestellt.

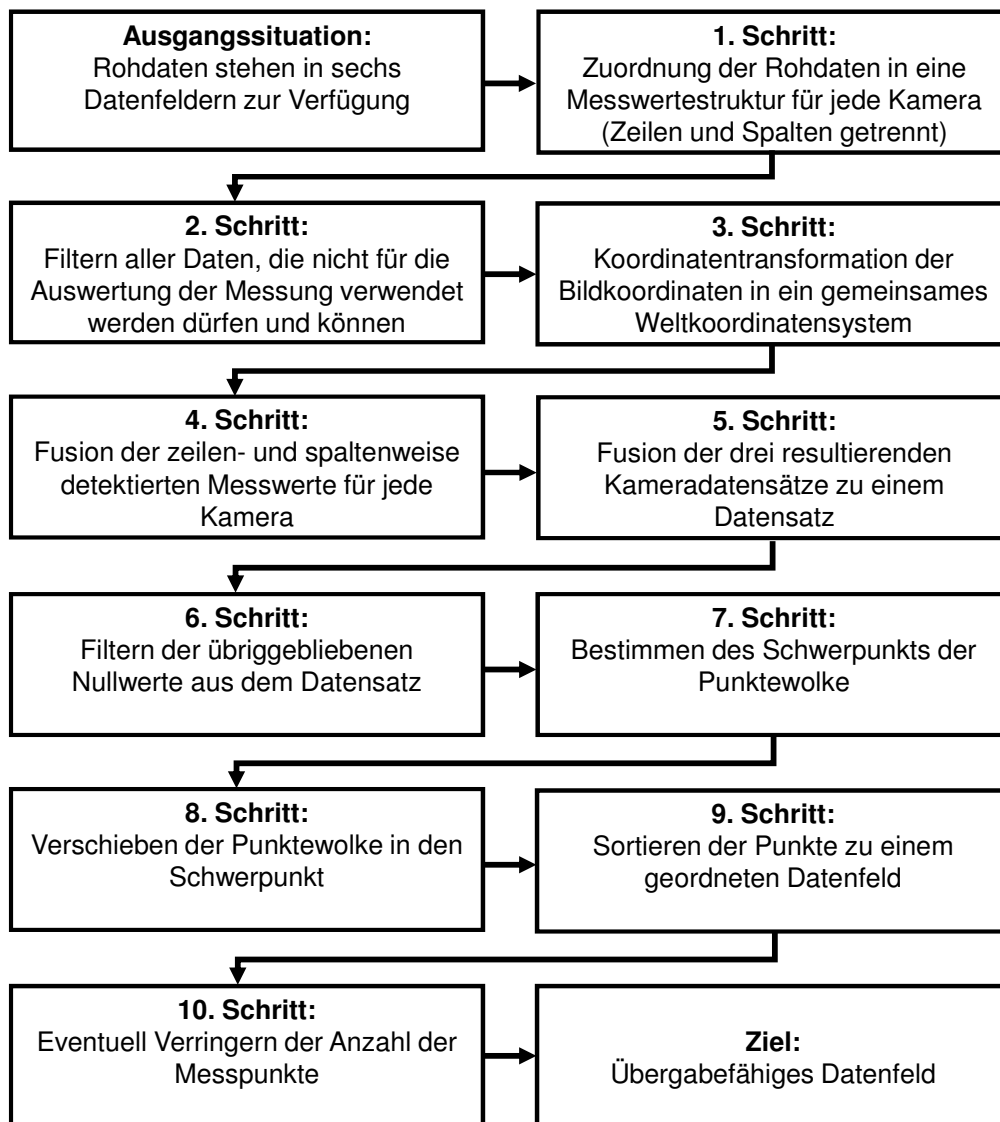


Bild 71: Ablauf der Datenverarbeitung mit dem OMS von den Rohdaten über Registrierung und Segmentierung bis zum übergabefähigen Datenfeld für die softwaregestützte Auswertung

Um die aufgenommen Profilfragmente visuell ortsfest festzulegen und um diese Profile zunächst in ihrem Schwerpunkt im WKS auszurichten, wird der arithmetische Mittelwert der x -Koordinate sowie der y -Koordinate für alle Messwerte (1 bis i) im Datenfeld anhand der Kalibrierung berechnet (Bild 72). Im Idealfall handelt es sich bei den Messwerten um eine geschlossene Punktwolke die eine annähernd gleich verteilte Häufigkeit aufweist. Dies bedeutet, dass der kürzeste Abstand zwischen zwei benachbarten Punkten immer

nahezu gleich ist. Dann entspricht der Punkt mit den Koordinaten (x_n, y_n) nicht nur dem Flächenschwerpunkt der Punktwolke, sondern auch dem Mittelpunkt des Profils. Da dies während der Messung nicht immer der Fall ist, müssen u.g. Maßnahmen getroffen werden, um dies zu gewährleisten. Die Messsoftware leistet die vollautomatische Kalibrierung. Zunächst wird dafür die aufgenommene Punktwolke derart translatorisch verschoben (Gleichungen 4.106 und 4.107), dass der errechnete Schwerpunkt mit dem Koordinatenursprung zusammenfällt.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^i x_i}{i} \quad (4.106)$$

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^i y_i}{i} \quad (4.107)$$

Durch diese Verschiebung ist sichergestellt, dass sich der Ursprung des WKS innerhalb der Punktwolke befindet, wenn es sich bei den zu messenden Profilen um ein Rundprofil, n -Kantprofil, I-Profil oder Schlüsselbartprofil handelt.

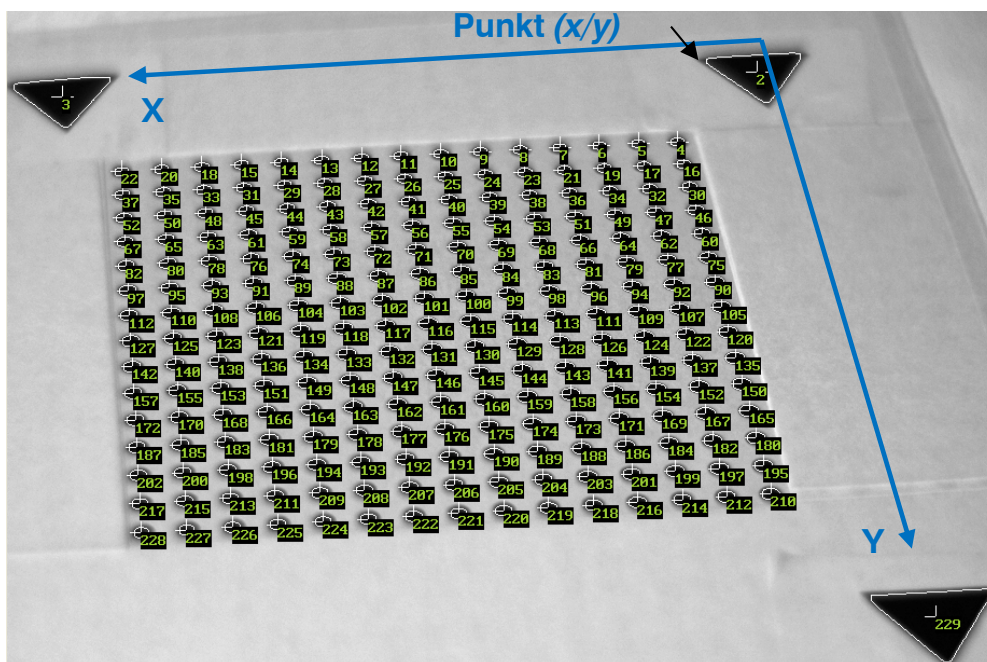


Bild 72: Automatisches Kalibrierverfahren des OMS mit Zuweisung der Punktkoordinaten; die Nutzung von Referenzmarkierung stellt die eindeutige Ausrichtung im Raum sicher

$$\begin{pmatrix} x_{i\text{neu}} \\ y_{i\text{neu}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_i - \bar{x} \\ y_i - \bar{y} \end{pmatrix} \quad (4.108)$$

Für die notwendige Sortierung muss zunächst für alle Punkte des Datenfeldes der Winkel zur x -Achse, ausgehend vom Vektor zwischen Koordinatenursprung und Messpunkt, berechnet werden. Dann werden nacheinander die Punkte abgearbeitet und die Referenzpunkte 1 und 2 festgelegt. Hierzu geht der Algorithmus im Uhrzeigersinn durch das sortierte Datenfeld und erkennt charakteristische Winkelsprünge zum Ursprung (des

Kreisvektors) als charakteristisch (je nach ausgewähltem Profil). Für $y_i > 0$ bestimmt sich der Winkel zu:

$$\alpha_i = \arccos \left(\frac{x_i}{\sqrt{x_i^2 + y_i^2}} \right) \quad (4.109)$$

Der Startwinkel, von dem aus die Punkte sortiert werden sollen, kann für die Ausführung der Funktion ausgewählt und so an auftretende Anforderungen angepasst werden (Standardwinkel 0°). Um einen anderen Startwinkel zu berücksichtigen, werden die errechneten Winkel an diesen angepasst, d.h. alle werden gegen den Uhrzeigersinn um den Startwinkel verschoben. Das Sortierverfahren basiert auf dem Quicksort-Algorithmus und ist derart an die vorliegenden Aufgaben angepasst, dass das Sortieren mehrdimensionaler Felder ermöglicht wird und die Zusammengehörigkeit der beiden Einträge innerhalb des Feldes nach dem Sortieren erhalten bleibt (Tabelle 7).

Tabelle 7: Sortierverfahren zur rechnergestützten kontinuierlichen Auswertung (hier: ein Beispiel)

Unsortiertes Datenfeld	Y	X0	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7
	X	Y0	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6	Y7
	Index	0	1	2	3	4	5	6	7
Berechnung der Winkel									
Datenfeld mit Winkeln unsortiert	Winkel	α_0	α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	α_6	α_7
	Index	0	1	2	3	4	5	6	7
Sortieren mit Quicksort									
Datenfeld mit Winkeln sortiert	Winkel	α_3	α_5	α_2	α_7	α_1	α_6	α_0	α_4
	Index	3	5	2	7	1	6	0	4
Ordnen des Datenfeldes									
Sortiertes Datenfeld	Y	X3	X5	X2	X7	X1	X6	X0	X4
	X	Y3	Y5	Y2	Y7	Y1	Y6	Y0	Y4
	Index	3	5	2	7	1	6	0	4

Für den anderen Fall von $y_i < 0$ ergibt sich:

$$\alpha_i = 180^\circ - \arccos \left(\frac{x_i}{\sqrt{x_i^2 + y_i^2}} \right) \quad (4.110)$$

Dabei arbeitet der Algorithmus nach dem Prinzip „divide and conquer“, wodurch die Abhängigkeit vom Grad der Vorsortierung, bzw. der Datenfelder weitgehend unabhängig bleibt und schwierig zu sortierende Datensätze immernoch relativ schnell durchlaufen werden im Vergleich zu anderen Sortierverfahren. Diese mangeln häufig an eindeutiger Sortierfolge oder scheiden wegen der größeren Rechenzeit, Instabilität oder nicht eindeutiger Terminierung aus [MARESCH 2006]. Daher wird im Rahmen der Arbeit und der Evaluation der Messsoftware ausschließlich mit dem Quicksort-Algorithmus sortiert. Mit dieser

Rotation um α_i entstehen Punkte, denen betragsmäßig ein Winkel mit negativem Vorzeichen zugewiesen ist. Da der Fall eintreten kann, dass durch die vorhergehende Umformung negative Winkelwerte im Datenfeld vorhanden sind, müssen diese durch Addition von 360° wieder in den positiven Wertebereich transformiert werden (Bild 73).

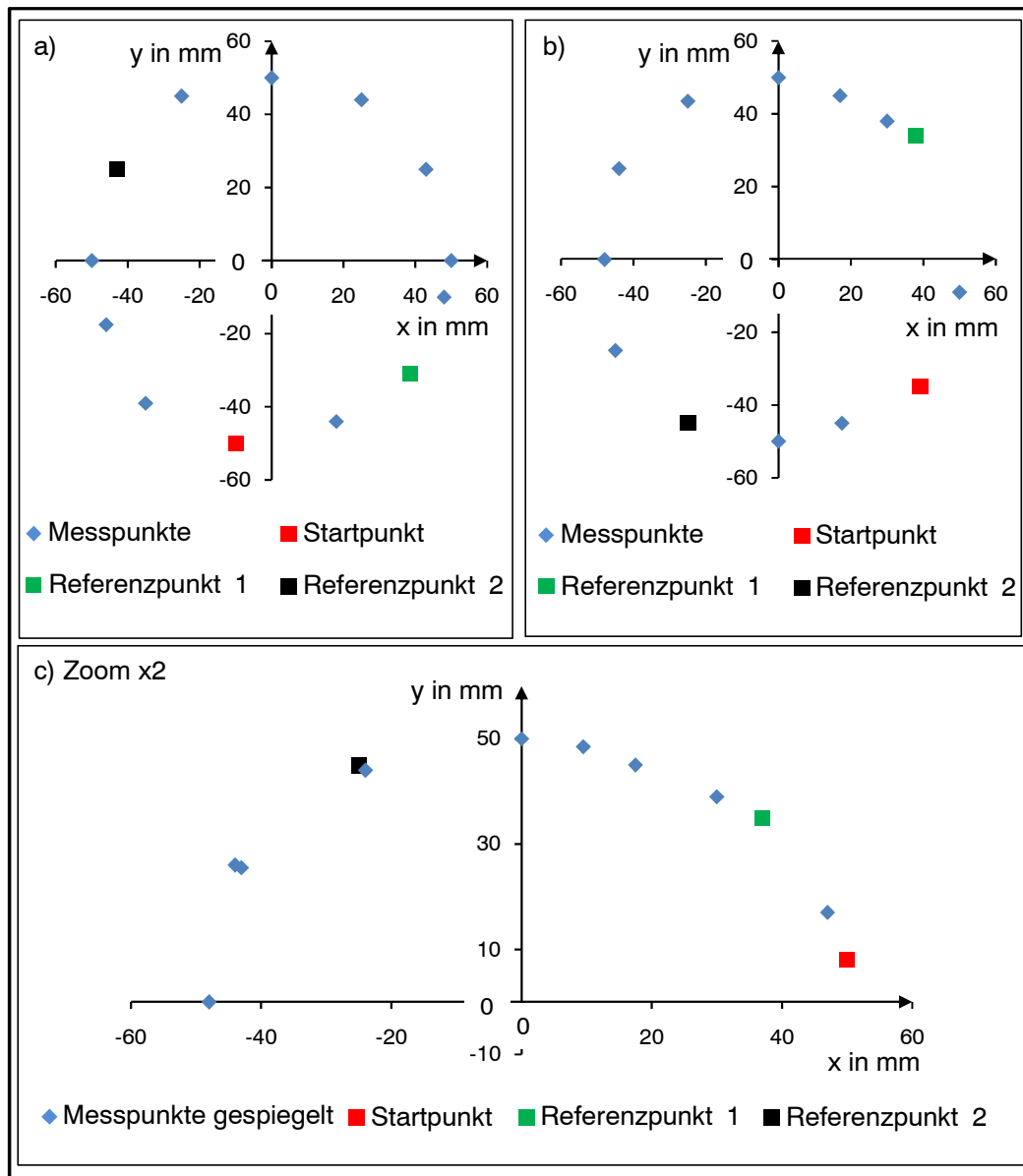


Bild 73: Identifikations- und Kontrollverfahren zur versatzminimierten Positionierung des Messdatensatzes im Schwerpunkt; hier: relevante Punkte für die weitere Auswertung, a) Referenzpunkte im 2. und 4. Quadranten, b) Referenzpunkte 1. und 3. Quadrant, c) Vergrößerte Darstellung

Als nächstes werden alle Punkte, die sich im dritten oder vierten Quadranten der Ebene befinden, in den ersten oder zweiten Quadranten gespiegelt. Abschließend wird der o.g. Algorithmus auf das transformierte Datenfeld angewendet. Der Index des gesuchten Punktes ist der, dessen Winkel am nächsten der Null liegt. Nachdem die vier gesuchten Punkte ermittelt wurden, wird der Abstand d_i zum Koordinatenursprung errechnet:

$$d_i = \sqrt{x_i^2 + y_i^2} \text{ für } i = 1, 2, 3, 4 \quad (4.111)$$

Dadurch wird die verbleibende systematische Abweichung der vorhergehenden Verschiebung in den Schwerpunkt der Punktwolke beseitigt, welche durch inhomogene Verteilung der Messpunkte auf der Profiloberfläche entstanden ist. Wird nun die Profilform n -Kant (z.B. Sechskantprofil) betrachtet, lässt sich zeigen, dass die beschriebene Methode auch geeignet ist, um die exakte Ausrichtung am Profilmittelpunkt bereitzustellen. Ist zusätzlich zur Verschiebung eine Rotation des Messobjekts vorhanden, wird diese im Vorfeld rechnerisch kompensiert, indem die Profile im Koordinatensystem ausgerichtet werden und deren Rotation nach Gleichung 4.112 ausreichend bestimmt wird. Die Flanken des Profils können mit der bereits für die Datenfusion vorliegenden Detektionsfunktion der Profilmittelpunkte ermittelt werden. Bei allen Konturen ist durch Festlegung eine Flanke parallel zur x -Achse des WKS und:

$$R_{\text{Ausrichtung}} = \begin{pmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} \quad (4.112)$$

mit der Steigung m der Flanke und:

$$\alpha = \tan^{-1} m \quad (4.113)$$

zu berechnen. Die Rotation muss um den Ursprung stattfinden, da ansonsten der Fall eintreten kann, dass dieser sich nicht mehr innerhalb der Punktwolke befindet und somit der nachfolgende Algorithmus nicht mehr spezifikationskonform arbeitet. Die Koordinaten der gedrehten Punktwolke bestimmen sich zu:

$$P_{\text{neu}} = R \cdot P_i \quad (4.114)$$

Damit sind für alle relevanten Profiltypen, welche aus Kanten und Teilkreisen aufgebaut sind, Methoden für die Transformation der Datensätze in ein WKS und zur Aufbereitung anforderungsgerecht bereitgestellt. Zum Auswerteverfahren wurden a priori Simulationstests durchgeführt, welche die Basis für die Messungen bildeten. In Bild 74 ist dies für ein verzerrtes, mit Schikanen versehenes T- und L-Profil skizziert. Diese offline geführten Vorarbeiten stellten die spätere Funktion prozessneutral sicher.

