

Beitrag zur automatisierbaren Messunsicherheitsermittlung in der Präzisionskoordinatenmesstechnik mit Bildsensoren

DISSERTATION

zur Erlangung des akademischen Grades

DOKTORINGENIEUR (Dr.-Ing.)

vorgelegt der Fakultät für Maschinenbau

der Technischen Universität Ilmenau

von Frau

Dipl.-Wirtsch.-Ing. Karina Weißensee

geboren am 14.08.1981 in Arnstadt

Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. habil. Gerhard Linß, Technische Universität Ilmenau

Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza, Karlsruher Institut für Technologie

Prof. Dr.-Ing. Klaus-Dieter Sommer, Physikalisch-Technische Bundesanstalt

Tag der Einreichung: 28.09.2010

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 28.01.2011

**Der Gebildete treibt die Genauigkeit nicht weiter, als
es der Natur der Sache entspricht.**

Aristoteles (384 v. Chr.- 322 v.Chr.)

Vorwort

Es ist eine verbreitete Verhaltensweise der Menschen und im industriellen Umfeld verbreitete Praxis, von Maschinen speziell von Messgeräten angezeigte Werte leichtgläubig zu übernehmen. Damit in der Qualitätssicherung der angezeigte Wert richtige Rückschlüsse auf das Messobjekt zulässt, ist eine Aussage über dessen Annäherung an den wahrscheinlichsten Wert der Messgröße unabdingbar.

Diese Arbeit soll einen Beitrag dafür leisten, die Wahrnehmung der immer vorhandenen Unsicherheit von Messergebnissen in der Industrie und auch im Alltag zu etablieren. Gleichzeitig ist es die Intention, einen Impuls auszulösen, damit zukünftig Messgeräte neben dem Messwert auch Informationen über die zugehörige Messunsicherheit anzeigen. Mein persönliches Verlangen ist es, die Sicherheit und das Vertrauen in Messungen mit Bildsensoren durch die zusätzliche automatisierte Angabe der Messunsicherheit zu erhöhen.

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin im Fachgebiet Qualitätssicherung der Technischen Universität Ilmenau.

Mein besonderer Dank gebührt Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Gerhard Linß, Leiter des Fachgebiets und Inhaber des Lehrstuhls Qualitätssicherung an der Technischen Universität Ilmenau für die Förderung meiner Arbeit und meiner Person sowie für das mir entgegengebrachte Vertrauen. Mein Dank gilt ebenfalls Herrn Dr.-Ing. Olaf Kühn, Direktor des Landesamtes für Mess- und Eichwesen Thüringen, für die motivierenden Ratschläge und kritischen Hinweise im Vorfeld und während der Erstellung der Arbeit.

Herr Prof. Dr.-Ing. Klaus-Dieter Sommer stand mir auch nach unserer gemeinsamen Zeit am Landesamt für Mess- und Eichwesen Thüringen als fachlicher Diskussionspartner und Ratgeber zur Verfügung, wofür ich ihm sehr danke.

Ihren Anteil zum Erfolg dieser Dissertation haben alle Mitarbeiter des Fachgebietes Qualitätssicherung beigetragen. Ihnen allen möchte ich für die ausgezeichnete Zusammenarbeit, die anregenden Diskussionen und die vielen guten Ideen zum Thema danken.

Nicht zuletzt danke ich meinen Eltern Gela und Günther Weißensee für die umfangreiche Unterstützung während des Studiums und die wertschätzenden und herzlichen Worte in der Zeit der Erstellung der Dissertation.

Höchste Anerkennung gilt meinem lieben Mann Holger für das entgegengebrachte Verständnis, die tiefgründigen, gedankenreichen Gespräche und die daraus entstandenen Erkenntnisse.

Karina Weißensee, im September 2010

Kurzfassung

Das Vertrauen in die Vergleichbarkeit von Messergebnissen ist von enormer Bedeutung für den internationalen Handel und Warenaustausch. Die Vergleichbarkeit von Messergebnissen ist nur dann sinnvoll, wenn auch die Messunsicherheit verglichen und nach gleichen Methoden ermittelt wird.

Präzisionskoordinatenmessgeräte mit Bildsensoren sind für die Messung geometrischer Prüfmerkmale aufgrund ihres großen Einsatzbereichs, ihrer niedrigen Messzeit, ihrer berührungslosen Arbeitsweise, ihres großen Arbeitsabstands, ihres damit verbundenem großen Messbereichs und ihrer Flexibilität bei der Messung verschiedenster Werkstücke weit verbreitet und bedeutsam.

In dieser Arbeit wird eine neue Methode zur Messunsicherheitsermittlung von Längenmessungen an Präzisionskoordinatenmessgeräten mit Bildsensoren in Verbindung mit digitaler Bildverarbeitung vorgestellt.

Das digitale Bild des Messobjekts ist die Voraussetzung jeder geometrischen Messung mit Bildsensoren. Die neu entwickelte Methode basiert daher auf dem Wissen über die Qualität des Bildes. Zur Schätzung der Messunsicherheit werden signifikante Bildinformationen in Kombination mit Messresultaten aus Wiederholmessungen von Voruntersuchungen herangezogen. Adaptiv wird zu jeder Messszene die Bildqualität quantitativ erfasst. Während der Detektion eines Koordinatenpunktes wird ein Vektor definierter Bildkenngrößen, als Träger signifikanter Bildinformationen, bestimmt und das Modell zur Messunsicherheitsschätzung adäquat angepasst.

Die vorgestellte Methode schafft die Voraussetzungen für die automatisierte Angabe eines vollständigen Messergebnisses bestehend aus bestem Schätzwert und erweiterter Messunsicherheit für praxisnahe Präzisionskoordinatenmessungen mit Bildsensoren. Die auf diese Weise wissensbasiert geschätzte Messunsicherheit ermöglicht dem Anwender die Bewertung der Zuverlässigkeit des angezeigten Messwerts und die Vergleichbarkeit mehrerer Messungen ohne empirische Berechnungen auf der Basis aufwändiger Wiederholmessungen durchführen zu müssen. Es konnte gezeigt werden, dass die neue Methode Schätzwerte für die Messunsicherheit liefert, die praktikabel sind und weitgehend mit experimentell erzielten Messunsicherheitsangaben übereinstimmen. Die dargelegten Ergebnisse können für jede Art von Längenmessungen mit Bildsensoren angewendet werden.

Abstract

The confidence in the comparability of measurement results is of great importance in national trade and international exchange of goods. The comparability of measurement results is expedient only if the measurement uncertainty is compared too and if the measurement uncertainty is determined under a uniform procedure.

For the measurement of geometrical features precision coordinate measuring machines with visual sensors are widely used and important due to their large scope of application, their short measurement time, their contactless operation mode, their large operating distance, their concomitant large measuring range and their flexibility in the measurement of different workpieces.

In this work, a new method of measurement uncertainty estimation of dimensional measurements on a precision coordinate measuring machine using visual sensors and image processing is proposed.

The digital image of the unit under test is the prerequisite of any dimensional measurement with visual sensors. Therefore, the newly developed method is based on knowledge about the quality of the image. Significant image information in combination with measurement results of supplemental experiments in preliminary investigations is applied for the estimation of the measurement uncertainty. The image quality to each measuring scene is compatibly quantified. During the detection of a coordinate point a vector of defined image parameters, as carrier of the significant image information, is ascertained and the model for uncertainty estimation is adequately adapted.

The proposed method lays the foundations for the automated indication of a complete measurement result consisting of the best estimate and the expanded measurement uncertainty for practical precision coordinate measurements with visual sensors. The knowledge-based estimated measurement uncertainty by this means enables the user the evaluation of the reliability of the indicated measurand and the comparability of several measurements without the realisation of extensive supplemental experiments. It could be shown, that the novel method gives estimates of measurement uncertainty which are practicable and widely-agreed with experimental effectuated uncertainty declarations. The presented results can be applied in any kind of dimensional image-based measurements using visual sensors.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
I	UNTERSUCHUNGEN ZUM AKTUELLEN ENTWICKLUNGSSTAND DER PRÜFMERKMALBEZOGENEN MESSUNGSICHERHEITSERMITTLUNG IN DER PRÄZISIONSKOORDINATENMESSTECHNIK MIT BILDSENSOREN	3
2	Methoden zur Ermittlung der Messunsicherheit	4
2.1	Klassische Bewertung der Messunsicherheit	4
2.1.1	Zufällige, systematische und grobe Messabweichungen . . .	5
2.1.2	Messfehler versus Messabweichung	6
2.1.3	Lineares und quadratisches Fehlerfortpflanzungsgesetz . . .	8
2.1.4	Angabe des vollständigen Messergebnisses	9
2.2	Messunsicherheit gemäß GUM	9
2.2.1	Veranlassung und Legitimation des GUM	9
2.2.2	Bayestheorie als Basis des GUM	10
2.2.3	Standard-ISO-GUM-Verfahren	13
2.2.4	Numerische Verteilungsfortpflanzung	25
2.3	Verfahren für die Messunsicherheitsermittlung in der Koordinatenmesstechnik	28
2.3.1	Verfahren zur prüfmerkmalbezogenen Messunsicherheitsermittlung in der Koordinatenmesstechnik durch Substitutionsmessungen nach DIN ISO/TS 15530-3	28
2.3.2	Ermittlung der Messunsicherheit von Koordinatenmessungen durch Messunsicherheitsbilanzen	29
2.3.3	Messunsicherheit von Koordinatenmessungen mit optischer Antastung nach VDI/VDE 2617-6	29
2.3.4	Ermittlung der Messunsicherheit von Messungen mit Koordinatenmessgeräten durch Simulation	31
2.3.5	Prüfprozesseignung von Messungen mit Koordinatenmessgeräten	31
2.4	Verfahren zur automatisierten Ermittlung der Messunsicherheit . . .	31
2.5	Bewertung der Methoden für die Anwendung in der Präzisionskoordinatenmesstechnik mit Bildsensoren	33
3	Zusammenfassung und Präzisierung der Aufgabenstellung	35
3.1	Zusammenfassung des aktuellen Entwicklungsstands	35
3.2	Präzisierung der Aufgabenstellung	36

II	THEORETISCHE UNTERSUCHUNGEN ZUR PRÜFMERKMALBEZOGENEN MESSUNGSICHERHEITSERMITTLUNG IN DER PRÄZISIONSKOORDINATENMESSTECHNIK MIT BILDSENSOREN	39
4	Messprozess zur Messung von 2D-Koordinatenpunkten mit Bildsensoren	40
4.1	Messsystem zur Messung von 2D-Koordinatenpunkten mit Bildsensoren	40
4.1.1	Koordinatenmessgerät	40
4.1.2	Sensorsystem	40
4.1.3	Auflösungsbegrenzung visueller Sensoren	41
4.2	Messprinzip und Messmethode	42
5	Vorgehensweise zur Ermittlung der Messunsicherheit von 2D-Koordinatenpunkten	45
5.1	Induktives Inferenzverfahren zur Messunsicherheitsermittlung	45
5.1.1	Wissensbasierte Verfahren	45
5.1.2	Abbildung des vorhandenen Wissens durch Bildkenngrößen	46
5.1.3	Bestimmung des Grauwertgesamtrauschens als Einganggröße für die Fortpflanzung innerhalb des KOKs zu $u_{R,MCM}$	50
5.1.4	Vorgehensweise des induktiven Inferenzverfahrens	51
5.1.5	Charakterisierung der Antastabweichung durch PDF	55
5.2	Ermittlung des Messunsicherheitsbeitrags durch Geometrieabweichungen	56
5.3	Ermittlung des thermisch verursachten Messunsicherheitsbeitrags	57
5.4	Kombination der Messunsicherheitsbeiträge von 2D-Koordinatenpunkten	59
6	Ermittlung der prüfmerkmalbezogenen Messunsicherheit	61
6.1	Ausgleichsrechnung für Parameter von Geometrieelementen	61
6.2	Zusammenhang von prüfmerkmalbezogener Messunsicherheit und Form- und Standardabweichung von Geometrieelementen	63
6.3	Prüfmerkmalbezogene Messunsicherheit für das Geometrieelement Gerade	65
6.4	Prüfmerkmalbezogene Messunsicherheit für das Geometrieelement Kreis	67
7	Risiken bei der Qualitätsprüfung	68
7.1	Fehlentscheidungen bei der Qualitätsprüfung	68
7.2	Berechnung von Risiken bei der Qualitätsprüfung	70
7.3	Optimierung von Messprozessen auf der Grundlage von Risiken	71
8	Programmablaufplan zur Messunsicherheitsermittlung in der Präzisionskoordinatenmesstechnik mit Bildsensoren	74

<p>III EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN ZUR PRÜFMERKMALBEZOGENEN MESSUNGSICHERHEITSERMITTLUNG IN DER PRÄZISIONSKOORDINATENMESSTECHNIK MIT BILDSSENSOREN</p> <p>9 Versuchsordnung und Messobjekte</p> <p>9.1 Versuchsordnung</p> <p>9.2 Auswahl geeigneter Messobjekte</p> <p>10 Wissensbasis für das induktive Inferenzverfahren zur Messunsicherheitsermittlung</p> <p>10.1 Wiederholmessungen von 2D-Koordinatenpunkten</p> <p>10.2 Bildkenngrößenbasierte Schätzung der Messunsicherheit</p> <p>10.3 Verifizierung des wissensbasierten Verfahrens zur Messunsicherheitsschätzung</p> <p> 10.3.1 Statistische Verifizierung</p> <p> 10.3.2 Experimentelle Verifizierung</p> <p> 10.3.3 Präzision der wissensbasierten Schätzmethode</p> <p>11 Softwarebasierte Umsetzung der Messunsicherheitsschätzung in der Präzisionskoordinatenmesstechnik mit Bildsensoren</p> <p>11.1 Softwarestruktur zur Ermittlung der Messunsicherheit von 2D-Koordinatenpunkten</p> <p>11.2 Softwarestruktur zur Ermittlung der prüfmerkmalbezogenen Messunsicherheit</p> <p>12 Demonstration der wissensbasierten Messunsicherheitsschätzung an praxisrelevanten Messaufgaben</p> <p>12.1 Vergleich der Messunsicherheit von 2D-Koordinatenpunkten an unterschiedlichen Messobjekten</p> <p>12.2 Messunsicherheitsschätzung an einem LTCC-Elektronikbauteil</p> <p>12.3 Messunsicherheitsschätzung an einem Kalibriernormal</p> <p>12.4 Messunsicherheitsschätzung an einer Leiterplatte</p> <p>12.5 Messunsicherheitsschätzung an einem Siliziumwafer</p> <p>12.6 Messunsicherheitsschätzung an einem Kunststoffwafer</p> <p>12.7 Auswertung der wissensbasierten Messunsicherheitsschätzung an praxisrelevanten Messaufgaben</p> <p>13 Zusammenfassung und Ausblick</p> <p>13.1 Zusammenfassung</p> <p>13.2 Ausblick</p> <p>Literaturverzeichnis</p> <p>Anhang</p> <p>A1 Funktionsweise des Kantenortkriteriums Dynamischer Schwellwert</p> <p>A2 Messpunkte für die Anwendung der Monte-Carlo-Methode</p> <p>A3 Voruntersuchungen</p>	<p>75</p> <p>76</p> <p>76</p> <p>77</p> <p>79</p> <p>79</p> <p>82</p> <p>85</p> <p>85</p> <p>85</p> <p>86</p> <p>88</p> <p>88</p> <p>94</p> <p>95</p> <p>95</p> <p>96</p> <p>98</p> <p>99</p> <p>101</p> <p>103</p> <p>107</p> <p>108</p> <p>108</p> <p>110</p> <p>111</p> <p>124</p> <p>124</p> <p>128</p> <p>129</p>
---	--

Symbol- und Abkürzungsverzeichnis

α_{MO}	thermischer Längenausdehnungskoeffizient des Messobjekts
α_{MS}	thermischer Längenausdehnungskoeffizient der Maßstäbe
\bar{x}	arithmetischer Mittelwert
ΔL_{T}	thermische Längenausdehnung
Δl_{min}	Auflösungsgrenze
ΔSP	Differenz der Grauwert-Schwerpunkte
ΔEP	E inzel p unktabweichung
$\delta(z)$	Dirac Delta Funktion, $\delta(z = 0) = 1$, $\delta(z \neq 0) = 0$
Δ_{Sprung}	Abweichung zur idealen Sprungfunktion im Subpixelbereich
η_1, \dots, η_n	mögliche Werte der Messgröße Y
Γ	Gammafunktion
λ	Wellenlänge
$\mu = x_{\text{E}}$	Erwartungswert
ω	A-Priori-Information
\overline{GW}_{L}	mittlerer Grauwert im Intervall $[P_{\text{A}}; P_{\text{SP}} - d]$
\overline{GW}_{R}	mittlerer Grauwert im Intervall $[P_{\text{SP}} + d; P_{\text{E}}]$
ϕ	Wahrscheinlichkeitsverteilung
σ	Standardabweichung
σ^2	Varianz
$\vec{\text{BK}}$	Bildkenngrößen-Vektor
MPE_{E}	Grenzwert der Längenmessabweichung
φ	Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion
$\varphi_{\text{H}}(x_{\text{H}})$	Funktion des Herstellungsprozesses
$\varphi_{\text{M}}(x_{\text{M}})$	Funktion des Messprozesses
$\varphi_{\text{Q}}(\xi)$	Vektor aus den PDFs der Eingangsgrößen (Q_1, \dots, Q_w) mit deren möglichen Werten (ξ_1, \dots, ξ_w)
$\varphi_{\text{Y}}(\eta)$	PDF der Messgröße Y mit deren möglichen Werten (η_1, \dots, η_w)
$\varphi_{\text{R}(x)}$	resultierende Funktion
$\xi_{j1}, \dots, \xi_{jn}$	mögliche Werte der Eingangsgrößen Q_j
A, K, B	Konstanten bei der Berechnung der Längenmessunsicherheit
a_+	oberer Grenzwert
a_-	unterer Grenzwert
$A_{\text{Pixel,L}}$	Anzahl der Pixel im Intervall $[P_{\text{A}}; P_{\text{SP}} + d]$
$A_{\text{Pixel,R}}$	Anzahl der Pixel im Intervall $[P_{\text{SP}} + d; P_{\text{E}}]$
A_{Pixel}	Anzahl der Pixel entlang des gesamten Suchstrahls
A_{R}	Anstieg einer Regressionsgeraden im Subpixelbereich
b	systematische Abweichung des Mittelwerts vom Kalibrierwert (DIN ISO/TS 15530-3)
$\text{BK}_{\text{En}}(X)$	signifikante Bildkenngrößen einer Einzelmessung
$\text{BK}_{\text{Wn}}(X)$	signifikante Bildkenngrößen einer Wiederholmessung
c	Spaltenanzahl der Bildpunktmatrix

D	Durchmesser des Objektivs
d	definierte Halbbreite für den Subpixel-Algorithmus
E	Längenmessabweichung
e_i	Restfehler mit $i = 1 \dots n$
E_E	Endergebnis einer Einzelmessung
E_M	Endergebnis einer Messreihe
F	Summe der erfassten systematischen Abweichungen
f	Freiheitsgrad
$f(\xi)$	Modellgleichung des Messprozesses
F_L, F_R	Flächeninhalte im Subpixelbereich
f_{eff}	effektiver Freiheitsgrad
f_F	Unsicherheit der erfassten systematischen Messabweichungen
f_f	geschätzte unbekannt systematische Messabweichungen
f_{Objektiv}	Brennweite des Objektivs
G_{pp}	Grenzwert für die Prüfprozesseignung
g_{pp}	Kennwert der Prüfprozesseignung
$g_Y(\eta)$	PDF der Messgröße Y
GW	Grauwert
GW_m	mittlerer Grauwert
$GW_{\text{max,o}}$	maximaler Grauwert im Intervall $[GW_m; GW_o]$
$GW_{\text{max,u}}$	maximaler Grauwert im Intervall $[GW_u; GW_m]$
GW_o	höchster Grauwert mit Häufigkeit $H(GW_o) \geq 2$
$GW_{\text{SP,max}}$	größter Grauwert im Subpixelbereich
$GW_{\text{SP,min}}$	kleinster Grauwert im Subpixelbereich
GW_u	kleinster Grauwert mit Häufigkeit $H(GW_u) \geq 2$
H	absolute Häufigkeit
H_{IE}	Informationsentropie
$H_{\text{m,o}}$	mittlere Häufigkeit eines Grauwerts im Intervall $[GW_m; GW_o]$
$H_{\text{m,u}}$	mittlere Häufigkeit eines Grauwerts im Intervall $[GW_u; GW_m]$
$H_{\text{max,o}}$	maximale Grauwert Häufigkeit im Intervall $[GW_m; GW_o]$
$H_{\text{max,u}}$	maximale Grauwert Häufigkeit im Intervall $[GW_u; GW_m]$
i	Anzahl der Eingangsgrößen
I_y	Vertrauensbereich
I_m	mittlere Intensität
IQ	Interquantil
k	Erweiterungsfaktor
$K_{\text{abs,L}}$	absoluter Kontrast im Intervall $[P_A; P_{\text{SP}} - d]$
$K_{\text{abs,R}}$	absoluter Kontrast im Intervall $[P_{\text{SP}} + d; P_E]$
K_{abs}	absoluter Kontrast im Intervall $[P_A; P_E]$
K_{glob}	globaler Kontrast
K_m	mittlerer Kontrast
K_{SP}	Kontrast im Subpixelbereich
KK	Kreuzkorrelation zu einer idealen Referenzkante
L	gemessene Länge
$l(x)$	unbekannte Likelihood
m	Anzahl der aus der Stichprobe geschätzten Parameter
$m_0(X)$	Regressionskonstante

$m_1(X) \dots m_n(X)$	Regressionskoeffizienten
MPE	Grenzwert (engl. Maximal Permissible Error)
n	Stichprobenumfang
$NS_{f''}$	Anzahl der Nullstellen der 2. Ableitung im Subpixelbereich
P	Wahrscheinlichkeit
P_A	Anfangspunkt des Suchstrahls
P_E	Endpunkt des Suchstrahls
P_{SP}	durch die Subpixel-Kante geschnittenes Pixel
P_{SW}	Pixel an dem SW überschritten wird
Q_1, \dots, Q_i	Eingangsgrößen
q_j	Bester Schätzwert/Erwartungswert der Eingangsgröße Q_j
R	Spannweite
r	Korrelationskoeffizient
R_2	zweidimensionale Antastunsicherheit
R_A	Abnehmerrisiko
R_{GW}	mittleres Grauwertersuchen
R_H	Herstellerrisiko
s	empirische Standardabweichung
s_{Rest}^2	empirische Restvarianz
S_{min}	minimierte Summe der quadrierten Abweichungen
s_L	Standardabweichung im Intervall $[P_A; P_{SP} - d]$
s_{norm}	normierte Standardabweichung in Prozent
s_R	Standardabweichung im Intervall $[P_{SP} + d; P_E]$
$s_W(X)$	Standardabweichung einer Wiederholmessung zu Messtyp X
$s_W(X)$	Standardabweichung einer Wiederholmessung
SP	Schwerpunkt
SP_o	Grauwert-Schwerpunkt im Intervall $[GW_m; GW_o]$
SP_u	Grauwert-Schwerpunkt im Intervall $[GW_u; GW_m]$
SW	pixelgenauer Schwerpunkt
T	Toleranzbereich, $T = T_o - T_u$
t	Studentfaktor
t_{MO}	Temperatur des Messobjekts
t_{MS}	Temperatur der Maßstäbe des KMGs
T_o	obere Toleranzgrenze/Spezifikationsgrenze
T_u	untere Toleranzgrenze/Spezifikationsgrenze
U	erweiterte Messunsicherheit
u	Standardunsicherheit
u_A	Standardunsicherheit der visuellen Antastung
U_{KP}	erweiterte Messunsicherheit eines Koordinatenpunkts
u_{KP}	Standardunsicherheit eines Koordinatenpunkts
u_{sim}	durch Simulation bestimmte Unsicherheit
U_{SN}	Messunsicherheitsabschätzung in Iteration N
U_Z	Zielmessunsicherheit
u_μ	Standardunsicherheit des Mittelwerts
u_K	Standardunsicherheit der Kalibrierung des Werkstücks bzw. Normals (DIN ISO/TS 15530-3)
u_M	Standardunsicherheit aus Wiederholmessungen

$u_{R,MCM}$	Standardunsicherheit des SPKO
u_W	zufällige Abweichungen durch Werkstoff- und Prozessstreuung (DIN ISO/TS 15530-3)
v	Anzahl der in die Messung einbezogenen Koordinatenachsen
w	Anzahl der Versuche bei der Monte Carlo Methode
X	Messtyp
x_K	Kalibrierwert
x_E	Erwartungswert
x_m	gemessener Wert
Y	Messgröße
y	bester Schätzwert/Erwartungswert der Messgröße Y
$y_{\text{oben},P}$	obere Grenze des Unsicherheitsintervalls bei gegebener Überdeckungswahrscheinlichkeit P
$y_{\text{unten},P}$	untere Grenze des Unsicherheitsintervalls bei gegebener Überdeckungswahrscheinlichkeit P
y_w	Wert der Messgröße Y
z	Zeilenanzahl der Bildpunktmatrix
AOI	Messfeld (engl. A rea O f I nterest)
BK	B ildkenngröße
BP	B ildpunkt
CCD	ladungsgekoppeltes Bauteil (engl. C harge C oupled D evice)
CDF	kumulative Verteilungsfunktion (engl. C umulative D istribution F unction)
FA	F ormabweichung
GUM	Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen (engl. G uide to the E xpression of U ncertainty in M easurement)
GW(BP)	Grauwert des Bildpunkts
IR	I nferenzrelation
KMG	K oordinaten m essgerät
KMT	K oordinaten m esstechnik
KOK	K anten o r k riterium
KP	K oordinaten p unkt
LTCC	L ow T emperature C ofired C eramics
MCM	M onte C arlo M ethode
MST	M ikrosystem t echnik
PDF	Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion (engl. P robability D ensity F unction)
PUMA	P rozedur für das U nsicherheits- M anagement
PZZ	P seudozufallszahlen
QID	Q uick I mage D evelopment, Softwarebibliothek
RV	R ichtungsvektor einer Geraden
SP	S tart p unktvektor bzw. Schwerpunkt einer Geraden
SPC	statistische Prozesslenkung, (engl. S tatistical P rocess C ontrol)
SPKO	S ubpixel- K anten o r t
W	vorhandenes Wissen
W_S	neues geschlussfolgertes Wissen

Abbildungsverzeichnis

2.1	Blockschema eines Messsystems [Adu00]	4
2.2	Ishikawa-Diagramm der Einflüsse auf den Wert der Messgröße am Beispiel der Koordinatenmesstechnik mit elektronischen Bildsensoren	7
2.3	Standard GUM-Verfahren [SS04c]	14
2.4	Typische Messwertverteilungen mit zugehörigem Erwartungswert und Standardunsicherheit [SS04c], [Adu00]	15
2.5	Normalverteilung mit Standardabweichung s und erweiterter Messunsicherheit U für den 95 % Zufallsstreubereich	16
2.6	Gegenüberstellung Typ A und Typ B nach GUM [SS04c], [SS04b]	18
2.7	Visualisierung von erweiterter Messunsicherheit U , bestem Schätzwert y und Vertrauensbereich I_y für eine normalverteilte Messgröße	20
2.8	Zusammenhang erweiterte Messunsicherheit und bester Schätzwert der Messgröße [Adu00]	23
2.9	Struktur des Modellassistenten-Demonstrators, BMBF-Verbundprojekt <i>MST-UNCERT</i> [WKHO07]	32
3.1	Bildbeispiele	37
3.2	Ziel und Vorgehensweise in dieser Arbeit	38
4.1	Dekomposition des Messsystems zur 2D-Koordinatenmessung mit Bildsensoren	40
4.2	Einteilung optischer Sensoren für KMGs [VDI05b], [VDI05c]	41
4.3	Prinzipieller Aufbau eines Bildverarbeitungssensors mit Auf- und Durchlichtbeleuchtung [CN03]	42
4.4	Handlungsabfolge einer Längenmessung mit Bildverarbeitungssensor am Beispiel eines MST-Bauteils aus Silizium und Chrom (1-facher Abbildungsmaßstab, Auflichtmessung)	43
5.1	Schematischer Aufbau eines wissensbasierten Systems nach [BKI08], angepasst für die Schätzung der Messunsicherheit in der KMT mit Bildsensoren	46
5.2	Vorgehensweise zur Bestimmung des Grauwertgesamtrauschens als Eingangsgröße für die Fortpflanzung innerhalb des KOKs	51
5.3	Vorgehensweise zur Ermittlung der Standardunsicherheit von 2D-Koordinatenpunkten	52
5.4	Datenbankstruktur und Abfrageformular zur Schätzung der Standardunsicherheit	53
5.5	Darstellungen der Häufigkeitsverteilung eines 1000-fach wiederholt angetasteten 2D-Koordinatenpunkts	55