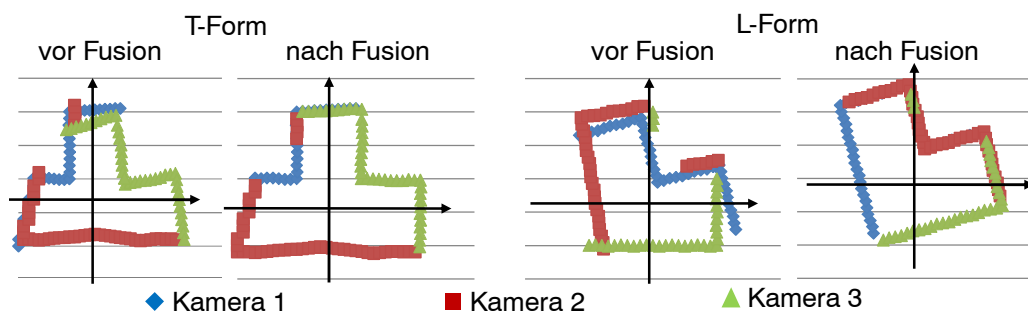


Bild 74: Simulierte Fusionsergebnisse mit automatischer Ausrichtung des WKS im Objektschwerpunkt, hier: zu überzeichneten und verzerrten Einzelkonturen; links: T-Form, rechts: L-Form

5 Untersuchung der messtechnischen Eigenschaften

Um die Fähigkeit des OMS abschließend zu evaluieren, muss das neuartige Messverfahren sowohl im Laboratorium (Kap. 5.2) getestet als auch in der Fertigung (Kap. 5.3) validiert werden. Der Prototyp wurde aus Platzgründen, organisatorischen Gründen, Aspekten der Arbeitssicherheit und der langfristig geforderten technischen Robustheit einmalig über einen längeren Zeitraum im realen Umfeld installiert. Dabei wurde der grundsätzliche Funktionsbeweis des optischen Multi-Sensor-Messverfahrens erbracht. Besonders die dafür erforderlichen und implementierten Zusatzkomponenten wie Kühlung und Abschirmung (Kap. 4.4.3) sowie die abgeänderte Konstruktion zur Fertigungsintegration (Kap. 5.3.1) sind dafür zentrale Faktoren. Diese Robustheit muss das prototypische Messsystem erfüllen, um nachweislich zu funktionieren. Die erheblichen Fremdlichtanteile durch Eigenstrahlung der Messobjekte (auch Kap. 3.1.1) und die Schwingungen (auch Kap. 4.4.3), welche im Laboratorium des Lehrstuhls nur teilweise simuliert wurden, sind wesentliche Aspekte, unter denen das Messverfahren mit den dafür erarbeiteten Vorkehrungen und den angepassten Algorithmen bestehen muss.

5.1 Vorgehensweise

Der zeitliche und inhaltliche Ablauf der Evaluation des realisierten Messverfahrens wurde im Laboratorium unter Idealbedingungen getestet, mündet in eine Messunsicherheitsanalyse und -ermittlung (Kap. 5.2.1 und Kap. 5.2.2) mit einer „worst-case“ Simulation (Kap. 5.2.3 und begründet in Kap. 5.2.4 sowie Kap. 5.2.5). Damit werden verbundene Chancen und Risiken für die Fertigungstests (Kap. 5.3.1 und Kap. 5.3.2) aufgezeigt. Aus Zeitgründen wurde dies auf einige repräsentative Messobjekte beschränkt, u.a. auch auf das häufig in der Fertigung anzutreffende Rundprofil. Die verwendeten Softwarealgorithmen wurden vorab offline an einigen Auswerteformen mit zertifizierter Messsoftware hinsichtlich der Ergebnisse verglichen und als konform beurteilt [DUWE-3D 2010], [WERTH-MESSTECHNIK 2010]. Auf dieser Basis wurden Messdaten in-line erfasst, ausgewertet, und metrologisch bewertet.

5.2 Messergebnisse mit dem Messverfahren

Längenmessergebnisse und deren Stabilität sind besonders wichtig für die Konformitätsprüfung von Strangprofilen. Es wird ein Modell der Messung und eine Simulation der Messung vorgestellt für den Einzelpunkt (Kap. 5.2.1). Die Wiederholbarkeit, die Streuung und die Langzeitstabilität sind essentielle Bestandteile für eine Befähigung des Messverfahrens in der Fertigung (Kap. 5.2.2). All das wird u.a. durch Reihenmessungen ($n > 125$) mit und ohne weitere äußere Einflussgrößen auf die Messung durchgeführt (auch Kap. 5.2.3). Die verwendeten Profile sind in Bild 21 dargestellt. Die ausführlichsten Untersuchungen wurden an Rundprofilen *11 mm*, *38 mm* sowie mit gleichen Randbedingungen

und ähnlichen erzielten Messergebnissen am Vierkantprofil (Längstes Kantenmaß: 32 mm), Sechskantprofil (Schlüsselmaße: 18 mm, 26 mm, 12,5 mm) sowie dem L-Profil (Schenkelmaß: 50 mm) und T-Profil (Lange Seite: 42 mm) durchgeführt.

5.2.1 Modellierte Messunsicherheitsanalyse nach GUM

Der „Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement“ (*GUM*) ist die international anerkannte wissenschaftliche Grundlage für die Ermittlung der Messunsicherheit eines Messvorgangs und dient maßgeblich zur Beurteilung der Qualität der Messung [SOMMER 2004]. Das Vorgehen ist anwendbar auf alle Messaufgaben und in weiten Teilen auch auf andere Multi-Sensor-Messsysteme [WECKENMANN 2006]. Die zugehörige Simulation von beigeordneten Unsicherheiten zu Messprozessen kann durch rechnergestützte Verfahren und Hilfsmittel wie der *GUM*-Workbench unterstützt werden, wobei auch hier nichtlineare Zusammenhänge und korrelierte Größen kaum – bestenfalls näherungsweise – teilweise mit erheblichem Mehraufwand berücksichtigt werden können. Dazu gehören trigonometrische Zusammenhänge, komplexe Messvorgänge oder rückgekoppelte Systeme. Diese können nur eingeschränkt (z.B. mit Monte-Carlo-Methoden oder Taylor-Reihenentwicklungen) und modelliert sowie ergebnisbezogen simuliert werden.

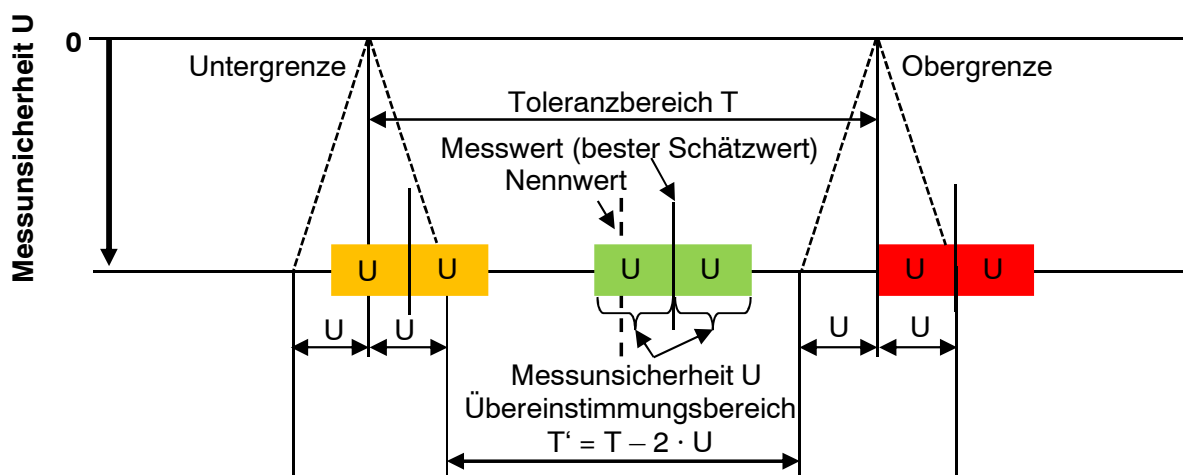
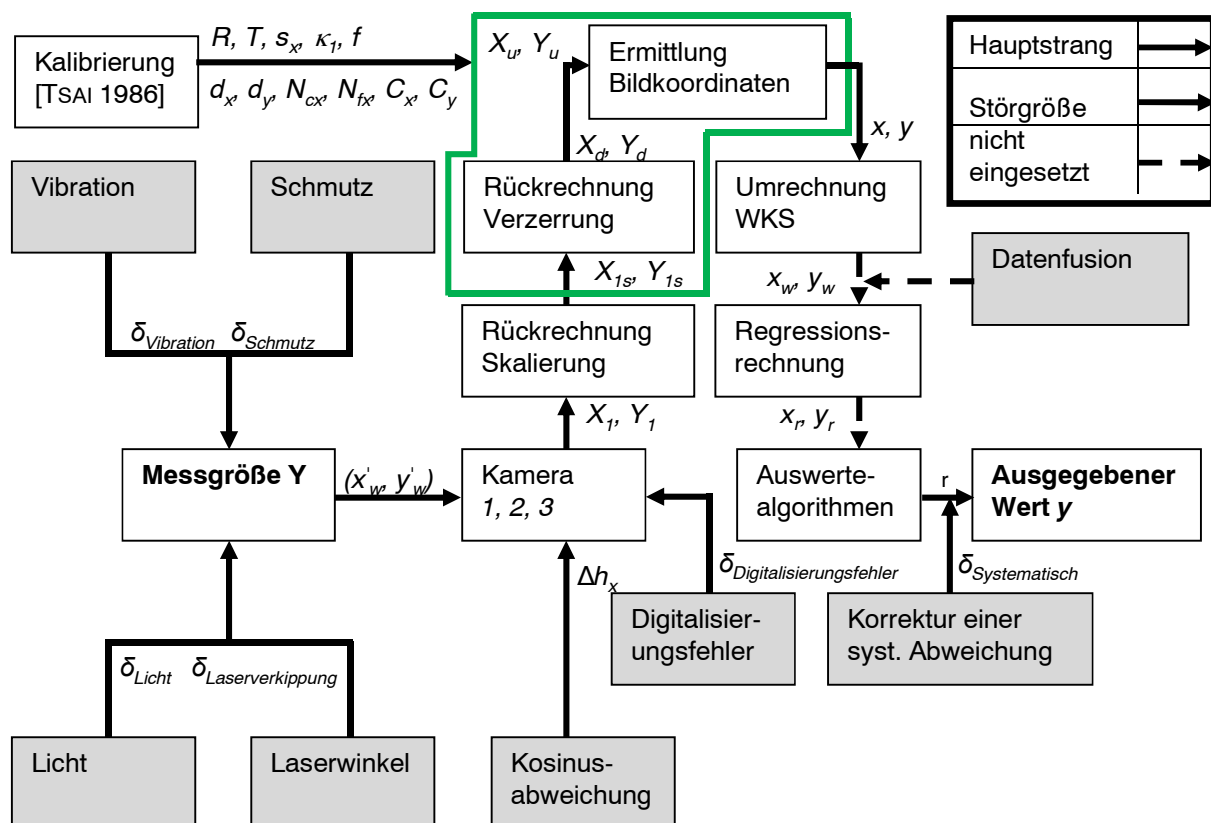


Bild 75: Übereinstimmungsbereich T' zur Konformitätsprüfung [DIN EN ISO 14253-1]; T' wird umso größer, desto kleiner die Messunsicherheit U (Güteparameter der Messung) ist [GUM 2008]

Dennoch soll das optische Multi-Sensor-Messverfahren theoretisch modelliert und das rudimentäre Modell der Messung als Grundlage des wissenschaftlichen Verfahrens und für weitere wissenschaftliche Untersuchungen zur Verfügung zu stehen. Hierbei wurde nur die Abbildung des Einzelpunktes integriert, auf dessen Basis weitere Untersuchungen für ein vollständiges Modell der Messung in nachfolgenden Arbeiten erweitert werden können. Die eingeschränkt möglichen Simulationen zur vorliegenden Arbeit werden auf Basis der *GUM Workbench 2.3* durchgeführt. Wegen der mangelnden Simulationsmöglichkeit der Auswertekriterien und o.g. Sortier- und Fusionsverfahren wurden weitergehende

Untersuchungen nicht durchgeführt. Die algorithmischen Zusammenhänge bei angewandten Auswertekriterien und zusammengesetzten Formelementen, wie abgerundeten Teilstrecken und nicht symmetrische Formergänzungen, verlangen nach erheblichen Aufwendungen, die für die erfolgreiche prototypische Realisierung nicht erforderlich schienen. Für Datenfusionsalgorithmen und mehrdimensionale sowie nichtlineare Probleme eignet sich dieser Modellierungs- und Simulationsansatz ebenso wenig, daher wurde in Kap. 5.2.2 die Messunsicherheit experimentell ermittelt und die vollständigen Messergebnisse erbracht. Die Konformität der Teile muss trotz der vorhandenen Messunsicherheit sichergestellt sein (Bild 74). Das grundlegende Modell der Messung wird in Bild 76 gezeigt. Hierbei entsprechen R der Rotationsmatrix, T dem Translationsanteil, s_x dem Skalierungsfaktor, κ_1 dem linearen Verzerrungsfaktor, f der Brennweite, d_x , d_y dem Abstand der Sensorelemente in x -/ y -Richtung, N_{cx} der Anzahl der Sensorelemente in x -Richtung, N_{fx} der Anzahl der Pixel auf dem Monitor in x -Richtung, C_x , C_y den Zentren der Bildverzerrung in x -/ y -Richtung, X_u , Y_u den unverzerrten Kamerakoordinaten und X_d , Y_d den daraus skalierten Kamerakoordinaten.



- Grün markiert sind die linearen Teile für den funktionalen Zusammenhang, welcher in den Arbeiten bereits mit o.g. Gleichungen aus Kap. 4.1.1 beschrieben sind.
- δ_x : werden (hier) bei der Modellierung des funktionalen Zusammenhangs nicht berücksichtigt.

Bild 76: Blockschaltbild; Modell mit funktionalem Zusammenhang für den Einzelpunkt über die Messung auf Basis des optischen Multi-Sensor-Messverfahrens (Vereinfachungen in blau)

Die Gleichung der Messung lautet unter den Einschränkungen zur Messung des Einzelpunktes mit dem LSS ohne rückgekoppelte systematische Korrektur mit dem SWS nach Gleichung 5.1:

$$Y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (5.1)$$

Es werden Modellgleichungen der Messung und dem funktionalen Zusammenhang für den Einzelpunkt in den Gleichungen 5.3 bis 5.9 vorgestellt, wobei die Blöcke „Regressionsrechnung“ und „Auswertalgorithmen“ mit der Übertragungsfunktion 1 (somit normiert) modelliert wurden. Besonders sinnvoll ist dies, um das GUM-konforme Modell der Messung nicht größtenteils zu entwerfen, da verschiedene Regressionsmethoden tatsächlich austauschbar Anwendung finden. Die Auswertalgorithmen sind aufgabenspezifisch zudem unterschiedlich und unterliegen mit verwendeten Filtermethoden wie dem Hoch- oder Tiefpassfilter sowie weiteren Filtern für Ausreißer nicht den Linearitätsbedingungen [GUM 2008]. Für die Berechnungen sind hauptsächlich die Gleichungen aus Kap. 3 und Kap. 4 verwendet worden. Das quantitativ bewertete Modell der Messung zur Abweichung des Einzelpunktes des Messwerts r wurde mit der Software *GUM Workbench 2.3* aufgestellt.

$$r = \sqrt{\left(\frac{a + b + c}{r_1 r_5 r_9 + r_2 r_6 r_7 + r_3 r_4 r_8 - r_7 r_5 r_3 - r_8 r_6 r_1 - r_9 r_4 r_2} + \Delta h - x_m \right)^2 + \left(\frac{d + e + g}{r_1 r_5 r_9 + r_2 r_6 r_7 + r_3 r_4 r_8 - r_7 r_5 r_3 - r_8 r_6 r_1 - r_9 r_4 r_2} - y_m \right)^2} \quad (5.2)$$

Die Parameter r_1 bis r_9 sind zu entnehmen aus Gleichungen 4.2 und Gleichungen 4.4. Der Wert r wird um den – aus dem kontinuierlichen Kalibrierverfahren auf Basis des Schattenwurfsystems ermittelten Korrekturbeiwert – korrigiert. Die eingeführten Modellparameter a , b , c , d , und e sind dabei unter Berücksichtigung der o.g. Gleichungen 4.5 bis 4.11 wie folgt beschreibbar:

$$a = (r_5 r_9 - r_6 r_8) \cdot \left\{ \frac{\left(\frac{(X_f - C_x)}{s_x} \cdot \left[1 + \kappa_1 \cdot \left(\left(\frac{(X_f - C_x) \cdot d_x}{s_x} \right)^2 + ((Y_f - C_y) \cdot d_y)^2 \right) \right] \right)}{f} - t_1 \right\} \quad (5.3)$$

$$b = (r_3 r_8 - r_2 r_9) \cdot \left\{ \frac{(X_f - C_x) \cdot d_y \cdot \left[1 + \kappa_1 \cdot \left(\left(\frac{(X_f - C_x) \cdot d_x}{s_x} \right)^2 + ((Y_f - C_y) \cdot d_y)^2 \right) \right]}{f} - t_2 \right\} \quad (5.4)$$

$$c = (r_2 r_6 - r_3 r_5) \cdot (-t_3) \quad (5.5)$$

$$d = (r_6 r_7 - r_4 r_9) \cdot \left\{ \frac{(X_f - C_x) \cdot \left[1 + \kappa_1 \cdot \left(\left(\frac{(X_f - C_x) \cdot d_x}{s_x} \right)^2 + ((Y_f - C_y) \cdot d_y)^2 \right) \right]}{f} - t_1 \right\} \quad (5.6)$$

$$e = (r_1 r_9 - r_3 r_7) \cdot \left\{ \frac{(X_f - C_y) \cdot d_y \cdot \left[1 + \kappa_1 \cdot \left(\left(\frac{(X_f - C_x) \cdot d_x}{s_x} \right)^2 + ((Y_f - C_y) \cdot d_y)^2 \right) \right]}{f} - t_2 \right\} \quad (5.7)$$

f bezeichnet die Brennweite der für die Modellierung verwendeten Kameras. Weitere Betrachtungen wurden im Rahmen der Arbeit nur empirisch durchgeführt.

$$g = (r_3 r_4 - r_1 r_6) \cdot (-t_3) \quad (5.8)$$

5.2.2 Experimentelle Messunsicherheitsbestimmung nach VDI 2617-8

Die experimentelle Bestimmung der Messunsicherheit wurde nach üblichen in der Metrologie geltenden Richtlinien durchgeführt wie aus [VDI 2617-8]. Die Durchführung einer Messunsicherheitsanalyse ist bei dem vorgestellten optischen Multi-Sensor-Messverfahren auf Basis der Längenmessergebnisse machbar [WECKENMANN 2009d].