5.6	Beispiel für Längenmessabweichungen E eines KMGs mit Grenzwert $MPE_E = (5 + L/100) \mu\text{m}$ [Her07]	57
5.7	Beispiel für die temperaturbedingte Restmessunsicherheit der Längenmessabweichungen	59
5.8	Simulink-Modell der Messabweichungen für Koordinatenpunkte mit beispielhaften Histogrammen der Messabweichungen für x - und y -Koordinatenwerte	60
6.1	Fortpflanzung der Standardunsicherheiten von 2D-Koordinatenmesspunkten zu Parametern von Geometrieelementen	62
6.2	Form- und Standardabweichung einer Geraden	64
6.3	Einfluss der Standardunsicherheit der Koordinatenpunkte u_{KP} auf Form- und Standardabweichung	64
6.4	Relative Bedeutung der Messunsicherheit von Standard- und Formabweichung	64
6.5	Histogrammdarstellungen der x - und y -Komponenten des Startpunkt- und Richtungsvektors sowie der Standard- und Formabweichung einer Geraden und des Abstands zwischen Gerade und Startpunkt der gegenüberliegenden Geraden	66
6.6	Histogrammdarstellungen der x - und y -Komponenten des Mittelpunkts und des Radius sowie der Standard- und Formabweichung eines Kreises	67
7.1	Bereiche der Messunsicherheit, Übereinstimmung und Nichtübereinstimmung eines gemessenen Merkmals [ISO99]	68
7.2	Faltungsgebiete zweier unabhängiger normalverteilter Zufallsgrößen (Herstellungsprozess und Messprozess) mit der Kennzeichnung der Risikobereiche [Zin05]	71
7.3	Iteratives Verfahren zur Ermittlung der Messunsicherheit - Prozedur für das Messunsicherheitsmanagement [ISO00]	72
7.4	Erweiterung der PUMA-Methode um einen iterativen Algorithmus zur Berechnung der Zielmessunsicherheit aus einem Zielwert für das Abnehmerrisiko	73
8.1	Programmablaufplan zur Messunsicherheitsermittlung in der Präzisionskoordinatenmesstechnik mit Bildsensoren	74
9.1	Versuchsanordnung für Voruntersuchungen	76
10.1	Vergleich zwischen der geschätzten Messunsicherheit	83
10.2	Optimierung des Ausleseumfangs n für die Bestimmung des Grauwertgesamttauschens	84
10.3	Verifizierung des wissensbasierten Messunsicherheitsschätzverfahrens	86
10.4	Test des wissensbasierten Messunsicherheitsschätzverfahrens an einem von der Voruntersuchung abweichenden Messtyp	87

10.5	Streuung der Messunsicherheitsschätzung für den Radius an einer Chrom-Glas-Kreisschablone im Livebild (online) und an einem gespeicherten Bild der Messszene (offline)	87
11.1	Struktureller Aufbau einer Applikation mit QID [Ste10]	88
11.2	Softwarestruktur der Testapplikation zur automatisierten, wissensbasierten Messunsicherheitsschätzung	89
11.3	Visualisierungen von je 10000 Pseudozufallszahlen	90
11.4	Messaufgabe: Abstand Gerade-Punkt	92
11.5	Darstellung der Stabilität der MCM am Beispiel der Messaufgabe Abstand Gerade-Punkt	92
11.6	Abstraktion der Programmabläufe bei der softwarebasierten Ermittlung der Messunsicherheit des detektierten Kantenorts	93
12.1	Vergleich von Standardunsicherheiten u_A angetasteter 2D-Koordinatenpunkte entlang eines Kreises	95
12.2	Vergleich der erweiterten Messunsicherheit U des Radius an einem LTCC-Elektronikbauteil resultierend aus der wissensbasierten Schätzung und der experimentellen Ermittlung	96
12.3	Radiusmessung an einem LTCC-Elektronikbauteil	97
12.4	Vergleich der erweiterten Messunsicherheit U des Radius einer Chrom-Glas-Kreisschablone resultierend aus der wissensbasierten Schätzung und experimentellen Ermittlung	99
12.5	Radiusmessung eines Kreises auf einer Chrom-Glas-Kalibrierschablone	100
12.6	Messung der Breite einer Elektronikkomponente auf einer Leiterplatte durch Ermittlung der beiden Geraden entlang der Außenkanten und anschließender Abstandsberechnung	101
12.7	Vergleich der erweiterten Messunsicherheit U der Breite einer Elektronikkomponente auf einer Leiterplatte resultierend aus der wissensbasierten Schätzung und experimentellen Ermittlung	101
12.8	Abstandsmessung eines Bauelements auf einer Leiterplatte	102
12.9	Vergleich der erweiterten Messunsicherheit U des Radius am Siliziumwafer resultierend aus der wissensbasierten Schätzung und experimentellen Ermittlung	103
12.10	Radiusmessung an einem Siliziumwafer	104
12.11	Vergleich der erweiterten Messunsicherheit U des Radius an einem Kunststoffwafer resultierend aus der wissensbasierten Schätzung und experimentellen Ermittlung	105
12.12	Detektion des subpixelgenauen Kantenorts	105
12.13	Radiusmessung an einer kreisrunden Aussparung auf einem transparenten Kunststoffwafer	106
12.14	Vergleich von wissensbasiert geschätzter und durch Wiederholungsmessung empirisch bestimmter erweiterter Messunsicherheit für Prüfmerkmale an fünf verschiedenen Messobjekten	107
A1.1	Kantenortkriterium Dynamischer Schwellwert	125
A1.2	Visualisierung der Berechnung des 2D-Koordinatenpunkts $P(x,y)$	127

Tabellenverzeichnis

2.1	Quantile der t-Verteilung für das Vertrauensniveau $P = 95\%$ und verschiedene Freiheitsgrade f	21
2.2	Erweiterungsfaktor k in Abhängigkeit vom Grad des Vertrauens für normalverteilte Messgrößen	21
3.1	Zusammenfassung der untersuchten Verfahren	35
5.1	Im Rahmen der Arbeit untersuchte Bildkenngrößen (BK)	47
5.2	BK mit signifikanter Korrelation zu experimentell erzielten Standardabweichungen aus Wiederholmessungen von Messpunkten	50
6.1	Typische Prüfmerkmale mit zugeordneten Geometrieelementen	62
7.1	Anforderungen an das Messunsicherheits-Toleranz-Verhältnis U/T	69
9.1	Im Rahmen der Voruntersuchung verwendete Messobjekte	78
10.1	Im Rahmen der Voruntersuchungen analysierte Kantenübergänge und Grauwert-Signalverläufe	79
10.2	Koeffizienten der Multiplen Regressionsanalyse	83
10.3	Regressions-Statistik	85
12.1	Wiederholmessungen des Kreisradius an einem LTCC-Elektronikbauteil	96
A2.1	x- und y-Koordinatenwerte experimentell angetasteter Messpunkte mit zugehöriger Standardunsicherheit	128
A3.2	Voruntersuchungen	129

1. Einleitung

Deutlich hat sich in der aktuellen Wirtschaftskrise gezeigt, dass knapper werdende Ressourcen und globaler Wettbewerb die Produktionstechnik aller Branchen zu kontinuierlicher Veränderung zwingen. Der Trend in der Fertigung geht hin zu immer kleineren Toleranzen [IS09]. In diesem Zusammenhang steigen die Anforderungen an Messgeräte hinsichtlich realisierbarer Messunsicherheit, Messgeschwindigkeit, Zuverlässigkeit, Störimpfindlichkeit, Ausrüstung mit digitalen Schnittstellen und Netzwerkfähigkeit.

Eine weitere Entwicklungstendenz ist in der Integration der Messtechnik in die Produktion zu sehen. „Je kürzer die Zeit zwischen der Herstellung und der Messung einer Objektgeometrie, desto schneller kann die Produktionssteuerung reagieren [SJNI09].“ Eine schnelle transparente Produktionssteuerung beeinflusst wesentlich die Robustheit und Variantenvielfalt in der Produktion und stellt einen beachtlichen Wettbewerbsvorteil dar. Besonders durch den zunehmenden Einsatz der Messtechnik in der Produktion wirken vermehrt störende Einflüsse aus der Umgebung, wodurch die Messunsicherheit steigt. Im Zusammenhang damit nimmt der Aufwand zur Ermittlung der Messunsicherheit, die als das bedeutendste Qualitätsmerkmal einer Messung gilt, zu.

Im üblichen Sprachgebrauch vermittelt das Wort *Unsicherheit* nicht eben das Gefühl von Vertrauen. Nahezu jede menschliche Entscheidung muss unter Unsicherheit oder Risiko getroffen werden, und das hat zum Teil erhebliche Konsequenzen für das individuelle Handeln, aber auch für die Wirtschafts-, Arbeitsmarkt- und Sozialpolitik. Im technischen oder technisch-wissenschaftlichen Bereich bezeichnet *Unsicherheit* einen Kennwert, der dem Ergebnis einer Messung, bei einer Prüfung oder Kalibrierung, beigeordnet wird. Die nach einem einheitlichen Verfahren berechnete und in einer bestimmten Weise mitgeteilte Messunsicherheit drückt so die Stärke des Vertrauens aus, mit der angenommen werden darf, dass der Wert der gemessenen Größe unter den Bedingungen der Messung innerhalb eines bestimmten Wertebereichs liegt [Kes98]. Bei der Prüfmittelauswahl, bei der Festlegung geometrischer Produktspezifikationen, bei der Prozesslenkung sowie bei der Wareneingangs- und -ausgangsprüfung hat die Messunsicherheit eine besondere Bedeutung [WS02]. In internationalen Standards zum Qualitätsmanagement [DIN08] wird daher eine Angabe zur Messunsicherheit gefordert.

Die Messunsicherheit ermöglicht dem Anwender, die Verlässlichkeit des Messergebnisses einzuschätzen, um die Ergebnisse verschiedener Messungen der gleichen Messgröße miteinander oder mit Referenzwerten zu vergleichen. Das Vertrauen in die Vergleichbarkeit von Messergebnissen ist wichtig im nationalen Handel und internationalen Warenaustausch und unterstützt den Abbau von Handels- und Wirtschaftsbarrieren. Der Vergleich von Messergebnissen ist nur dann sinnvoll, wenn auch die Messunsicherheit verglichen wird, und diese nach einem einheitlichen Verfahren ermittelt worden ist [Sch99].

Entwicklung, Konstruktion und Fertigung schaffen Voraussetzungen für qualitativ hochwertige Produkte [Hod61]. Bei der messtechnischen Prüfung werden Fertigungsabweichungen durch Messabweichungen überlagert, was unproblematisch ist, wenn die Messabweichungen im Verhältnis zur Merkmalstoleranz gering sind [Hof88]. Häufig soll ein Messwert mit Grenzwerten verglichen werden, die in einer Spezifikation oder normativen Vorschrift festgelegt sind. In diesem Falle ist anhand der Messunsicherheit zu erkennen, ob das Messergebnis deutlich innerhalb der vorgegebenen Grenzen liegt oder ob die Forderungen nur knapp erfüllt werden. Liegt der gemessene Wert sehr nahe bei einem Grenzwert, so besteht ein großes Risiko, dass die Messgröße doch nicht die gestellten Forderungen einhält. Die beigeordnete Messunsicherheit ist in diesem Fall eine wichtige Hilfe, dieses Risiko realistisch einzuschätzen [Kes98]. Die wirtschaftliche Bedeutung der Messunsicherheitsbetrachtung steigt, wenn das Messunsicherheits-Toleranz-Verhältnis entgegen der *Goldenen Regel der Messtechnik* [BK54] den Wert 0,1 überschreitet, wie es in vielen Bereichen der Mikrosystemtechnik nicht zu vermeiden ist.

Geometrische Messungen stellen einen Schwerpunkt der Fertigungsmesstechnik dar. Die große Anzahl der Prüfmerkmale je Bauteil verlangt eine hohe, für die fertigungstechnische Anwendung geeignete Messgeschwindigkeit und Robustheit. Daher ist der Einsatz optischer Messverfahren in Verbindung mit Bildverarbeitung weit verbreitet. Diese Messsysteme realisieren die Erfassung kleinster geometrischer Qualitätsmerkmale bei berührungsloser Arbeitsweise, einem großen Arbeitsabstand bei gleichzeitig großem Messbereich und hoher Messgeschwindigkeit weitgehend automatisiert.

Die Verringerung der Toleranzen und die Integration der Messtechnik in die Produktion führen zur Erhöhung des Stellenwerts optischer Technologien in der Messtechnik und zur zunehmenden Bedeutung der Messunsicherheit in Verbindung mit der Vergrößerung von Umgebungseinflüssen. Der Aufwand für die Ermittlung der Messunsicherheit kann insbesondere von kleinen und mittleren Unternehmen mit geringen Stückzahlen und einer hohen Variantenvielfalt kaum bewältigt werden. Um die Weiterentwicklung der Produktionstechnik zu forcieren sind Lösungen zur Automatisierung der Messunsicherheitsbestimmung und deren Integration in die Messgeräte gefragt.

Diese Arbeit soll einen Beitrag zur automatisierbaren und damit reproduzierbaren und vergleichbaren Messunsicherheitsermittlung in der Präzisionskoordinatenmesstechnik mit Bildsensoren liefern. Durch das dieser Arbeit zu Grunde liegende neuartige Verfahren werden die Voraussetzungen für die Angabe eines vollständigen Messergebnisses, bestehend aus bestem Schätzwert und erweiterter Messunsicherheit, wie in [DIN99b] gefordert, für praxisrelevante Messungen an realen Messobjekten geschaffen. Dabei erfolgt die zweckmäßige Berücksichtigung der individuellen Messobjekteigenschaften, da hauptsächlich Bildinformationen zur Bewertung der Messunsicherheit herangezogen werden.

Teil I.

UNTERSUCHUNGEN ZUM AKTUELLEN ENTWICKLUNGSSTAND DER PRÜFMERKMALBEZOGENEN MESSUNSICHERHEITSERMITTLUNG IN DER PRÄZISIONSKOORDINATENMESSTECHNIK MIT BILDSENSOREN

2. Methoden zur Ermittlung der Messunsicherheit

Zur Durchführung einer Messung ist ein physikalisch existentes Messobjekt und eine Maßverkörperung erforderlich. Ein Messsystem setzt sich aus Messobjekt und Messeinrichtung zusammen und steht mit der Umgebung in Wechselwirkung (Bild 2.1). Das Messobjekt sendet die Messgröße an die Messeinrichtung, die alle technischen Hilfsmittel zur Durchführung der Messung enthält, und auf das Messobjekt rückwirken kann. Außerdem wirkt die Umgebung sowohl auf das Messobjekt als auch auf die Messeinrichtung ein und kann dadurch die Messgröße beeinflussen [Adu00].

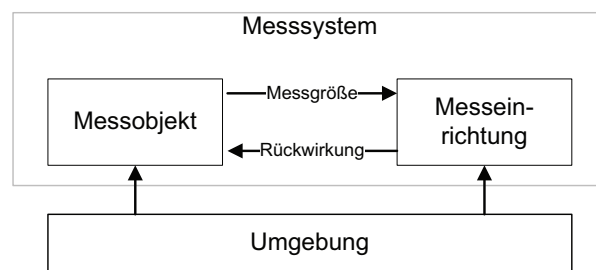


Bild 2.1.: Blockschema eines Messsystems [Adu00]

Die Ermittlung der Messunsicherheit basiert auf dem Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen [ISO95]. Dieser ist seit 1999 in deutscher Sprache in der Vornorm DIN V ENV 13005 umgesetzt [DIN99b]. Zusätzlich existieren verschiedene Normen und Richtlinien, die jedoch alle auf dem GUM basieren [DIN99a], [Bos03], [VDA10], [MSA02].

Die Messunsicherheitsbewertung in der Koordinatenmesstechnik kann nur prüfmerkmalbezogen realisiert werden. Hierfür sind spezielle Vorgehensweisen in unterschiedlichen Richtlinien und Normen beschrieben [DIN06], [DIN09b], [DIN09c], [VDI05a], [VDI89], [VDI01], [VDI97], [VDI05b], [VDI06a], [VDI06b].

Im Folgenden werden die verschiedenen bekannten Methoden zur Ermittlung der Messunsicherheit im Hinblick auf die Anwendung in der Koordinatenmesstechnik mit elektronischen Bildsensoren beschrieben und bewertet.

2.1. Klassische Bewertung der Messunsicherheit

Messunsicherheit ist definiert als *dem Messergebnis zugeordneter Parameter, der die Streuung der Werte angibt, die der Messgröße (aufgrund der vorhandenen Kenntnisse) vernünftigerweise zugeordnet werden können* [ISO08] bzw. als *Kennwert, der aus Messungen gewonnen wird und zusammen mit dem Messergebnis zur Kennzeichnung eines Wertebereichs für den wahren Wert der Messgröße dient* [DIN95].

Der Begriff Messunsicherheit im heutigen Sinne existiert seit Ende der 1960er Jahre. Bis dahin wurden Messunsicherheitsangaben bei Wiederholmessungen durch die

empirische Standardabweichung s (2.1), als Maß für die mittlere zu erwartende Abweichung der Messwerte, ausgedrückt [HB04].

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (x_{mj} - \bar{x}_m)^2} \quad (2.1)$$

$$\bar{x}_m = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_{mj} \quad (2.2)$$

2.1.1. Zufällige, systematische und grobe Messabweichungen

Obwohl alle Einflüsse auf den Messprozess in der Praxis grundsätzlich zusammen in Erscheinung treten, hat es sich bewährt, eine Unterteilung nach den Ursachen in *systematische*, *zufällige* und *grobe* Messabweichungen vorzunehmen [Hof79].

Viele in der Natur auftretende Prozesse werden durch zufällige Faktoren beeinflusst, die voneinander unabhängig sind und von denen jeder den Ablauf des Prozesses nur wenig ändert. Im Allgemeinen wird nur die Summe ihrer Wirkungen beobachtet. Genauso verhält es sich bei Messprozessen, wobei das Ziel darin besteht, den Wert der Messgröße und die zugehörige Messunsicherheit zu ermitteln [Adu00].

Zufällige Messabweichungen sind definiert als *Komponenten der Messabweichungen, welche sich bei Wiederholmessungen unvorhersehbar verhalten* [ISO08]. Wiederholbedingungen liegen vor, wenn dieselbe Messperson am selben Messobjekt dieselbe Messgröße mit demselben Messgerät und demselben Messverfahren wiederholt misst. Die unter diesen Voraussetzungen zu ermittelnde Standardabweichung der Messwerte beruht auf zeitlich und örtlich nicht konstanten Messunsicherheitsquellen. Zufällige Messabweichungen können deshalb nicht durch Korrekturen eliminiert werden [Hof79]. Standardabweichungen aus Wiederholmessungen schließen alle Randbedingungen ein, unter denen die Messungen durchgeführt wurden, und sind somit nicht zu verallgemeinern [HLW97].

Aus Erfahrung lassen sich folgende Eigenschaften *zufälliger* Messabweichungen ableiten [Hul71], [HLW97], [Adu00], [DIN03a]:

- Positive und negative Abweichungen gleichen Betrags sind gleich häufig.
- Mit dem Betrag der Abweichung nimmt die Häufigkeit ihres Auftretens monoton ab.
- Die Häufigkeitsverteilung hat bei Abweichung Null ihr Maximum.

Unter der Voraussetzung, dass die Messwerte x_{mj} statistisch unabhängig voneinander sind, führen diese Eigenschaften zu symmetrischen, eingipfligen Verteilungen. Typisch für zufällige Messabweichungen ist die Normalverteilung (2.3), weshalb ihre Dichtefunktion (*Glockenkurve*) von Gauß als *Fehlerkurve* bezeichnet wurde [HLW97].

$$\varphi(x; \mu, \sigma^2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \cdot e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (2.3)$$

Zudem folgt aus dem *Zentralen Grenzwertsatz*, dass die Summe beliebig verteilter unabhängiger Zufallsgrößen näherungsweise normalverteilt ist [Bar98].

Durch $(n - 1)$ -fache unabhängige Wiederholmessungen können zufällige Messabweichungen durch Mittelwertbildung um den Faktor $1/\sqrt{n}$ verringert werden.

Systematische Messabweichungen werden durch die Unvollkommenheit der Messgeräte, Messverfahren, Maßverkörperungen und durch messtechnisch erfasste oder berechnete determinierte Einflüsse der Umwelt sowie den persönlichen Einfluss der Messperson hervorgerufen. *Systematische* Messabweichungen sind durch eine reproduzierbare Differenz gekennzeichnet und deshalb grundsätzlich beherrschbar, bestimmbar und eliminierbar [HB04]. Nicht exakt erfassbare und bestimmbare *systematische* Messabweichungen können in einigen Fällen abgeschätzt werden. Die Abschätzung verlangt sehr hohe Sachkenntnis und ist daher umstritten [Hof79]. Für den Umgang mit *systematischen* Messabweichungen, deren Ursachen erkennbar und deren Werte bestimmbar sind, gibt es drei Möglichkeiten [HLW97]:

- Vermeidung bei der Messung aufgrund bekannter Ursachen,
- Bestimmung nach Betrag und Vorzeichen und Berücksichtigung durch entsprechende Korrekturmaßnahmen,
- Vernachlässigung und Einbeziehung in die Messunsicherheit.

Es hängt vom Stand der Messtechnik ab, ob *systematische* Messabweichungen identifiziert werden oder im *Rauschen* der *zufälligen* Messabweichungen untergehen [Adu04].

Grobe Messabweichungen beruhen auf Irrtümern, falschem oder nachlässigem Ablesen, einem zeitweilig defekten Messgerät oder starken äußeren Einflüssen. Abweichungen, die deutlich größer sind, als es unter den gegebenen Umständen zu erwarten wäre, werden als *grob* bezeichnet [HLW97]. Bei Einzelmessungen gibt es keine Möglichkeit *grobe* Abweichungen zu erkennen, da der Wert der Messgröße unbekannt ist. Bei Wiederholmessungen können Ausreißer basierend auf statistischen Verfahren erkannt werden. Zuverlässige Ergebnisse werden jedoch nur erzielt, wenn Kenntnisse zur Messwertverteilung vorliegen und geeignete Ausreißerkriterien gewählt werden [HLW97], [Hof79], [Hul71].

Durch die besondere Betonung der statistischen Fehlerrechnung wurde verbreitet der Eindruck erweckt, dass *zufällige* Messabweichungen den Hauptanteil bei der Analyse von Messabweichungen darstellen. Die Wirkung *systematischer* Messabweichungen, welche das Messergebnis *verfälschen*, ist jedoch meist schwerwiegender als die Wirkung *zufälliger* Messabweichungen, welche das Messergebnis *unsicher* machen.

Es fällt auf, dass einige Autoren als Ursache von Messabweichungen Veränderungen des Messobjekts angeben. Da bei einer Messung die Eigenschaften eines Messobjekts quantitativ bestimmt werden sollen, sind diese vom Messobjekt ausgehenden Schwankungen nicht als Fehlerursache des Messvorgangs anzusehen, sondern eine typische Eigenschaft des Messobjekts, die erkannt und berücksichtigt werden muss.

2.1.2. Messfehler versus Messabweichung

Traditionell wurde die Bezeichnung *Fehler* bzw. *Messfehler* für die Differenz von gemessenem Wert x_m und dem Wert y der Messgröße Y verwendet. Bei einem idea-

len Messsystem liegt die Messgröße Y am Eingang an und wird *unverfälscht* am Ausgang als Messwert $x_m = y$ ausgegeben [HB04].

Allgemein wird von *Fehlern* gesprochen, wenn etwas *falsch* gemacht wurde. Im Qualitätsmanagement dient das Wort *Fehler* als Synonym für Nichtkonformität und bedeutet die Abweichung des Prüflings von vorgegebenen Spezifikationen [HLW97]. Die Bezeichnung *Fehler* ist somit nur für *grobe* Messabweichungen gerechtfertigt. In der Messtechnik wird daher seit einigen Jahren der Begriff *Messabweichung* anstelle von *Fehler* verwendet. Die Unterscheidung zwischen systematischen und zufälligen Messabweichungen ist vom Stand der Messtechnik abhängig [Adu00]. Messabweichungen, die zu einem bestimmten Zeitpunkt als zufällig betrachtet werden, könnten zu einem späteren Zeitpunkt als Messabweichungen systematischen Ursprungs erkannt werden. Bekannt war schon immer, dass bei einem Messprozess *Abweichungen* auftreten, die unterschiedliche Ursachen haben. Das Messergebnis wird durch die Eigenschaften des verwendeten Messverfahrens, des Messsystems, der Umgebung und der Messperson bestimmt [DIN99b], [ISO08], [DIN03a]. Diese Einflussgrößen können Ursachen für Messabweichungen sein. Zu ihrer strukturierten Darstellung in Ursache-Wirkung-Richtung eignet sich das Ishikawa-Diagramm (Bild 2.2).

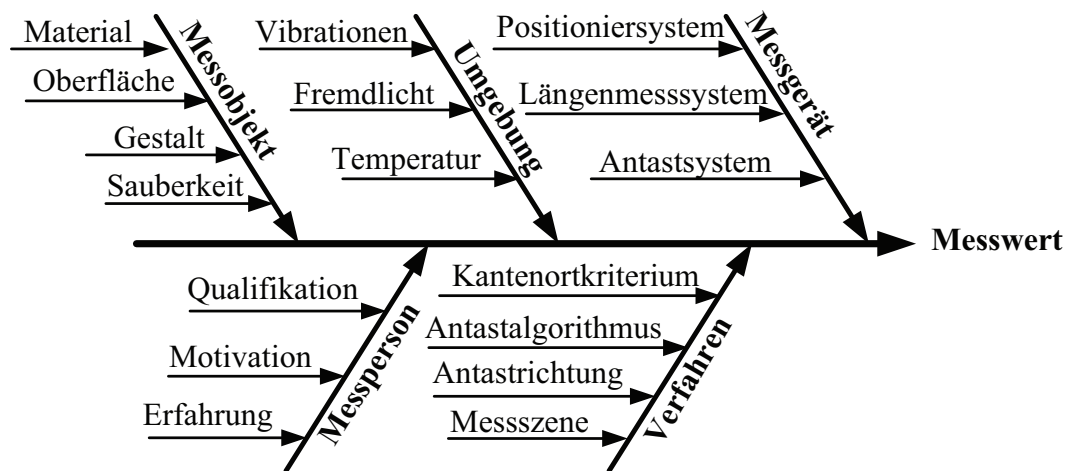


Bild 2.2.: Ishikawa-Diagramm der Einflüsse auf den Wert der Messgröße am Beispiel der Koordinatenmesstechnik mit elektronischen Bildsensoren

Eine Einflussgröße ist selbst nicht Gegenstand der Messung, beeinflusst jedoch den Wert der Messgröße. Es wird zwischen irreversiblen und reversiblen Einflussgrößen unterschieden, je nachdem, ob bei Wegfall der Einflussgröße eine bleibende Veränderung des Messsystems auftritt oder nicht [Adu00]. Reversible Einflussgrößen sind beispielsweise die Umgebungstemperatur, die Betriebsspannung sowie äußere elektrische oder magnetische Felder. Zu den irreversiblen Einflussgrößen zählen z. B. Zeit (Alterung), elektrische Überlastung oder Überhitzung.

2.1.3. Lineares und quadratisches Fehlerfortpflanzungsgesetz

Wird ein Messergebnis aus mehreren mit Unsicherheit behafteten Messwerten berechnet, so ist auch das Messergebnis unsicher [HB04]. Bis zum Erscheinen des Leitfadens zur Angabe der Messunsicherheit [ISO95] wurden Fortpflanzungsgesetze für systematische und zufällige Messabweichungen unterschieden. Für bekannte systematische Messabweichungen galt das lineare *Fehlerfortpflanzungsgesetz*:

Ist die gesuchte Größe Y eine Funktion nur einer einzigen Eingangsgröße $Y = f(Q_1)$, so ändert sich der Wert der Messgröße y um Δy , wenn sich der Wert der Eingangsgröße q_1 um Δq_1 ändert [Hul71]:

$$y + \Delta y = f(q_1 + \Delta q_1). \quad (2.4)$$

Diese Funktion lässt sich nach dem Satz von *Taylor* in Reihe entwickeln [Hul71]:

$$y + \Delta y = f(q_1) + \frac{\Delta q_1}{1!} f'(q_1) + \frac{(\Delta q_1)^2}{2!} f''(q_1) + \frac{(\Delta q_1)^3}{3!} f'''(q_1) + \dots \quad (2.5)$$

Die Abweichung Δq_1 der systematischen Einzelmessabweichung q_1 ist ein im Vergleich zu q_1 kleiner Wert. Die zweiten und höheren Potenzen von Δq_1 können daher vernachlässigt werden. Ist die Messgröße Y eine Funktion mehrerer voneinander unabhängiger Eingangsgrößen $Y = f(Q_1, Q_2, \dots, Q_i)$ so ergibt sich nach dem *Taylor'schen Satz* für Funktionen von mehreren Veränderlichen bei Vernachlässigen der höheren Ableitungen [Hul71]:

$$\Delta y = \frac{\partial f}{\partial q_1} \Delta q_1 + \frac{\partial f}{\partial q_2} \Delta q_2 + \dots + \frac{\partial f}{\partial q_i} \Delta q_i = \sum_{j=1}^i \frac{\partial f}{\partial q_j} \Delta q_j. \quad (2.6)$$

Diese Gleichung ist das *lineare Fehlerfortpflanzungsgesetz* für bekannte systematische Einzelmessabweichungen Δq , von denen jede ein bestimmtes Vorzeichen hat [Hul71].

Für zufällige Messabweichungen gilt das *quadratische Fehlerfortpflanzungsgesetz* [Hul71]:

$$\delta y = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial q_i} \delta q_i \right)^2 + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \frac{\partial f}{\partial q_i} \cdot \frac{\partial f}{\partial q_j} \delta q_i \delta q_j \cdot r}. \quad (2.7)$$

Diese Gleichung gilt nur für voneinander unabhängige und einzeln messbare Eingangsgrößen (Q_1, Q_2, \dots, Q_i). Prinzipiell handelt es sich dabei um ein Verfahren zur Zusammenfassung mehrerer Streuungsmaße zu einem Gesamtstreuungsmaß. Unter folgenden Umständen ist die Gültigkeit von 2.7 ganz oder teilweise nicht mehr erfüllt:

- die Unsicherheiten der Eingangsgrößen Q_j weichen stark voneinander ab,
- eine oder mehrere Eingangsgrößen Q_j werden durch eine nicht symmetrische Verteilung charakterisiert.

Ist die gesuchte Größe Y von nur zwei Eingangsgrößen Q_1 und Q_2 abhängig, wird empfohlen generell das *lineare Fehlerfortpflanzungsgesetz* (2.6) anzuwenden [Hul71], [Hof79].

2.1.4. Angabe des vollständigen Messergebnisses

Das Endergebnis einer Einzelmessung wurde vor Einführung des GUM [ISO95] wie folgt angegeben [Hul71]:

$$E_E = x_m - F \pm [ak_1 |s| + f_f + f_F]. \quad (2.8)$$

Vom Messwert x_m wurde die algebraische Summe der erfassten systematischen Messabweichungen F subtrahiert. Der Term nach dem Doppelvorzeichen \pm stellt die Messunsicherheit dar, die sich aus *zufälligen* Messabweichungen, der algebraischen Summe der geschätzten *unbekannten systematischen* Messabweichungen f_f und der resultierenden Unsicherheit der *erfassten systematischen* Messabweichungen zusammensetzt. Die *zufälligen* Messabweichungen werden repräsentiert durch die empirische Standardabweichung s multipliziert mit den Erweiterungsfaktoren a , gemäß der statistischen Sicherheit P , und k_1 für die Vertrauensgrenzen der Standardabweichung in Abhängigkeit von P und n .

Bei einer Messreihe wurde für das Endergebnis

$$E_M = \bar{x} - F \pm \left[t \left| \frac{s}{\sqrt{n}} \right| + f_f + f_F \right] \quad (2.9)$$

angegeben [Hul71]. Anstelle des Messwerts x_m wurde der arithmetische Mittelwert \bar{x} der Einzelmesswerte eingesetzt. Die zufälligen Messabweichungen reduzieren sich um den Faktor \sqrt{n} , wobei n die Anzahl der Einzelmessungen der Messreihe beschreibt. Anstelle der Erweiterungsfaktoren a und k_1 wird der Faktor t für den Vertrauensbereich des Mittelwerts in Abhängigkeit von P und n verwendet (Tabelle 2.1).

2.2. Messunsicherheit gemäß GUM

2.2.1. Veranlassung und Legitimation des GUM

Um 1980 wurde beschlossen, durch ein internationales Expertengremium eine generelle Vorgehensweise zur Ermittlung der Messunsicherheit auszuarbeiten. Resultat war der 1993 erstmals publizierte Leitfaden zur Angabe der Messunsicherheit [ISO95]. Der ISO-Leitfaden *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement* (GUM) [ISO95] ist die allgemein akzeptierte Richtlinie zur Bestimmung der Messunsicherheit. Ziel des GUM ist es, Regeln für die Angabe der Messunsicherheit im Bereich der Normung, Kalibrierung, Akkreditierung von Laboratorien und metrologischen Diensten bereitzustellen und die internationale Vergleichbarkeit und Nachvollziehbarkeit von Messergebnissen zu gewährleisten.

Ausgangspunkt der normierten Vorgehensweise des GUM ist die Annahme, dass nach der Beseitigung aller als systematisch erkannten Messabweichungen keine weitere Differenzierung zwischen systematischen und zufälligen Messabweichungen erfolgt. Im Gegensatz zum traditionellen Konzept wird sich bei den Überlegungen im GUM nicht mehr auf den *wahren Wert einer Messgröße* bezogen, sondern auf den wahrscheinlichsten Wert der Messgröße, den so genannten besten Schätzwert [Adu04].

2.2.2. Bayestheorie als Basis des GUM

Eine bedeutende wissenschaftliche Grundlage der Messunsicherheitsermittlung nach GUM ist die Bayestheorie [Sch99], [Lee94], [Lin65]. Sie ist die Basis dafür, die Unvollständigkeit der Kenntnis über die am Messprozess beteiligten Größen durch Wahrscheinlichkeitsverteilungen zu charakterisieren. Diese Definition des Wahrscheinlichkeitsbegriffs als *Grad der Plausibilität bzw. Grad des Dafürhaltens* entspricht der klassischen Sichtweise, welche von Bernoulli und Laplace eingeführt wurde (2.10), [Lap12], [Jay83], [LW06]:

$$P(A) = \frac{\text{mögliches Eintreten des Ereignisses } A}{\text{Gesamtzahl der Ereignisse}}. \quad (2.10)$$

Das Bayes-Konzept ist in erster Linie auf den Kenntnisstand des Betrachters ausgerichtet. Zur Beschreibung des stochastischen Verhaltens einer Beobachtung wird innerhalb der Bayes-Inferenz das Grundmodell der Statistik verwendet mit einer Verteilungsannahme über die zu beobachtende Stichprobe [Jay03]. Zur Charakterisierung einer Messwertverteilung lässt sich entweder die Wahrscheinlichkeitsverteilung (CDF) (2.11), welche die Wahrscheinlichkeit $P(x)$ für das Auftreten der Werte bis x angibt [HLW97]

$$\Phi(x) := P(-\infty \leq x_m \leq x) \text{ (stetig)}, \quad (2.11)$$

$$\sum_{j=1}^n P(x_j) = 1 \text{ (diskret)} \quad (2.12)$$

oder ihre Dichtefunktion (PDF) (2.13), welche die Wahrscheinlichkeit des Auftretens eines bestimmten Werts x angibt [HLW97], [DIN82]

$$\varphi(x) := \frac{\partial \Phi(x)}{\partial x} \quad (2.13)$$

verwenden. In der messtechnischen Praxis wird meist die PDF verwendet, da sie in der diskreten Form des Histogramms als Darstellung der Wahrscheinlichkeit für das Auftreten der jeweiligen Messwerte interpretiert werden kann. Die für die CDF vorausgesetzte Stetigkeit ist bei Messreihen nicht gegeben, da der Stichprobenumfang n eine endliche Zahl ist. Für die mathematische Beschreibung diskreter Verteilungsfunktionen werden anstelle des Integrals Summen verwendet. Bei der Überlagerung einzelner Messunsicherheitsbeiträge entstehen neue Verteilungsformen. Diese entsprechen mathematisch der Faltung der Einzelverteilungen, welche in der vorliegenden Arbeit numerisch bestimmt werden.

Die Bayestheorie ist flexibel und universell bei der Messdatenbewertung auch für komplexe nichtlineare Messprozessmodelle anwendbar [LW06]. Die unvollständige Kenntnis zum Wert einer physikalischen Größe wird gemäß der Bayestheorie durch eine induktive Inferenzmethode bewertet, d.h. einzelne Informationen und Beobachtungen werden zu einer allgemeinen Schlussfolgerung, einem Schätzwert mit zugehöriger Unsicherheit, zusammengefasst. Die Leistungsfähigkeit der Methode wird

durch den Vergleich der Schlussfolgerungen mit späteren Experimenten ermittelt. Die Bayes-Inferenz aktualisiert die Wahrscheinlichkeiten alternativer Hypothesen aufgrund neuer Beobachtungserkenntnisse (*A-Priori-Wissen*). Ohne A-Priori-Wissen sind alle möglichen Parameterwerte gleichwahrscheinlich [Jay03]. Analog einem wissenschaftlichen Experiment wird neue Information dazu genutzt, die A-Priori-Wahrscheinlichkeit einer Hypothese zu aktualisieren. Es können entweder empirische oder subjektive Wahrscheinlichkeiten verwendet werden [Kla08]. Die Bayesstatistik basiert auf dem Bayestheorem:

Die Wahrscheinlichkeit, dass die Ereignisse A und B wahr sind, entspricht dem Produkt aus den Wahrscheinlichkeiten, dass A wahr ist, und dass B wahr ist unter der Bedingung, A ist wahr (2.14).

Unter der Bedingung, dass die Ereignisse austauschbar sind, folgt daraus das Bayestheorem (2.15) [LW06]:

$$P(AB) = P(A) \cdot P(B|A) \quad (2.14)$$

$$P(A|B) = \frac{P(B|A) \cdot P(A)}{P(B)}. \quad (2.15)$$

Gemäß der Inferenzmethode nach Bayes wird keine Unterscheidung zwischen zufälligen und systematischen Messabweichungen vorgenommen. Diese Vereinheitlichung entspricht genau dann der messtechnischen Realität, wenn die beiden Typen der Messabweichungen nur schwer zu differenzieren sind, bzw. im Fall unbekannter systematischer Messabweichungen, wenn diese wie zufällige behandelt werden [WW92].

Die Wahl des Verteilungstyps erfolgt nach dem Prinzip der maximalen Informationsentropie. Der Ursprung dieser Idee stammt aus der Informationstheorie nach Weaver und Shannon [SW63], nach der *Information* wie folgt definiert wird:

Information ist ein Maß für die Entscheidungsfreiheit. Je größer die Entscheidungsfreiheit und damit der Informationsgehalt, umso größer ist auch die Unsicherheit der zu treffenden Entscheidung.

Nachdem Shannon die Grundlagen einer mathematischen Theorie der Nachrichtenübertragung, die Informationstheorie, geschaffen hatte, hielt sie Einzug in nahezu allen Gebieten der Wissenschaft. Folgende Grundgedanken sind Inhalt der Informationstheorie nach Shannon:

- Die Informationsgröße ist von der Ungewissheit abhängig, die vor dem Eintreffen eines Signals vorhanden war.
- Die Ungewissheit wird beim Empfang eines Signals aufgehoben.
- Die empfangene Information ist zahlenmäßig gleich der Unsicherheit, die bis zum Eintreffen der Information bestand.
- Vor dem Informationsempfang bestehen mögliche Ereignisse, die mit gewissen Wahrscheinlichkeiten eintreten können.
- Nach dem Informationsempfang ist die Unsicherheit bezüglich der möglichen Ereignisse beseitigt.

Gemäß dem letzten Grundgedanken kann die Informationsentropie, als Maß für Information, mit *beseitigter Unsicherheit* umschrieben werden [Che87], [New87]. Die Informationsentropie einer diskreten Datenreihe x_i mit der Wahrscheinlichkeit $P(x_i)$ (2.16) wird in der Einheit *bit* angegeben.

$$H_{\text{IE}}(x_{xi}) = - \sum (P(x_i) \log_2 P(x_i)) \quad (2.16)$$

Im Falle einer kontinuierlichen Verteilungsdichtefunktion wird die Informationsentropie H_{IE} nach folgender Vorschrift berechnet (2.17):

$$H_{\text{IE}}(x) = - \int_{-\infty}^{\infty} P(x) \log_2 P(x) dx. \quad (2.17)$$

Für die bestmögliche Charakterisierung einer Einflussgröße durch eine PDF ist zu ermitteln, für welche PDF die Informationsentropie maximal wird (2.18).

$$-H_{\text{IE}}(x) = - \int_{-\infty}^{+\infty} P(x) \log_2 P(x) dx \rightarrow \max; \quad \text{mit: } \int_{-\infty}^{+\infty} P(x) dx = 1 \quad (2.18)$$

Für diskrete Wahrscheinlichkeiten wird die Informationsentropie H_{IE} folgendermaßen bestimmt [SW63], [WW92], [WW99], [Jay03]:

$$H_{\text{IE}} = - [P_1 \log_2 P_1 + P_2 \log_2 P_2 + \dots + P_n \log_2 P_n] \quad (2.19)$$

$$H_{\text{IE}} = - \sum_{i=1}^n P_i \log_2 P_i. \quad (2.20)$$

Dabei sind $P_1 \dots P_n$ Wahrscheinlichkeiten für Informationen z. B. einzelne mögliche Messwerte. Die Summe aller Wahrscheinlichkeiten ist 1. Die Informationsentropie H_{IE} erreicht ihr Maximum, wenn alle möglichen Ereignisse gleich wahrscheinlich sind:

$$P_1 = P_2 = \dots = P_n. \quad (2.21)$$

Ist dagegen ein Ereignis sehr wahrscheinlich, z. B.

$$P_1 \cong 1, P_2 = P_3 = \dots = P_n \cong 0, \quad (2.22)$$

dann ist die Informationsentropie $H_{\text{IE}} \cong 0$. Es ist keine Entscheidungsunsicherheit vorhanden. Wird die Anzahl der möglichen Ereignisse n erhöht, nimmt der Informationsgehalt und auch die Ungewissheit zu, was zur Folge hat, dass die Informationsentropie H_{IE} ansteigt [SW63]. Dieser Ansatz basiert auf der Grundgleichung der Thermodynamik nach Gibbs, die besagt, dass die Entropie in einem abgeschlossenen System niemals abnehmen kann [CN96].

Eine daran angelehnte Vorgehensweise ist die Methode der *Intervallschätzung*. Diese ermöglicht eine prozentuale Angabe darüber, ob ein bestimmtes Intervall einen Messwert enthält. Erste Anwendung fanden Intervallschätzungen bei der Ermittlung der Masse des Saturn durch Laplace Ende des 18. Jahrhunderts. Intervallschätzungen finden bei der Prozedur für das Unsicherheitsmanagement nach [ISO00] Anwendung.

Das A-Priori-Wissen zu einer Messgröße beschreibt die vorhandene Information bzw. Wissen, das allein durch Nachdenken entstanden ist, bislang nicht durch Tatsachenerfahrungen gedeckt wird und als Ausgangspunkt für weitere Erkenntnisse dient, bevor Messungen durchgeführt werden. Dies können Grenzwerte für einzelne Einflussgrößen, statistische Daten, Ergebnisse aus früheren Messungen, wissenschaftliche Aussagen oder Ausdrücke mit relationalen Operatoren, Fuzzy-Relationen oder auch boolesche Ausdrücke sein. Die PDF einer Größe ist ein Ausdruck des Wissensstands über diese Größe. Dadurch wird der Grad des Vertrauens über Werte quantifiziert, die der Größe, basierend auf den vorhandenen Informationen, zugeordnet werden können. Zum Festlegen der gemeinsamen *A-Posteriori-PDF* der Messgröße, bestehend aus einem Satz von Zufallsvariablen entsprechend der involvierten Einflussgrößen, wird die Verteilung als Produkt aus dem A-Priori-Wissen $\omega(x)$ und der unbekanntenen *Likelihood* $l(x)$ dargestellt. Unter Anwendung der Methode von Lagrange (Variation der Konstanten) [CN96] und des Prinzips der maximalen Informationsentropie kann dieser Zusammenhang (2.23) ermittelt werden [Jay68], [Jay83], [Jay03].

$$H_{IE} = - \int \varphi(x) \log_2 l(x) dx \rightarrow \max \quad (2.23)$$

Die Informationsentropie H_{IE} als Maß für die Wahrscheinlichkeit einer PDF $\varphi(x)$, welche zur Charakterisierung einer Einflussgröße angenommen wird, kann durch Lösung des Maximierungsproblems bestimmt werden:

$$\varphi(x) = C \cdot \exp \left(- \sum_j \beta_j \phi_j(x) \right) \omega(x). \quad (2.24)$$

Die Informationsentropie einer Gaußverteilung mit Standardabweichung σ wird beschrieben durch $H_{IE}(x) = \log_2 \sqrt{2\pi e} \cdot \sigma$ [SW63]. Zur Wahl des Verteilungstyps werden in [DIN99b] aus diesen Theorien abgeleitete für die messtechnische Praxis relevante Empfehlungen gegeben.

2.2.3. Standard-ISO-GUM-Verfahren

In [DIN99b] wird eine Standardmethode zur Ermittlung der Messunsicherheit angegeben (Bild 2.3). Das Standard-ISO-GUM-Verfahren basiert auf dem Konzept einer Messgleichung als mathematische Repräsentation des Messprozesses. Ausgangspunkt ist eine mathematische Gleichung des Gesamtmodells $Y = f(Q_1, Q_2, \dots, Q_i)$, die den Messprozess beschreibt. Sie beinhaltet die funktionale Abhängigkeit der Messgröße Y von allen Eingangsgrößen Q_j , aus deren Unsicherheitsbeiträgen sich die Unsicherheit der Messgröße Y zusammensetzt [WS02]. Eingangsgrößen sind alle Größen, die den Messprozess beeinflussen können (Einflussgrößen).

Standardisiertes Vorgehen zur Ermittlung der Messunsicherheit gemäß GUM:

1. Definition der Messaufgabe und des Modellzwecks,
2. Modularisierung und Beschreibung der Systemkomponenten,
3. Ermittlung und Darstellung des Ursache-Wirkung-Zusammenhangs,

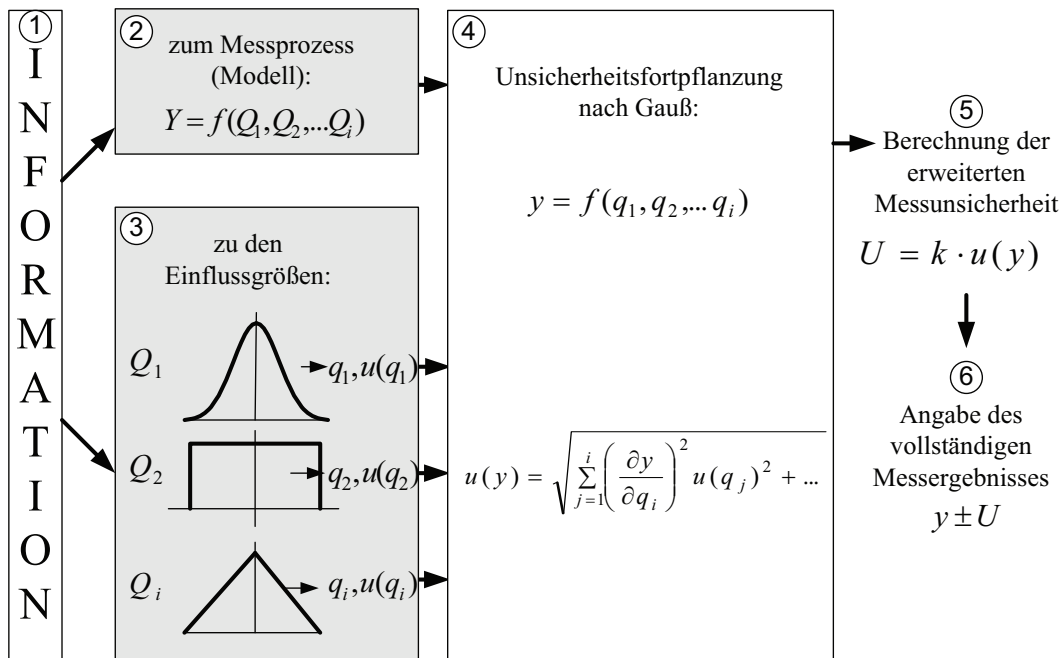


Bild 2.3.: Standard GUM-Verfahren [SS04c]

4. Ermittlung der funktionalen Beziehung der einzelnen Systemkomponenten,
5. Aufstellung der Gleichung des Gesamtmodells und Invertierung zum Modell der Auswertung,
6. Charakterisierung relevanter Eingangsgrößen durch PDFs,
7. Berechnung der kombinierten Standardunsicherheit,
8. Berechnung der erweiterten Messunsicherheit,
9. Angabe des vollständigen Messergebnisses,
10. Bewertung des Messergebnisses.

Die Messunsicherheitsfortpflanzung gemäß GUM entspricht dem quadratischen Fehlerfortpflanzungsgesetz für zufällige Messabweichungen nach Gauß. Sind die Messunsicherheiten $u(q_j)$ der Größen Q_j bekannt, dann kann die Standardunsicherheit des Schätzwerts der Messgröße als kombinierte Standardunsicherheit $u(y)$ berechnet werden (Bild 2.3). Die kombinierte Standardunsicherheit entspricht sinngemäß der Quadratwurzel aus der kombinierten Varianz:

$$u(y) = \sqrt{\sum_{j=1}^i \left(\frac{\partial y}{\partial q_j}\right)^2 u^2(q_j)}. \quad (2.25)$$

Die Empfindlichkeitskoeffizienten $\frac{\partial y}{\partial q_j}$ beschreiben die Abhängigkeit der Messgröße von den Einflussgrößen.

Weil statistische Information, ebenso wie nichtstatistische Information, durch eine PDF ausgedrückt werden kann, ist die Wahrscheinlichkeitstheorie die theoretische Basis des GUM [SS04a]. Messgröße und Eingangsgrößen werden durch PDFs

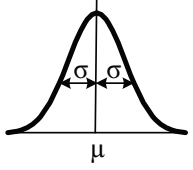
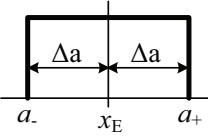
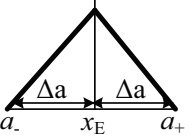
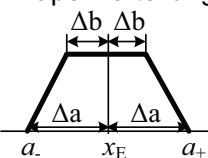
Verteilungstyp	Erwartungswert	Standardunsicherheit
Normalverteilung 	$x_E = \mu$	$u = \sigma$
Rechteckverteilung 	$x_E = \frac{a_+ + a_-}{2}$	$u = \frac{\Delta a}{\sqrt{3}}$
Dreieckverteilung 	$x_E = \frac{a_+ + a_-}{2}$	$u = \frac{\Delta a}{\sqrt{6}}$
Trapezverteilung 	$x_E = \frac{a_+ + a_-}{2}$	$u = \frac{\Delta a}{\sqrt{6}} \cdot \sqrt{1 + \frac{\Delta b}{\Delta a}}$

Bild 2.4.: Typische Messwertverteilungen mit zugehörigem Erwartungswert und Standardunsicherheit [SS04c], [Adu00]

charakterisiert. Für die messtechnische Praxis ist die Kenntnis der möglichen Verteilungsfunktionen der Messwerte wichtig (Bild 2.4). Dabei werden zwei Fälle unterschieden [Adu00]:

- Messwertverteilungen, die aus mathematischen Überlegungen folgen z. B. Normalverteilung, und
- Messwertverteilungen, die aus Grenzwertbetrachtungen folgen z. B. Rechteckverteilung, Dreieckverteilung.

Mit dem Instrumentarium der Normalverteilung (Bild 2.5) können näherungsweise Messvorgänge beschrieben werden, bei denen zufällige Messabweichungen durch Wiederholmessungen bei konstanten Bedingungen zu Grunde liegen [DIN02b]. Die Normalverteilung repräsentiert Werte von $-\infty$ bis $+\infty$, was der Realität in der Messtechnik nicht immer entspricht. Ausschließlich stochastisch wirkende Ursachen können gut durch eine Gaußsche Normalverteilung beschrieben werden [HLW97]. Bei der wissenschaftlichen Charakterisierung von Messunsicherheitsbeiträgen können *Modellverteilungen* verwendet werden, die der Realität hinreichend gut entsprechen, wie beispielsweise eine gestutzte Normalverteilung. Für die Prüfung des Verteilungstyps von Messabweichungen aus Wiederholmessungen kommen verschiedene Verfahren zum Einsatz [Lin06]. Zum einen ist die grafische Prüfung anhand der

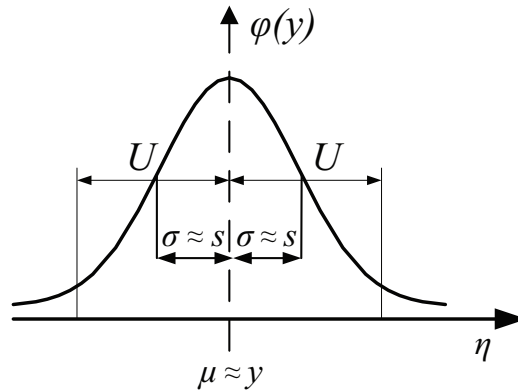


Bild 2.5.: Normalverteilung mit Standardabweichung s und erweiterter Messunsicherheit U für den 95 % Zufallsstreuungsbereich

diskreten Verteilungsdichtefunktion in Form des Histogramms ein geeigneter subjektiver Ansatz, der durch statistische Verteilungstestverfahren zu belegen ist. Die Breite der zugehörigen Wahrscheinlichkeitsverteilung, repräsentiert durch die Standardabweichung σ (2.1), ist ein Maß für die Unsicherheit. Der Erwartungswert μ (2.2) der PDF gilt als Schätzer für den Wert der Messgröße Y (Bild 2.5).