Hierzu muss eine Referenzierung der Messstücke durchgeführt werden, welche für den eigentlichen Messvorgang zur Bestimmung der Messunsicherheit verwendet wird. Diese Referenzierung ist mit einem wesentlich genaueren Koordinatenmessgerät unter metrologischen Normbedingungen durchzuführen. Die hierbei verwendete *UPMC 1200 CARAT* der Carl Zeiss AG ist ein sehr genaues taktils Koordinatenmessgerät und kann unter Laborbedingungen Messunsicherheiten im Bereich des *MPE* (unter $1 \mu m$ in Messbereichen von kleiner $1 mm$ bis mehr als $1000 mm$) leisten. Die Richtlinien befinden sich in laufender Überarbeitung u.a. wegen der unzureichenden Abbildung von Korrekturbeiträgen und der im Modell fehlenden Abbildung nichtlinearer Effekte der Multi-Sensor-Messung [VDI 2617-6]. Die Messunsicherheit wird später experimentell anhand der Rundprofile $11 mm$ und $38 mm$ ermittelt, wobei nach den Auswertekriterien Gauß-, Pferch- und Hüllkreis [VIM 2008] ausgewertet wird.

$$\begin{aligned} \bar{x} &= \frac{1}{n} \cdot \sum x_n; \quad \text{mit } s(x_k) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum (x_n - \bar{x})^2} \Rightarrow \\ \Rightarrow u(x_n) &= \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_n - x_0)^2}{n-1}} \end{aligned} \quad (5.9)$$

Die Langzeitstabilität wurde qualitativ durch Vergleich aufeinanderfolgender Messergebnisse am gleichen Messobjekt über einen längeren Zeitraum, die Wiederholbarkeit konkret

auf Basis endlicher Messreihen mit $n > 125$ untersucht, um die Freiheitsgrade über 50 und folglich den Erweiterungsfaktor k_p gegen 2,0 gehen zu lassen.

Die Terminologie weicht teilweise von der im *GUM* üblichen Bezeichnung für die Messgröße ab, um die Verwechslungen mit jenen, die Achsen bezeichnenden Variablen der Kameras übertragbar. Die Modelle sind auf andere, ähnliche optische Verfahren modular übertragbar. Im Folgenden werden dann Messergebnisse mit dem optischen Multi-Sensor-Messverfahren konform zu [DIN EN ISO 10360-2] auf der Basis von statistischen Informationen in Form von Experimenten nach Typ-A ermittelt. Die Verteilung der ermittelten Längenmesswerte stellt sich wie exemplarisch für das Rundprofil mit dem Nennwert 19,0 mm in Bild 77 dar. Das vollständige Messergebnis lautet für die Auswertung nach Gauß: $18,96 \text{ mm} \pm 0,12 \text{ mm}$ ($k_p=2$). Dieser Wert lässt sich für andere Profilformen bestätigen (auch Kap 5.2.4).

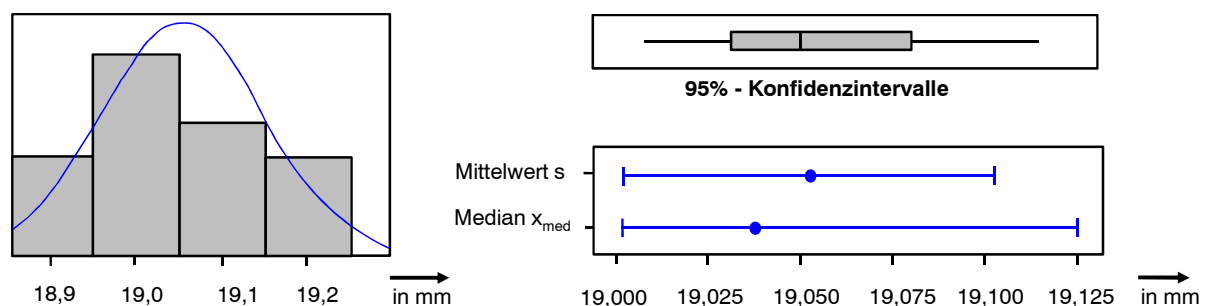


Bild 77: Histogrammverteilung zu Messwerten von 0,5-d mit dem OMS bei o.g. Einflussgrößen

5.2.3 Wechselwirkungen simulierter Einflussgrößen

Nach Analyse der Messunsicherheit unter Laborbedingungen wird das Messverfahren unter erschwerten Bedingungen evaluiert. Zur Auswertung der Wechselwirkungen der Einflüsse wird die Software Mini Tab 14 verwendet und einige Einflüsse werden laborgebunden untersucht, wobei die Methode auf andere Softwareassistenten vollständig übertragbar ist. Darauf aufbauend wurde hierfür ein vollfaktorieller Versuchsplan erstellt (Tabelle 8), wobei mit MiniTab auch erweiternde Elemente wie Fuzzy-Logic, Neuronale Netze angewendet oder aufgesetzt werden können [GEUS 2000], was jedoch nicht zentraler Bestandteil der vorgestellten Ergebnisse ist. Die durchgeführte Messung mit dem OMS unterliegt – wie jede Messung – einer Vielzahl von verschiedenen Einflüssen, welche kategorisiert werden können (Bild 78), [MASING 2007]. Als Haupteffekte äußerer Einflussgrößen wurden Schmutz/Staub, zweiachsige Schwingungen mit 1 Hz Frequenz und 1 mm Amplitude, Fremdlicht (ca. 100 W, 1,0 m Abstand, teildiffuse Strahlung) und Verkippung der optischen Beleuchtungsachse um einen Winkel von 0,6° (in Vorversuchen durch geeignete Vorrichtung als vom Bediener gerade noch einstellbaren und damit erreichbaren Grenzwinkel ermittelt) verwendet, um die externen Einflussgrößen der Fertigungsmessung realistisch nachzubilden. Dabei ergeben sich 16 Teilversuche in einem vollfaktoriellen 2^4 -Versuchsplan.

Tabelle 8: Vollfaktorieller Versuchsplan für die experimentelle Messunsicherheitsanalyse

Versuch	Verschmutzung	Lasereinstellung	Licht	Vibration
1	ohne	alle in Ebene	Umgebungslicht	ohne
2	ohne	alle in Ebene	Umgebungslicht	seitlich 1 mm, 1 Hz
3	ohne	alle in Ebene	abgedunkelt	ohne
4	ohne	alle in Ebene	abgedunkelt	seitlich 1 mm, 1 Hz
5	ohne	einer 1° verdreht	Umgebungslicht	ohne
6	ohne	einer 1° verdreht	Umgebungslicht	seitlich 1 mm, 1 Hz
7	ohne	einer 1° verdreht	abgedunkelt	ohne
8	ohne	einer 1° verdreht	abgedunkelt	seitlich 1 mm, 1 Hz
9	Kreidespray	alle in Ebene	Umgebungslicht	ohne
10	Kreidespray	alle in Ebene	Umgebungslicht	seitlich 1 mm, 1 Hz
11	Kreidespray	alle in Ebene	abgedunkelt	ohne
12	Kreidespray	alle in Ebene	abgedunkelt	seitlich 1 mm, 1 Hz
13	Kreidespray	einer 1° verdreht	Umgebungslicht	ohne
14	Kreidespray	einer 1° verdreht	Umgebungslicht	seitlich 1 mm, 1 Hz
15	Kreidespray	einer 1° verdreht	abgedunkelt	ohne
16	Kreidespray	einer 1° verdreht	abgedunkelt	seitlich 1 mm, 1 Hz

Der Bedienerinfluss wird mangels ausreichender Vergleichbarkeit und Auswertbarkeit nicht weiter untersucht, zudem wird dieser durch die fast vollständige Verfahrensautomatisierung in Kalibrierung und Messung mit dem OMS minimiert.

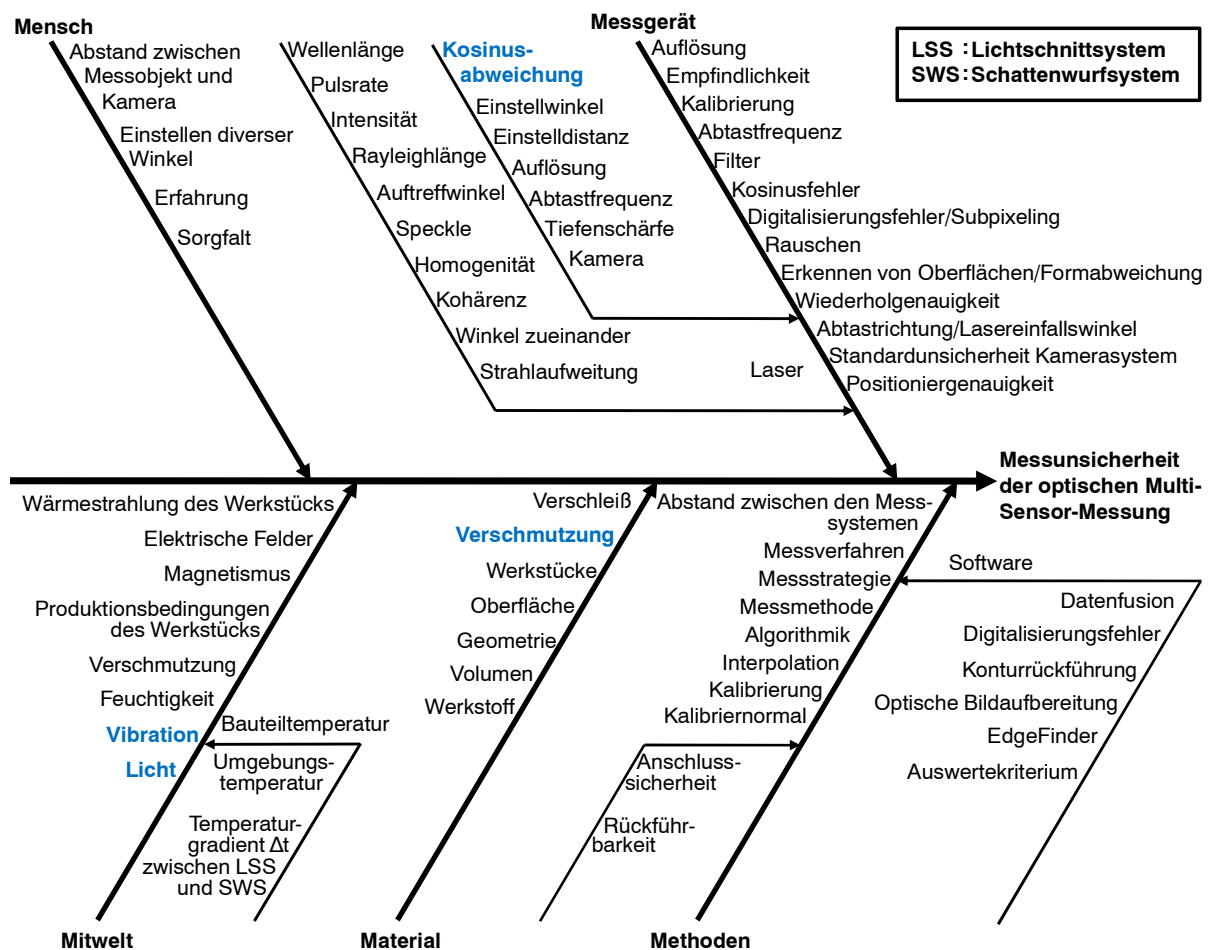


Bild 78: Einflüsse auf die Messung mit dem OMS; blau: genauer betrachtete Einflussgrößen

Durch ergonomische Bedienung und einen dafür konzeptionierten Leitfaden zum realisierten Messverfahren sowie ein regelmäßiges Wartungsverfahren kann dieser Einfluss gänzlich minimiert werden [DIN EN 62079]. Daraufhin sollen als Vorbedingung die Signifikanzniveaus der Effekte, die quantitativen Auswirkungen für die Messunsicherheiten und darauf aufbauend die Signifikanz für die gesamte Messung mit dem OMS festgestellt werden. Die identifizierten Wechselwirkungen und daraus abgeleitete Aussagen verhelfen zu positiven Feststellungen über die Robustheit des Messsystems und die sehr hohe Wahrscheinlichkeit für eine ebenso erfolgreiche Evaluation in der Fertigung (Kap. 5.3).

Es wurde begründet eine Gaußsche Normalverteilung angenommen, wie sie angenähert in derartigen Prozessen vorkommt, wobei für die gemessene Annäherung und große n nachvollziehbar x zu $E[X]$, x_{quer} zu μ und $s(x)$ zu σ_x und zu u_x gesetzt werden (Gleichung 5.10). Die Ergebnisse der Reihenmessungen wurden ebenfalls mit einem Chi²-Test softwaregestützt auf Übereinstimmung überprüft.

$$f(x_n) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \cdot e^{-\frac{(x_n - \mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (5.10)$$

Die dabei erzielten Ergebnisse wurden nach Gleichungen 5.11 und 5.12 ausgewertet und ergaben, dass die Signifikanz nur teilweise vorhanden ist (Bild 81). Dabei führen die Einflüsse Schmutz (simuliert durch Kalkspray im Laboratorium) und Licht zu Überhöhungseffekten und führen zu größer werdenden Messergebnissen, die systematisch korrigiert werden müssen. Die Laserverkipfung um eine Achse und die Profilschwingungen sind kaum signifikant, was im wesentlichen auf die Methoden zur Filterung und Kompensation innerhalb der softwaregestützten Messdatenauswertung zurückzuführen ist.

$$Y = y + |\delta_{Licht}| + |\delta_{Schmutz}| + |\delta_{Vibration}| + |\delta_{Laser}| \quad (5.11)$$

$$\text{Effekt}_{\text{Faktor}} = \frac{(\sum +) - (\sum -)}{\frac{n}{2}} \quad (5.12)$$

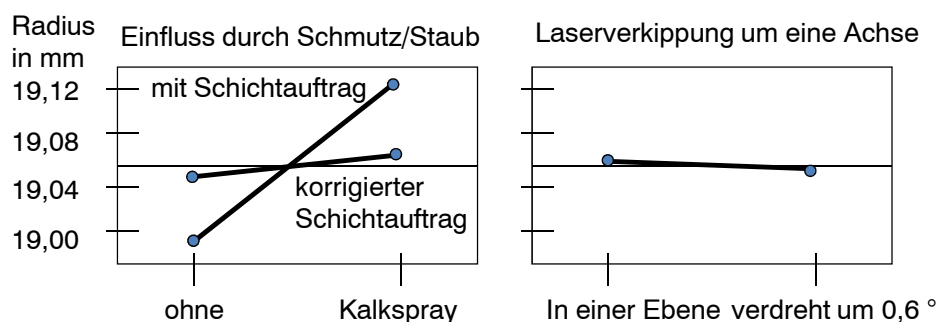


Bild 79: Haupteffekte der Einflussgrößen für Schmutz und Laserverkipfung um eine Achse

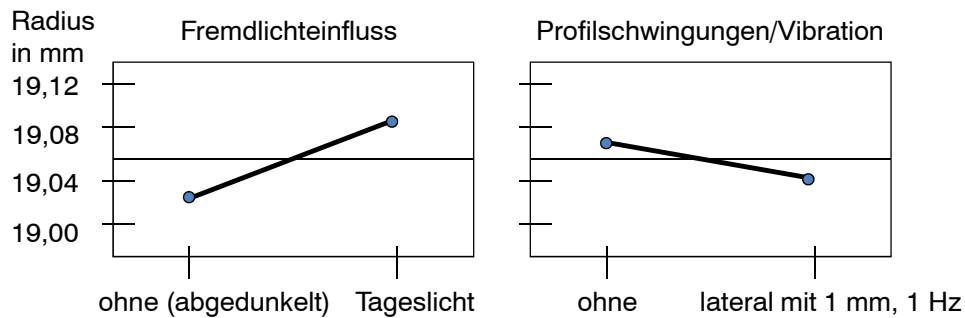
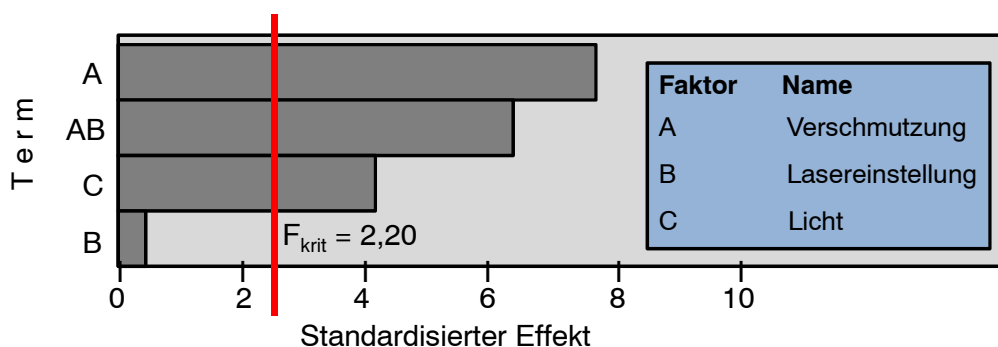


Bild 80: Haupteffekte der Einflussgrößen für Fremdlichteinfluss und Profilschwingungen/Vibration

Untersuchungen zur Signifikanz ergaben, dass die o.g. Laserverkipfung bis zur Sichtschwelle von rund $0,6^\circ$ nicht signifikant ist (Bild 79). Die anderen Signifikanzen folgen für $\alpha = 0,05$ der Darstellung in Bild 81. Bei der Schwelle von $\alpha = 0,05$ werden 95 % der Werte als relative Überdeckungswahrscheinlichkeit P_{rel} aller Messwerte mit der Standardunsicherheit u aus dem Maß der Streuung s um den Erwartungswert x_{quer} als besten Schätzer der Mittelwerte der Einzelmessungen der Messreihe entspricht.

$$P_{rel} = (1 - \alpha) \cdot 100\% \text{ mit } \alpha = 0,05 \Rightarrow P_{\alpha=0,05} = 95\% \quad (5.13)$$

Bild 81: Signifikanz und F_{krit} zu den o.g. Einflussgrößen (A, B, C) und der Wechselwirkung AB

Die Verschmutzung ist abzüglich des Schichtauftrags von bis zu $100 \mu\text{m}$ zu bewerten (Bild 80). Nach Aufschalten dieses äußeren Einflusses wurde bewusst nicht wiederholt kalibriert um die Vergleichbarkeit zu gewährleisten. Die Wechselwirkungen aller Einflüsse in den durchgeführten Versuchen sind für ein gemessenes Profil (Durchmesser 38 mm) in Bild 82 dargestellt. Dabei sind z.B. signifikante Abhängigkeiten zwischen Verschmutzung und Umgebungslicht erkennbar, was durch den Überhöhungseffekt reflektierter Anteile auf der rauerer Oberfläche erklärbar wird.

Die Messergebnisse werden um mehrere μm von den Störgrößen beeinflusst, wobei für das Gaußkriterium Schmutz, Vibration und Fremdlicht etwa gleichverteilte Unsicherheitsbeiträge einbringen. Bei Hüll- und Pferchformelement ist die Vibration mit ca. 75 % Unsicherheitsbeitrag aufgrund des Tragens dreier Punkte für das Ausgleichsformelement deutlich dominanter vorhanden als beim Gaußkriterium wo eine Mittelung über eine größere Anzahl von Messpunkten erfolgt.

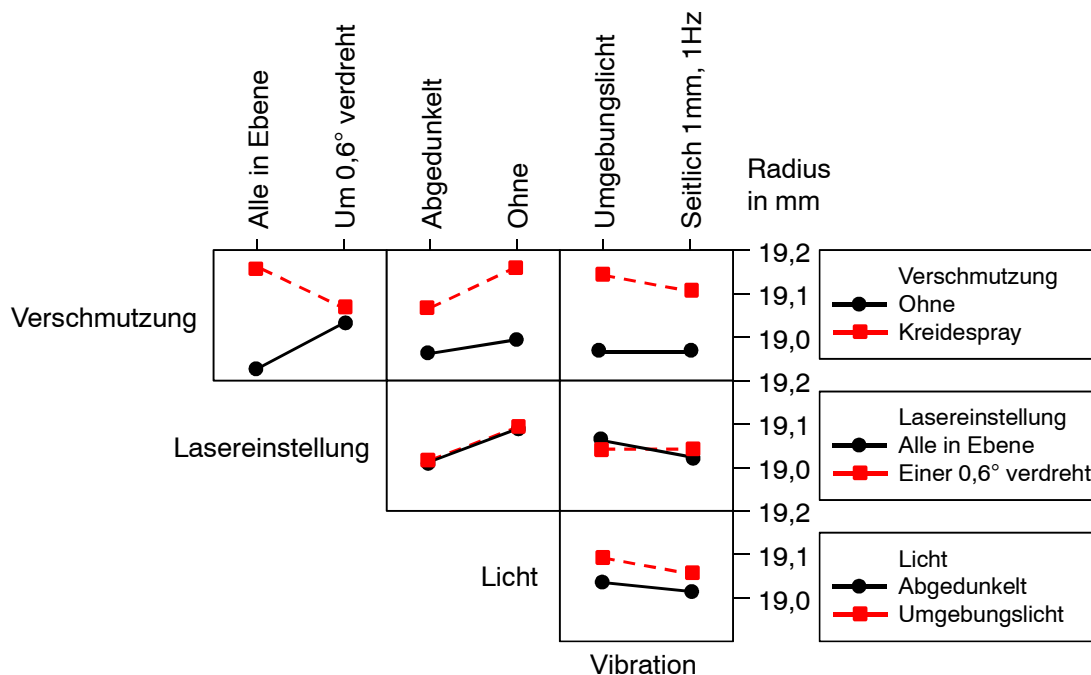


Bild 82: Wechselwirkungen der simulierten Einflussgrößen: Schmutz, Vibration, Fremdlicht, Abweichung Lasereinstellung (an den o.g. referenzierten Werkstücken)

5.2.4 Auswertung von Reihemessergebnissen mit Gauß-, Hüll- und Pferchkriterium

Die Messergebnisse zur Wiederholbarkeit mit $n = 125$ sind in Bild 83 dargestellt. Dabei ist der Nennwert mit einem erheblich genaueren Koordinatenmessgerät gemessen worden [DIN EN ISO 10360-2].

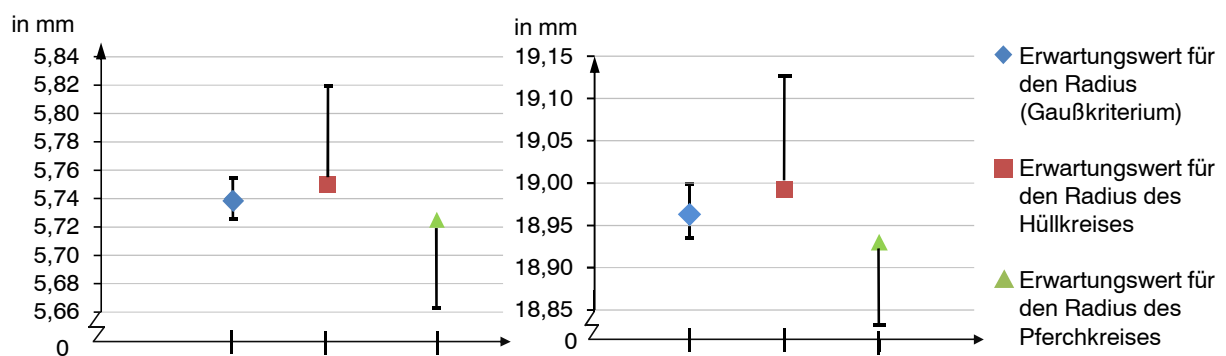


Bild 83: Wiederholbarkeit des OMS auf Basis des angewendeten multi-sensoriellen Messverfahrens, links: Darstellung zu $D_1 = 11,48 \text{ mm}$, rechts: Darstellung zu $D_2 = 37,92 \text{ mm}$

Die Referenzierung ergab für das kleine gemessene Rundprofil $x_{\text{quer}} = 11,49 \text{ mm}$. Für das große Rundprofil wurde $x_{\text{quer}} = 37,91 \text{ mm}$ ermittelt. Die Standardunsicherheit des Mittelwerts x_{quer} ($n = 125$) liegt damit um ca. $10 \mu\text{m}$ unter Laborbedingungen. Dabei sind die Streuungen bei den Formelementen nach Pferch- und Hüllkriterium mit asymmetrischer Varianz versehen, da die Abweichungen, bedingt durch die Bildung des Formelements aus drei Punkten, nur in eine Richtung geprüft werden muss.

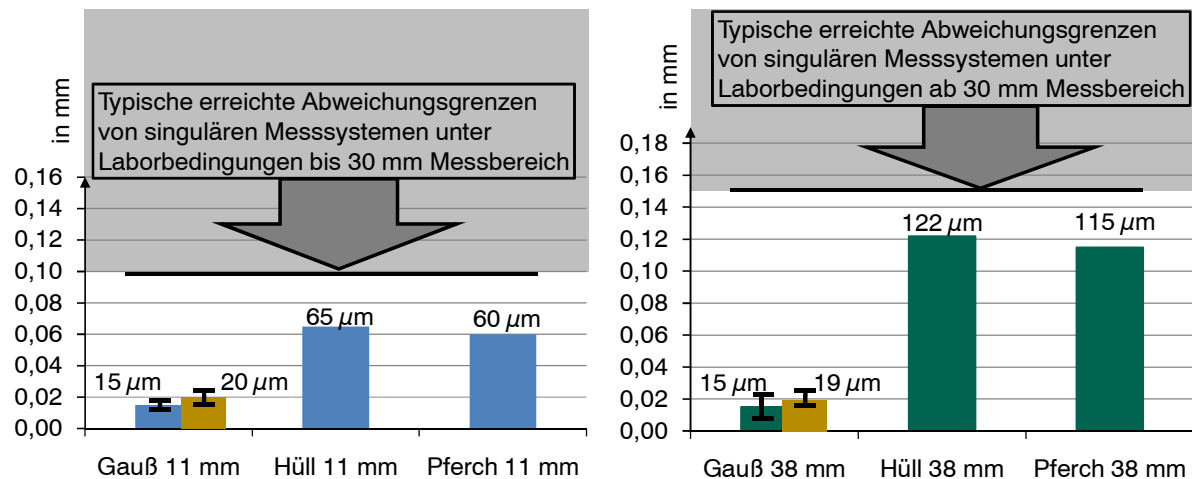


Bild 84: Standardmessunsicherheit bei Wirkung o.g. Einflüsse nach Kap. 5.2.3 (im Laboratorium)

In Bild 84 sind in gesonderter Weise die Abweichungen unter Wirkung der äußeren Einflussgrößen in zwei verschiedenen Messbereichen dargestellt, ebenfalls für $n = 125$. Bemerkenswert ist die Robustheit gegen Störungen, da sich die Messunsicherheit im Vergleich zu Laborbedingungen kaum negativ verändert.

5.2.5 Analyse und Bewertung

Das optische Multi-Sensor-Messverfahren kann Messunsicherheiten von $20 \mu\text{m}$ trotz äußerer Einflüsse im vorgestellten prototypischen OMS leisten. Die genannten äußeren Einflüsse sind verfahrensbedingt dafür bekannt, die Messunsicherheit signifikant negativ zu beeinflussen [DIN V ENV 13005]. Dennoch sind die o.g. Längenmessergebnisse tauglich, um eine Evaluation des Messverfahrens durchzuführen (Kap. 5.3). Die Ergebnisse der experimentellen Messunsicherheitsanalyse sind in Tabelle 9 zusammengefasst für den zugehörigen Erweiterungsfaktor $k_p = 2$ (auch Bild 77).

Tabelle 9: Erweiterte Messunsicherheit des realisierten OMS nach Ermittlung der Verteilung

Profiltyp	Auswertekriterium	Vollständiges Messergebnis		k_p -Faktor
Rund_11 mm	Gauß	5,74 mm	0,02 mm	2
	Hüll	5,75 mm	0,07 mm	2
	Pferch	5,72 mm	0,06 mm	2
Rund_38 mm	Gauß	18,96 mm	0,02 mm	2
	Hüll	18,99 mm	0,12 mm	2
	Pferch	18,93 mm	0,12 mm	2

5.3 Evaluation des Multi-Sensor-Messverfahrens in der realen Fertigungsumgebung

Um das optische Multi-Sensor-Messverfahren weitergehend zu evaluieren, muss der Prototyp umgebaut und in die Fertigung integriert werden. Dazu wurde ein Montagever-

fahren erstellt, um die Einbauzeit gering zu halten (ca. 3 h – 4 h Nettoaufwand nach Vorbereitungen). Dieser ist grundsätzlich für den späteren Einsatz derartiger in-line Multi-Sensor-Messverfahren notwendig. Der Ein-/Ausbau muss zeitlich kurz und ohne Gefahren für die Bediener ermöglicht werden. Das OMS darf dabei nicht beschädigt werden und die Sensoren müssen prinzipbedingt rund um den Profilauslauf angebracht werden. Es muss eine Möglichkeit bestehen, die Messergebnisse während des Fertigungsprozesses mehrere Meter entfernt zu generieren und diese wiederum zu verifizieren. Hierzu muss das Messsystem aufgebaut und in der realen Fertigungslinie mit verschiedenen Profilgrößen, -typen und über einen Zeitraum von mehreren Tagen durchgehend beschickt werden.

5.3.1 Test des Messverfahrens in der realen Fertigungsumgebung

Das vorgestellte OMS wurde bei der DIEHL Metall Stiftung & Co. KG an der Geradeauspresse für Stangen mit maximal 3500 t (äquivalenter) Presskraft nach dem Rückwärtsfließpressprinzip getestet. Die modellierte Einbausituation mit dem erforderlichen Kühlsystem ist in Bild 59 skizziert. Das mit Kühlkörpern bestückte prototypische Messverfahren im kontinuierlichen Betrieb ist in Bild 85 dargestellt. Konzepte für das Kühlverfahren auf der Basis von doppelwandigen metallischen Rohren mit großer Wärmeleitfähigkeit sind in Bild 86 dargestellt. Das neue Messverfahren muss die Messaufgabe auch unter den o.g. erschwerten Bedingungen dauerhaft bewältigen, weshalb in Kap. 5.3.3 weitere Ergebnisse zu Gerätetemperaturen und Optimierungsmöglichkeiten für den serienreifen Einsatz einer Messeinrichtung aufgeführt sind. Die evaluierten Konzepte und simulationsbasierten Ergebnisse zur Anbindung an die Fertigungssteuerung sind in Kap. 5.3.4 vorgestellt. Staubbelastungen sind aufgrund der getroffenen Maßnahmen nicht vorhanden.

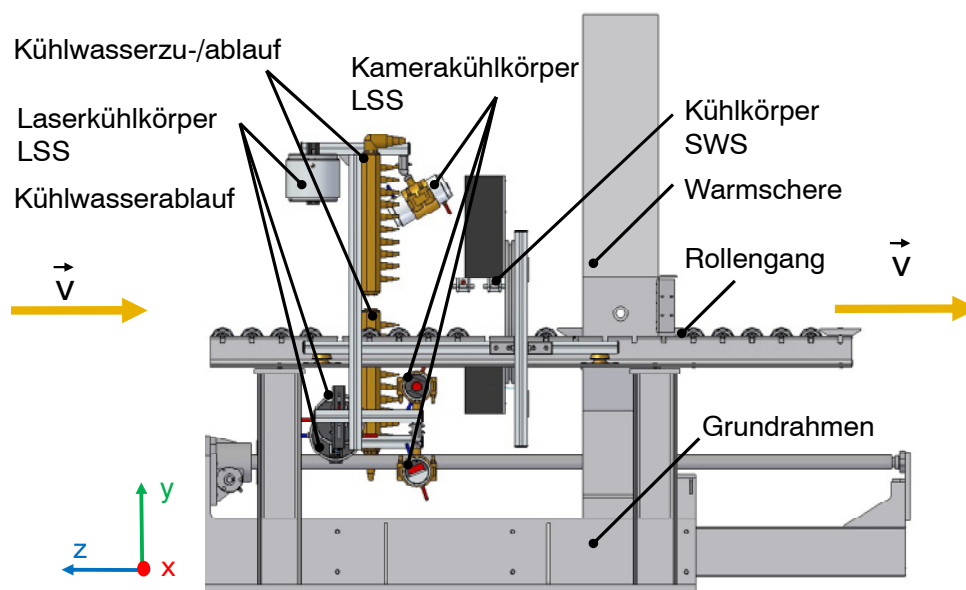


Bild 85: Realisiertes OMS mit Kühlwasserzulauf (oben) und -abläufen(unten) sowie den Kühlkörpern, eingebaut in eine Stangenpresse für Messingprofile mit bis zu $3,5 \cdot 10^4$ kN Presskraft

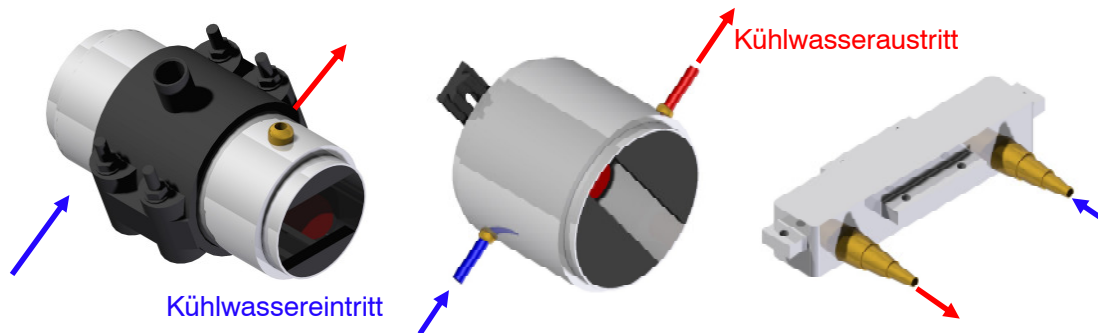


Bild 86: Konzeptionierte Strömungsgehäuse zum Kühlverfahren (konstruiert in Solid Edge 19); links: Kameras LSS, Mitte: Laser LSS, rechts: SWS

Die Fertigungsintegration inklusive einer Abschirmung und eines Wasserkühlverfahrens zum OMS ist auch bei den wärmsten Profilen (840°C) und halbem Maximalwasserdurchsatz (entspricht rund 300 Liter/h) voll funktionsfähig. Hierzu muss die auftreffende Wärmemenge aufgenommen und mit dem Wasserablauf abgeführt werden. Die gesamte Integration des OMS hat dabei Abmessungen von kleiner 1 m^3 . Die Strömungssituation stellt sich wie in Bild 87 dar. Alle Teilzweige der Länge l und des Durchmessers d sind für gleichen Druckverlust mit der Rohrreibungszahl λ und dem sog. Widerstandsbeiwert ζ (Gleichung 5.14) ausgelegt [BEITZ 2001]. Die verwendeten Gewebeschräuche *UNITRIX® 60* sind flexibel, elektrisch leitfähig mit $R < 10^6\ \Omega$ gegen statische Aufladung, bis 85°C temperaturfest, beständig gegen Öle bzw. Fette und druckfest bis 20 bar . Der verwendete Wasserzulauf hatte normalen Wasserleitungsdruck von ca. $3\text{ bis }5\text{ bar}$, kalkuliert wurde mit nur 2 bar um unabhängig von statistisch auftretenden Druckschwankungen dennoch kontinuierlich genügend Kühlleistung bereitzustellen. Der leitungsgebundene Druckverlustanteil λ und der strömungsgebundene Druckverlustanteil ζ als $f(c)$ bei sich ergebender Strömungsgeschwindigkeit des Fluids c wurden hierzu berücksichtigt und entsprechend ausgelegt.

$$\Delta p_{\text{ges}} = \left(\lambda \cdot \frac{l}{d}\right) \cdot \frac{\rho}{2} \cdot c^2 + \sum \zeta_v \cdot \frac{\rho}{2} \cdot c^2 = \frac{\rho}{2} \cdot c^2 \left(\lambda \cdot \frac{l}{d} + \sum \zeta_v\right) \quad (5.14)$$

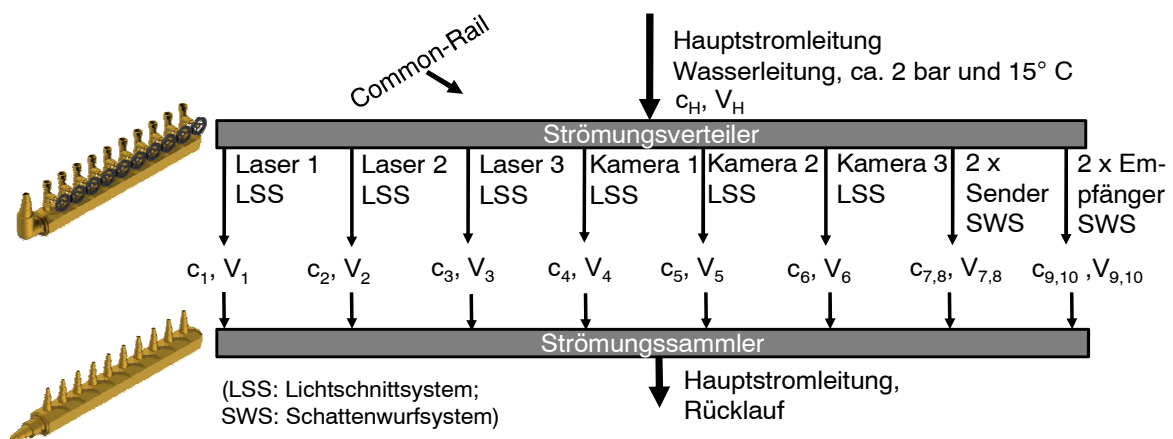


Bild 87: Strömungskonzept zum fluidbasierten Kühlverfahren im OMS während der Evaluierung

5.3.2 Messergebnisse, Langzeitstabilität und Reproduzierbarkeit

Die während der realen Fertigungstests erzeugten Aufnahmen sind in Bild 88 dargestellt. Für Reihenmessungen an $n > 125$ Messungen ist der beste Schätzwert als Erwartungswert ermittelt worden, welcher durch

$$x_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i = \mu \quad (5.15)$$

gegeben ist. Die Verkettung verschiedener Unsicherheitseinflüsse ergibt sich dann zu:

$$u^2_c = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) \quad (5.16)$$

Auf Basis des erprobten Messverfahrens wurden weitere Profiltypen als Messobjekte (u.a. konkave Profilformen wie T- oder L-) algorithmisch zur Messung befähigt. Die Ergebnisse sind sehr positiv, da Drifts, Quereffekte und andere Trendeffekte während der Experimente innerhalb der Messungen nicht feststellbar waren.