Die Standardabweichung σ kann als Intervall der x -Achse um den besten Schätzwert der Messgröße interpretiert werden, an deren Grenzen die PDF $\varphi(y)$ einen Wendepunkt hat. Die Normalverteilung bezieht sich als stetige Verteilung auf unendlich viele Messungen, also auf die Grundgesamtheit. Sie stellt somit eine Modellverteilung für Wiederholmessungen dar. Tatsächlich wird jedoch stets nur eine Stichprobe mit $n < \infty$ Werten untersucht. Vor allem bei Stichproben mit geringer Anzahl an Werten zeigen sich deutliche Abweichungen von der Normalverteilung. Somit stellen die Parameter der diskreten Normalverteilung *arithmetischer Mittelwert* \bar{x} und *empirische Varianz* s^2 nur Näherungen dar. Die Verhältnisse bei Messprozessen mit n Wiederholungen werden deshalb durch die *Student- oder t-Verteilung* beschrieben, die die Verteilung der Stichprobenwerte darstellt und für $n \rightarrow \infty$ in die Normalverteilung übergeht [Adu04]. Die Dichtefunktion ist wie folgt definiert:

$$\varphi(x, f) = \frac{1}{\sqrt{\pi f}} \frac{\Gamma\left(\frac{f+1}{2}\right)}{\Gamma\left(\frac{f}{2}\right)} \frac{1}{\left(1 + \frac{x^2}{f}\right)^{\left(\frac{f+1}{2}\right)}}, \quad (2.26)$$

wobei Γ die Gammafunktion ist, die durch

$$\Gamma\left(\frac{f+1}{2}\right) = \int_0^\infty e^{-\alpha} \alpha^{\frac{f-1}{2}} d\alpha \quad (2.27)$$

beschrieben ist [Adu00]. Der Freiheitsgrad f wird aus der Anzahl der Wiederholmessungen n und der Anzahl der aus der Stichprobe geschätzten Parameter m bestimmt.

$$f = n - m \quad (2.28)$$

Abweichungen gegenüber der Normalverteilung werden durch den Studentfaktor t beschrieben (Tabelle 2.37). Dieser stellt für eine Stichprobe den Quotient aus der Abweichung des Mittelwerts vom Erwartungswert und der Streuung des Mittelwerts dar (2.29).

$$t = \frac{|\bar{x} - x_E|}{\frac{\sigma}{\sqrt{n}}} \quad (2.29)$$

Zur Beschreibung der Streuung von Werten der Eingangsgröße Q_j werden Varianzen herangezogen und mit $u^2(q_j)$ bezeichnet, wobei q_j der Schätzwert der Eingangsgröße Q_j ist. Varianzen stellen ein Maß für die Streuung der Werte einer Größe dar und zeigen, wie stark der beste Schätzwert vom Wert der Größe abweicht [Adu04]. Die Wurzel aus der Varianz, die Standardabweichung σ wird im Zusammenhang mit der Messunsicherheitsermittlung Standardunsicherheit u genannt. Es wird unterschieden in:

- Ermittlung der Varianz aus Wiederholmessungen (Typ A) und
- Ermittlung der Varianz aus anderen Quellen (Typ B).

Beide Varianzen werden gemäß GUM gleichwertig behandelt (Bild 2.6). Neben den Verteilungsfunktionen für Wiederholmessungen werden in der Praxis weitere Verteilungen benötigt (Bild 2.4). Vor allem bei der Typ B-Messunsicherheitsermittlung gemäß GUM wird die Rechteckverteilung angewendet. Sie findet Verwendung, wenn von einer Größe nur bekannt ist, dass sie zwischen zwei Grenzen $+a$ und $-a$ liegt. Als realistische Näherung für die Rechteckverteilung, wird die Trapezverteilung eingesetzt. Die Dreieckverteilung findet Anwendung, wenn vermutet wird, dass die Messwerte um den Erwartungswert besonders dicht gedrängt liegen [Adu04].

Zur wissenschaftlichen Beurteilung von Varianzen gemäß Typ B können u.a. folgende Informationsquellen einfließen:

- eigene Erfahrung,
- Daten aus vorherigen Messungen,
- Erfahrungen anderer,
- allgemeine Kenntnisse über Verhalten und Eigenschaften der relevanten Materialien und Messgeräte,
- Angaben des Herstellers,
- Daten von Kalibrierscheinen und anderen Zertifikaten,
- Unsicherheiten, die Referenzdaten aus Handbüchern zugeordnet sind.

Auch bei der Durchführung von Wiederholmessungen haben weitere Größen Einfluss auf die Gesamtmessunsicherheit, wie z. B. die Messunsicherheitsangabe des verwendeten Messgerätes. Für diese Einflüsse liegen Angaben des Herstellers vor. Im Dokument [EAL96] sind ergänzend folgende Richtlinien enthalten:

1. Liegt für eine Größe nur ein einzelner Wert vor, z. B. ein einzelner Messwert, Ergebniswert einer vorangegangenen Messung, Literaturwert oder Korrekturwert, so ist dieser als Schätzwert zu verwenden.
Die Varianzen sind ebenfalls zu übernehmen, soweit sie angegeben sind oder sich aus eindeutigen Unsicherheitsangaben errechnen lassen. Falls derartige Angaben nicht vorliegen, sind die Varianzen aus der Erfahrung zu schätzen.

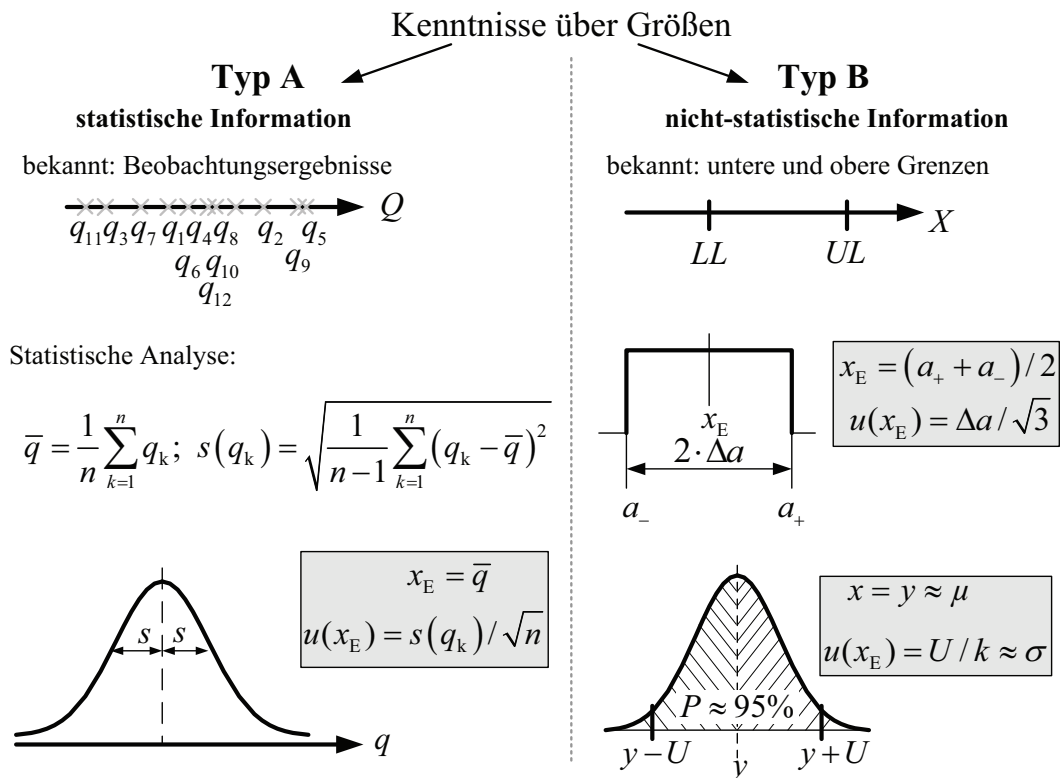


Bild 2.6.: Gegenüberstellung Typ A und Typ B nach GUM [SS04c], [SS04b]

2. Sofern für eine Einflussgröße aus der Theorie oder Erfahrung eine bestimmte Verteilung angenommen werden kann, ist die dieser Verteilung entsprechende Varianz anzusetzen.
3. Können für die Werte der Einflussgröße Q_j nur obere oder untere Grenzen a_+ und a_- geschätzt werden (z. B. Fehlergrenzen eines Messgerätes, geregelter Temperaturbereich), so gilt für den geschätzten Erwartungswert x_{Ej} :

$$x_{Ej} = \frac{a_+ + a_-}{2} \quad (2.30)$$

Als Schätzwert für die Varianz ergibt sich:

$$s_j^2 = \frac{(a_+ + a_-)^2}{12} \quad (2.31)$$

Dieser Ansatz entspricht der Rechteckverteilung. Für andere Verteilungen ist gemäß Bild 2.4 vorzugehen.

Bei der Berechnung der Varianz für die Messgröße Y werden Varianzen verschiedener Verteilungsfunktionen der Eingangsgrößen kombiniert (Bild 2.3). Für die kombinierte Varianz der Messgröße kann näherungsweise eine Normalverteilung angesetzt werden. Bei der Berechnung der kombinierten Varianz auf der Grundlage des quadratischen Fehlerfortpflanzungsgesetzes nach Gauß wird eine Linearisierung vorgenommen. Diese ist jedoch nicht zulässig, wenn Wechselwirkungen zwischen

den Eingangsgrößen bestehen. In diesem Fall sind Korrelationen wie folgt zu berücksichtigen:

$$u(y) = \sqrt{\sum_{p=1}^i \sum_{q=1}^i \frac{\partial y}{\partial x_p} \frac{\partial y}{\partial x_q} u(x_p, x_q)} \quad (2.32)$$

$$\text{mit: } u(x_p, x_q) = r(x_p, x_q)u(x_p)u(x_q) \quad (2.33)$$

Der Korrelationskoeffizient $r(x_p, x_q) = r(x_q, x_p)$ liegt im Bereich $-1 \leq r \leq 1$ und ist für nicht korrelierte Größen null. Korrelation von Eingangsgrößen kann bestehen, wenn zur Ermittlung z. B. dasselbe Messgerät, dasselbe Normal oder derselbe Referenzwert herangezogen wird [DIN99b].

Bei signifikanter Nichtlinearität sind Glieder höherer Ordnung der Taylorreihenentwicklung einzubeziehen [DIN99b]. Eine Linearisierung ist auch durch logarithmische Transformation durchführbar.

Durch wiederholtes Messen kann die Standardunsicherheit verringert werden. Daher wird zwischen der Standardunsicherheit eines Einzelmesswerts (2.34) und der Standardunsicherheit des Mittelwerts (2.35) bei wiederholter Messung unterschieden. Der Mittelwert streut demzufolge wesentlich weniger als die Messwerte selbst.

$$\text{Standardunsicherheit eines Einzelmesswerts: } u = s \quad (2.34)$$

$$\text{Standardunsicherheit eines Mittelwerts: } u_{\bar{x}} = s_{\bar{x}} = s/\sqrt{n} \quad (2.35)$$

Um die Messunsicherheit auf ein definiertes Vertrauensniveau umzurechnen, wird die kombinierte Standardunsicherheit $u(y)$ mit einem *Erweiterungsfaktor* k multipliziert.

$$U = k \cdot u(y) \quad (2.36)$$

Die daraus resultierende erweiterte Messunsicherheit U ist ein Kennwert, der einen Bereich um das Messergebnis kennzeichnet, von dem erwartet werden kann, dass er einen großen Anteil (Überdeckungswahrscheinlichkeit P) der Verteilung der Werte umfasst, die der Messgröße vernünftigerweise zugeordnet werden könnten (Bild 2.7). Je größer k ist, desto größer ist das Vertrauen, dass der Wert der Messgröße in dem durch das Messergebnis angegebenen Intervall liegt. Die Breite und damit die Überdeckungswahrscheinlichkeit P des symmetrisch um den besten Schätzwert definierten Vertrauensbereichs, wird häufig in Vielfachen von σ angegeben, z. B. 95,45 % ($\pm 2\sigma$) oder 99,73 % ($\pm 3\sigma$). Bei Wiederholmessungen mit $n < \infty$ ist die Intervallbreite entsprechend des Vertrauensniveaus $\pm t_{95,45}\sigma$ oder $\pm t_{99,73}\sigma$. Die nach Gleichung 2.37 berechnete erweiterte Messunsicherheit U berücksichtigt die zusätzliche Unsicherheit aus der Schätzung der Standardabweichung s der Stichprobe.

$$U = s \cdot t_{1-\alpha/2, n-1} \quad (2.37)$$

In Abhängigkeit von der Überdeckungswahrscheinlichkeit P und vom Freiheitsgrad f sind die Quantile der t-Verteilung zu ermitteln (Tabelle 2.1) [DIN99b].

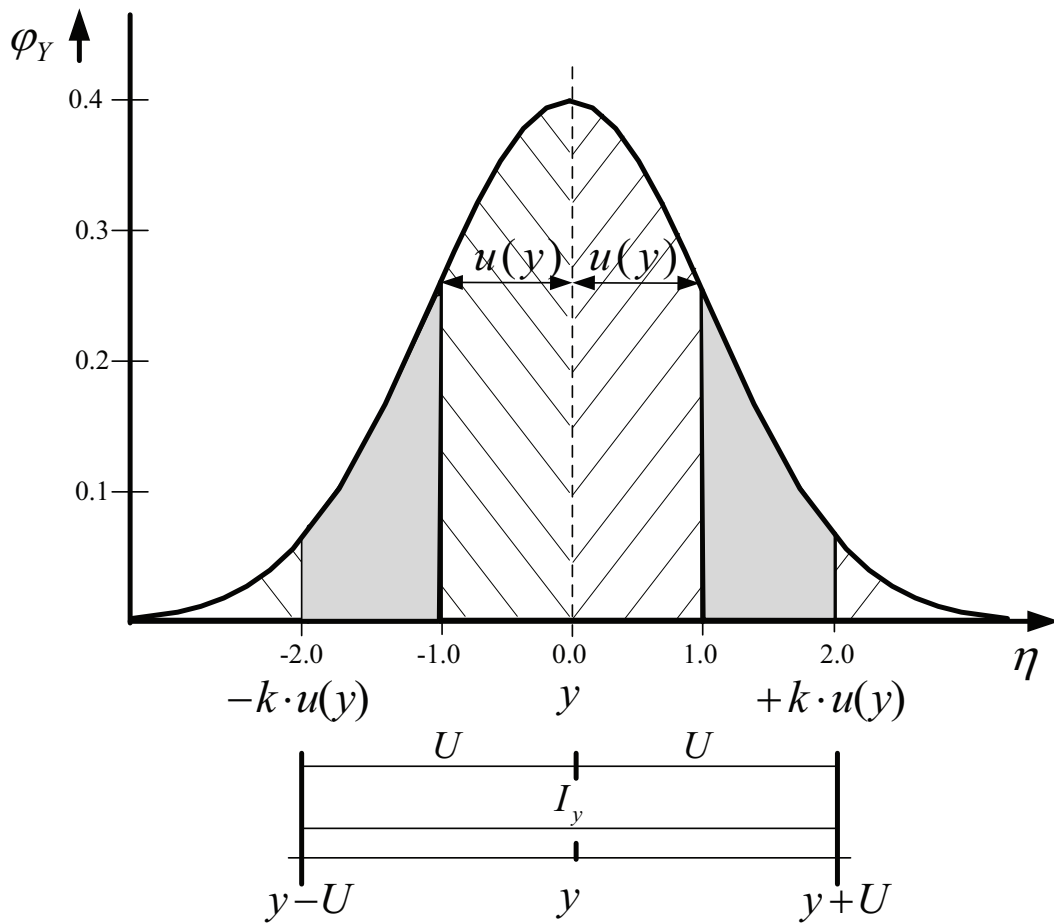


Bild 2.7.: Visualisierung von erweiterter Messunsicherheit U , bestem Schätzwert y und Vertrauensbereich I_y für eine normalverteilte Messgröße

Die erweiterte Messunsicherheit $U = k \cdot u(y)$ gibt einen Bereich um das Messergebnis an, indem ein Großteil der Verteilung der Werte liegt. Für übliche Messaufgaben und unter Annahme einer Normalverteilung kann der Erweiterungsfaktor k in Abhängigkeit des zu Grunde gelegten Vertrauensniveaus aus der t-Verteilung bestimmt werden (Tabelle 2.2).

Ist der Verteilungstyp der Messgröße nicht bekannt bzw. weicht stark von der Normalverteilung ab, müssen spezielle Werte für den Erweiterungsfaktor unter Berücksichtigung des Vertrauensniveaus basierend auf dem effektiven Freiheitsgrad ermittelt werden.

Der effektive Freiheitsgrad f_{eff} wird auf der Basis der Welch-Satterthwaite-Formel (2.38) berechnet [DIN99b].

$$f_{\text{eff}} = \frac{u^4(y)}{\sum_{j=1}^i \frac{u_j^4(y)}{f_j}} \quad (2.38)$$

Werden Eingangsgrößen Q_j gemäß GUM-Typ B bewertet, geht der Freiheitsgrad $f_j \rightarrow \infty$. Bei Rechteckverteilungen ergibt sich für eine Überdeckungswahrscheinlichkeit von 95 % ein Erweiterungsfaktor $k = 1,65$.

Tabelle 2.1.: Quantile der t -Verteilung für das Vertrauensniveau $P = 95\%$ und verschiedene Freiheitsgrade f

Freiheitsgrad f	Quantil der t -Verteilung
1	12,71
2	4,30
3	3,18
4	2,78
5	2,57
6	2,45
7	2,36
8	2,31
9	2,26
10	2,23
∞	1,96

Tabelle 2.2.: Erweiterungsfaktor k in Abhängigkeit vom Grad des Vertrauens für normalverteilte Messgrößen

Grad des Vertrauens P in %	Erweiterungsfaktor k
68,27	1
95,45	2
99,73	3

Der Erweiterungsfaktor k kann nur ermittelt werden, wenn umfassende Kenntnisse über die PDF jeder Eingangsgröße Q_j vorhanden sind und wenn diese PDFs miteinander kombiniert werden, um die PDF der Messgröße Y zu erhalten. Werden mehrere Eingangsgrößen mit verschiedenen Wahrscheinlichkeitsverteilungen berücksichtigt, wird die Ergebnisgröße gemäß dem *Zentralen Grenzwertsatz der Wahrscheinlichkeitsrechnung* [CN96], [Pap94] annähernd der t -Verteilung entsprechen, so dass gilt: $k = t(f_{\text{eff}})$, wobei das Quantil der t -Verteilung auf der Anzahl der effektiven Freiheitsgrade f_{eff} beruht (Tabelle 2.1).

Da sich die aufwendigen Berechnungen selten durch Umfang und Zuverlässigkeit der verfügbaren Informationen rechtfertigen lassen, ist das Verfahren der effektiven Freiheitsgrade nur anzuwenden, wenn die Anzahl der Eingangsgrößen klein ist [Adu00]. Ansonsten kann der Erweiterungsfaktor k unter Annahme einer Normalverteilung gemäß Tabelle 2.2 bestimmt werden.

Zur Angabe eines vollständigen Messergebnisses zählen:

- vollständige Definition der Messgröße Y ,
- Schätzwert y der Messgröße Y ,
- Standardunsicherheit $u(y)$ des Schätzwerts der Messgröße,
- erweiterte Messunsicherheit U mit Erweiterungsfaktor k .

2. Methoden zur Ermittlung der Messunsicherheit

Folgende Angaben sind zusätzlich anzugeben bzw. auf ein Dokument zu verweisen, indem sie enthalten sind:

- Wertangabe und Beschreibung der Art der Ermittlung der Eingangsschätzwerte und ihrer Standardunsicherheit,
- bei korrelierten Eingangsschätzwerten die Kovarianzen oder Korrelationskoeffizienten und die Art ihrer Ermittlung,
- Freiheitsgrade für die Standardunsicherheit aller Eingangsschätzwerte und die Art ihrer Ermittlung,
- mathematischer Zusammenhang zwischen der Messgröße und den Eingangsgrößen,
- die Empfindlichkeitskoeffizienten.

In [EAL96] und [Adu00] werden folgende Empfehlungen für die praktische Vorgehensweise bei der Messunsicherheitsermittlung gegeben:

1. Drücke die Abhängigkeit der Messgröße von den Eingangsgrößen in mathematischer Form aus.
2. Bestimme alle signifikanten Korrekturen und wende sie an.
3. Liste alle Unsicherheitsquellen in Form einer Unsicherheitsanalyse auf. Bestimme die Standardunsicherheit für wiederholt gemessene Größen.
4. Für Einzelwerte, z. B. resultierende Werte von vorhergehenden Messungen, Korrekturwerte oder Werte aus der Literatur übernehme die Standardunsicherheit, wenn sie angegeben ist oder berechnet werden kann. Sind keine Daten verfügbar, aus denen die Standardunsicherheit abgeleitet werden kann, schätze einen Wert auf der Grundlage der Erfahrung.
5. Sind Einflussgrößen für die Wahrscheinlichkeitsverteilung bekannt oder können sie angenommen werden, berechne die Erwartungswerte und die Standardunsicherheit. Wenn lediglich obere und untere Grenzen gegeben sind oder geschätzt werden können, berechne die Standardunsicherheit gemäß Bild 2.4.
6. Berechne für jede Eingangsgröße den Beitrag zur Unsicherheit des Schätzwerts für die Messgröße aus den Schätzwerten der Eingangsgrößen und addiere ihre Quadrate, um die Unsicherheit der Messgröße zu erhalten.
7. Berechne die erweiterte Unsicherheit durch Multiplikation der Standardunsicherheit des Schätzwerts der Messgröße mit einem Erweiterungsfaktor gemäß Tabelle 2.2.
8. Gib das Resultat der Messung, das die Schätzung der Messgröße und die zugeordnete erweiterte Unsicherheit enthält, an.

Zusammenfassend sind die Beziehungen aller für die Messunsicherheitsermittlung relevanten Kenngrößen dargestellt (Bild 2.8).

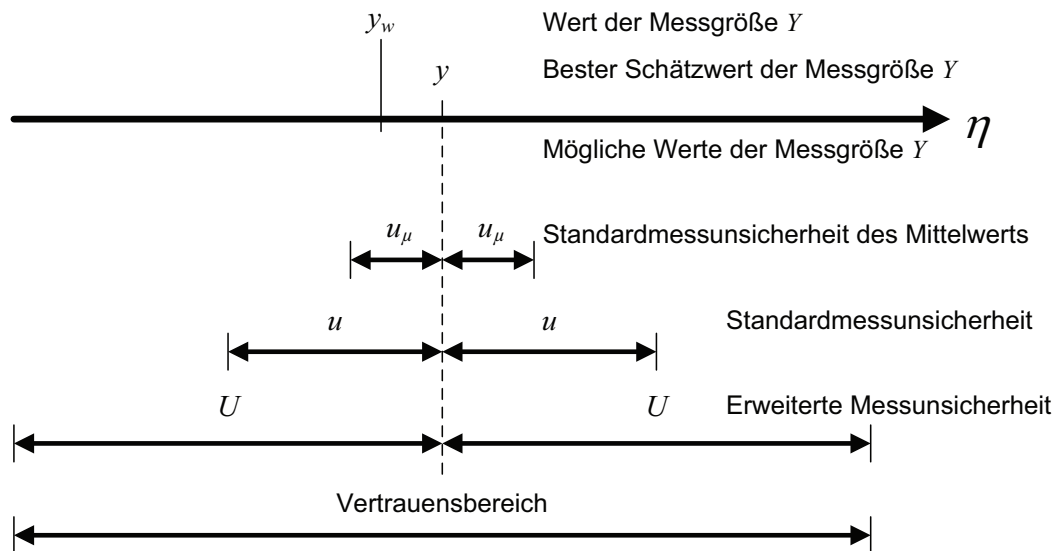


Bild 2.8.: Zusammenhang erweiterte Messunsicherheit und bester Schätzwert der Messgröße [Adu00]

Bewertung des Standard-ISO-GUM-Verfahrens

Die Vorgehensweise nach GUM ist in der Praxis für viele, aber nicht für alle Messunsicherheitsbewertungsprobleme sehr gut geeignet [CS06], [Pet10]. Im GUM [DIN99b] wird eine Methode zur Bestimmung der Standardunsicherheit vorgestellt, die voraussetzt, dass das Modell entweder linear ist oder hinreichend genau durch eine Taylorreihenentwicklung erster Ordnung approximiert und damit linearisiert werden kann [KTH06]. Die Berechnung der Standardunsicherheit erfolgt durch das *quadratische Fehlerfortpflanzungsgesetz* (Abschnitt 2.1.3) und wird im GUM Unsicherheitsfortpflanzungsgesetz genannt. Neben der Einschränkung auf lineare Modelle ist die Unsicherheitsfortpflanzung auch in Bezug auf die Eingangswerte limitiert. Durch die Beschreibung jeder Eingangsgröße durch ihren Erwartungswert und die Standardabweichung gehen Informationen, wie z. B. die Schiefe der Verteilung, verloren. Die Berechnung des Unsicherheitsintervalls der Messgröße kann problematisch sein, da für diese generell eine Normalverteilung angenommen wird, und somit auch hier wichtige Informationen verloren gehen können.

Unbekannte systematische Abweichungen werden gemäß GUM wie zufällige Abweichungen behandelt. Diese Behandlung unbekannter systematischer Abweichungen ist kritisch. In [Gra05] wird vorgeschlagen, sie nicht mit Wahrscheinlichkeiten zu belegen sondern Worst-Case-Schätzwerte festzulegen, die durch Experimente (a posteriori) zu bestimmen sind. Schätzwerte, die durch unbekannt systematische Abweichungen, welche als zufällige behandelt werden, beeinflusst sind, sind Bias behaftet. Gauß selbst soll davor gewarnt haben, systematische Abweichungen in den von ihm entwickelten Algorithmus, das *quadratische Fehlerfortpflanzungsgesetz*, mit einzubeziehen [Gra05].

Gemäß GUM sind systematische Abweichungen in den Eingangsgrößen Q_j im Voraus zu korrigieren [DIN99b]. Ist die Korrektur nicht möglich, werden systematische

Abweichungen durch A-Priori-Verteilungen angenähert und auf ein einheitliches Vertrauensniveau umgerechnet. Aus messtechnischer Sicht kann es durchaus interessant sein, die Fortpflanzung systematischer Effekte zu betrachten, z. B. um abzuschätzen, ob sich systematische Abweichungen der Eingangsgrößen Q_j so kompensieren, dass die Abweichung in der Messgröße Y vernachlässigbar klein wird [HLW97].

Probleme bei der Ermittlung der Messunsicherheit gemäß Standard-GUM-Verfahren:

- Die Herleitung der Modellgleichung ist bei komplexen Messprozessen sehr aufwändig [Sch99].
- Der Umgang mit mehrdimensionalen Messgrößen (z. B. bei numerisch auszuwertenden Messaufgaben wie Ausgleichselementen bei Koordinatenmessungen) ist im Standard-GUM-Verfahren nicht geregelt [SKSW00]. Für die Lösung dieser Problematik befindet sich ein weiteres Beiblatt zum GUM in Vorbereitung [BB2].
- Die Linearisierung von Auswerteproblemen ist nicht generell möglich. Nicht-lineare Modellgleichungen würden eine Weiterentwicklung der Taylorreihe bei der Unsicherheitsfortpflanzung erfordern (im Standard-GUM-Verfahren nicht berücksichtigt).
- Die analytische Ermittlung von Sensitivitätskoeffizienten bei nichtlinearen Modellgleichungen ist teilweise nicht möglich [SKSW00].
- Die vereinfachte Annahme einer symmetrischen PDF für die Messgröße entspricht nicht in jedem Fall der Realität [SKSW00].
- Die Ermittlung von Korrelationen der Eingangsgrößen ist teilweise nicht möglich (z. B. bei vielfältig korrelierten Messpunkten) [Sch99].
- Die Korrektur der systematischen Abweichungen ist oft problematisch [Sch99].
- Die Repräsentation von systematischen Messabweichungen und von Kombinationen aus zufälligen und systematischen Messabweichungen durch PDFs ist in der Literatur oft umstritten.