Bild 88: Kontrastergebnisse bei in-line Tests mit aktivem Kühlverfahren, kaum Speckling erkennbar; links: T-Profil, Mitte: Rundprofil, rechts: L-Profil; $v = 2 \text{ m/s}$ bis 10 m/s

Das optische Multi-Sensor-Messverfahren wird nach jedem Profilwechsel neu kalibriert und bei größeren Veränderungen (z.B. Veränderung der Beobachtungsstrategie) entsprechend dem in Kap. 4.5 dargelegten Justagekonzept neu ausgerichtet und dann kalibriert. Der reproduzierbare Bedienungsablauf wird durch einen Leitfaden, eine für diese Tests vereinfachte Benutzeroberfläche sowie schriftliche Hinweise, Beschilderungen und einem Wartungsplan am Messsystem sichergestellt. Die Kalibrierzeit beträgt auch unter Werkstattbedingungen lediglich rund 300 s. Das Messverfahren kann, auf Basis der nachgewiesenen Langzeitstabilität, zur Prüfmittelüberwachung im Rahmen eines Qualitätsmanagementsystems eingesetzt werden.

5.3.3 Robustheit gegen Einflüsse: Schwingungen, Stäube, Temperatur

Im Vergleich zu den Simulationsergebnissen im Laboratorium sind die erreichten Temperaturen wegen des angewendeten Kühlverfahrens gering. Die Verteilung der Ergebnisse zeigt an den Sensoren Temperaturen zwischen 20°C und 39°C , was keinerlei Gefährdung für die optischen Komponenten darstellt. Wegen des Wasserreservoirs innerhalb der Kühlkörper schwankt die Temperatur kaum messbar.

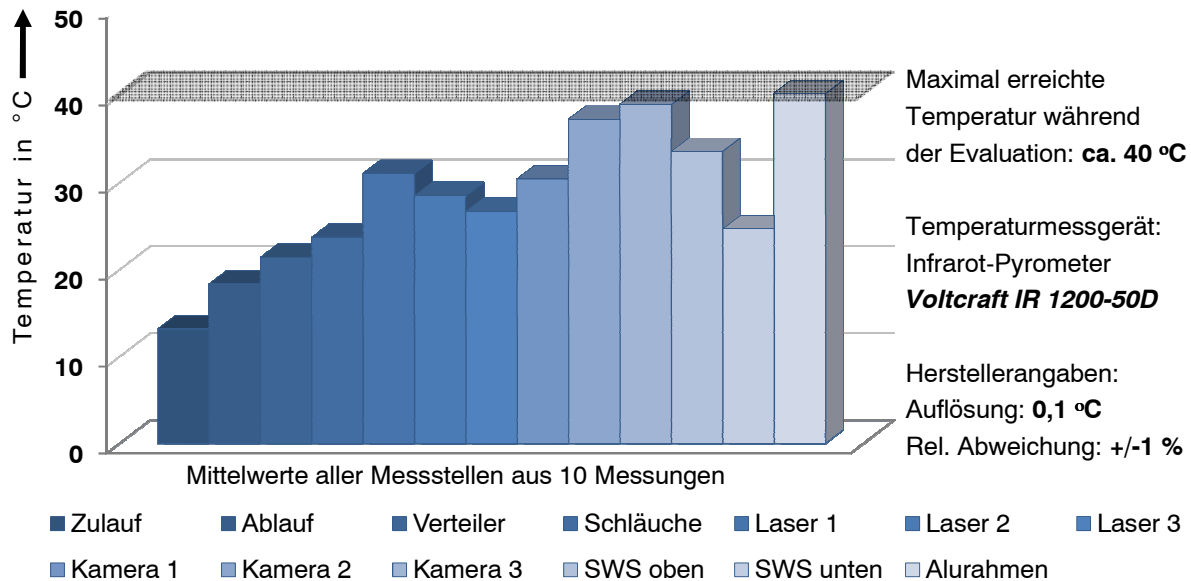


Bild 89: Temperaturergebnisse („worst-case“) während der Evaluation des Messverfahrens

Hierzu wurden die Temperaturen in der Fertigung an allen Sensoren pyrometrisch und in regelmäßigen zeitlichen Abständen aufgezeichnet (Bild 89), statistisch ausgewertet und aus den Ergebnissen objektive Aussagen über die Robustheit abgeleitet. Die Messwerte sind aufgrund der beträchtlichen Messunsicherheit von Pyrometern auf bewegten Metalloberflächen und schwankendem Emissionskoeffizienten ε nur eingeschränkt haltbar, dienen jedoch zur Abschätzung der thermischen Fähigkeit des OMS. Im Rahmen eines Wartungsverfahrens sollte alle ca. 100 Stunden der angelagerte Staub (hier Graphitstaub) von Registern und Blenden entfernt werden. Eine Darstellung des betriebenen Messverfahrens mit dem prototypischen und umgebauten OMS während der Evaluationszwecke im Einbauzustand ist in Bild 90 dargestellt [WECKENMANN 2010c].

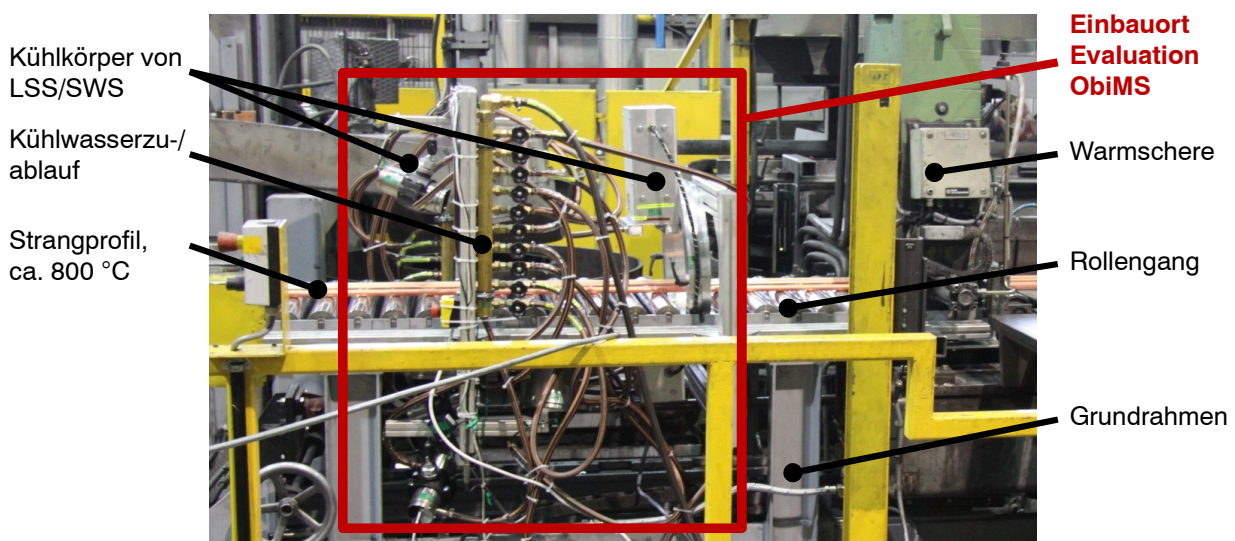


Bild 90: Einbauort während der Evaluationszwecke für das realisierte Messverfahren; Strangprofilfertigung der Rückwärtsfließpresse bis $3,5 \cdot 10^4$ kN beim Geradeauspressen

Das prototypische OMS lieferte einwandfreie Messergebnisse ohne wesentliche Abweichungen zu den Untersuchungen aus Kap. 5.2.5. Die Lagebewegungen des Profilstranges waren für das Messverfahren durchweg unkritisch und lagen durchwegs unter den simulierten Amplituden, Kap. 5.2.3.

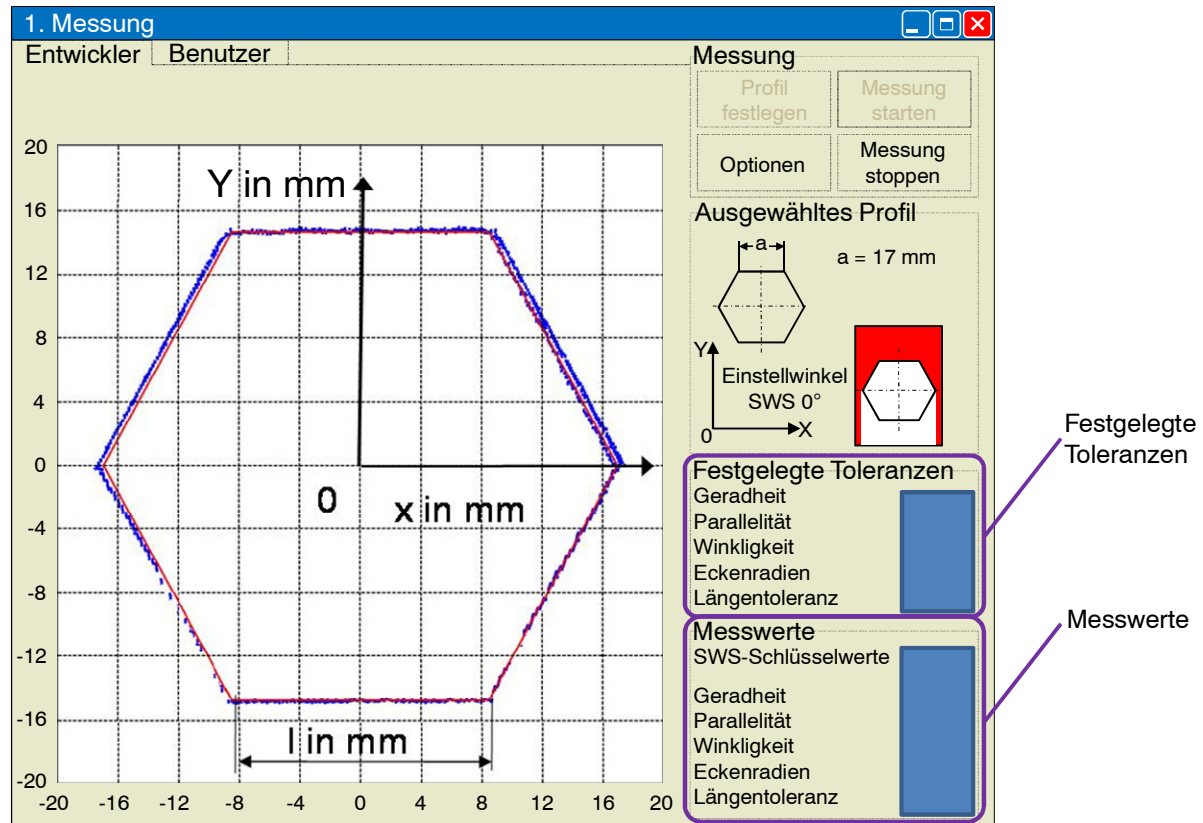


Bild 91: Visualisierung des realisierten Messverfahrens, Darstellung von Prozessfähigkeitsindizes, Längen, Winkligkeit und Parallelität (hier: Sechskantprofil); rot: Sollkontur, blau: gemessen

Die Visualisierung des eingesetzten OMS ist in Bild 91 dargestellt. Ein Kontrollbildschirm wie er zur gesamtheitlichen Steuerung und Prozessregelung verwendet werden kann, ist in Bild 92 gezeigt. Zur Regelung muss jedoch der physikalische Zusammenhang (Übertragungsfunktion) zwischen Profilgeometrie und den Regelungsgrößen der Strangprofilfertigung, wie z.B. der Austrittsgeschwindigkeit und der Presskraft, bekannt sein. Dies ist aktuell noch teilweise ungelöst [KIENCKE 2001], [KALZ 2002].

Dann könnte das OMS in einem Regelkreis als metrologische Basis und als Stellglied zur Prozessregelung verwendet werden. Dabei können die Pressgeschwindigkeit und die Presskraft bereits in heutigen Leitrechner automatisiert geregelt und überwacht werden [FISCHER 1997]. Hierbei sind sekundäre Informationen wie die Blocklänge, die Blocktemperatur und die Rezipiententemperatur sowie die zulässigen Maximalwerte für Austrittsgeschwindigkeit und die zulässigen Formtoleranzen des aktuell hergestellten Halbzeugs mit aufgeführt. Allerdings fehlen die Zusammenhänge zwischen den am produzierten Strang

auftretenden Formabweichungen mit den zugehörigen geometrischen Größen und diesen Messgrößen aus dem Strangprozess noch gänzlich.

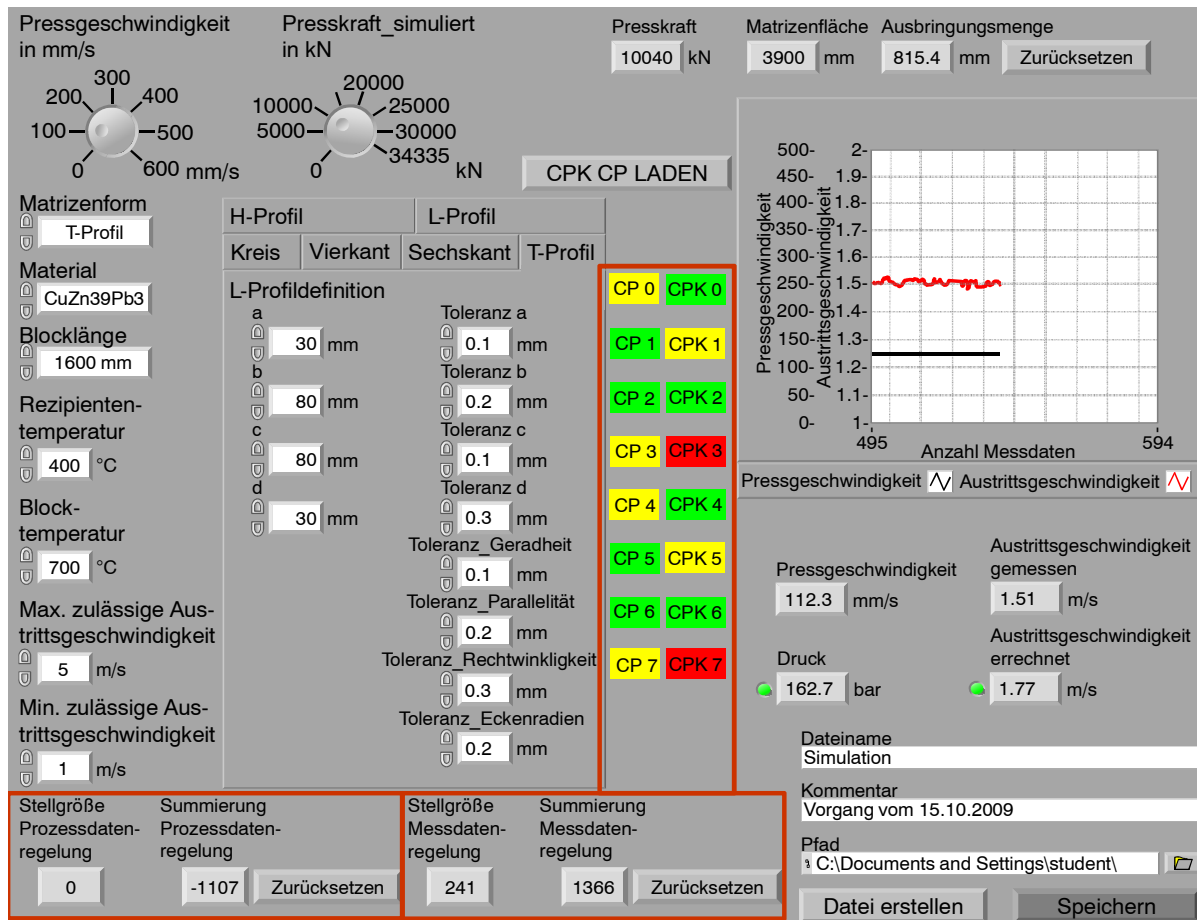


Bild 92: Konzept der Benutzeroberfläche zur Strangprozessregelung mit dem OMS; rechts: Beispielhaft visualisierter Verlauf der Parameter Pressdruck und Strangaustrittsgeschwindigkeit

5.4 Bewertung der messtechnischen Eigenschaften

In der Evaluation waren sämtliche kritischen Randparameter, welche bereits in laborprototypischen „worst-case“-Tests nur teilweise signifikant waren, unkritisch. Die Einwirkungen waren beherrscht und beeinträchtigten nicht wesentlich die Messunsicherheit oder den Aussagegehalt der Messergebnisse. Die auftretenden Temperaturen waren durch den Einsatz eines geeigneten Wasserkühlsystems unbedenklich, die Einstellbarkeit des OMS war trotz enger Platzverhältnisse gegeben. Die Kalibrierzeit beträgt ~ 300 s, was als zufriedenstellend für die produzierende Industrie und als ausgezeichnet für ein optisches Multi-Sensor-Messverfahren im Vergleich zu anderen Verfahren beurteilt werden kann. Die erweiterte Messunsicherheit von $20 \mu\text{m}$ (trotz Störeinflüssen) konnte im Laboratorium simuliert und experimentell ermittelt werden. Diese wurde dann auch unter Fertigungsbedingungen reproduziert und sogar teils, auch über langzeitige Messreihen hinweg, unterboten.

Die Leistungswerte des Messverfahrens und die abzuleitenden Einsatzempfehlungen sind in Tabelle 9, ein Vergleich zu bisherigen Verfahren in Tabelle 10 dargestellt. Bereits in Bild 43 sind die konkurrierenden Ziele von minimaler Mess- und Auswertezeit und der Anforderung nach Datendichte sowie ganzheitlicher Informationen über die Messobjekte erkennbar. Ca. 150 Messpunkte pro Umfangsdatensatz stellen einen sinnvollen Konsens dar (auch Gleichung 5.28). In weiteren Untersuchungen und bei zunehmender fortschreitender Rechnertechnologie könnten jedoch über die aus Sortier- und Auswertealgorithmen ableitbaren Zusammenhängen, die Vergrößerung oder Reduktion der Punktzahl pro Messdatensatz verbessert oder das Verfahren für noch zeitkritischere Anwendungen qualifiziert werden. Es wurde deutlich, dass z.B. für den Kreis drei Punkte des Formelements berechnet und anschließend noch $(n - 3)$ -mal bezüglich des Wertes überprüft werden [PAPULA 2000]. Es ergibt sich daher – nach einigen Vereinfachungen aus Kap. 4 und Tests – eine algorithmische Komplexität M , welche im Wesentlichen auf ähnliche metrologische Auswerteverfahren übertragbar ist (Gleichungen 5.24, 5.25 und Bild 43):

$$M_{\text{regulär}} = \frac{n!}{3!(n-3)!} = \binom{n}{3} \quad (\text{für } 3 \leq n); \quad (5.24)$$

$$\begin{aligned} M_{\text{überprüft}} &= \binom{n}{3} \cdot (n-3) = \frac{n!}{3!(n-3)!} \cdot (n-3) = \frac{n!(n-3)}{3!(n-3) \cdot (n-4)!} = \frac{n!}{3!(n-4)!} \\ &= \frac{n \cdot (n-1) \cdot (n-2) \cdot (n-3) \cdot (n-4)!}{3!(n-4)!} = \frac{n \cdot (n-1) \cdot (n-2) \cdot (n-3)}{6}, \\ \text{mit } n = 300 &\Rightarrow M = 1,32 \cdot 10^9 \end{aligned} \quad (5.25)$$

Somit entstehen z.B. für 300 Messwerte pro Umfangsdatensatz $1,32 \cdot 10^9$ zeitbedarfsrelevante Operationen. Die Auswertung von geraden Bereichen ist durch Fügung und anschließende Analyse von Teilsegmenten erzielt und beschleunigt worden. Dabei können Steigungen der Teilsektoren (hier: Teilung in 6 Segmente für Sechskant) durch Aufteilen in Bereiche kleinerer n beschleunigt und im WKS nach einigen Umformungen folgendermaßen hinsichtlich Steigung m_x bzw. Winkel α festgelegt werden:

$$\tan \alpha = \frac{m_1 - m_2}{1 + m_1 \cdot m_2} \Rightarrow m_2 = \frac{\tan \alpha + m_1}{1 - m_1 \cdot \tan \alpha} \Rightarrow (\text{z.B. } \alpha = 30^\circ) \Rightarrow \frac{\frac{1}{3}\sqrt{3} + m_1}{1 - m_1 \cdot \frac{1}{3}\sqrt{3}} \quad (5.26)$$

Bei vektorieller Betrachtung kann man für Ortsvektoren (hier: a und b) Schnittwinkel α und dann auch die zugehörigen Schnittpunkte bestimmen durch Ansetzen von:

$$\cos \alpha = \frac{|\vec{a} \cdot \vec{b}|}{|\vec{a}| \cdot |\vec{b}|} = \frac{|a_x b_x + a_y b_y|}{\sqrt{a_x^2 + a_y^2} \cdot \sqrt{b_x^2 + b_y^2}} \quad (5.27)$$

Bei Einsetzen einer beispielhaft kleineren Zahl von z. B. 150 Messwerten pro Umfangsdatensatz verändert sich die Ausgleichsfunktion (Gleichung 5.26) mit kaum zunehmender Unsicherheit von noch unter 5 % in durchgeführten Simulationen. Jedoch ergibt sich durch

Gleichung 5.25 die Komplexität $M_{\text{überprüft}}$ und damit der notwendige effektive Rechenzeitbedarf zu deutlich geringeren $8,104 \cdot 10^7$ (Gleichung 5.28).

$$M = \frac{150 \cdot (150 - 1) \cdot (150 - 2) \cdot (150 - 3)}{6} = \frac{150 \cdot 149 \cdot 148 \cdot 147}{6} = 8,104 \cdot 10^7 \quad (5.28)$$

Der Zeitbedarf bei doppelter Punktzahl liegt damit Faktor 16 höher. Weitere Algorithmen um auch die anderen zusammengesetzten Profile aufzuteilen scheitern oft an dem hohen Aufwand der Fügung, spart dann jedoch auch weitere Rechenzeit ein. Die Verwendung des *RANSAC* und individualisierten Sortiervverfahren kann die Datendichte weiter steigern und damit die Leistungsfähigkeit des OMS verbessern. Das Potenzial des optischen Multi-Sensor-Messverfahrens für in-line Messaufgaben ist zunehmend beträchtlich, wenn sich ein OMS hinsichtlich einer Serienreife in Konfiguration und Ausführung zunehmend konkretisiert und etabliert. Ein Defizit des OMS ist die grundsätzliche Empfindlichkeit gegen Lichtreflexionen und wechselnde räumliche Verhältnisse der Sensorausrichtung (nach Kalibrierung). Ein Verbesserungspotenzial ist zudem im Gradienten über den Bauteilumfang zu sehen, da hierbei Standard-Filtermethoden (Kalman-, Hochpass-, Tiefpass-, Bandpass-, Gaußfilter) bisher nicht durchweg optimal arbeiten. Die validierten Messunsicherheiten lassen erkennen, dass die Erwartungen aus der laborgebundenen Messunsicherheitsanalyse an das gezeigte optische Multi-Sensor-Messverfahren unter Werkstattbedingungen bestätigt werden konnten. Bei einer großen Auswahl von Profiltypen bis 80 mm Durchmesser wurde eine Längenmessunsicherheit von 12 µm eingehalten, die Spannweite der Messwerte war zudem deutlich unter 100 µm (Bild 93). Die Bildwiederholrate betrug 20 fps (mit zugehöriger Synchronisierung des kalibrierenden SWS). Das Messverfahren gilt damit als validiert und robust, um zusammen mit dem realisierten Kühlsystem unter widrigen Bedingungen spezifikationskonform zu arbeiten. Dabei werden holistische Messergebnisse erreicht, die für konkave Strangprofile etwa eine Größenordnung genauer sind als jene, die bisher zur Verfügung standen (Tabelle 10).

Tabelle 10: Spezifikationen des OMS mit Bewertung im Vergleich zu anderen Messverfahren

	Lichtschnittsystem (LSS)	Schattenwurfsystem (SWS)	Offline - Messsystem	Multi-Sensor-Messsystem (OMS)
Messrate in Hz	Mittel, bis zu 20	Hoch, bis zu 600	Sehr gering	Hoch, bis größer 20
Messunsicherheit in mm	Mittel, bis zu 0,2	Niedrig, besser 0,1	Niedrig, besser 0,1	Niedrig, besser 0,1
Anwendungsaufwand	Mittel	Gering	Sehr hoch	Mittel
Zusätzlicher Arbeitsschritt	Nein	Nein	Ja	Nein
Messung von Formmerkmalen	Ja, höchstens ca. 150° Umfang	Nein	Ja	Ja
Messung konkaver Querschnitte	Teilweise	Nein	Ja	Ja

Es steht damit nun ein Messverfahren zur Verfügung, welches Messunsicherheiten im Bereich von $10\ \mu\text{m}$ an jeder Stelle konkaver Halbzeuge bereitstellt. Dabei werden erstmals Messbereiche von $10\ \text{mm}$ bis ca. $100\ \text{mm}$ abgedeckt und konkave sowie andere Profilformen in Länge und Form genau messbar. Zusammen mit einer optional verwendbaren Prozessregelung können Profilmängel nun präziser und frühzeitiger erkannt sowie im Rahmen eines modernen Qualitätsmanagements zur Produktverbesserung und Ausschussreduktion eingesetzt werden.

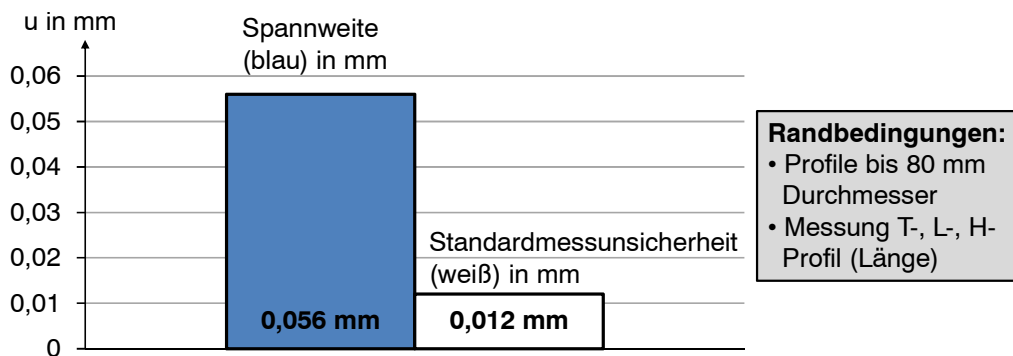


Bild 93: Messergebnisse mit dem OMS, erreicht bei der Evaluation unter Werkstattbedingungen

Das Ziel der Exploration des optischen Multi-Sensor-Messverfahrens aus Multi-LSS und singulärem SWS wurde erreicht [BERNSTEIN 2010b]. Der Hauptgrund dafür ist, dass bei keinem derzeitigen optischen in-line Messverfahren für Halbzeuge vollständige $2,5\ D$ -Informationen des Bauteils in einem WKS – als Basis für die Anwendung von holistischen Prüfaussagen – in diesem Unsicherheitsbereich vorliegen. Somit waren bisher Auswerteverfahren wie die konstruktive Datenfusion und die kontinuierliche Selbstkalibrierung bei bestehenden Einzelmessverfahren gar nicht, bzw. nur teilweise vorhanden. Die Ausgabe spezifischer Formabweichungen wurde dafür algorithmisch ausgeführt und im Laboratorium erforscht. Danach wurden die positiven Ergebnisse auch unter Werkstattbedingungen erfolgreich bestätigt. Die prozessbedingt unvermeidbaren mechanischen Profilschwingungen und die Umgebungs- und Strangtemperaturen durch Infrarotstrahlung hatten zuletzt keinen entscheidenden Einfluss mehr auf die Messergebnisse. Die notwendige Messzeit von weniger als $50\ \text{ms}$ pro Datensatz für notwendige $20\ \text{fps}$ Messfrequenz wurde eingehalten. Korrelationen zwischen Messunsicherheit und Punktdichte bergen noch viele Potenziale für ähnliche Industrie- und Laboranwendungen. Dabei spricht verfahrensmetrologisch nichts gegen eine Ausweitung des Messbereichs, was jedoch in der vorgestellten Anwendung nicht gefordert war. Es ist auch möglich, das Messverfahren hinsichtlich Messzeit und Messunsicherheit weiter zu optimieren. Die Messung anderer Messobjekte großer Aspektverhältnisse, deren geometrische Merkmale und deren Oberflächenstrukturen, wie z.B. bei flachen Faserverbundkunststoff-Bahnen und Textilien, ist ein weiteres Gebiet künftiger wissenschaftlicher Arbeiten auf Basis des optischen Multi-Sensor-Messverfahrens.

6 Zusammenfassung und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurden die theoretische Konzeption, der wissenschaftliche Nutzen und die praktische Anwendbarkeit eines optischen Multi-Sensor-Messverfahrens für die kontinuierliche Produktionsüberwachung in der Halbzeugindustrie gezeigt. Im Vergleich zu heutigen Offline-Verfahren (a posteriori) oder bisherigen singulären in-line Verfahren muss der Fertigungsprozess nicht verändert, die Messobjekte nicht zeitintensiv ausgesteuert oder gesondert positioniert werden. Das ist bis heute nur dann möglich, wenn mit unzureichenden Messunsicherheiten von ca. $100\ \mu\text{m}$ in Messbereichen von $10\ \text{mm}$ bis $100\ \text{mm}$ gearbeitet wird.

Nun sind erstmals Messunsicherheiten besser als $100\ \mu\text{m}$ bei konkaven Profilformen möglich, auf die bisher verzichtet werden musste. Mehrere Einschränkungen bisheriger optischer, in der Fertigungskontrolle mit diesen Anforderungen einsetzbarer in-line Messsysteme konnten damit, wissenschaftlich nachgewiesen, überwunden werden. Bisher fehlte die sichere Entscheidungsgrundlage zur Beurteilung der Bauteilkonformität konkaver Strangprofile gänzlich. Das Ziel der Exploration des optischen Multi-Sensor-Messverfahrens aus Multi-Lichtschnittverfahren und singulärem Schattenwurfverfahren wurde erreicht. Mit dem technisch realisierten Messverfahren sind Messunsicherheiten für konkave Strangprofile bis $100\ \text{mm}$ Durchmesser, trotz der erschwerenden o.g. Einflüsse in realitätsnahen Versuchen, bei der Evaluation deutlich unter $100\ \mu\text{m}$ ermöglicht worden. Die Messungen der Standardprofilformen Rund, Vierkant, Sechskant, Achtkant, L, I, T konnten bis dato wissenschaftlich fertig gestellt werden. Die unbedingte Anforderung, Messergebnisse in-line zu erhalten und trotz prozessbedingt unvermeidbarer äußerer Einflüsse oder Fehlbedienungen einen Ausfall des Messsystems oder der Messsoftware zu verhindern, ist mit verschiedenen in der Arbeit vorgestellten Vorkehrungen und der eigenständig erstellten Messsoftware gelungen. Die Korrektheit der dabei enthaltenen Algorithmen und der erzielten Messergebnisse wurden im Laboratorium an Referenzwerkstücken richtlinienkonform bewiesen und im Vergleich mit standardisierten Verfahren erfolgreich validiert. Das prototypische Messverfahren und dessen messtechnische Leistungsdaten wurden gemäß der geltenden Normenwerke an Werkstücken – vorab referenziert auf einem erheblich genaueren Koordinatenmessgerät im DKD-Kalibrierlaboratorium des Lehrstuhls QFM – unter festgelegten Normbedingungen evaluiert [DIN EN ISO 17025]. Danach wurde das Messverfahren auch unter Werkstattbedingungen der Halbzeugindustrie über einen angemessenen Zeitraum getestet und mit erweiterten Messunsicherheiten um $20\ \mu\text{m}$ positiv bewertet.

Das komplexe Kalibrierverfahren wurde durch Automatisierung und Optimierung in dem zeitlichen Aufwand von ca. $60\ \text{min.}$ auf ca. $300\ \text{s}$ pro Kalibrierung reduziert. Dies erforderte eine Reihe technischer Maßnahmen und stellt nun wegen der regelmäßigen Rüstzeiten im Strangprozess (z.B. bei Werkzeugwechsel) einen prozessneutralen Wert dar. Aus

vielfältigen Gründen lässt sich diese Kalibrierzeit für genaue Längenmessungen nicht ohne weiteres mehr verkürzen, ohne Einbußen bezüglich der Kalibrierunsicherheit in Kauf zu nehmen. Ein assistiertes Einstellverfahren, welches bei diesen Vorgängen unterstützt, sorgt für die optimale Konfiguration und präventive Vermeidung von Bedienfehlern. Demzufolge ist insbesondere die Reduktion von Kalibrierabweichungen erstrebenswert, da diese in voller Ausprägung jedes spätere Messergebnis negativ beeinflussen.

Wegen der oftmals nicht abschätzbaren äußeren Einflüsse auf die verstellbaren Systemkomponenten erscheinen ein verändertes Gestell mit optimierten Bauteilen und weitere metrologische Tests für die Einsatzreife in der Fertigung sinnvoll. Dazu wäre die Erarbeitung noch schnellerer Algorithmen zur Datenverarbeitung ein maßgeblicher Schlüsselfaktor für ein optimiertes OMS. Die zusätzlich erforderlichen Kalibrier- und Auswerteverfahren für Sonderprofile, wie z.B. nichtsymmetrischen H-Profilen oder flachen Messobjekten großer Aspektverhältnisse, sowie die weiter zu vereinfachende Bedienung für Justage und Wartung tragen dazu bei, das Messverfahren für weitere Anwendungen zu etablieren. Dabei stehen nun übertragbare Methoden bereit, wodurch auch nahezu alle anderen Profiltypen der Produktionsportfolios – welche aus den Formelementen Teilstrecke, Teilkreis und Vollkreis aufgebaut sind – gemessen werden können. Als weiteres Vorgehen für die Anwendung des Messverfahrens und die serienreife Implementierung in mittleren Stückzahlen wäre ggf. vorzusehen: Motorisch unterstützte Sensorhalterungen, thermische Geräteabschirmung der Rechner und Monitore, Integrationsansätze in eine Kontrollbrücke mit gekapselten Filterschränken, trittsichere Kabelführungen und erweiterte Assistenz bei der Bedienung der Messsoftware. Auf Basis des Messverfahrens können dann Stückzahlen im Bereich einer Kleinserie von Messsystemen realisiert werden. In diesem Zuge wird auch die fortschreitende Rechnertechnologie bei der Optimierung der Auswertung unterstützen, um künftig wettbewerbsfähige Halbzeuge hochgenau und wirtschaftlich zu prüfen und die Produktqualität im internationalen Wettbewerb zu verbessern.