Trotz der aufgeführten Probleme, die die eingeschränkte Anwendung der Messunsicherheitsbewertung gemäß GUM aufzeigen, ist der ISO-GUM für die meisten Anwendungen in der Praxis einsatzfähig. Zudem wird das standardisierte Berechnungsverfahren durch zahlreiche Software-Anwendungsprogramme unterstützt [WW04]. Alternativen stellen numerische Verfahren dar. Im ersten GUM-Supplement [BB107] wird eine neue Berechnungsmethode auf der Grundlage der Monte-Carlo-Methode vorgestellt, die diesen Einschränkungen nicht mehr unterliegt. Vielmehr eröffnen sich ganz neue Möglichkeiten bei der Modellierung, was sich an der gestiegenen Anzahl von verschiedenen Wahrscheinlichkeitsverteilungen für Eingangsgrößen widerspiegelt [WMR07].

2.2.4. Numerische Verteilungsfortpflanzung

Im Beiblatt 1 des GUM [BB107] und in [VDI06a] wird als Werkzeug für die numerische Berechnung der Messunsicherheit und die Messunsicherheitsfortpflanzung die *Monte-Carlo-Methode* (MCM) vorgeschlagen. In Anlehnung an den GUM [ISO95] muss der mathematische Zusammenhang zwischen Eingangsgrößen Q_j und Messgröße Y vorliegen. Relevante Eingangsgrößen müssen durch eine PDF charakterisiert sein, um auf der Grundlage des mathematischen Modells eine gemeinsame PDF für Y zu erhalten, welche die Kenntnisse über Eingangsgrößen zum Ausdruck bringt [EWC07]. Grundlage ist die Nachbildung des Messprozesses durch statistische Simulation basierend auf der MCM [BB107]. Das Modell des Messprozesses und die auf den Messprozess einwirkenden Größen sind, wie bei der Erstellung eines herkömmlichen Messunsicherheitsbudgets, die Basis für die Ermittlung der Messunsicherheit [ISO99]. Die Auswertung erfolgt jedoch nicht über die Lösung von partiellen Ableitungen und Summierung von Unsicherheitsbeiträgen, sondern mit Hilfe eines rechnerbasierten w -fach wiederholten virtuellen Experiments [Wäl04]. Dabei werden Pseudo-Zufallszahlen zwischen 0 und 1 verwendet, um repräsentative mögliche Werte der Eingangsgrößen aus den Umkehroperationen der PDFs zu erzeugen. Die PDF der Messgröße kann aus modellkonformen Kombinationen der möglichen Werte der Eingangsgrößen, ausgedrückt durch die Markovgleichung (2.39), generiert werden [CS06].

$$\varphi_Y(\eta) = \int_{-\infty}^{\infty} \varphi_Q(\xi) \delta(\eta - f(\xi)) d\xi_1 \dots d\xi_w \quad (2.39)$$

- $\varphi_Y(\eta)$ = PDF der Messgröße Y mit deren möglichen Werten (η_1, \dots, η_w) ,
- $\varphi_Q(\xi)$ = Vektor aus den PDFs der Eingangsgrößen (Q_1, \dots, Q_w) mit deren möglichen Werten (ξ_1, \dots, ξ_w) ,
- $\delta(z)$ = Dirac Delta Funktion, $\delta(z = 0) = 1$, $\delta(z \neq 0) = 0$,
- $f(\xi)$ = Modellgleichung des Messprozesses.

Die aufgabenspezifische Messunsicherheit auf der Grundlage der MCM wird durch numerische Fortpflanzung der PDFs bestimmt. Dieser Ansatz ist auch geeignet, um GUM-Messunsicherheitsbudgets zu validieren.

In [BB107] wird ein Unsicherheitsintervall $[y_{\text{unten},P}, y_{\text{oben},P}]$ definiert, welches den entsprechend dem Vertrauensniveau geforderten Anteil (z. B. $P = 95\%$) der möglichen Werte der Messgröße enthält [KTH06]. Bei nichtlinearen mathematischen Modellen des Messprozesses kann die simulierte Verteilungsdichtefunktion asymmetrisch verlaufen, d.h. der beste Schätzwert y der Messgröße liegt nicht in der Mitte des Unsicherheitsintervalls. Für die Bestimmung der Intervallgrenzen werden drei Varianten vorgeschlagen:

1. Quantil-Methode: Verwendung von Quantilen der simulierten diskreten Werte η_j für Y ; z. B. für $P = 95\%$ ($y_{\text{unten},P} = 0,025$ Quantil, $y_{\text{oben},P} = 0,975$ Quantil). Es ist notwendig, bei Angaben zur erweiterten Messunsicherheit U , die zu Grunde liegende Überdeckungswahrscheinlichkeit P mit anzugeben.

- Bei symmetrischer PDF der Messgröße folgt:

$$U = (y_{\text{oben,P}} - y_{\text{unten,P}})/2. \quad (2.40)$$

- Bei unsymmetrischer PDF der Messgröße folgt:

$$U_{P-} = y - y_{\text{unten,P}}, \quad U_{P+} = y_{\text{oben,P}} - y. \quad (2.41)$$

Die Quantile der Messgröße sind in Abhängigkeit von der Überdeckungswahrscheinlichkeit P wie folgt zu bestimmen:

$$y_{\text{oben,P}} = \left[\frac{1+P}{2} \right] \text{Quantil}; \quad (2.42)$$

$$y_{\text{unten,P}} = \left[\frac{1-P}{2} \right] \text{Quantil}. \quad (2.43)$$

2. Verwendung des Unsicherheitsbereichs mit der geringsten Breite, der bei geforderter Überdeckungswahrscheinlichkeit realisierbar ist:

$$U = \frac{(y_{\text{oben,P}} - y_{\text{unten,P}})}{2} \rightarrow \min. \quad (2.44)$$

3. s-Methode: Gemäß GUM [ISO95] wird der Verteilungstyp der Messgröße basierend auf dem zentralen Grenzwertsatz der Wahrscheinlichkeitsrechnung als normalverteilt angenommen. Bei einer entsprechend großen Anzahl an Eingangsgrößen oder wenn keine der Eingangsgrößen einen verhältnismäßig hohen Sensitivitätskoeffizienten aufweist, ist die Normalverteilungsannahme zweifellos gerechtfertigt. Bei nachweislich normalverteilten oder annähernd normalverteilten Messgrößen kann die Standardabweichung als Schätzwert für die Standardunsicherheit aus den diskreten Werten η_j der Messgröße berechnet und mit dem zu Grunde liegenden Erweiterungsfaktor k in Abhängigkeit von der Überdeckungswahrscheinlichkeit P multipliziert werden:

$$U = k \cdot \sqrt{\frac{1}{w-1} \sum_{j=1}^w (\eta_j - \bar{\eta})^2}. \quad (2.45)$$

Zusammenfassung zur Vorgehensweise bei der numerischen Verteilungsfortpflanzung gemäß [BB107]:

1. Definieren der Messgröße Y ,
2. Bestimmen der Eingangsgrößen Q_j , von denen die Messgröße Y abhängt,
3. Entwickeln eines Modells für die Beziehung zwischen Messgröße Y und Eingangsgrößen Q_j ,
4. Zuweisen einer PDF zu jeder Eingangsgröße Q_j ,
5. Bestimmen der Anzahl w von Versuchen für MCM (bestimmt Effektivität des Verfahrens),

6. Generieren von Werten η_j der Messgröße Y durch Fortpflanzen der Eingangsgrößen Q_j gemäß dem Modell,
7. Darstellen einer diskreten Häufigkeitsverteilung für die Messgröße Y aus den generierten Werten η_j ,
8. Bestimmen des Erwartungswerts y der resultierenden Werte als Schätzwert für die Messgröße Y ,
9. Berechnen der erweiterten Messunsicherheit U anhand der Standardabweichung s der resultierenden Werte oder Bestimmen von Intervallgrenzen auf der Basis der Quantil-Methode und unter Berücksichtigung der Überdeckungswahrscheinlichkeit P .

Bedingungen für die Anwendung der MCM [BB107]:

- Vorhandensein einer kontinuierlichen Modellfunktion in der Umgebung des Erwartungswerts y ,
- Vorhandensein einer kontinuierlichen und steigenden CDF der Messgröße Y ,
- Vorhandensein einer kontinuierlichen und unimodalen PDF der Messgröße Y ,
- stetiges Ansteigen der PDF von Y links vom Modalwert und stetiges Absinken der PDF von Y rechts vom Modalwert,
- Existenz von Erwartungswert y und Varianz σ^2 der PDF der Messgröße Y ,
- geeignete Anzahl w simulierter Experimente ($w \geq 1/(1 - P) \cdot 10^4$ [BB107]).

Bewertung der Messunsicherheitsermittlung mit numerischer Verteilungsfortpflanzung:

Bei Anwendung des simulationsbasierten Verfahrens erfolgt die vollständige Berücksichtigung des mathematischen Modells - im Unterschied zum Standard-GUM-Verfahren sind keine linearen Approximationen notwendig [EWC07]. Jeder Wert ξ_j jeder Eingangsgröße Q_j kann zu einem Wert η_j für die Messgröße Y beitragen. Die Wahrscheinlichkeit für eine Kombination möglicher Werte ist aus der PDF für die Eingangsgrößen bestimmbar. Der mögliche Wert η_j der Messgröße Y für diese Kombination ist durch das Modell gegeben. Daher ist die PDF für die Messgröße der Träger der gesamten Information, die über die Messung vorhanden ist [SS04a]. Durch die numerische Ermittlung der PDF der Messgröße Y kann die Abschätzung des Verteilungstyps bzw. der Nachweis der Normalverteilungsannahme entfallen [EWC07]. Ebenso ist die Ermittlung von Sensitivitätskoeffizienten, wie im Standard-GUM-Verfahren gefordert, nicht notwendig. Weitere Vorteile der MCM bestehen darin, dass die Ermittlung der Freiheitsgrade und, bei Anwendung der Quantil-Methode, die Bestimmung des Erweiterungsfaktors k entfallen. Durch Anwendung der numerischen Verteilungsfortpflanzung können ohne großen Aufwand Auswert- und Filteralgorithmen eingebunden werden [Sch99]. Zudem bietet die numerische Verteilungsfortpflanzung die Möglichkeit der visuellen Darstellung der PDF der

Messgröße Y in Form eines Histogramms.

Letztlich ist aber auch, wie bei der Anwendung des Standard-GUM-Verfahrens, die resultierende Verteilung für die Messgröße Y von den PDFs der Eingangsgrößen Q_j abhängig. Diese werden auch gemäß [BB107] auf der Grundlage ausgewerteter Messdaten (Typ A) [KKS10] oder vorhandener Informationen (Typ B) charakterisiert. Die MCM führt bei realen Messproblemen immer zum Ziel. Es ist jedoch erst zu prüfen, ob ihr Einsatz notwendig ist, weil das Standard-GUM-Verfahren, wenn ausreichend, einfacher ist und eine analytische Lösung bietet [SS04a]. Die MCM ist sehr effektiv und hilft, komplexe Analysen, die bei umfangreichen Messprozessmodellen immense Ausmaße annehmen können, zu vermeiden. Ein weiterer Vorteil der Methode ist darin zu sehen, dass sie relativ einfach zu implementieren ist. Nachteilig ist die hohe Rechenintensivität, da je nach Genauigkeitsniveau große Anzahlen w an Monte-Carlo-Versuche benötigt werden [Bai04].

2.3. Verfahren für die Messunsicherheitsermittlung in der Koordinatenmesstechnik

Für die komplexen Messaufgaben der Koordinatenmesstechnik (KMT) mit vielfältigen Einflussgrößen, umfangreichen Korrelationen und numerischen Auswertungen ist die konventionelle Methode des Messunsicherheitsbudgets im Allgemeinen nicht anwendbar [Wäl04]. Alternativen sind neben experimentellen Methoden auch numerische Verfahren und Schätzungen der Messunsicherheit durch Experten. Im Folgenden werden ausgewählte, vorrangig standardisierte Regelwerke vorgestellt, deren Inhalt die Messunsicherheit von Koordinatenmessungen ist.

2.3.1. Verfahren zur prüfmerkmalbezogenen Messunsicherheitsermittlung in der Koordinatenmesstechnik durch Substitutionsmessungen nach DIN ISO/TS 15530-3

Diese Methode zeichnet sich dadurch aus, dass die Erfassung von Einflussgrößen auf den Messprozess und deren Wechselwirkungen durch experimentelle Messungen erfolgt. Die Einflussgrößen im Einzelnen müssen nicht erfasst und analysiert werden, sie sind im Ergebnis des Experiments enthalten. Ein kalibriertes Werkstück oder ein Normal wird wiederholt in gleicher Weise und bei gleichen Bedingungen, wie bei der realen Messung, gemessen [LV10]. Die Differenzen zwischen den so ermittelten Ergebnissen und dem Kalibrierwert dienen zur Berechnung der aufgabenspezifischen Messunsicherheit. Die so ermittelte Messunsicherheit kann auf andere Werkstücke übertragen werden, wenn folgende Bedingungen erfüllt sind [DIN09c]:

- ähnliche Größe und Gestalt des Werkstücks,
- ähnliche Oberflächenbeschaffenheit (Formabweichung, Rauheit, Reflexion),
- ähnliche Materialeigenschaften (Ausdehnungskoeffizient, Elastizität, Härte),
- gleiche Prüfmerkmale,
- ähnliche Messparametereinstellung bzw. Sensorkonfiguration,

2.3. Verfahren für die Messunsicherheitsermittlung in der Koordinatenmesstechnik

- ähnliche Messstrategie (Anzahl und Anordnung der Messpunkte),
- ähnliche Aufspannung (Handhabung, Position, Orientierung),
- ähnliche Temperaturbedingungen (Temperierung, Temperaturkorrektur),
- ähnliche Messbedingungen (Fremdlichteinwirkung, Messperson).

Das kalibrierte Werkstück bzw. das Normal ist zwanzigmal zu messen. Das Koordinatenmessgerät (KMG), die Messstrategie und die Umgebungsbedingungen müssen denen der realen Messung des Werkstücks entsprechen, für welches die Messunsicherheitsbewertung erfolgen soll. Aus den Messungen werden der Mittelwert \bar{x} , die Standardabweichung $s = u_M$ und die systematische Abweichung des Mittelwerts vom Kalibrierwert $b = \bar{x} - x_K$ berechnet. Bei der Messunsicherheitsbewertung gemäß [DIN09c] werden neben der Standardunsicherheit aus den Wiederholmessungen u_M auch die Standardunsicherheit der Kalibrierung des Werkstücks bzw. Normals u_K und mögliche zufällige Abweichungen durch Werkstoff- und Prozessstreuung u_W berücksichtigt. Diese drei Standardunsicherheiten werden quadratisch addiert und mit dem Erweiterungsfaktor $k = 2$ für $P = 95\%$ multipliziert. Dazu wird der Betrag der systematischen Abweichung b addiert (2.46).

$$U = k \cdot \sqrt{u_K^2 + u_M^2 + u_W^2} + |b| \quad (2.46)$$

Die Standardunsicherheit aus den Wiederholmessungen u_M kann auch aus mehreren über einen längeren Zeitraum verteilten Messreihen bestimmt werden, indem der Mittelwert aus den einzelnen Standardabweichungen berechnet wird. Somit kann die gesamte Streubreite der Umgebungsbedingungen erfasst werden.

2.3.2. Ermittlung der Messunsicherheit von Koordinatenmessungen durch Messunsicherheitsbilanzen

Das in [VDI09] beschriebene Verfahren folgt einem analytischen Ansatz zur großzügigen Abschätzung der Messunsicherheit. Der Ansatz ähnelt der Prozedur für das Unsicherheitsmanagement (PUMA) [ISO00], bei der ebenso zunächst unter geringem Aufwand eine Schätzung der Messunsicherheit nach Typ B des GUM erfolgt. Anhand des Verhältnisses von U/T können ggf. umfangreichere Berechnungen durchgeführt werden. Die rechnerische Ermittlung der aufgabenspezifischen Messunsicherheit nach [VDI09] ist an die taktile Messung mit Einzelpunktantastung gebunden und somit nicht für Präzisionskoordinatenmessungen mit Bildsensoren geeignet. Für die Erfassung von Geometrieabweichungen des KMGs und Messabweichungen durch die Temperatur ist der Einsatz der rechnerischen Methode innerhalb dieser Arbeit jedoch möglich (Abschnitt 5.2).

2.3.3. Messunsicherheit von Koordinatenmessungen mit optischer Antastung nach VDI/VDE 2617-6

KMGs werden als universelle Längenmess- und Prüfgeräte eingesetzt. Jeder Betreiber muss sicherstellen, dass die maximal zulässige Messunsicherheit nicht überschritten wird. In [VDI97] wird ein praxisnahes Abnahme- und Überwachungsverfahren

für KMGs mit Bildsensoren, unter Verwendung kalibrierter Prüfkörper behandelt. Optische Sensoren sind unterteilbar in Sensoren, die die Messung in Richtung der Sensorachse ermöglichen (Abstandssensoren) und solche, die die Messung in lateraler Richtung zur Sensorachse ermöglichen (Lateralsensoren). Zu den Lateralsensoren zählen auch Bildverarbeitungssensoren mit matrix- oder zeilenförmiger Bildaufnahme, die oft als visuelle Sensoren bezeichnet werden [VDI05b]. Die Überwachung von KMGs dient der langfristigen Einhaltung der vom Hersteller festgelegten Grenzwerte (*MPE*) für Antast- und Längenmessunsicherheit. Spezifizierte *MPE* gelten, wenn nicht gesondert vereinbart, für alle möglichen Einstell- und Konfigurationsmöglichkeiten, wie z. B. [VDI97]:

- Beleuchtungsart und Intensität,
- gewählter Abbildungsmaßstab,
- verwendeter optischer Sensor,
- Bildauswerteverfahren,
- Antastgeschwindigkeit.

Der Hersteller eines KMGs hat dafür Sorge zu tragen, dass die Öffnungswinkel (Aperturen) der einzelnen optischen Systeme aufeinander abgestimmt sind und die Auswertesoftware Möglichkeiten zur ausreichend guten Kalibrierung der Algorithmen zur Kantenortbestimmung bietet [VDI05b]. Die Grenzwerte für Antastabweichungen können unter Berücksichtigung spezifischer Messobjekteigenschaften (Oberflächenrauheit, Reflexionsverhalten usw.) auf beliebige Messobjekte übertragen werden. Durch die *Antastunsicherheit* wird das Abweichungsverhalten des Gesamtsystems, bestehend aus KMG, Sensorsystem und Zusatzeinrichtungen, in einem sehr kleinen Messvolumen beschrieben [VDI97].

Die zweidimensionale Antastunsicherheit R_2 ist die Spanne der radialen Abweichungen zwischen dem nach der Methode der kleinsten Fehlerquadratsumme rechnerisch ermittelten Kreis und den ausgegebenen Koordinatenwerten für die Antastpunkte [VDI97]. Dies entspricht der Differenz zwischen maximalem und minimalem Abstand von Antastpunkten zum Mittelpunkt des Ausgleichselementes (Spannweite des Kreisradius) $R_2 = R_{\max} - R_{\min}$ [VDI05b].

Zur Prüfung der zweidimensionalen Antastunsicherheit kommen Lehrringe oder Verkörperungen von Kreisen z. B. Chromstrukturen auf Glas in ebener Anordnung zum Einsatz, für die ein Kalibrierschein vorliegen muss. Bei KMGs mit optischen Sensoren besteht die Möglichkeit, Messungen sowohl ohne Bewegung der Koordinatenachsen als auch durch Bewegung im Messbereich des Sensors zu realisieren. Für jede dieser Betriebsarten ist eine getrennte Angabe der Antastunsicherheit erforderlich. Die Spezifikation der Antastabweichungen ist eingehalten, wenn die ermittelten Werte der Kenngrößen die zugehörigen *MPE* an keiner der Messpositionen überschreiten. Hierbei ist die erweiterte Messunsicherheit U des Prüfverfahrens zu berücksichtigen [ISO99].

2.3.4. Ermittlung der Messunsicherheit von Messungen mit Koordinatenmessgeräten durch Simulation

Das in [VDI06a] beschriebene Verfahren ist mit den Grundprinzipien des GUM vereinbar und entspricht im Wesentlichen dem Vorgehen nach [BB107]. Speziell für die Anwendung bei Messungen mit KMGs wird gefordert, die Verarbeitung der Messpunktkoordinaten und die Auswertung der geometrischen Größen als Bestandteil des Messprozesses im Simulationsmodell zu erfassen. Das Resultat soll eine aufgabenspezifische Messunsicherheitsangabe sein. Die kombinierte Standardunsicherheit wird wie folgt ermittelt:

$$u = \sqrt{u_{\text{sim}}^2 + \sum u_i^2}. \quad (2.47)$$

Sie setzt sich zusammen aus u_{sim} , der durch Simulation bestimmten Unsicherheit und den Unsicherheiten u_i , z. B. Formabweichung des Messobjekts, die nicht in der Simulation berücksichtigt werden und manuell abgeschätzt werden müssen [VDI06a].

2.3.5. Prüfprozesseignung von Messungen mit Koordinatenmessgeräten

Unter Prüfprozesseignung wird die Eignung eines Prüfmittels für eine vorgegebene Prüfaufgabe unter Berücksichtigung aller auf den Prüfprozess einwirkenden Größen verstanden [VDI06b], [VDA10]. Zur Beurteilung der Prüfprozesseignung g_{pp} ist die Messunsicherheit U ($k = 2$) und die Merkmalstoleranz T heranzuziehen [DIN08].

$$g_{\text{pp}} = 2 \cdot \frac{U}{T} \leq G_{\text{pp}} \quad \text{bei zweiseitiger Toleranz } T \quad (2.48)$$

$$g_{\text{pp}} = \frac{U}{T} \leq G_{\text{pp}} \quad \text{bei einseitiger Toleranz } T \quad (2.49)$$

Die Eignung des Prüfprozesses ist nachgewiesen, wenn das Verhältnis der Messunsicherheit zur Toleranz einen Grenzwert G_{pp} nicht überschreitet. Dieser Grenzwert liegt typischerweise zwischen 0,2 und 0,4. Die Ermittlung der Messunsicherheit kann gemäß [VDI06b] nach [DIN09c], [ISO00] oder [VDI06a] erfolgen.

2.4. Verfahren zur automatisierten Ermittlung der Messunsicherheit

Eine Messung ist die *Gesamtheit der Tätigkeiten zur Ermittlung eines Größenwerts; wobei die Tätigkeiten auch automatisch ablaufen können* [ISO08]. Ebenso existieren zur automatisierten Berechnung der Messunsicherheit gemäß [DIN99b] zahlreiche Softwareprodukte von unterschiedlicher Qualität und mit unterschiedlichem Funktionsumfang [WW05], [WW04]. Diese wirken unterstützend bei der Bewertung von Einflussgrößen und bei der Unsicherheitsfortpflanzung und halten somit den Aufwand für den Anwender in Grenzen. Einige der verfügbaren Softwareprodukte zur Messunsicherheitsbewertung (z. B. BUGS, Evaluator, Measurement Software Toolkit, Uncertainty Manager, WinCert) nutzen numerische Verfahren nach [BB107]. Die Software *MUSE* verwendet die numerische Verteilungsfortpflanzung nach [BB107] und unterstützt den Anwender zusätzlich bei der Modellierung komplexer Messsysteme durch das Bereitstellen parametrierbarer und wiederverwendbarer so genannter

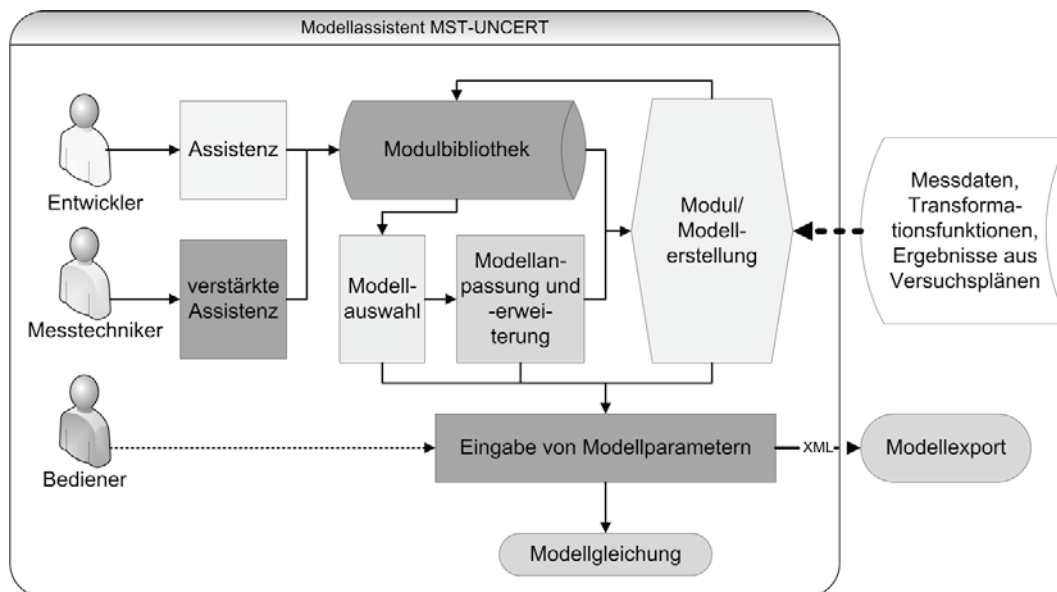


Bild 2.9.: Struktur des Modellassistenten-Demonstrators, BMBF-Verbundprojekt *MST-UNCERT* [WKHO07]

Basismodelle [WMR07].

Die Ermittlung eines adäquaten Modells der Messung stellt in der Praxis die größte Herausforderung für den Messtechniker dar. Die Modellbildung, als wesentlicher Bestandteil der Messunsicherheitsermittlung, erfordert umfassende Kenntnisse zu Messsystem und Messaufgabe. Dies kann durch Softwarepakete nicht vollständig automatisiert umgesetzt werden. Im BMBF-Verbundprojekt *MST-UNCERT* (10/2005-03/2008) wurde ein softwarebasiertes mehrstufiges Assistenzsystem entwickelt, welches den Anwender bei der Modellbildung unterstützt (Bild 2.9). Für bestimmte Komponenten des Messsystems werden Modellbausteine (Module) vom Messtechnikentwickler vorbereitet, auf die der Anwender über eine Modulbibliothek zugreifen kann. Der Modellassistenten-Demonstrator stellt verschiedene Funktionalitäten bereit, wie z. B. die Wiederverwendbarkeit von Modulen durch Speicher- und Ladefunktion, die grafische Abbildung, Anordnung und Verknüpfung von Modellbildungs-Grundelementen, die Charakterisierung von Modulgrößen durch PDFs, der Export der Modellgleichung und eine interaktive Hilfefunktion [WKHO07].

Automatisierte, merkmalsbezogene Verfahren mit numerischer Verteilungsfortpflanzung existieren für sehr spezielle Anwendungen bereits. In der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) wurde das *Virtuelle Koordinatenmessgerät* entwickelt [Sch99]. Dies beruht auf der simulativen Nachbildung eines individuellen Messablaufs an taktilen KMGs, wobei Einflussgrößen innerhalb vorgegebener Grenzen und gemäß definierter Verteilungen stochastisch variiert werden. Der Messprozess wird so als zufällige Kombination aller möglichen Zustände der Einflussgrößen vielfach wiederholt simuliert [Her07]. Vom Hersteller der Simulationssoftware muss angegeben werden, welche Einflussgrößen in seiner Software berücksichtigt sind, und welche Daten vom Anwender eingegeben werden müssen [VDI06a].

Für die modellgestützte Optimierung von Interferometern wurde am Fraunhofer IPT in Aachen das virtuelle Interferometer entwickelt, mit dem softwarebasiert

die Messabweichungen, durch beispielsweise Verkippung, Defokussierung, Astigmatismus und Sphärische Aberration simuliert werden können, um die optimale Justage des Interferometers zu realisieren. Zur Optimierung wurden u.a. modifizierte Simplex-Algorithmen, statistische Versuchsmethodik, Simulated Annealing und Back-Propagation-Netzwerke untersucht. Die Ermittlung der Messunsicherheit kann durch Variation der Simulationsparameter im virtuellen Interferometer erfolgen [Mis00].

Weitere virtuelle Messgeräte wurden im Rahmen des Schwerpunktprogramms 1159 modelliert [S⁺08]. Dabei liefern virtuelle Messgeräte Erkenntnisse zur Entwicklung neuartiger Messsysteme, Beiträge zur Optimierung bestehender Verfahren sowie Möglichkeiten zur Bestimmung der Messunsicherheit und modellbasierten Korrektur systematischer Messabweichungen.

2.5. Bewertung der Methoden für die Anwendung in der Präzisionskoordinatenmesstechnik mit Bildsensoren

Bei Messungen, die zur Überwachung von Toleranzen herangezogen werden, müssen zur Prüfung auf Übereinstimmung/Nicht-Übereinstimmung nach DIN EN ISO 14253-1 [ISO99] die prüfmerkmalspezifischen Messunsicherheiten berücksichtigt werden. Die prüfmerkmalbezogene Messunsicherheit beschreibt die Messunsicherheit einer speziellen Messaufgabe, beispielsweise Durchmesser eines Zylinders oder Abstand zweier Geraden, unter Berücksichtigung aller Einflüsse auf den Messprozess. Die Notwendigkeit, prüfmerkmalbezogene Messunsicherheiten anzugeben, ergibt sich unmittelbar aus den Forderungen in [DIN08] an ein Qualitätssicherungssystem. Der allgemeine Rahmen zur Bestimmung der aufgabenspezifischen Messunsicherheit ist durch Richtlinien [VDI06a] und Normen [DIN99b], [DIN09c], [DIN99a] vorgegeben, allerdings regeln diese primär nur das mathematisch-statistische Verfahren zur Kombination der Messunsicherheitsbeiträge.

Für einfache Messsysteme kann die prüfmerkmalbezogene Messunsicherheit nach den Empfehlungen des international gültigen Leitfadens zur Ermittlung der Messunsicherheit (GUM) [DIN99b] durch ein Messunsicherheitsbudget ermittelt werden. Für Messungen mit KMGs hingegen ist die Formulierung eines klassischen Modells der Messung auf Grund der Komplexität der Messprozesse für die meisten Messaufgaben sehr aufwändig oder nicht möglich.

Problematisch bei der GUM-konformen Messunsicherheitsermittlung gestaltet sich die Charakterisierung der Eingangsgrößen des Messprozesses. Speziell in der KMT mit Bildsensoren stellt die Erfassung und Charakterisierung einzelner Eingangsgrößen eine besondere Herausforderung dar. Teilweise ist es auf Grund vielfältiger nicht analysierbarer Korrelationen nicht möglich Eingangsgrößen getrennt zu messen und zu bewerten. Zudem müsste eine solche Analyse der Eingangsgrößen für jede Messaufgabe erneut durchgeführt werden, da das Messobjekt einen entscheidenden Einfluss auf die Wirkung der Eingangsgrößen hat und vor allem Wechselwirkungen zwischen Messobjekt und Bildsensor zur Messunsicherheit beitragen. Weiterhin sind Anzahl und Art einzustellender Messparameter bei Koordinatenmessungen mit Bildsensoren auf die spezifische Messaufgabe ausgerichtet. Bei einer zum Standard-GUM-Verfahren konformen Messunsicherheitsermittlung müsste für

jede Messaufgabe ein individuelles Modell des Messprozesses entworfen werden. Diese Vorgehensweise wäre für den Einsatz in der Praxis nicht zielführend und effizient.

In den bekannten Normen [DIN06], [DIN09b] und Richtlinien [VDI05a], [VDI89], [VDI01], [VDI05b], [VDI97], [VDI06a], [VDI06b] werden die Kenngrößen und Prüfverfahren für die Genauigkeit von Koordinatenmessgeräten beschrieben. Sie eignen sich jedoch nicht zur Ermittlung der aufgabenspezifischen Messunsicherheit von Prüfmerkmalen [Her07].

Die nach [VDI97], [VDI05b] und [DIN09c] zu bestimmenden Antastabweichungen beziehen sich ausschließlich auf Messungen an idealen Messobjekten (Normale oder kalibrierte Werkstücke). In der industriellen Messtechnik können diese Verfahren aus Effizienzgründen nicht für jede Messaufgabe spezifisch durchgeführt werden. Die Verfahren in [VDI97] und [VDI05b] sind somit nur für Prüfmittelfähigkeitsuntersuchungen bzw. Abnahmeprüfungen und die Prüfmittelüberwachung geeignet. Das in [DIN09c] beschriebene Verfahren bezieht zwar Unsicherheiten des Messobjekts mit ein, setzt aber ein dem Messobjekt gleichartiges kalibriertes Referenzobjekt voraus. Weicht das Referenzobjekt von den realen Messobjekten ab, werden zusätzliche Messunsicherheiten z. B. durch variierende Material- oder Oberflächeneigenschaften geschätzt. Die Messunsicherheitsangabe ist somit anteilig subjektiv, wodurch ihre Zuverlässigkeit und Nachvollziehbarkeit nicht eindeutig gegeben ist. Die Messunsicherheitsermittlung für Koordinatenmessungen mit Bildsensoren basiert gemäß [DIN09c] auf Wiederholmessungen, die zusätzlich zur eigentlichen Messung durchzuführen sind. Auf diese Weise kann die Messunsicherheitsermittlung nicht automatisiert werden. Die Anwendungen, in denen Größen unter Wiederholbedingungen gemessen und daraus Mittelwerte und Standardabweichungen berechnet werden, bilden in der modernen Messtechnik die Ausnahme [HLW97]. In der Praxis der Prüftechnik und der Qualitätssicherung überwiegen Einzelmessungen. Bekannte Lösungen zur Messunsicherheitsermittlung bei Koordinatenmessungen mit Bildsensoren sind daher zeit- und kosteneffizient, unzuverlässig und nicht in jedem Fall realisierbar.

3. Zusammenfassung und Präzisierung der Aufgabenstellung

3.1. Zusammenfassung des aktuellen Entwicklungsstands

Industrielle Messungen der Geometrie technischer Objekte basieren auf Längenmessungen. Als Messgeräte werden Koordinaten- und Formmessgeräte eingesetzt. Koordinatenmessungen stellen eine spezielle Form indirekter Messungen dar. In den meisten Anwendungen der KMT ist die prüfmerkmalbezogene Messgröße nicht über eine mathematische Beziehung mit den Eingangsgrößen verknüpft, sondern kann erst aus einem funktionellen Zusammenhang mehrerer vorgelagerter Messgrößen gewonnen werden. Die Eingangsgrößen, speziell einzelne Koordinatenpunkte, der prüfmerkmalbezogenen Messgröße können in diesen Fällen selbst Messgrößen sein. Im ersten Teil dieser Arbeit wurden aktuelle Normen und Richtlinien zur Messunsicherheitsermittlung in der KMT analysiert und hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit für Präzisionskoordinatenmessungen mit Bildsensoren bewertet. In Tabelle 3.1 werden diese Verfahren systematisch zusammengefasst.

Tabelle 3.1.: Zusammenfassung der untersuchten Verfahren

Verfahren	Grundidee	Angabe des Messergebnisses	Anwendbarkeit für Bildsensoren
klassische Fehlerrechnung	Wiederholmessungen	$x_m - F \pm [ak_1 s + f_f + f_F]$	mit entsprechendem Aufwand anwendbar
Standard ISO-GUM-Verfahren	deterministisches Modell, Bayes Theorie	$y \pm k \cdot u(y)$ mit: $u(y)$ nach Gl. (2.25), (2.32)	zunächst problematisch da, Ursache-Wirkung-Zusammenhang nicht vollständig erfassbar
Beiblatt 1 des ISO-GUM	numerische Fortpflanzung von Verteilungen	y und U resultieren aus der diskreten Häufigkeitsverteilung der Werte der Messgröße	sehr vorteilhaft anwendbar
DIN ISO/TS 15530-3	Substitution, Wiederholmessungen	$y \pm k \cdot \sqrt{u_K^2 + u_M^2 + u_W^2} + b $	abhängig von der Ähnlichkeit zwischen Messobjekt und Referenz

Folgende Feststellungen bilden die Voraussetzung für die Konzeption einer praktikablen Vorgehensweise zur Messunsicherheitsermittlung in der KMT mit Bildsensoren [WKL08].

- Alle auf dem Standard-GUM-Verfahren beruhenden Richtlinien sind für Geometriemessungen an KMGs aufgrund der damit verbundenen nichtlinearen Ausgleichsalgorithmen nicht anwendbar, denn die Bildung einer geschlossenen Modellgleichung ist nicht möglich. Daher ist das Modell nicht differenzierbar, was die analytische Berechnung der Sensitivitätskoeffizienten ausschließt. Die quadratische Unsicherheitsfortpflanzung nach Gauß kann nicht realisiert werden. Es eignen sich ausschließlich numerische Verfahren, wie z. B. MCM [BB107].
- Das Ursache-Wirkung-Prinzip kann für die prüfmerkmalbezogene Messunsicherheitsermittlung von Präzisionskoordinatenmessungen mit Bildsensoren nicht angewendet werden. Ist es überhaupt möglich, Messunsicherheitsbeiträge von Eingangsgrößen zu bewerten, dann kann anhand dieser kein direkter Rückschluss auf die Messunsicherheit der Messgröße getroffen werden (Bild 3.1).
- Das digitale Bild des Messobjekts bildet bei Längenmessungen durch KMGs mit Bildsensoren die Grundlage zur Berechnung von Messgrößen.
- Messungen mit Bildsensoren basieren auf der Kantendetektion durch Intensitätsunterschiede an Oberflächenstrukturen des Messobjekts.
- In der Präzisionskoordinatenmesstechnik mit Bildsensoren wird ausschließlich die Wirkung (digitales Bild des Messobjekts) aller Einflüsse auf den Messprozess analysiert.
- Zur Bewertung der Qualität der Kantendetektion können Bildkenngrößen (BK), wie z. B. Kontrast, Intensität und Kantenbreite, herangezogen werden.
- Die Ursachen hoher Messunsicherheiten in der Präzisionskoordinatenmesstechnik mit Bildsensoren (z. B. Material und Oberfläche des Messobjekts, Erfahrungsgrad der Messperson) können variieren, während die Wirkung, z. B. ein unzureichender Kontrast, gleich ist (Bild 3.1).
- Es ist nicht möglich nur auf der Grundlage eines digitalen Bildes genaue Aussagen über die Ursachen der Messunsicherheit zu treffen.

3.2. Präzisierung der Aufgabenstellung

Ziel dieser Arbeit ist es, eine Methode zu erforschen, die automatisiert Aussagen über die prüfmerkmalbezogene Messunsicherheit von Präzisionskoordinatenmessungen mit Bildsensoren, speziell CCD-Bildsensoren, trifft, ohne dass zusätzlich aufwendige Wiederholmessungen an Referenzmessobjekten oder am Messobjekt selbst durchzuführen sind. Das Verfahren, welches Gegenstand dieser Arbeit ist, soll universell für Präzisionskoordinatenmessungen mit Bildsensoren anzuwenden und

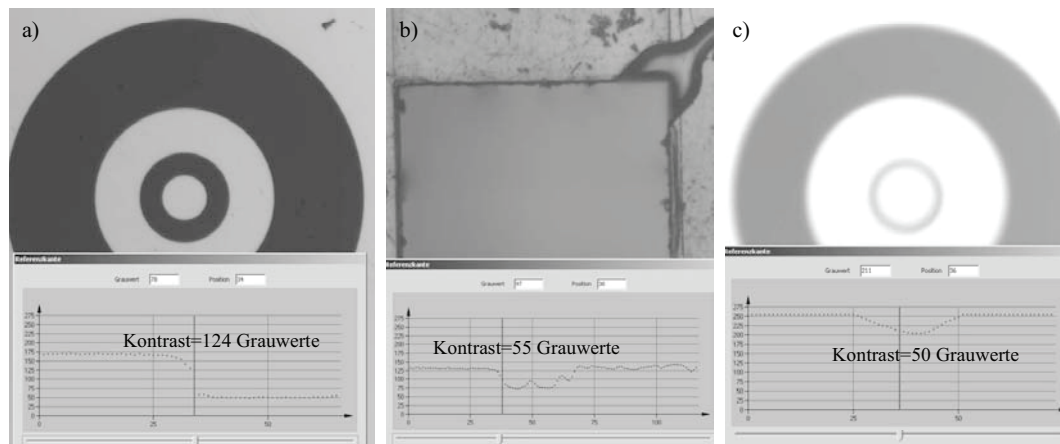


Bild 3.1.: Bildbeispiele (5-fache Vergrößerung, Aufsichtmessung): a) ideales Messobjekt, 2D-Kalibrierschablone mit Chrom-Glas-Strukturübergang, gemessen unter optimalen Messparameter-Einstellungen; b) transparentes Kunststoff-Spritzgussbauteil, gemessen unter optimalen Messparameter-Einstellungen; c) ideales Messobjekt, 2D-Kalibrierschablone mit Chrom-Glas-Strukturübergang, gemessen unter unvoreilhaftesten Messparameter-Einstellungen

demzufolge unabhängig von individuellen Messobjekteigenschaften sein.

Daher wird, in Ergänzung zur Ermittlung der Messunsicherheit gemäß dem Standard-GUM-Verfahren, welches die Analyse und Messunsicherheitsbewertung aller Einflüsse auf den Messprozess in Ursache-Wirkung-Richtung empfiehlt [DIN99b], ein Ansatz verfolgt, bei dem die Ursachen der Messabweichungen vorrangig nicht untersucht werden. Stattdessen wird deren Wirkung anhand ausgewählter Bildkenngrößen (BK) im Grauwertbild analysiert. Es erfolgt eine Bewertung der Bildqualität, die einerseits auf Eigenschaften des Messobjekts und andererseits auf Einflüsse des Antastprozesses zurückzuführen ist.

Da alle Messaufgaben auf der Ermittlung von 2D-Koordinatenpunkten basieren, soll in einem ersten Schritt ein automatisierbares Verfahren zur Messunsicherheitsbewertung eines 2D-Koordinatenpunkts entwickelt werden. Die Grundlage hierfür soll ein Vektor an Bildkenngrößen liefern, der basierend auf den vorhandenen Algorithmen zur Detektion von 2D-Koordinatenpunkten, so genannter Kantenortkriterien, hergeleitet wird. Systematische Messabweichungen der Kantenortkriterien bleiben unberücksichtigt.

Die erzielten Messunsicherheiten der 2D-Koordinatenpunkte werden entsprechend der Messaufgabe auf der Basis der MCM fortgepflanzt [BB107] (Bild 3.2). In der vorliegenden Arbeit wird dieser Ansatz tiefgründig untersucht und anhand ausgewählter Messobjekte demonstriert. Durch die neuartige Vorgehensweise werden Voraussetzungen für die Angabe eines vollständigen Messergebnisses, bestehend aus bestem Schätzwert und erweiterter Messunsicherheit, wie in [DIN99b] gefordert, für praxisrelevante Messungen mit Bildsensoren an realen Messobjekten geschaffen. Zusätzlich kann automatisiert eine Aussage zu möglichen Fehlentscheidungsrisiken getroffen werden, wenn das Messunsicherheits-Toleranz-Verhältnis zu Grunde gelegt wird.

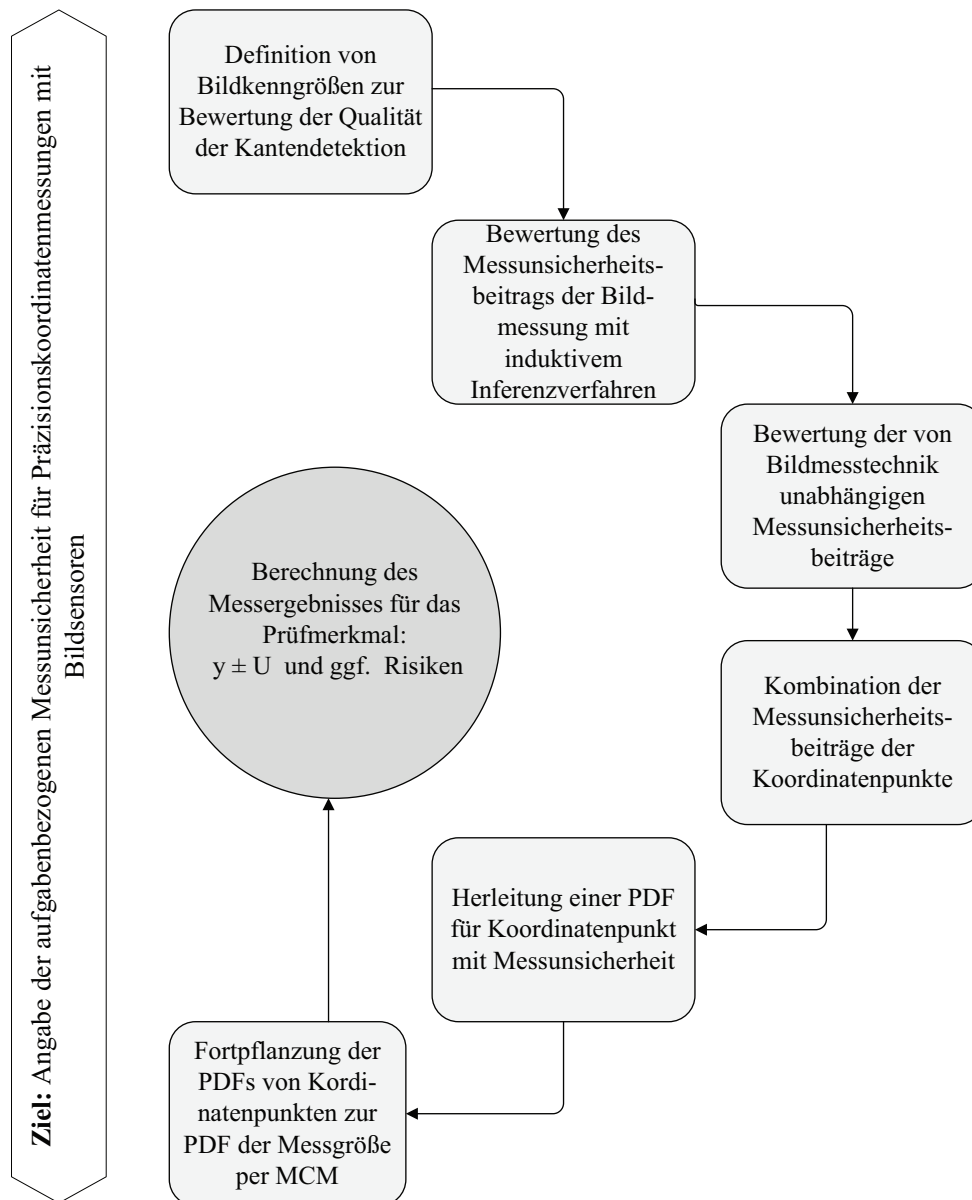


Bild 3.2.: Ziel und Vorgehensweise in dieser Arbeit

Teil II.

THEORETISCHE UNTERSUCHUNGEN ZUR PRÜFMERKMALBEZOGENEN MESSUNSICHERHEITSERMITTLUNG IN DER PRÄZISIONSKOORDINATENMESSTECHNIK MIT BILDSENSOREN

4. Messprozess zur Messung von 2D-Koordinatenpunkten mit Bildsensoren

4.1. Messsystem zur Messung von 2D-Koordinatenpunkten mit Bildsensoren

Wird das Messsystem als kompakte Einheit betrachtet, ist eine abstrakte Darstellung in Form einer Black-Box möglich [Mar05]. Zur Analyse der relevanten Funktionseinheiten des komplexen Systems wird das Prinzip der Dekomposition eingesetzt. In einem ersten Dekompositionsschritt erfolgt die grobe Unterteilung in die Komponenten Antastsystem, Koordinatenmessgerät und Messobjekt. Durch weitere Dekomposition wird das Sensorsystem in die Bildverarbeitung und das optische System unterteilt (Bild 4.1) [WKLS08a].

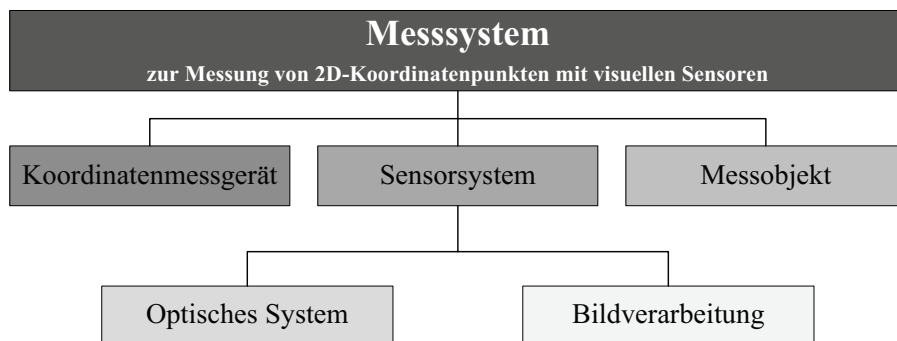


Bild 4.1.: Dekomposition des Messsystems zur 2D-Koordinatenmessung mit Bildsensoren

4.1.1. Koordinatenmessgerät

Koordinatenmessgeräte (KMGs) basieren auf kartesisch angeordneten Koordinatenachsen mit linearen Maßstäben [CN03]. In [DIN03b] wird KMG wie folgt definiert:

Ein KMG ist ein Messsystem, geeignet zur Messung räumlicher Koordinaten, ausgestattet mit Mitteln zur Bewegung eines Messkopfsystems zur Bestimmung von räumlichen Koordinaten von Punkten auf einer Werkstückoberfläche [DIN03b].

4.1.2. Sensorsystem

Optische Sensoren werden unterteilt in Sensoren, die die Messung in Richtung der Sensorachse realisieren (Abstandssensoren) und solche, bei denen die Messung in lateraler Richtung zur Sensorachse erfolgt (Lateralsensoren) (Bild 4.2). Die

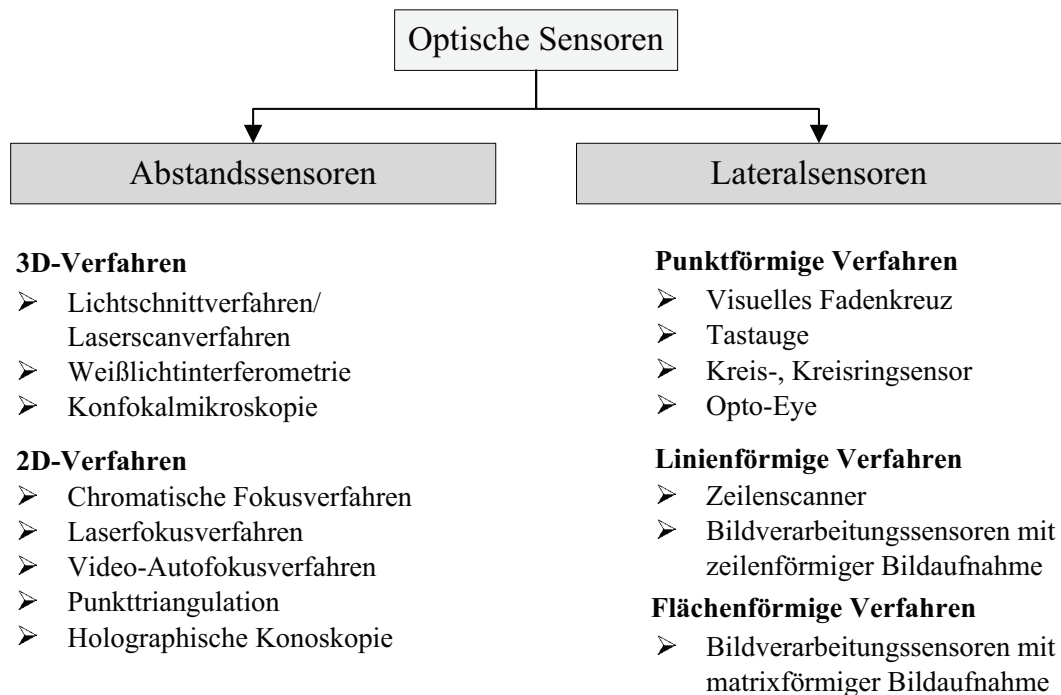


Bild 4.2.: Einteilung optischer Sensoren für KMGs [VDI05b], [VDI05c]

Thematik dieser Arbeit ist ausschließlich auf den Einsatz von visuellen Sensoren (Bildverarbeitungssensoren) aus der Gruppe der Lateralsensoren ausgerichtet.

Visuelle Sensoren sind Sensoren, die zur Bestimmung von Messpunkten die Intensitätsverteilung des optischen Bildes des Messobjekts in der Bildebene auswerten [VDI05b], [CN03].

Der am häufigsten eingesetzte visuelle Sensor ist der Bildverarbeitungssensor mit Matrixkamera, bei dem das Messobjekt auf einen Flächenwandler abgebildet wird (Bild 4.3). Die Kameraelektronik wandelt das optische Bild in ein elektrisches Signal. Dieses Signal wird mit Hilfe einer weiteren Elektronik in ein digitales Bild umgesetzt, das letztlich zur rechnerinternen Bestimmung von Messpunkten mit einer entsprechenden Bildverarbeitungssoftware herangezogen wird. Zur Digitalisierung der Bilder werden heute üblicherweise Kameras auf Halbleiterbasis (CCD, CMOS) in Verbindung mit PC-Komponenten für die Bilderfassung (Frame-Grabber) eingesetzt [VDI05b]. Die Basis für jede Messung mit visuellen Sensoren bildet das möglichst kontraststarke Darstellen und somit die Beleuchtung der zu messenden Prüfmerkmale. Die Abbildung des beleuchteten Messobjekts in die Ebene des optoelektronischen Wandlers erfolgt mit Hilfe eines Objektivs. Für die Ausführung dieser Abbildungsoptik existieren verschiedene Alternativen.

4.1.3. Auflösungsbegrenzung visueller Sensoren

Die Kenngrößen der Optik beeinflussen die Messunsicherheit direkt. Bedingt durch die Bauweise optischer Instrumente wird deren Auflösung durch Beugung z. B. am kreisförmigen Objektivgehäuse begrenzt. Dies entspricht der Fraunhofer-Beugung an

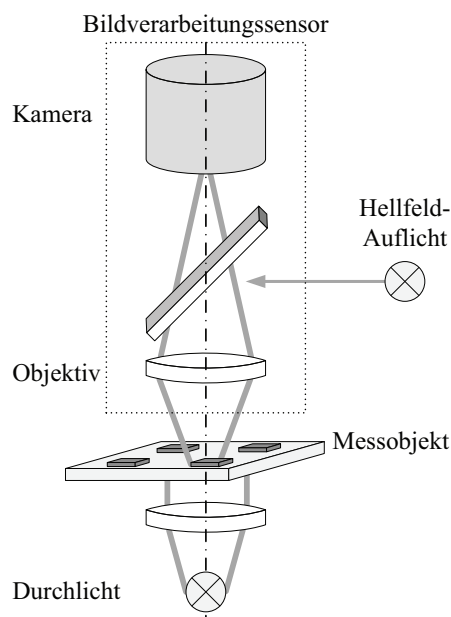


Bild 4.3.: Prinzipieller Aufbau eines Bildverarbeitungssensors mit Auf- und Durchlichtbeleuchtung [CN03]

einer Kreisblende mit Durchmesser D . Das beugungsbedingte Auflösungsvermögen $1/(\Delta l)_{\min}$ eines optischen Systems mit Brennweite f_{Objektiv} bei einer Wellenlänge λ ist nach dem Lord-Rayleigh-Kriterium definiert als [Hec01], [Mes99]:

$$1/(\Delta l)_{\min} \quad \text{mit: } (\Delta l)_{\min} = \frac{1,22 \cdot f_{\text{Objektiv}} \cdot \lambda}{D}. \quad (4.1)$$

Dabei stellt $(\Delta l)_{\min}$ den gerade noch auflösbaren Abstand zweier benachbarter Objektpunkte dar.