Darüber hinaus können die Messergebnisse grundsätzlich für eine teil- oder vollautomatische Prozessregelung verwendet werden. Bei Anbindung des Messverfahrens an einen Leitrechner der Fertigungssteuerung und bei Festlegung der Prozessparameter sowie der Fähigkeitsindex lässt sich die Eingriffsgrenze des kontrollierten Fertigungsprozesses mit den Ergebnissen des Messverfahrens kontrollieren und beeinflussen. Dazu gehört die reproduzierbare metrologische Überwachung, ggf. das Auslösen von Warnschwellen sowie Eingriffe im Rahmen einer Prozessregelung. Diese Ergebnisse werden auch in modernen produzierenden Unternehmen wegen Ihrer Vorteile und dem steigenden Anspruch nach Qualität, Rückverfolgbarkeit, Dokumentation, Prozessorientierung und Standardisierung zunehmend verlangt und eingeführt.

7 Abkürzungsverzeichnis

1D	-	Eindimensional
1,5D	-	zweidimensionale Daten der Struktur $y(x)$
2D	-	Zweidimensional
2,5D	-	dreidimensionale Daten der Struktur $z(x,y)$
OMS	-	Optisches Multi-Sensor-Messsystem
CCD	-	Charge Couple Device
CMOS	-	Complementary Metal Oxide Semiconductor
DIN	-	Deutsches Institut für Normung
DKD	-	Deutscher Kalibrierdienst
DPI	-	Dots per inch
fps	-	frames per second
FWC	-	Full Well Capacity
GIG-E	-	Gigabit Ethernet
GUM	-	Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement
MPE	-	Maximum Permissible Error
MU	-	Erweiterte Messunsicherheit
NCE	-	Normalized Calibration Error
NURBS	-	Non Uniform Rational B-Spline
(nach) Gauß	-	Formelement basierend auf dem Gaußkriterium
ICP	-	Iterative Closest Point
ISO	-	International Organization for Standardization
k_p	-	Erweiterungsfaktor des vollständigen Messergebnisses
K	-	Kelvin
KMG	-	Koordinatenmessgerät
LED	-	Light-Emitting Diode
LSS	-	Lichtschnittsystem
MPE	-	Maximum Permissible Error
PTB	-	Physikalisch-Technische Bundesanstalt
RANSAC	-	Random Sample Consensus
SNR	-	Signal Noise Ratio
SWS	-	Schattenwurfsystem
USB	-	Universal Serial Bus
WKS	-	Weltkoordinatensystem

8 Literatur

[ABMAYR 2001]

ABMAYR, Wolfgang: *Einführung in die digitale Bildverarbeitung*. Stuttgart: B.G. Teubner Verlag, 2001.

[ABRAMOWITZ 2010]

ABRAMOWITZ, Mortimer; DAVIDSON, Michael W.: *Full-Frame CCD Architecture*.

<http://learn.hamamatsu.com/articles/fullframe.html>,

Stand: 17.05.2010.

[ABUS 2010]

ABUS PFAFFENHAIN GMBH: *Das Schließenanlagen-Programm: Nach DIN EN 1303 und DIN 18252 gefertigt*. Prospekt, Mitte oben, 2010.

<http://www.abus.com/>,

Stand: 12.11.2010.

[AHLERS 2000]

AHLERS, Rolf Jürgen: *Das Handbuch der Bildverarbeitung*. Renningen: Expert Verlag, 2000.

[ANDOR 2008]

ANDOR TECHNOLOGY: *CCD Sensor Architectures* / Andor Technology, Belfast, 2008.

http://www.andor.com/learn/digital_cameras/?docID=314

Stand: 17.05.2010.

[ASUNDI 1999]

ASUNDI, Anand; WENSEN, Zhou: *Unified calibration technique and its applications in optical triangular profilometry*. In: *Applied Optics* (1999), Vol. 38, Nr. 16, pp. 3556-3561.

[BAEHR 2008]

BAEHR, H. D.; STEPHAN, K.: *Wärme- und Stoffübertragung*. 6. Auflage Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 2008.

[BA-MESSTECHNIK 2010]

BA-MESSTECHNIK: *Schwenkende Durchmesser-Messgeräte*,

<http://www.brms.de/>,

Stand: 09.06.2010.

[BARTSCH 2001]

BARTSCH, Hans-Jochen: *Taschenbuch mathematischer Formeln*. 19. Auflage Leipzig: Carl Hanser Verlag, 2001.

[BASSMANN 2000]

BASSMANN, Henning: *Licht und Schatten: Beispiele zum Einsatz von LED-Beleuchtung in der industriellen Bildverarbeitung* / The Imaging Source Europe GmbH. Bremen: 02.01.2000.

[BAUER 2007]

BAUER, Norbert: *Handbuch zur industriellen Bildverarbeitung*. 1. Auflage Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2007.

[BAUER 2003]

BAUER, Norbert; BERNDT, Dirk: *Leitfaden zu Grundlagen und Anwendungen der optischen 3D-Messtechnik* / Fraunhofer Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V., 1. Auflage, 2003.

[BAUER 2001a]

BAUER, Norbert (Hrsg.): *Leitfaden zur bildgebenden Sensortechnik* / Fraunhofer Allianz Vision, Teil 3. Erlangen: 2001. - ISBN 3-8167-5536-4.

[BAUER 2001b]

BAUER, Norbert (Hrsg.): *Leitfaden zur industriellen Bildverarbeitung* / Fraunhofer Allianz Vision. Erlangen, Fraunhofer Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V., 2. Auflage, 2001.

[BAUSER 2001]

BAUSER, M.; SAUER, G.; SIEGERT, K.: *Strangpressen*. 2. Auflage Düsseldorf: Aluminium Verlag, 2001.

[BEITZ 2001]

BEITZ, W.; GROTE, K.-H.: *Dubbel Taschenbuch für Maschinenbau*. 20. Auflage Berlin: Springer Verlag, B48 (Hydro- und Aerodynamik), 2001. – ISBN 3-540-67777-1.

[BERNDT 1968]

BERNDT, G.; HULTZSCH, E.; WEINHOLD, H.: *Funktionstoleranz und Meßunsicherheit*. Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Universität Dresden 17, Heft 2, 1968.

[BERNSTEIN 2010a]

BERNSTEIN, J.; WECKENMANN, A.: *User Interface for Optical Multi-Sensorial Measurements at Extruded Profiles*. Zeitschriftenaufsatz In: *Measurement 44 (2011)*, Journal of IMEKO, p. 202-210, accepted: 27. September 2010.

[BERNSTEIN 2010b]

BERNSTEIN, J.; WECKENMANN, A.: *Bi-Sensor*. Veröffentlichung im Uni-Kurier der Universität Erlangen-Nürnberg. In: *Uni kurier aktuell* 17 (81), 2010. – ISSN 1436-3232, S. 8.

[BGHW 2010]

BGHW: *BG-Vorschriften: BGV B2: Laserstrahlung*,
<http://www.bge.de/asp/dms.asp?url=/uvv/93/inhalt.htm>,
Stand: 17.05.2010.

[BIMBERG 1993]

BIMBERG, Dieter: *Messtechnik mit Lasern*. 1. Auflage: Expert Verlag, 1993. - ISBN 3-8169-0777-6.

[BLANC 2001]

BLANC, Nicolas: *CCD versus CMOS – has CCD imaging come to an end?*. In: Photogrammetric Week. Heidelberg: Wichman Verlag, 2001.

[BOSCH 2004]

BOSCH, J.; HUGGER, A.; FRANZ, J.; FALTER, S.; OBENDORFER, Y.: *Phased Array-Technology für automatisierte Pipeline-Inspektion*. In: DGZfP-Jahrestagung 2004: ZfP in Forschung, Entwicklung und Anwendung (Salzburg), 2004.

[BÖSWIRTH 2007]

BÖSWIRTH, L.: *Technische Strömungslehre*. 2. Auflage Wiesbaden: Vieweg Verlag, 2007.

[BRONSTEIN 2008]

BRONSTEIN, I. N.; SEMENDJAEV, K. A.: *Taschenbuch der Mathematik*. 7. Auflage Leipzig: Harri Deutsch GmbH Verlag, 2008.

[CANTZLER 1981]

CANTZLER, H.: *Random Sample Consensus (RANSAC)*, p. 1 (1981).
http://homepages.inf.ed.ac.uk/rbf/CVonline/LOCAL_COPIES/CANTZLER2/ransac.pdf,
Stand: 17.05.2010.

[DEBEVEC 2001]

DEBEVEC, P.: *Reconstructing and Augmenting Architecture with Image-Based Modelling, Rendering and Lighting*. In: Proceedings of the International Symposium on Virtual Architecture (VAA 2001), S. 1-10, Dublin 21.-22.06.2001.

[DEMANT 2002]

DEMANT, Christian; SPEICHER-ABEL, Bernd: *Industrielle Bildverarbeitung – wie optische Qualitätskontrolle wirklich funktioniert*. 2. Auflage Berlin: Springer Verlag, 2002.

[DEPPE 2005]

DEPPE, Gerd-Joachim; PAUL, Michael: *Entwicklung und betriebliche Umsetzung der zerstörungsfreien Heißwanddickenmessung von nahtlosen Rohren mittels Laserultraschall*. In: ZfP Zeitung 93: S. 41-45, 2005.

[DEPPE 2001]

DEPPE, G.-J.; HULS, F.; SAUERLAND, M.; SCHNEIDER, H.: *Laser-Ultraschall-Wanddickemessungen an heißen Rohren in einem Walzwerk*. In: DGZf-Jahrestagung 2001: ZfP in Anwendung, Entwicklung und Forschung, Berlin, 21.05.2001.

[DGZFP 2007]

DGZFP e. V., Berlin (Hrsg.): *Handbuch automatische Ultraschallprüfung*. 2. Auflage Düsseldorf: Verlag für Schweißen und verwandte Verfahren, DVS-Verlag, 2007.

[DIEHL 2010]

DIEHL: Metall Messing,
<http://www.diehlmetall-messing.de/index.php?id=193>,
Stand: 17.05.2010.

[DIETRICH 1998]

DIETRICH, E.; SCHULZE, A.: *Richtlinien zur Beurteilung von Messsystemen und Prozessen, Abnahme von Fertigungseinrichtungen*. 3. Auflage München: Carl Hanser Verlag, 1998.

[DOBMANN 2005]

DOBMANN, Gerd: *Zerstörungsfreie Prüfverfahren* / Fraunhofer Institut für zerstörungsfreie Prüfverfahren IZFP. In: Bauer, Norbert (Hrsg.): *Leitfaden zur Wärmefluss-Thermographie. Zerstörungsfreie Prüfung mit Bildverarbeitung*. Erlangen, 2005, S. 2-4.

[DUTSCHKE 2005]

DUTSCHKE, Wolfgang: *Fertigungsmesstechnik*. 5. Auflage: Teubner Verlag, 2005. - ISBN 3-519-46322-9.

[DUWE-3D 2010]

DUWE-3D: PolyWorks® Software.

<http://www.duwe-3d.de>,

Stand: 19.05.2010.

[ENGEL 2006]

ENGEL, Michael: *Wahrheiten über CMOS-Sensoren* / Vision Components GmbH. In: *Messen Prüfen Automatisieren 1/2* (2006), S. 32-34.

[FABRIMEX 2008]

FABRIMEX SYSTEMS AG: *Informationsträger der industriellen Bildverarbeitung* / Fabrimex Systems AG, Schwerzenbach (CH). In: *Polyscope 3/08* (2008), S. 42-44.

[FISCHER 1997]

FISCHER, G.: *Strangpressen*. Frankfurt am Main: DGM Informationsgesellschaft GmbH, 1997.

[FISCHLER 1981]

FISCHLER, Martin; BOLLES, Robert: *Random Sample Consensus: A paradigm for model fitting with application to image analysis and automated cartography*. In *Communications of the ACM* Vol. 24 Nr. 6 (1981), p. 283.

<http://portal.acm.org/citation.cfm?id=358692>,

Stand: 07.06.2010.

[FITZGIBBON 1998]

FITZGIBBON, A. W.; ZISSERMANN, A.: *Automated 3D Model Acquisition and Generation of New Images from Video Sequences*. In: *Proceeding of European Signal Processing Conference (EUSIPCO 1998)*, S. 1261-1269, Rhodes (Greece) 1998.

[FONTANELLI 2007]

FONTANELLI, Daniele; RICCIATO, Luigi; SOATOO, Stefano: *A fast RANSAC-based algorithm for accurate localization in unknown environments using LIDAR Measurements* (2007), p. 599.

<http://ieeexplore.ieee.org/ielx5/4341639/4341640/04341827.pdf?arnumber=4341827>,

Stand: 17.05.2010.

[FUEZESSY 1996]

FUEZESSY, Z.; JUEPTNER, W.; OSTEN, W.: *Simulation and Experiment in Laser Metrology*. 2. Auflage Berlin: Wiley, 1996.

[GEUS 2000]

GEUS, D. A.: *Versuchsmethodischer Beitrag zum Aufstellen eines Modells zur Berechnung der Messunsicherheit am Beispiel von Formmessungen mit Erweiterung durch Fuzzylogik* / Weckenmann, Albert (Hrsg.): Berichte aus dem Lehrstuhl Qualitätsmanagement und Fertigungsmesstechnik Nr. 8. Erlangen: Lehrstuhl QFM, 2000.

[GOCH 2008]

GOCH, G.; LÜBKE, K.: *Tschebyscheff approximation for the calculation of maximum inscribed/minimum circumscribed geometry elements and form deviations*. Bremen BIMAQ, 2008.

[HECHT 2001]

HECHT, E.: *Optik*. 3. Auflage München, Wien: Oldenbourg Verlag, 2001.

[HEIKKILA 1997]

HEIKKILA, J.; SILVEN, O.: *A Four-Step Camera Calibration Procedure with Implicit Image Correction*. In: Proceedings of IEEE Computer Vision Pattern Recognition (1997), S. 1106-1112.

[HESSE 2004]

HESSE, S.; SCHNELL, G.: *Sensoren für die Prozess- und Fabrikautomation*. 3. Auflage. Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2004.

[HOFFMANN 2007]

HOFFMANN, Jörg: *Handbuch der Messtechnik*. 3. Auflage München: Carl Hanser Verlag, 2007.

[INGERSOLL-RAND 1999]

DWT GMBH, INGERSOLL-RAND: *Materialhandling: Laufschiensysteme*. Katalog Nr. G990610, CPN 00803114, 1999.

www.dwt-gmbh.de.

Stand: 12.11.2010.

[JÄHNE 2005]

JÄHNE, Bernd: *Digitale Bildverarbeitung*. 6. Auflage Berlin: Springer Verlag, 2005.

[JÄHNE 1996]

JÄHNE, B.; MASSEN, R.; NICKOLAY, B.; SCHARFENBERG, H.: *Technische Bildbearbeitung – Maschinelles Sehen*. 1. Auflage Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 1996.

[KALZ 2002]

KALZ, S.: *Numerische Simulation des Strangpressens mit Hilfe der Methode der finiten Elemente*. Doktorarbeit, Institut für Bildsame Formgebung, RWTH Aachen, 2002.

[KEFERSTEIN 2008]

KEFERSTEIN, C. P.; DUTSCHKE, W.: *Fertigungsmesstechnik*. 6. Auflage Wiesbaden: Teubner Verlag, 2008.

[KIENCKE 2001]

KIENCKE, U. ; KRONMÜLLER, H. : *Messtechnik. Systemtheorie für Elektrotechniker*. 1. Auflage Berlin: Springer Verlag, 2001.

[KODAK 2006]

EASTMAN KODAK COMPANY: *Device Performance Specification: Kodak KAI-11002 Image Sensor* / Eastman Kodak Company. New York (USA), 2006.

[KOFLER 2008]

KOFLER, M.: *Visual Basic 2008*. München: Addison-Wesley-Verlag, 2008. – ISBN 978-3-8273-2646-1.

[KUPFERINSTITUT 2010]

DEUTSCHES KUPFERINSTITUT: *Ein moderner Werkstoff mit langer Tradition*: Informationsbroschüre, 2010, S. 9 und S. 2.

www.kupferinstitut.de,

Stand: 08.11.2010.

[KURAZUME 2002]

KURAZUME, R.; NISHNO, K.; ZHANG, Z; IKEUCHI, K.: *Simultaneous 2D images and 3D geometric model registration for texture mapping utilizing reflectance attribute*. In: *Procedures of Fifth Asian Conference on Computer Vision*, 2002, Vol. 1, S. 99-106.

[LANSCH 2007]

LANSCH, U.: *Anhaltspunkte für die Kameraauswahl*, Matrix Vision GmbH, Oppenweiler. In: *Elektronik Praxis – Marktreport Bildverarbeitung*, 2007. S. 20 – S. 22.

[LASER COMPONENTS 2010]

LASER COMPONENTS GMBH: *Datenblatt Laserausrichtsystem*. Laser Components GmbH, 2010.

<http://lt-lasertools.de/downloads/lt-ars-d.pdf>,

Stand: 17.05.2010.

[LEIPERTZ 2005]

LEIPERTZ, A.: *Wärme- und Stoffübertragung*. 2. Auflage München: Carl Hanser Verlag, 2005.

[LERCH 2006]

LERCH, Reinhardt: *Elektrische Messtechnik*. 3. Auflage Berlin: Springer Verlag, 2006.

[MARESCH 2006]

MARESCH, T: *Mathematik – Verknüpfung von 2D- und 3D-Punktwolken*. Gießen, Diss., 2006.

[MASING 2007]

MASING, W.: Handbuch Qualitätsmanagement / Pfeifer, T.; Schmitt, R. (Hrsg.). 5. Auflage München: Carl Hanser Verlag, 2007.

[MAX-PLANCK-INSTITUT 2010]

MAX-PLANCK-INSTITUT: *Datenblatt Laserschutz-Unterweisung*. Max-Planck-Institut für Polymerforschung, 2010,
<http://www.mpip-mainz.mpg.de/~mengesh/PDFs/LSU.PDF>,
Stand: 17.05.2010.

[MIAN 2006a]

MIAN, A. S.; BENNAMOUN, M.; OWENS, R.: *A Novel Representation and Feature Matching Algorithm for Automatic Pairwise Registration of Range Images*. In: International Journal of Computer Vision (IJCV 2006), Vol. 66, Nr. 1, S. 19-40.

[MIAN 2006b]

MIAN, A. S.; BENNAMOUN, M.; OWENS, R.: *3D Model-Based Object Recognition and Segmentation in Cluttered Scenes*. In: IEEE Transactions in Pattern Analysis and Machine Intelligence (2006), Vol. 28, Nr. 10, S. 1584-1601.