Außer durch die Beugung wird das Auflösungsvermögen visueller Sensoren durch die Geometrie der Bildpunkte (Pixel) des Bildverarbeitungssensors begrenzt. Aus der Vergrößerung und Kenntnis der Eigenschaften des optoelektronischen Wandlers ist unmittelbar ein Rückschluss auf die erzielbare Auflösung des visuellen Sensors möglich [VDI05b], [CN03].

Über eine Interpolation der Amplituden benachbarter Bildpunkte kann die Kontur exakter, mit höherer Auflösung als das Bildpunktraster bestimmt werden (Subpixelverfahren). Die Messunsicherheit, die ohne Subpixeling direkt durch den Pixelabstand des CCD-Chips begrenzt wird, kann erheblich reduziert werden.

4.2. Messprinzip und Messmethode

Das Messprinzip, welches die „wissenschaftliche Grundlage des Messverfahrens“ darstellt, [ISO08], [DIN99b], ist der *äußere photoelektrische Effekt*:

Wird ein Metall elektromagnetischer Strahlung z. B. Licht ausgesetzt, emittiert es Elektronen [Hec01].

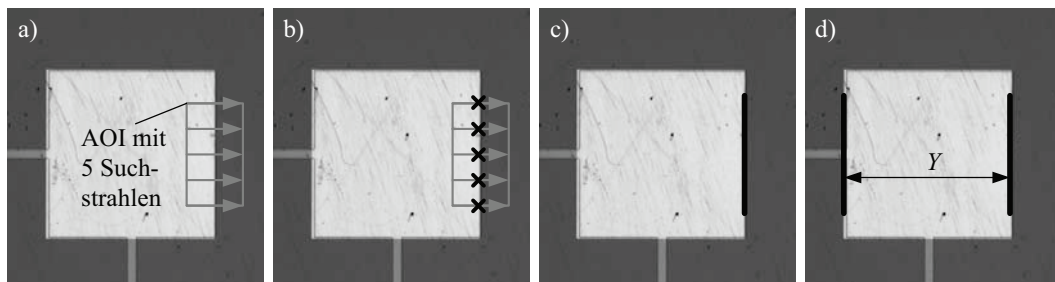


Bild 4.4.: Handlungsabfolge einer Längenmessung mit Bildverarbeitungssensor am Beispiel eines MST-Bauteils aus Silizium und Chrom (1-facher Abbildungsmaßstab, Auflichtmessung)

Die Messmethode, d.h. die „allgemeine Beschreibung der logischen Abfolge von Handlungen zur Durchführung von Messungen“ [DIN99b], wird im Folgenden kurz dargestellt (Bild 4.4).

- a) Ein Messfeld (AOI) mit einer festgelegten Anzahl paralleler Suchstrahlen wird mit einer vordefinierten Messszene eines digitalen Bildes überlagert.
- b) Zwischen Suchstrahlen und im Bild durch Intensitätsunterschiede sichtbaren Konturen des Messobjekts werden nach spezifizierten Algorithmen (*Kantenortkriterien* - KOK) Schnittpunkte ermittelt.

Kantenortkriterien stellen die mathematisch notwendige Eigenschaft eines Kantenübergangs dar, die den genauen Ort des Helligkeitsübergangs als Kante definiert. Die verschiedenen Antestalgorithmen verwenden unterschiedliche Kantenortkriterien. Die bedeutendsten sind: Schwellwertverfahren, differentielle Verfahren, integrale Verfahren und Korrelation [Vis08], [Küh97].

- c) Aus den Koordinatenpunkten wird das Geometrieelement über ein mathematisches Verfahren (z. B. Ausgleichsrechnung nach Gauß [Hul71], [Pap94], [Wol75]) berechnet, das zur visuellen Kontrolle im Monitorbild dem Originalgraubild überlagert dargestellt wird [VDI05b].
- d) Die Messgröße z. B. der Abstand zweier Geraden wird aus den zugehörigen Geometrieelementen berechnet.

Bildverarbeitungssensoren mit Matrixkamera verfügen als *messende Sensoren* über einen zweidimensionalen Messbereich [CN03]. Damit ist es möglich mehrere Koordinatenpunkte ohne Bewegung der Koordinatenachsen zu messen (Im-Bild-Messung). Sind die zu messenden Prüfmerkmale des Messobjekts größer als der Messbereich, sind Bewegungen der Koordinatenachsen zwischen der Messung von Koordinatenpunkten zur Ermittlung der Messgröße erforderlich (Am-Bild-Messung). Sowohl bei Im-Bild-Messungen, als auch bei Am-Bild-Messungen kommt es zu einer Überlagerung des Sensorkoordinatensystems mit dem Koordinatensystem des KMGs [CN03]. Die Software, mit der die Messpunkte aus den digitalisierten Bilddaten ermittelt

werden, beeinflusst wesentlich die Qualität der Messergebnisse von Bildverarbeitungssensoren. Die durch die Kamera mit elektronischem Bildsensor erzeugten Bilder, welche zur Ermittlung des Werts der Messgröße (2D-Koordinatenpunkt) herangezogen werden, enthalten die geometrische Information über Lage und Verlauf der Messobjektstrukturübergänge. Zu diesen Strukturübergängen zählen folgende optisch wirksame Grenzübergänge:

- Körperkanten (geometrische Ausprägung),
- Grenzlinien zwischen Materialübergängen (Materialausprägung),
- Grenzlinien zwischen Farbübergängen (spektrale Ausprägung),
- Grenzlinien zwischen Oberflächen unterschiedlicher Profilierung, beispielsweise unterschiedlicher Rauheit (Oberflächenausprägung).

Die Präzisionskoordinatenmesstechnik mit Bildsensoren basiert auf der Ermittlung von Koordinatenpunkten. Dabei erfolgt für jeden Koordinatenpunkt eine separate Bestimmung des Kantenorts [VDI05b]. Eine Besonderheit von Längenmessungen besteht darin, dass die Berechnung der Messwerte durch Ausgleichsrechnung erfolgt. Die für die messtechnische Anwendung erforderliche Berechnung von Geometrieelementen und Kombinationen aus diesen bedingt die Fortpflanzung der Standardunsicherheiten eingehender Koordinatenpunkte. Daher können auf der Grundlage eines Modells für die Messunsicherheitsermittlung von 2D-Koordinatenpunkten alle für die KMT mit Bildsensoren relevanten Messaufgaben bewertet werden.

5. Vorgehensweise zur Ermittlung der Messunsicherheit von 2D-Koordinatenpunkten

5.1. Induktives Inferenzverfahren zur Messunsicherheitsermittlung

In Kapitel 3 wurde dargestellt, dass das Ursache-Wirkung-Prinzip nach GUM für die Messunsicherheitsermittlung in der KMT mit Bildsensoren nicht effizient angewendet werden kann. Der in dieser Arbeit untersuchte Ansatz beruht auf dem Einsatz wissensbasierter Verfahren. Speziell wird eine induktive Inferenzmethode zur Schlussfolgerung der Messunsicherheit auf der Grundlage signifikanter Bildkenngrößen hergeleitet [WKL⁺09].

5.1.1. Wissensbasierte Verfahren

Wissensbasierte Verfahren bauen auf einer expliziten Wissensbasis auf, die z. B. aus einer Menge von Fakten und Schlussfolgerungsregeln besteht. Mithilfe von wissensbasierten Techniken werden Verfahren entwickelt, die sich insbesondere für prognostische Problemstellungen eignen, die wegen hoher Komplexität, Unsicherheit oder unvollständiger Information mit herkömmlichen algorithmischen und kombinatorischen Methoden nicht oder nur begrenzt gelöst werden können. Sie beinhalten Regeln, die definierte Objekte zueinander in Beziehung setzen und Lösungen durch logisches Schließen ableiten [Bod03]. Das Phänomen des menschlichen Schließens besteht darin, aus vorhandenem Wissen W (Wissensbasis) weiteres Wissen W_S nach einem bestimmten logischen Mechanismus IR schlussfolgern zu können. Dabei ist Wissen definiert als *Fähigkeit, Daten richtig zu interpretieren* [KT01]. Gesucht ist eine Relation IR , so dass W und W_S in Relation IR stehen [Bib93]. Das Problem beim Bestimmen von IR besteht in der Unvollständigkeit vorhandener Informationen und der Unschärfe der Wissensbasis.

Das induktive Inferenzverfahren ermöglicht die Schlussfolgerung von allgemeinen Funktionen und Konzepten aus speziellen Beobachtungen, um weitere Annahmen und Vermutungen zu gewinnen. Dabei besteht zwischen dem vorhandenen Wissen W und dem geschlussfolgerten Wissen W_S eine Inferenzrelation IR [Bib93], [BKI08].

Ist W gegeben, ermöglicht IR die Schätzung von W_S . Sind W und W_S gegeben, so dient IR zum Test, ob W und W_S in logischer Beziehung zueinander stehen. Die Relation IR ist experimentell beobachtbar. Ziel ist es, aus einzelnen Beobachtungen eine allgemeine Charakterisierung dieser Relation zu abstrahieren. Ist dies gelungen, stellt sich die anschließende Aufgabe algorithmische Verfahren anzugeben, die bei gegebenem W die Richtigkeit von Schlussfolgerungen testen bzw. Prognosen herleiten.

5. Vorgehensweise zur Ermittlung der Messunsicherheit von 2D-Koordinatenpunkten

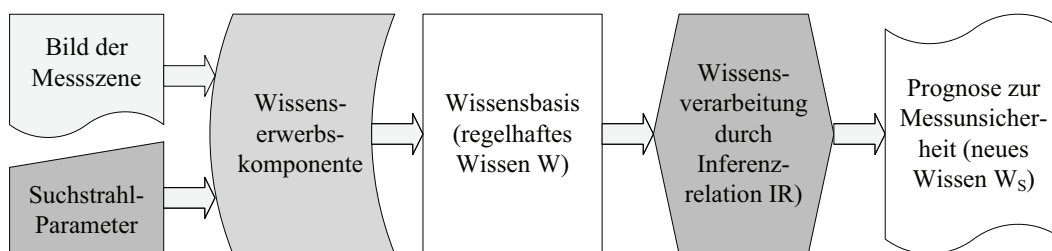


Bild 5.1.: Schematischer Aufbau eines wissensbasierten Systems nach [BKI08], angepasst für die Schätzung der Messunsicherheit in der KMT mit Bildsensoren

Übertragen auf die Problemstellung in dieser Arbeit wird W aus Voruntersuchungen gewonnen. Das digitale Bild der Messszene dient hier als passiver Wissensspeicher, aus dem prüfmerkmalbezogen innerhalb der Wissenserwerbskomponente (Bild 5.1) die relevanten Bildkenngrößen berechnet werden. Durch die IR wird W_S , die prüfmerkmalbezogene Messunsicherheit einer aktuellen Einzelmessung, abgeleitet.

5.1.2. Abbildung des vorhandenen Wissens durch Bildkenngrößen

Die Grundidee der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Vorgehensweise basiert auf der Analyse des Signalverlaufs von Suchstrahlen. Zur Bewertung der Güte des Kantenorts werden Bildkenngrößen (BK) definiert. Die BK werden während der Messung durch die Rechen- und Steuereinheit des Messgerätes unter Anwendung zugeordneter Rechenvorschriften bestimmt. BK werden dabei direkt aus den Bildinformationen eines einzelnen Suchstrahls abgeleitet. Je nach Messtyp kann es zur Bestimmung von signifikanten BK erforderlich sein, zur Bewertung der Güte des Kantenorts den Konturverlauf einzubeziehen. In diesem Fall können zusätzlich Bildinformationen benachbarter Suchstrahlen erfasst werden.

Das bei der Messung eingesetzte Kantenortkriterium (KOK) hat wesentlichen Einfluss auf die ermittelten Werte von 2D-Koordinatenpunkten und damit auch auf die prüfmerkmalbezogene Messunsicherheit. Für die Definition von BK sind die Algorithmen der KOK und somit die Vorgehensweise bei der Analyse des Signalverlaufs zur Detektion von Hell-Dunkel-Übergängen entscheidend. Ein besonders für Durchlichtmessungen gut geeignetes Verfahren ist das KOK *Dynamischer Schwellwert* (A1). Es entspricht der Kombination aus einem automatisierten *Schwellwertverfahren* und Subpixeling durch Integration. Basierend auf den Algorithmen des KOKs *Dynamischer Schwellwert* werden im Folgenden BK abgeleitet und im Hinblick auf Zusammenhänge zu experimentell erzielten Standardabweichungen untersucht.

Auf der Grundlage des *Dynamischen-Schwellwert-Algorithmus* werden im Rahmen der vorliegenden Arbeit Zusammenhänge zwischen experimentell erzielten Standardabweichungen und BK analysiert (Tabelle 5.1).

Tabelle 5.1.: Im Rahmen der Arbeit untersuchte Bildkenngrößen (BK)

BK	Definition
$u_{R,MCM}$	Standardunsicherheit des SPKO, die sich durch numerische Fortpflanzung des Gesamtrauschens des Bildsensors durch die MCM ergibt
GW_u	kleinster Grauwert mit Häufigkeit $H(GW_u) \geq 2$
GW_o	höchster Grauwert mit Häufigkeit $H(GW_o) \geq 2$
GW_m	mittlerer Grauwert $GW_m = (GW_o + GW_u)/2$
K_{glob}	globaler Kontrast $K_{glob} = GW_o - GW_u$
$H_{max,u}$	maximale Häufigkeit eines Grauwerts im Intervall $[GW_u; GW_m]$
$GW_{max,u}$	maximaler Grauwert im Intervall $[GW_u; GW_m]$
$H_{max,o}$	maximale Häufigkeit eines Grauwerts im Intervall $[GW_m; GW_o]$
$GW_{max,o}$	maximaler Grauwert im Intervall $[GW_m; GW_o]$
$H_{m,u}$	mittlere Häufigkeit $H_{m,u} = (H(GW_u) + H_{max,u})/2$ eines Grauwerts im Intervall $[GW_u; GW_m]$
$H_{m,o}$	mittlere Häufigkeit $H_{m,o} = (H(GW_o) + H_{max,o})/2$ eines Grauwerts im Intervall $[GW_m; GW_o]$
ΔSP	Differenz der Grauwert-Schwerpunkte $\Delta SP = SP_o - SP_u$
SP_u	Grauwert-Schwerpunkt im Intervall $[GW_u; GW_m]$ (A1.1)
SP_o	Grauwert-Schwerpunkt im Intervall $[GW_m; GW_o]$ (A1.2)
$GW_{SP,min}$	kleinster Grauwert im Subpixelbereich $[P_{SP} - d; P_{SP} + d]$
$GW_{SP,max}$	größter Grauwert im Subpixelbereich $[P_{SP} - d; P_{SP} + d]$
K_{SP}	Kontrast im Subpixelbereich $K_{SP} = GW_{SP,max} - GW_{SP,min}$
F_L	Integral im linken Subpixelbereich $[P_{SP} - d; P_{SP}]$
F_R	Integral im rechten Subpixelbereich $[P_{SP}; P_{SP} + d]$
A_{Pixel}	Anzahl der Pixel entlang des gesamten Suchstrahls
$A_{Pixel,L}$	Anzahl der Pixel entlang des Suchstrahls im Intervall $[P_A; P_{SP} + d]$
$A_{Pixel,R}$	Anzahl der Pixel entlang des Suchstrahls im Intervall $[P_{SP} + d; P_E]$

5. Vorgehensweise zur Ermittlung der Messunsicherheit von
2D-Koordinatenpunkten

BK	Definition
$K_{\text{abs,L}}$	absoluter Kontrast im Intervall $[P_A; P_{\text{SP}} - d]$: $K_{\text{abs,L}} = GW_{\text{max},[P_A; P_{\text{SP}} - d]} - GW_{\text{min},[P_A; P_{\text{SP}} - d]}$
$K_{\text{abs,R}}$	absoluter Kontrast im Intervall $[P_{\text{SP}} + d; P_E]$: $K_{\text{abs,R}} = GW_{\text{max},[P_{\text{SP}} + d; P_E]} - GW_{\text{min},[P_{\text{SP}} + d; P_E]}$
KK	Kreuzkorrelation zu einer idealen Referenzkante
K_m	mittlerer Kontrast: $K_m = \left \frac{1}{A_{\text{Pixel,L}}} \sum_{j=P_A}^{P_{\text{SP}} - d} GW_j - \frac{1}{A_{\text{Pixel,R}}} \sum_{j=P_{\text{SP}} + d}^{P_E} GW_j \right $
s_L	Standardabweichung im Intervall $[P_A; P_{\text{SP}} - d]$: $s_L = \sqrt{\frac{A_{\text{Pixel,L}} \sum_{j=P_A}^{P_{\text{SP}} - d} GW_j^2 - \left(\sum_{j=P_A}^{P_{\text{SP}} - d} GW_j \right)^2}{A_{\text{Pixel,L}} (A_{\text{Pixel,L}} - 1)}}$
s_R	Standardabweichung im Intervall $[P_{\text{SP}} + d; P_E]$: $s_R = \sqrt{\frac{A_{\text{Pixel,R}} \sum_{j=P_{\text{SP}} + d}^{P_E} GW_j^2 - \left(\sum_{j=P_{\text{SP}} + d}^{P_E} GW_j \right)^2}{A_{\text{Pixel,R}} (A_{\text{Pixel,R}} - 1)}}$
\overline{GW}_L	mittlerer Grauwert im Intervall $[P_A; P_{\text{SP}} - d]$: $\overline{GW}_L = \frac{1}{A_{\text{Pixel,L}}} \sum_{j=P_A}^{P_{\text{SP}} - d} GW_j$

5.1. Induktives Inferenzverfahren zur Messunsicherheitsermittlung

BK	Definition
\overline{GW}_R	<p>mittlerer Grauwert im Intervall $[P_{SP} + d; P_E]$:</p> $\overline{GW}_R = \frac{1}{A_{\text{Pixel,R}}} \sum_{j=P_{SP}+d}^{P_E} GW_j$
I_m	<p>mittlere Intensität:</p> $I_m = \frac{\left \frac{1}{A_{\text{Pixel,L}}} \sum_{j=P_A}^{P_{SP}-d} GW_j + \frac{1}{A_{\text{Pixel,R}}} \sum_{j=P_{SP}+d}^{P_E} GW_j \right }{2}$
Δ_{Sprung}	<p>Abweichung zur idealen Sprungfunktion im Subpixelbereich $[P_{SP} - d; P_{SP} + d]$</p>
$NS_{f''}$	<p>Anzahl der Nullstellen der 2. Ableitung des Grauwertverlaufs im Subpixelbereich $[P_{SP} - d; P_{SP} + d]$</p>
A_R	<p>Anstieg einer Regressionsgeraden im Subpixelbereich $[P_{SP} - d; P_{SP} + d]$:</p> $A_R = \frac{(2d+1) \cdot \sum_{j=P_{SP}-d}^{P_{SP}+d} (GW_j \cdot H(GW_j)) - \sum_{j=P_{SP}-d}^{P_{SP}+d} GW_j \cdot \sum_{j=P_{SP}-d}^{P_{SP}+d} H(GW_j)}{(2d+1) \cdot \sum_{j=P_{SP}-d}^{P_{SP}+d} H(GW_j)^2 - \left(\sum_{j=P_{SP}-d}^{P_{SP}+d} H(GW_j) \right)^2}$
s_{norm}	<p>normierte Standardabweichung in Prozent:</p> $s_{\text{norm}} = \frac{100 \cdot (0,5 \cdot s_L + 0,5 \cdot s_R)}{256}$

Die Bestimmung der Werte der BK erfolgt bei der Voruntersuchung und bei der Einzelmessung nach gleichen Rechenvorschriften automatisiert durch die Rechen- und Steuereinheit des Messgerätes. Als geeignet für die Wissensbasis des Inferenzverfahrens werden BK definiert, die eine signifikante Abhängigkeit zur erzielten Standardabweichung aufweisen. Als Maß für diese Beziehung werden Korrelationskoeffizienten herangezogen. Ein geeignetes Signifikanzniveau wird im Rahmen der Voruntersuchungen aus Erfahrungswerten festgelegt. Auf der Grundlage von Wiederholmessungen an verschiedenen Messobjekten und Strukturübergängen (Kapitel 10.2) wurden lineare Abhängigkeiten zwischen BK und empirischen Standardabweichungen untersucht. Als signifikant abhängig werden dabei Zusammenhänge definiert, die einen Korrelationskoeffizienten $r \geq |0,4|$ aufweisen. Folgende BK korrelieren für den in dieser Arbeit verwendeten Messtyp signifikant mit experimentell erzielten Standardabweichungen aus Wiederholmessungen von Messpunkten (Tabelle 5.2):

Tabelle 5.2.: BK mit signifikanter Korrelation zu experimentell erzielten Standardabweichungen aus Wiederholmessungen von Messpunkten

BK	Korrelationskoeffizient r
$u_{R,MCM}$	+0,91
K_m	-0,64
A_R	-0,63
I_m	+0,56
K_{SP}	-0,52
SP_u	+0,47
$GW_{SP,min}$	+0,47
ΔSP	-0,44
s_{norm}	+0,42
Δ_{Sprung}	+0,41

5.1.3. Bestimmung des Grauwertgesamtrauschens als Eingangsgröße für die Fortpflanzung innerhalb des KOKs zu $u_{R,MCM}$

Die Grundlage von Bildmessungen bilden die Grauwerte der Pixel entlang eines Suchstrahls. Die Qualität dieser digitalisierten Kamerasignale wird u.a. durch das Signal-Rausch-Verhältnis, bei gegebenen Betriebsbedingungen, bestimmt. Unter Anwendung der MCM kann das Gesamtrauschen einer CCD-Kamera entsprechend des KOKs zur Unsicherheit des subpixelgenauen Kantenorts (SPKO) $u_{R,MCM}$ fortgepflanzt werden. Dazu ist ein Eingangswert für das Gesamtrauschen der Grauwerte der aktuellen Messszene erforderlich. Das hier betrachtete Grauwertgesamtrauschen umfasst dabei die Überlagerung von Störgrößen des CCD-Sensors, der Optik, der Beleuchtung und der Umgebung während der Messung. Da die Bildkenngröße $u_{R,MCM}$ einen wesentlichen Einfluss auf die Qualität der aus W abzuleitenden IR hat, wird auch an die Bewertung des Grauwertgesamtrauschens eine hohe Anforderung gestellt. Zudem muss deren Bestimmung zeitminimal und automatisiert in die Messung integrierbar sein. Der in Bild 5.2 beschriebene Algorithmus berücksichtigt diese

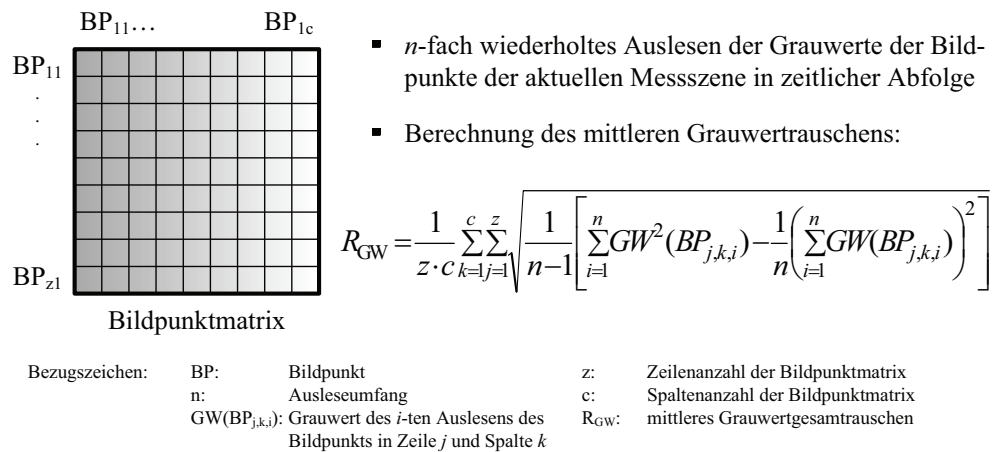


Bild 5.2.: Vorgehensweise zur Bestimmung des Grauwertersauschens als Eingangsgröße für die Fortpflanzung innerhalb des KOKs

Anforderungen und ist in die im Rahmen dieser Arbeit verwendete Bildverarbeitungssoftware eingefügt worden. Nach erfolgter Messvorbereitung (Messgeräte- und Messparametereinstellungen) startet der Algorithmus zur Bestimmung des Grauwertersauschens automatisch ohne störend auf die eigentliche Messung einzuwirken. In einer zeitlichen Abfolge werden n -fach wiederholt die Grauwerte der Bildpunkte des Sensors ausgelesen. Zur Ermittlung des Grauwertersauschens wird der Mittelwert der Standardabweichung der Grauwerte jedes Bildpunkts (Bild 5.2) herangezogen. Entsprechend des Kantenortkriteriums wird dieser messszenenabhängige Wert zur BK $u_{R,MCM}$ per MCM fortgepflanzt. Bei Experimenten im Rahmen dieser Arbeit wurde festgestellt, dass die BK $u_{R,MCM}$ signifikant zu empirischen Standardabweichungen aus Wiederholmessungen korreliert.

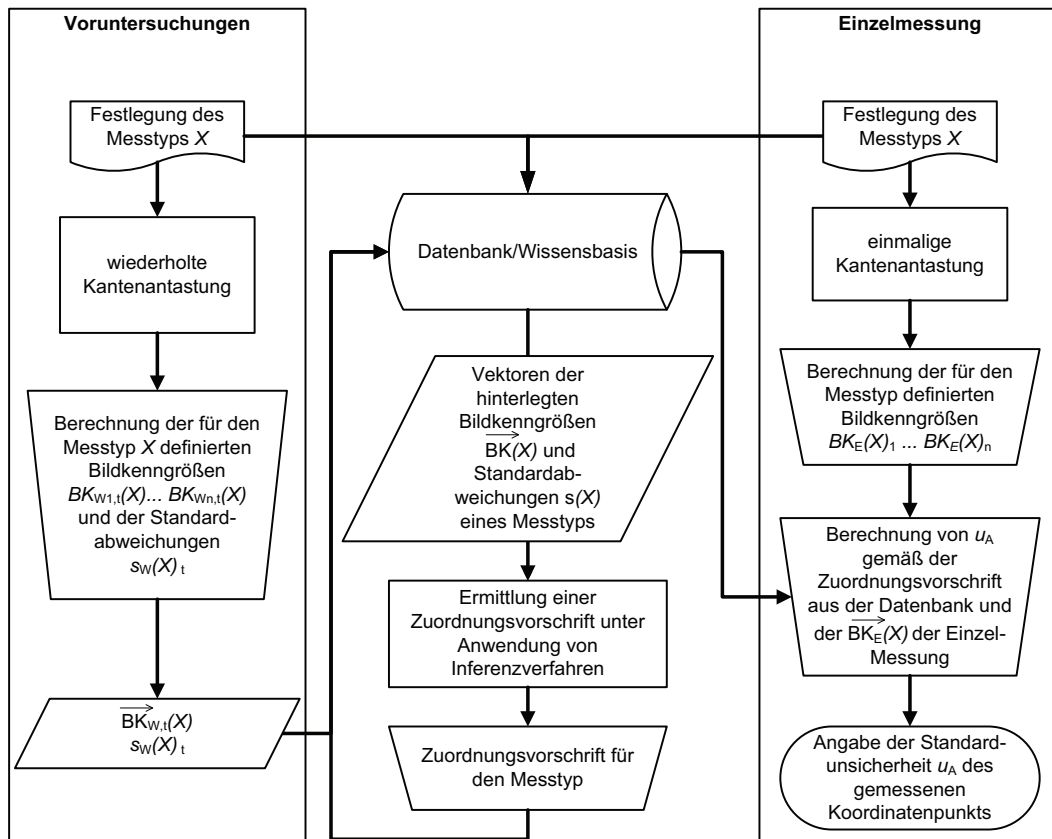
5.1.4. Vorgehensweise des induktiven Inferenzverfahrens

Das in dieser Arbeit beschriebene Verfahren (Bild 5.3) teilt sich auf in Voruntersuchung (Aufbau der Wissensbasis) und Einzelmessung während des Messprozesses (aktuelle Messung). Zur Ermittlung der Messunsicherheit bei einer Einzelmessung werden Rückschlüsse aus Informationen der Voruntersuchungen, die in einer Datenbank (Bild 5.4) hinterlegt werden, gezogen. Da Prüfmerkmale für die Messung mit Bildsensoren sehr unterschiedlich sind, ist im Vorfeld die Definition des Messtyps erforderlich.