[MICRONORM 2010]

MICRONORM WORONKA GMBH: *Fortschritt durch Innovation: Produktprogramm*. S. 1.
www.micronorm.de,
Stand: 12.11.2010.

[MIL 2009]

ACTIVEMIL: *Hilfe-Funktion der ActiveMIL-Bibliothek*, Software-Begleitliteratur, 2009.

[MODRICH 2007]

MODRICH, Kai-Udo: *Industrielle Bildverarbeitung für automatisierte Produktionen*. In: Optik & Photonik, 2007. Nr. 3, S. 25 – S. 31.

[NÜCHTER 2006]

NÜCHTER, Andreas: *Semantische dreidimensionale Karten für autonome mobile Roboter*. Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Diss., 2006, p. 68.
http://deposit.ddb.de/cgi-bin/dokserv?idn=982338805&dok_var=d1&dok_ext=pdf&filename=982338805.pdf,
Stand: 26.06.2010.

[PAPULA 2000]

PAPULA, L.: *Mathematische Formelsammlung für Ingenieure und Naturwissenschaftler*. 6. Auflage, Vieweg Verlag, 2000, S. 28.

[PELGRIMS 2004]

PELGRIMS, Patrick; VAN DE Vondel, Björn; VAN DE VELDE, Gerrit: *Subpixel Edge detection* / De Nayer Institut (NL), 2004.
http://emsys.denayer.wenk.be/emcam/subpix_eng.pdf,
Stand: 17.05.2010.

[PENTAX 2010]

PENTAX: *Datenblatt: Pentax B2514D (KP)*.

http://www.pentax.de/_de/cctv/products/index.php?ebene1=1ebene2=8produkt=C22525KP,

Stand: 19.05.2010.

[PESCH 2003]

PESCH, Bernd: *Bestimmung der Messunsicherheit nach GUM. Grundlagen der Metrologie*. Alamogordo, New Mexiko (USA): 2003.

[PFEIFER 2007]

PFEIFER, N.; BRIESE, C.: *Laser Scanning – Principles and Applications*. Nowosibirsk: 25.-27. April 2007, In: "III International Scientific Conference", 2007. ISBN 978-5-87693-229-7; p. 93 – p. 112.

[PFEIFER 2010]

PFEIFER, T.: *Fertigungsmesstechnik*. München, Wien: Oldenburger Verlag, 2010. ISBN: 978-3486592023.

[POLYTEC 2008]

POLYTEC GMBH: *Grundlagen* / Polytec GmbH, Waldbronn.

http://www.polytec.com/ger/159_2069.asp,

Stand: 17.05.2010.

[PROFOS 1992]

PROFOS, Paul: *Handbuch der industriellen Messtechnik* / Pfeifer, Thilo (Hrsg.). 5. Auflage München: Verlag R. Oldenbourg, 1992.

[PROSILICA 2009]

PROSILICA: *Datenblatt: Prosilica GE1900 CCD-Kamera*. 2009.

<http://prosilica.com/products/manuals/700028A%20-%20GE1900%20User%20Manual.pdf>,

Stand: 17.05.2010.

[PTB 2009]

PHYSIKALISCH-TECHNISCHE BUNDESANSTALT: *PTB*.

<http://www.ptb.de/de/wegweiser/industriekunden/kalibrierung.html>,

Stand: 17.05.2010.

[PULLI 1999]

PULLI, Karl: *Multiview Registration for Large Data Sets*. In: Second international conference on 3D digital imaging and modeling. (1999), S. 160-168.

<http://graphics.stanford.edu/papers/pulli-3dim99/3dim99.pdf>,

Stand: 17.05.2010.

[REUTER 2008]

REUTER, M.; ZACHER, S.: *Regelungstechnik für Ingenieure*. 12. Auflage Wiesbaden: GWV Fachverlage GmbH, 2008.

[ROGERS 2000]

ROGERS, David: *An Introduction to NURBS. With Historical Perspective*. Morgan Kaufmann Verlag, 2000.

[SCHÄFTER+KIRCHHOFF 2010]

SCHÄFTER+KIRCHHOFF: *Datenblatt*. Spezifikationen von Produkten.

http://www.sukhamburg.de/download/laser-mlg13lr_d.pdf,

Stand: 17.05.2010.

[SCHUMANN 1998]

SCHUMANN, Rainer; THONIß, Thomas: *Telezentrische Systeme für optische Prüf- und Messstechnik*. In: *Technisches Messen* (1998), Nr. 4, S. 131-136.

http://www.emt.uni-linz.ac.at/education/Inhalte/vl_digBildv/handouts/tm98.pdf,

Stand: 17.05.2010.

[SCHUSTER 2008]

SCHUSTER, N.: *Erfolgsfaktor Optik und Beleuchtung beim Einsatz von Bildverarbeitung - Vision & Control GmbH, Suhl*. In: Messe München GmbH: *Automatica 2008* (München, 10.-13.06.2008). – Fachvortrag, 19.06.2008.

[SCHWARZKOPF 2008]

SCHWARZKOPF, Patrick: *Europäische Bildverarbeitungsindustrie weiter auf Wachstumskurs: Ein aktueller Bericht zur Marktsituation in der IBV-Branche*. In: *Optik & Photonik* (2007) Nr. 3, S. 11-12.

[SCHWIEDER 2006]

SCHWIEDER, Peter Mario: *CCD- und CMOS-Bildsensoren / Photonfocus AG (CH)*. In: *Laserjournal* (2006), Nr. 5, S. 52-55.

[SHIBLA 2004]

SHIBLA, Aysen: *Der Iterative Closest Point Algorithmus*. Karlsruhe, Universität, 2004.

http://www.wipr.ira.uka.de/~megi/SEMINAR/SS_04/SEMINAR/S-AysenShibla-DerICPAlgorithmus.pdf,

Stand: 17.05.2010.

[SOMMER 2004]

SOMMER, K.-D.; SIEBERT, B. R.: *Grundlage und praktische Umsetzung der Messunsicherheitsbestimmung nach GUM*. In: *VDI-Berichte Nr. 1867* (2004).

[STEMMER 2010]

STEMMER IMAGING GMBH: *Beleuchtungstechniken für die industrielle Bildverarbeitung - Stemmer Imaging GmbH, Puchheim*.

<http://www.stemmer-imaging.de/pages/service/base.php?view=477&item=16>,

Stand: 19.05.2010.

[TEUTSCH 2006]

TEUTSCH, C.; BERNDT, D.: *Automated Geometry Measurement of Wheel Rims Based on Optical 3D Metrology*. Magdeburg: JBL Consulting, 2006.

[THÖNIß 2006]

THÖNIß, Thomas: *Objektive in der industriellen Bildverarbeitung* / Linos Photonics GmbH & Co. KG. In: 2. Fachtagung Optische Industriesensorik, Böblingen, 2006.

[TRÄNKLER 1998]

TRÄNKLER, Hans-Rolf; OBERMEIER, Ernst: *Sensortechnik – Handbuch für Praxis und Wissenschaft*. 1. Auflage Berlin: Springer-Verlag, 1998. - ISBN 3-540-58640-7.

[TROSTMANN 2003]

TROSTMANN, Erik: Lichtschnittverfahren. In: Norbert Bauer (Hrsg.): *Leitfaden zu Grundlagen und Anwendungen der optischen 3D Messtechnik* / Fraunhofer, Allianz Vision, Erlangen, S. 4-7, 2003.

[TSAI 1987a]

TSAI, Roger Y.: *Metrology Using Off-the-Shelf TV Cameras and Lenses*. In: IEEE Journal of Robotics & Automation (1987), Vol. 3, Nr. 4, S. 323-344.

[TSAI 1987b]

TSAI, Roger Y.: *A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses*. In: IEEE Journal of robotics and automation, Vol. 3, No. 4, August 1987.

[TSAI 1986]

TSAI, Roger Y.: *An Efficient and Accurate Camera Calibration Technique for 3D Machine Vision*. In: Proceedings of IEEE (1986), p. 364-374, Miami Beach 1986.

[TUTSCH 2008]

TUTSCH, R.; PETZ, M.; KECK, C.: *Optical 3D Measurement of Scattering and Specular Reflecting Surfaces*. In: Journal of Physics (IOP Publishing): Conference Series 139, 2008.

[TUTSCH 2006]

TUTSCH, R.; PETZ, M.: *Ermittlung der Oberflächengeometrie aus Messpunktewolken in der optischen Messtechnik*. In: Beyerer, J.; Puente Leon, F.; Sommer K.-D. (editors): Informationsfusion in der Mess- und Sensortechnik. Karlsruhe, Universitätsverlag Karlsruhe, 2006, p. 127-135. ISBN-10: 3-86644-053-7.

[VOEST 2010]

VOEST ALPINE SCHIENEN GMBH: *Oberbau-Profile, Oberbau-Fertigteile: Produktionsprogramm*, S. 5, 2010.
www.voestalpine.com/schienen,
Stand: 12.11.2010.

[WAGNER 2000]

WAGNER, T.: *Automatische Konfiguration von Bildbearbeitungssystemen*. Shaker, Erlangen-Nürnberg, 2000.

[WECKENMANN 2010a]

WECKENMANN, A.; BERNSTEIN, J.: *Optical Multi-Sensor-Metrology for Extruded Profiles*, Journal Metrology and Measurement Systems, Vol. XVII (2010), No. 1 pp. 47-54, ISSN 0860-8229.

[WECKENMANN 2010b]

WECKENMANN, A.; BERNSTEIN, J.: *Measurement uncertainty evaluation of optical multi-sensor-measurements*. Tagungsband 9th International Scientific Conference "Coordinate Measuring Technique CMT" (14.-16.04.2010, Bielsko-Biala, Poland). In: Sladek, J. Jakubiec, W. (Eds.): *Advances in coordinate metrology*. University of Bielsko Biala, 2010, p. 73-82. – Proceedings, ISBN 978-83-62292-56-1. "

[WECKENMANN 2010c]

WECKENMANN, A.; BERNSTEIN, J.: Beitrag zum Jahresbericht der BFS 2010: *Optisches Bi-Sensor-Messsystem für die Strangprofilfertigung*. Buchbeitrag Jahresbericht 2010 der Bayerischen Forschungsstiftung, 2010.

[WECKENMANN 2009a]

WECKENMANN, Albert; BERNSTEIN, Johannes: *Optical Multi-Sensor Metrology for Extruded Profiles*. In: Proceedings of 13th National and 4th International Scientific Conference "Metrology in Production Engineering - MwTw" (23.-25.09.2009, Poznan-Zerkow, Poland), p. 533-538. - ISBN 978-83-89333-30-8.

[WECKENMANN 2009b]

WECKENMANN, Albert; BERNSTEIN, Johannes: *User Interface for Optical Multi-Sensorial Measurements at Extruded Profiles*. In: IMEKO XIX World Congress "Fundamental and Applied Metrology" (06.-11.11.2009, Lisbon). P. 1871-1876. - Proceedings on CD-ROM. http://www.imeko2009.it.pt/Papers/FP_129.pdf as of 16.09.2009.

[WECKENMANN 2009c]

WECKENMANN, Albert; BERNSTEIN, Johannes: *Optical Multi-Sensor Measurements for Production Control of Extruded Profiles*. In: 11th CIRP International Conference on Computer Aided Tolerancing CAT 2009 "Geometric Variations within Product Life-Cycle Management" (26.-27.03.2009, Annecy, France). - Proceedings on CD-ROM.

[WECKENMANN 2009d]

WECKENMANN, Albert; BERNSTEIN, Johannes: *Optical Bi-Sensorial Measurement System for Production Control of Extruded Profiles*. In: Technisches Messen 76 (2009) 7-8, S. 369-373.

[WECKENMANN 2009e]

WECKENMANN, Albert; BERNSTEIN, Johannes: *Mehrbild-Messung mit einem optischen Bi-Sensor-Messsystem*. In: Technisches Messen 76 (2009) 3, S. 104-111.

[WECKENMANN 2009f]

WECKENMANN, Albert; BERNSTEIN, Johannes: *Optical Bi-Sensorial Measurement System for Production Control of Extruded Profiles*. In: ICPM - International Conference on Precision Measurement in conjunction with the 53rd International Scientific Colloquium (53rd IWK) (08.-12.09.2008, Ilmenau, Germany). TU Ilmenau (Publ.): Ilmenau : ISLE, 2008, - ISBN 978-3-938843-38-3. - Technisches Messen 76 (2009) 7-8, S. 369-373.

[WECKENMANN 2008]

WECKENMANN, Albert; BERNSTEIN, Johannes: *Optical Bi-Sensorial Measurement System for the Production Control of Extruded Profiles*. In: *9th International Symposium on Laser Metrology / IMEKO TC14 - Technical Committee on the Measurement of Geometrical Quantities* (30.06.-02.07.2008, SMU Conference Centre, Singapore). Quan, C.; Asundi, A. (Eds.): *Proceedings of SPIE Vol. 7155*, 2008, art. no. 71551U-1.

[WECKENMANN 2007]

WECKENMANN, Albert; BERNSTEIN, Johannes: *Optisches Bi-Sensor-Messsystem für die Strangprofil-Fertigung*. In: Bayerische Forschungsförderung (Hrsg.): *Jahresbericht 2006*. München: BFS, 2007, p. 85.

[WECKENMANN 2006]

WECKENMANN, Albert; SOMMER, K.-D.; SIEBERT, B. R. L.: *Qualität für Messergebnis, Messunsicherheit nach GUM*. *Technisches Messen* 73 (2006) 4, S. 189.

[WECKENMANN 2003]

WECKENMANN, Albert; NALBANTIC, K.: *Precision Measurement of Cutting Tools with Matched Optical 3D-Sensors*. *CIRP Annals – Vol. 52/1*, p. 443-446, 2003.

[WECKENMANN 1999]

WECKENMANN, Albert; GAWANDE, B.: *Koordinatenmesstechnik*. München: Carl Hanser Verlag, 1999.

[WECKENMANN 1995]

WECKENMANN, Albert; EITZERT, H.; GARMER, M.; WEBER, H.: *Functionality-oriented evaluation and sampling strategy in coordinate metrology*. Hamburg, University of Federal Armed Forces. In: *Precision Engineering* 17, 1995. S. 244 – S. 252.

[WECKENMANN 1992]

WECKENMANN, Albert; EITZERT, H.; WEBER, H.: *Koordinatenmesstechnik funktionsorientiert auswerten*. Conference on Microtechnology, VDI, 1992.

[WERTH-MESSTECHNIK 2010]

WERTH-MESSTECHNIK: Datenblatt: *WinWerth®-Mess-Software*.
<http://www.werthmesstechnik.de/html/deutsch/software.htm>,
Stand: 07.04.2010.

[WILLSON 1995]

WILLSON, R.: *Tsai Camera Calibration Software*. 28.10.1995.
Quelltext: <http://www.cs.cmu.edu/~rgw/TsaiCode.html>,
Erklärungen: <http://www.ius.cs.cmu.edu/IUS/usrp2/rgw/www/faq.txt>,
Stand: 17.05.2010.

[ZHANG 2000]

ZHANG, Z.: *A flexible new technique for camera calibration*. *IEEE Transactions Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 22, p. 1330-1334, 2000.

Normen und Richtlinien

[DIN 1319-1]

Norm DIN 1319 1995-1999. Grundlagen der Messtechnik, Teil 1. *Auswertung von Messungen einer einzelnen Messgröße, Messunsicherheit.*

[DIN 55350-12]

Norm DIN 55350-12 1989. *Teil 12: Begriffe der Qualitätssicherung und Statistik - Merkmalsbezogene Begriffe.*

[DIN 5031-7]

Norm DIN 5031-7 1984. *Teil 7: Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik; Benennung der Wellenlängenbereiche.*

[DIN EN 62079]

Norm DIN EN 62079 2001. *Erstellen von Anleitungen – Gliederung, Inhalt und Darstellung.*

[DIN EN 60825-1]

Norm DIN EN 60825-1 2001. *Teil 1: Klassifizierung von Laserstrahlung.*

[DIN EN ISO 1101]

DIN EN ISO 1101 2008. *Geometrische Produktspezifikation (GPS). Geometrische Tolerierung – Tolerierung von Form, Richtung, Ort und Lauf (ISO 1101 2005); deutsche Fassung EN ISO 1101 2005.*

[DIN EN ISO 10360-2]

DIN EN ISO 10360-2 2009. *Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Annahmeprüfung und Bestätigungsprüfung für Koordinatenmessgeräte (KMG) - Teil 2: KMG angewendet für Längenmessungen (ISO 10360-2:2009); deutsche Fassung EN ISO 10360-2:2009.*

[DIN EN ISO 14253-1]

Norm DIN EN ISO 14253 1999. Entscheidungsregeln für die Feststellung von Übereinstimmung oder Nichtübereinstimmung mit Spezifikationen, Teil 1. *Prüfung von Werkstücken und Messgeräten durch Messen/GPS.*

[DIN ISO 15530-3]

Norm DIN ISO 15530 2008. Anwendung von kalibrierten Werkstücken oder Normalen, Teil 3. *Verfahren zur Ermittlung der Messunsicherheit von Koordinatenmessgeräten (KMG)/GPS.*

[DIN V ENV 13005]

Norm DIN V ENV 13005-1999. *Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen.*

[DIN EN ISO/EC 17025]

DIN EN ISO/EC 17025. *Allgemeine Anforderungen an die Kompetenz von Prüf- und Kalibrierlaboratorien (ISO/IEC 17025:2005); Deutsche und Englische Fassung EN ISO/IEC 17025:2005.*

[GUM 2008]

Guide to the expression of uncertainty in measurement; Document produced by Working Group 1 of the Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM/WG 1), September 2008.
http://www.bipm.org/utils/common/documents/jcgm/JCGM_100_2008_E.pdf

[VDI/VDE 2617-6]

Richtlinie VDI/VDE 2617 2008. *Teil 6: Genauigkeit von Koordinatenmessgeräten - Kenngrößen und deren Prüfung. Teil 6.3: Koordinatenmessgeräte mit Multisensorik.*

[VDI/VDE 2617-8]

Richtlinie VDI/VDE 2617 2006. *Genauigkeit von Koordinatenmessgeräten - Kenngrößen und deren Prüfung. Teil 8: Prüfprozesseignung von Messungen mit Koordinatenmessgeräten.*

[VIM 2008]

DIN e. V. (Hrsg.): *Internationales Wörterbuch der Metrologie*. 3. Auflage Berlin: Beuth Verlag, 2008.