Als Messtyp wird die Zuordnung zu während der Messung eingesetztem Messequipment/Hardwarekonfiguration (z.B. Sensortyp, Abbildungsmaßstab des Objektivs, Beleuchtungsart, Einstellung von Messparametern) und die zum Einsatz kommenden Mess- und Auswertalgorithmen/Softwarekonfiguration (z.B. Kantenortkriterien) definiert.

In einem ersten Schritt werden im Rahmen der Voruntersuchungen die für den gewählten Messtyp geeigneten Messgeräteeinstellungen und die relevanten BK ausgewählt und in einer Datenbank (Bild 5.4) gespeichert, auf welche während nachfolgender Einzelmessungen zurückgegriffen werden kann. Die Ermittlung der

5. Vorgehensweise zur Ermittlung der Messunsicherheit von 2D-Koordinatenpunkten



Bezugszeichen: BK : Bildkenngröße t : Zählvariable der Referenzwiederholmessung des jeweiligen Messtyps
 s : Standardabweichung n : Anzahl der Bildkenngrößen des jeweiligen Messtyps
 u_A : Standardunsicherheit X : Messtyp

Bild 5.3.: Vorgehensweise zur Ermittlung der Standardunsicherheit von 2D-Koordinatenpunkten

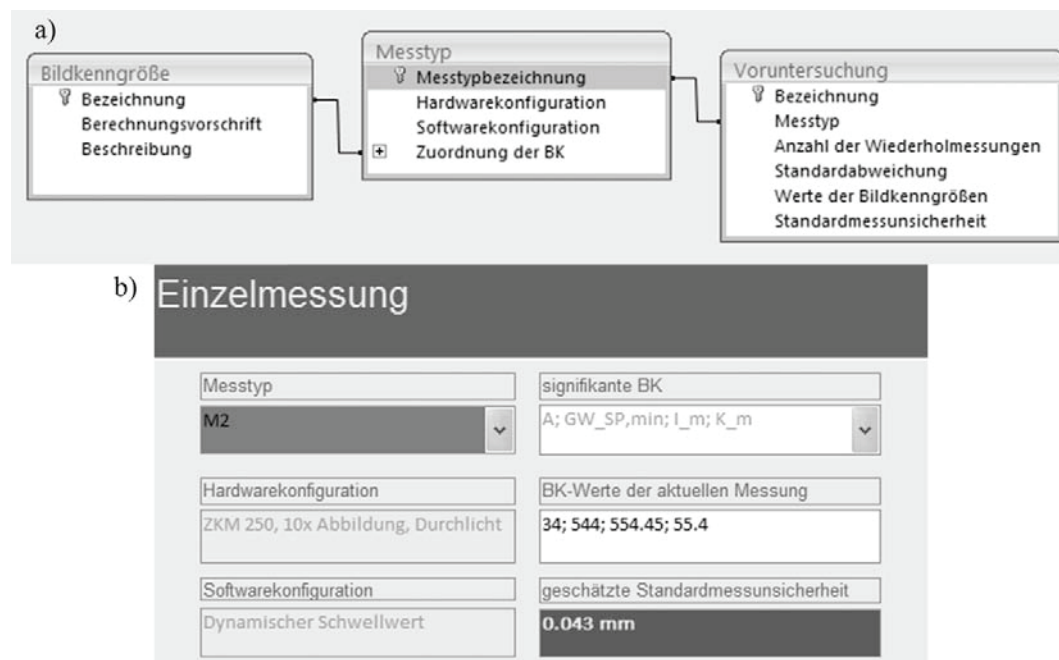


Bild 5.4.: a) Datenbankstruktur mit Darstellung der Beziehungen zwischen Messtyp, Bildkenngrößen und Voruntersuchungen; b) Abfrageformular zur Schätzung der Standardunsicherheit bei Einzelmessungen durch Zugriff auf die Wissensbasis

Messunsicherheit der Einzelmessung ist nur dann zuverlässig möglich, wenn Voruntersuchungen des gleichen Messtyps als Wissensbasis dienen.

Im Rahmen der Voruntersuchungen werden für jeden Messtyp Referenzwiederholmessungen durchgeführt. Dabei werden durch die Rechen- und Steuereinheit des Messgerätes ein dem Messtyp zugeordneter Satz an BK und die Standardabweichung s berechnet und in der Datenbank hinterlegt. Die Standardabweichung s dient dabei als bester Schätzwert für die Standardunsicherheit u . Sukzessive wird durch weitere Referenzwiederholmessungen unter praxisingerechten Bedingungen eine Wissensbasis aufgebaut. Bei der Einzelmessung wird der für den jeweiligen Messtyp definierte BK-Vektor \vec{BK} berechnet. Ein Wert für die Messunsicherheit wird durch Anwendung einer Zuordnungsvorschrift aus den in der Datenbank zum vorliegenden Messtyp abgelegten Informationen (\vec{BK} mit zugehöriger Standardabweichung s) und den aktuell berechneten BK geschlussfolgert.

Die Zuordnungsvorschrift $u_A = f(\vec{BK})$ entspricht der Inferenzrelation IR und dient der automatisierten Schätzung der Standardunsicherheit der Antastung u_A bei Einzelmessungen beruhend auf den BK der jeweiligen Einzelmessung sowie BK und s der Voruntersuchungen.

Eine mögliche Variante für die Herleitung einer Zuordnungsvorschrift stellt die *multiple lineare Regressionsanalyse* dar. Die multiple Regression erfasst den Einfluss mehrerer Größen auf eine Zielgröße. Alternativ ist auch der Einsatz von Approximationsverfahren und Verfahren aus dem Bereich der künstlichen Intelligenz und des

5. Vorgehensweise zur Ermittlung der Messunsicherheit von 2D-Koordinatenpunkten

Dataminings möglich. Ihre Anwendung würde jedoch eine wesentlich größere Anzahl an Referenzwiederholmessungen innerhalb der Voruntersuchungen erforderlich machen.

Zu jeder Referenzwiederholmessung eines Messtyps X werden s und ein BK-Vektor \vec{BK} berechnet und gemäß dem Modellansatz der multiplen Regression Gleichungen der Form

$$s_W(X) = m_0(X) + m_1(X) \cdot BK_{W1}(X) + \dots m_n(X) \cdot BK_{Wn}(X) + e_i \quad (5.1)$$

mit:

- $s_W(X)$ = Standardabweichung einer Wiederholmessung zu Messtyp X als Schätzwert für die Standardunsicherheit,
- $BK_{W1}(X) \dots BK_{Wn}(X)$ = signifikante Bildkenngrößen einer Wiederholmessung zu Messtyp X ,
- X = Messtyp,
- $m_1(X) \dots m_n(X)$ = Regressionskoeffizienten,
- $m_0(X)$ = Regressionskonstante,
- e_i = Restfehler mit $i = 1 \dots n$

aufgestellt. Die Bestimmung von $m_0(X) \dots m_n(X)$ erfolgt dann durch Lösung der Zielfunktion $\sum_{i=1}^n (e_i^2) = \min$. Für spätere Einzelmessungen kann die Standardunsicherheit der visuellen Antastung von Koordinatenpunkten u_A anhand der Zuordnungsvorschrift

$$u_A(X) = m_0(X) + m_1(X) \cdot BK_{E1}(X) + \dots m_n(X) \cdot BK_{En}(X) \quad (5.2)$$

abgeschätzt werden. Dabei sind $BK_{E1}(X) \dots BK_{En}(X)$ die bei der Einzelmessung berechneten Werte der signifikanten Bildkenngrößen des entsprechenden Messtyps. Einfluss auf die Güte der auf diese Weise zu bildenden Zuordnungsvorschrift haben Anzahl und Umfang der in der Datenbank hinterlegten Referenzwiederholmessungen aus den Voruntersuchungen und die dem Messtyp entsprechend definierten BK sowie die Art der Messaufgaben in den Voruntersuchungen.

Im Rahmen der Voruntersuchungen können neue signifikante Bildkenngrößen definiert und deren Berechnungsvorschrift in der Datenbank hinterlegt werden. Wird die Wissensbasis auf diese Weise oder durch weitere Wiederholmessungen erweitert, ist auch eine Anpassung der Zuordnungsvorschrift notwendig.

2D-Koordinatenpunkte verfügen über eine x - und y -Komponente. Je nach Ausrichtung des anzutastenden Strukturübergangs, können die Messunsicherheiten der Komponenten verschiedene Werte annehmen (Bild 5.5). Daher sind Messunsicherheitsangaben von 2D-Koordinatenpunkten multivariate Größen und werden im weiteren Verlauf der Arbeit als Vektoren dargestellt.

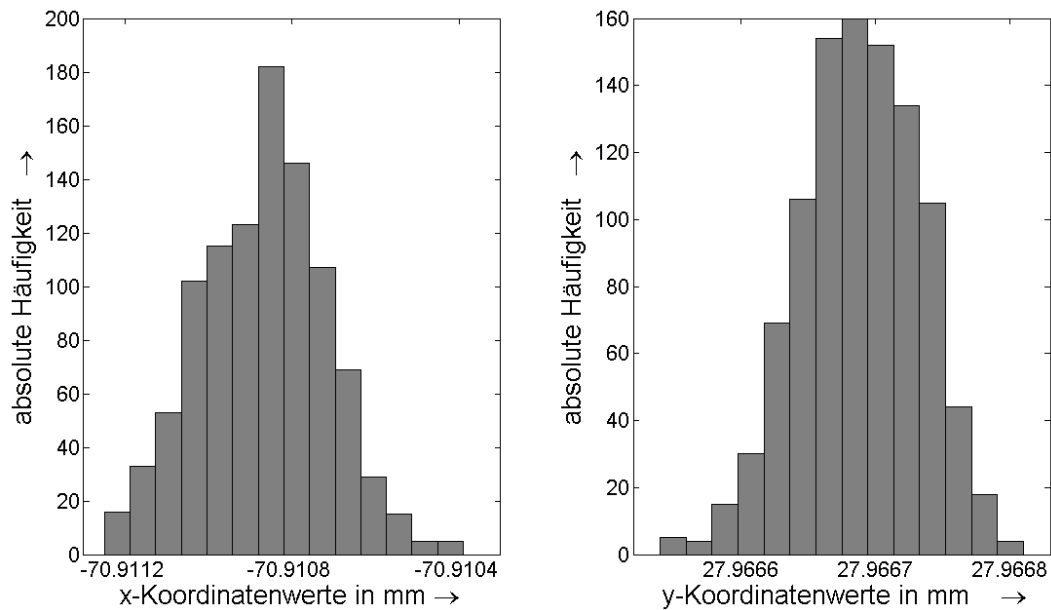


Bild 5.5.: Darstellungen der Häufigkeitsverteilung eines 1000-fach wiederholt ange-tasteten 2D-Koordinatenpunkts; a) Histogramm der x -Koordinatenwerte, $s = 0,15 \mu\text{m}$; b) Histogramm der y -Koordinatenwerte, $s = 0,05 \mu\text{m}$

5.1.5. Charakterisierung der Antastabweichung durch PDF

Das induktive Inferenzverfahren liefert Schätzwerte für die Antastabweichung der x - und y -Komponenten eines 2D-Koordinatenpunkts bei Im-Bild-Messungen. Da bei Bildmessungen in der Regel nicht einzelne Messpunkte sondern aus ihnen kombinierte geometrische Größen erfasst werden, sind weitere, meist auf Ausgleichsrechnung basierende, Rechenschritte notwendig. Dabei pflanzt sich die Messunsicherheit der einzelnen Koordinatenwerte fort [DIN05]. Für die Unsicherheitsfortpflanzung per MCM gemäß [BB107] muss die fortzupflanzende Größe durch eine PDF charakterisiert werden können [VDI99].

Viele statistische Werkzeuge und Methoden des Qualitätsmanagements, wie beispielsweise die statistische Prozesslenkung (SPC), setzen die Normalverteilung der Daten voraus. Werden diese Werkzeuge mit nicht normalverteilten Daten benutzt, liefern sie Ergebnisse, die nicht der Realität entsprechen und somit zu falschen Schlussfolgerungen führen können. Aus diesem Grund müssen vor einer Verwendung von Werkzeugen, die eine Normalverteilung der Zufallsvariablen voraussetzen, Tests auf Normalverteilung durchgeführt werden [DIN02a].

Die nach der Vorgehensweise in dieser Arbeit bestimmte Antastabweichung wird als normalverteilt angenommen, da bei der Berechnung von u_A eine Vielzahl an BK zusammengefasst werden, was als Überlagerung mehrerer Zufallsgrößen aufgefasst wird. Gemäß dem zentralen Grenzwertsatz (Abschnitt 2.1.1) ist die Normalverteilungsannahme gerechtfertigt und wird durch reale Messungen bestätigt.

Auf der Grundlage von Experimenten in Kombination mit statistischen Tests wurde der Verteilungstyp von Koordinatenwerten bei Bildmessungen untersucht. Die

Histogramme der x - und y -Werte eines 1000-fach wiederholt angetasteten Punktes (Bild 5.5) liefern annähernd normalverteilte Darstellungen der Häufigkeitsverteilung. Durch Hypothesentests auf Normalverteilung speziell die Tests nach Kolmogorov-Smirnov/Lilliefors und D'Agostino konnte diese Annahme nicht widerlegt werden.

5.2. Ermittlung des Messunsicherheitsbeitrags durch Geometrieabweichungen

Nicht alle Einflüsse auf Bildmessungen können durch die beschriebene induktive Inferenzmethode berücksichtigt werden. Bei Am-Bild-Messungen sind Bewegungen der Koordinatenachsen zwischen der Erfassung von Koordinatenpunkten notwendig. Hierdurch vergrößert sich die Messunsicherheit um den gemäß der Spezifikation des KMGs angegebenen Beitrag.

Unter Längenmessunsicherheit wird die Unsicherheit verstanden, mit der ein KMG den Abstand zweier Punkte bestimmt, die sich auf parallelen Flächen oder Kanten des Prüfkörpers gegenüberliegen. Der Grenzwert E der Längenmessunsicherheit wird als längenabhängige Größe $E_i = A_v + K_v \cdot L \geq B_v$ angegeben. A , K und B sind Konstanten, L ist die gemessene Länge und v die Anzahl der in die Messung einbezogenen Koordinatenachsen [VDI97], [DIN03b].

Die vom Hersteller angegebene Längenmessunsicherheit muss im gesamten Messbereich für jede beliebige Anordnung des Prüfkörpers eingehalten werden. Bei der Messung von geometrischen Größen wird grundsätzlich mit dem Erweiterungsfaktor $k = 2$ für den Grad des Vertrauens von etwa 95 % gerechnet, vorausgesetzt es liegen normalverteilte Messwerte vor. Längenmessabweichungen liegen typischerweise normalverteilt in der Mitte des durch die beiden Linien (Bild 5.6) begrenzten Bereiches und nutzen ihn etwa bis zur Hälfte aus. Folgende Faustregeln lassen sich für den Zusammenhang zwischen dem Grenzwert $MPE_E = (A + L/K)$ der Längenmessabweichung und Grenzwerten der Geometrieabweichungen ableiten [Her00], [Her07]:

- Maßabweichungen sind nicht größer als der längenabhängige Anteil: L/K ,
- Lageabweichungen sind nicht größer als das Zweifache des längenabhängigen Anteils: $2L/K$,
- Formabweichungen sind nicht größer als das Vierfache des längenabhängigen Anteils: $4L/K$.

Für L wird das Nennmaß der Länge bzw. die größte Seitenlänge oder Raumdiagonale des Formelementes eingesetzt. Der Grenzwert MPE_E der Längenmessabweichung begrenzt sowohl die Antastabweichungen als auch die Geometrieabweichungen des KMGs. Der konstante Anteil A beschreibt die Antastabweichung, während der längenabhängige Anteil L/K zur Abschätzung des Einflusses der Geometrieabweichung genutzt wird. Für die in dieser Arbeit betrachteten Messungen an Präzisionskoordinatenmessgeräten mit Bildsensoren entspricht die normalverteilte Antastabweichung

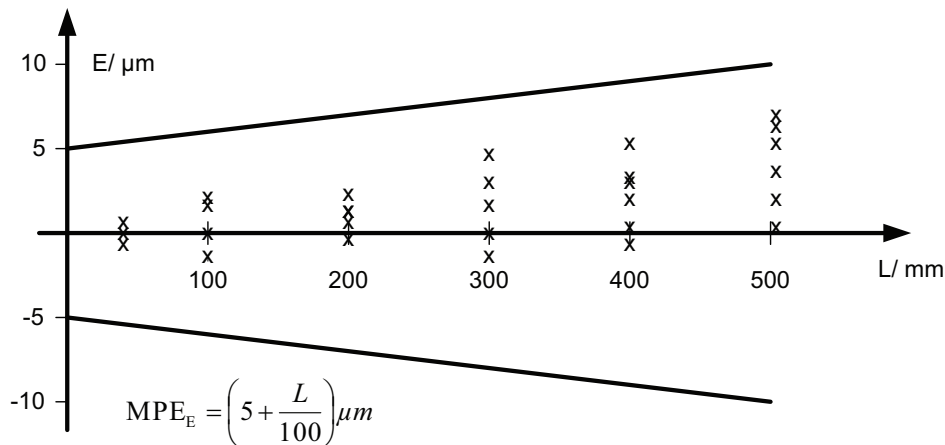


Bild 5.6.: Beispiel für Längenmessabweichungen E eines KMGs mit Grenzwert $MPE_E = (5 + L/100) \mu m$ [Her07]

der Standardunsicherheit der visuellen Antastung $A = u_A$, die durch das induktive Inferenzverfahren bestimmt wird (Abschnitt 5.1.4). Als zusätzliche Komponente ist ausschließlich die Geometrieabweichung zu berücksichtigen, deren Grenzwert L/K vom KMG-Hersteller angegeben wird. Die Geometrieabweichung wird allgemein als normalverteilt angenommen, da sie die Überlagerung mehrerer unabhängiger Einflussgrößen darstellt. Bei einem hierfür üblicherweise vorliegenden Vertrauensniveau von 100 % ergibt sich die Standardunsicherheit zu $L/(3K)$ (Tabelle 2.2).

5.3. Ermittlung des thermisch verursachten Messunsicherheitsbeitrags

Der Einfluss der Umgebungsbedingungen auf die Messung wird nach [VDI09] vollständig abgeschätzt. Wenn die Temperatur innerhalb des Messobjekts ausgeglichen ist, hat sie keinen Einfluss auf Form- und Lageabweichungen, sondern nur auf absolute Größen, wie Maße, Abstände und auch die Position. Unabhängig von der Geometrie des Messobjekts und dem Prüfmerkmal lassen sich die thermisch verursachte Messabweichung und ihre Unsicherheit nach oben abschätzen, wenn als Messlänge L die größte Ausdehnung des Messobjekts (Raumdiagonale) eingesetzt wird. Bezieht sich das Prüfmerkmal auf ein Geometrieelement, das deutlich kleiner als das gesamte Messobjekt ist, so wird dessen Länge bzw. Raumdiagonale verwendet [Her07].

Ist die Temperatur t_{MO} des Messobjekts größer als $20^\circ C$, dehnt es sich aus. Für die Temperatur t_{MS} der Maßstäbe des KMGs gilt das Gegenteil. Mit den Ausdehnungskoeffizienten α_{MO} des Messobjekts und α_{MS} des Messgerätemaßstabs ergibt sich die thermisch verursachte Längenmessabweichung ΔL_T [VDI09]:

$$\Delta L_T = L \cdot [\alpha_{MO} \cdot (t_{MO} - 20^\circ C) - \alpha_{MS} \cdot (t_{MS} - 20^\circ C)] \quad (5.3)$$

Bei thermisch stabilen KMGs wird vereinfachend nur der Temperatureinfluss auf das Messobjekt berücksichtigt, da die Einflüsse auf das KMG für einen definierten

5. Vorgehensweise zur Ermittlung der Messunsicherheit von 2D-Koordinatenpunkten

Temperaturbereich bereits in der Herstellerangabe MPE_E enthalten sind [Neu08]. Unter diesen Voraussetzungen wird die thermische Längenausdehnung wie folgt berechnet:

$$\Delta L_T = L \cdot \alpha_{MO} \cdot (t_{MO} - 20^\circ\text{C}) \quad (5.4)$$

Das in dieser Arbeit beschriebene Verfahren eignet sich ausschließlich für thermisch stabile KMGs. Folgende Möglichkeiten bestehen, um thermische Stabilität bei KMGs zu realisieren [Neu08]:

- Temperaturmessung an den Skalen und interne Längenkorrektur,
- Zerodur-Skalen ohne Korrektur,
- Verwendung thermisch besonders gut geeigneter Werkstoffe, z.B. mit guter Wärmeleitung oder geringer Wärmeausdehnung,
- thermische Korrektur des Geräteaufbaus,
- thermisch isolierter Aufbau,
- Einbeziehung der Wärmeausdehnung des Messobjekts durch automatische Korrektur bei Eingabe von α_{MO} und t_{MO} bzw. für t_{MO} durch Messfühler am Messobjekt.

Auch bei einer Klimatisierung auf 20°C verbleibt eine thermisch bedingte Restunsicherheit (Bild 5.7). Diese ist bedingt durch die Unsicherheit bei der Angabe von Werten für Temperatur und Ausdehnungskoeffizienten. Bei der Abschätzung der Grenzabweichungen sind sowohl die Abweichungen der Temperaturbestimmung als auch die möglichen räumlichen Temperaturunterschiede und zeitlichen Temperaturänderungen innerhalb des Messobjekts (Temperaturgradienten) zu berücksichtigen [Her07], [VDI09].

Für die Abschätzung der Grenzabweichungen von Temperatur und Ausdehnungskoeffizient werden drei Fälle unterschieden [Neu08]:

- a) Ausschließliche Messung der Raumtemperatur, Messobjekt nicht austemperierte, α_{MO} nur prinzipiell bekannt: $a_{\alpha,MO} = 0,1 \cdot \alpha_{MO}$, $a_{t,MO} = 1 \text{ K}$,
- b) Messung der Temperatur am Messobjekt, α_{MO} des Messobjekts genauer bekannt: $a_{\alpha,MO} = 0,05 \cdot \alpha_{MO}$, $a_{t,MO} = 0,5 \text{ K}$,
- c) Genaue Messung der Temperatur am Messobjekt, α_{MO} des Messobjekts kalibriert: $a_{\alpha,MO} = 0,02 \cdot \alpha_{MO}$, $a_{t,MO} = 0,2 \text{ K}$.

Zur Berechnung der Restunsicherheit sind die Standardunsicherheiten $u_{t,MO}$ der Temperaturen und $u_{\alpha,MO}$ der Ausdehnungskoeffizienten zu bestimmen. Sie werden allgemein als gleichverteilt angenommen [Neu08] und entweder aus den Grenzabweichungen nach Bild 2.4 berechnet oder direkt unter Anwendung der MCM zum thermisch bedingten Messunsicherheitsbeitrag fortgepflanzt (Bild 5.7). Wird die temperaturbedingte Längenmessabweichung ΔL_T (systematische Abweichung) nicht korrigiert, so muss sie als zusätzlicher Unsicherheitsbeitrag berücksichtigt werden [VDI09]. In dieser Arbeit wird davon ausgegangen, dass die Korrektur der thermischen Längenausdehnung erfolgt und ausschließlich die Restunsicherheit zu berücksichtigen ist.

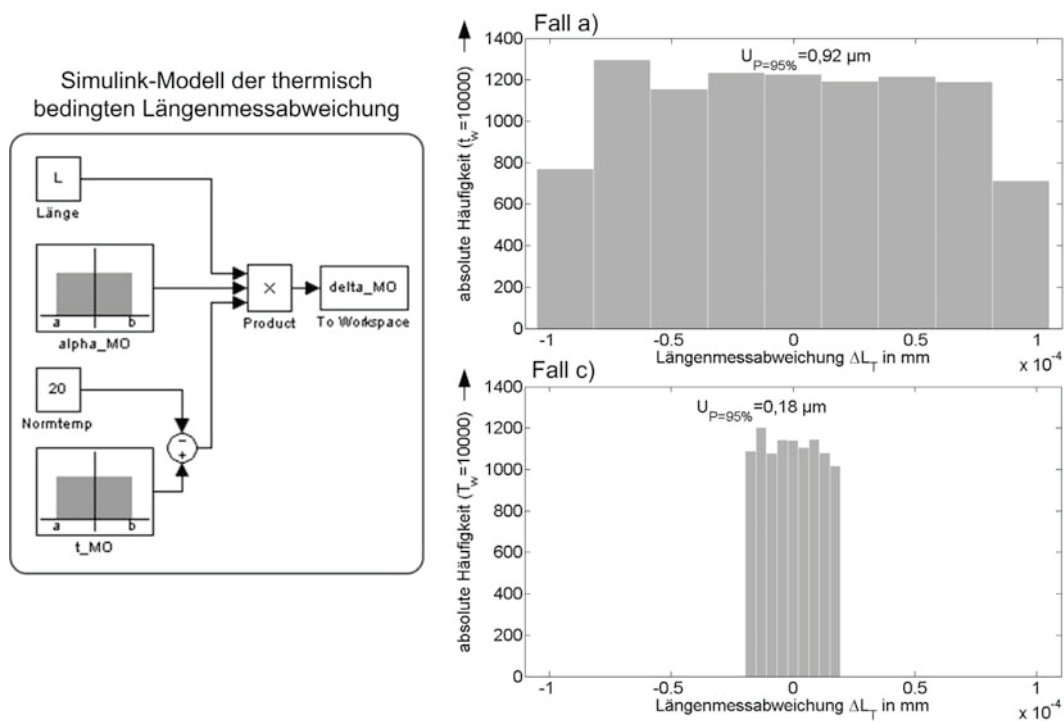


Bild 5.7.: Beispiel für die temperaturbedingte Restmessunsicherheit der Längenmessabweichungen ΔL_T eines thermisch stabilen KMGs für die Fälle a) und c) mit $L = 4 \text{ mm}$, $\alpha_{MO} = 24 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$, $t_{MO} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$

5.4. Kombination der Messunsicherheitsbeiträge von 2D-Koordinatenpunkten

Die beschriebenen Messunsicherheitsbeiträge müssen zu einem Gesamtwert kombiniert werden. Dabei werden zwei Fälle unterschieden (Bild 5.8). Erfolgt die Messung ausschließlich innerhalb der durch das Bild dargestellten Messszene (Im-Bild-Messung), hat die Geometrieabweichung des KMGs keinen Einfluss auf die Messung.

$$\begin{pmatrix} \Delta KP_x \\ \Delta KP_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u_{A,x} \\ u_{A,y} \end{pmatrix} + \Delta L_T \quad (5.5)$$

Werden andererseits zur Erfassung des Prüfmerkmals die Koordinatenachsen des KMGs zwischen der Aufnahme von Messpunkten bewegt, muss der Messunsicherheitsbeitrag durch die Geometrieabweichung des KMGs berücksichtigt werden.

$$\begin{pmatrix} \Delta KP_x \\ \Delta KP_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u_{A,x} \\ u_{A,y} \end{pmatrix} + \Delta L_T + L/K \quad (5.6)$$

Aus den im Modell (Bild 5.8) resultierenden Messabweichungen ΔKP_x und ΔKP_y können Messunsicherheitsangaben für 2D-Koordinatenpunkte nach der Quantilmethode (Abschnitt 2.2.4) ermittelt oder durch weitere Rechenschritte zu Messabweichungen der zu bestimmenden Prüfmerkmale fortgepflanzt werden.

5. Vorgehensweise zur Ermittlung der Messunsicherheit von 2D-Koordinatenpunkten

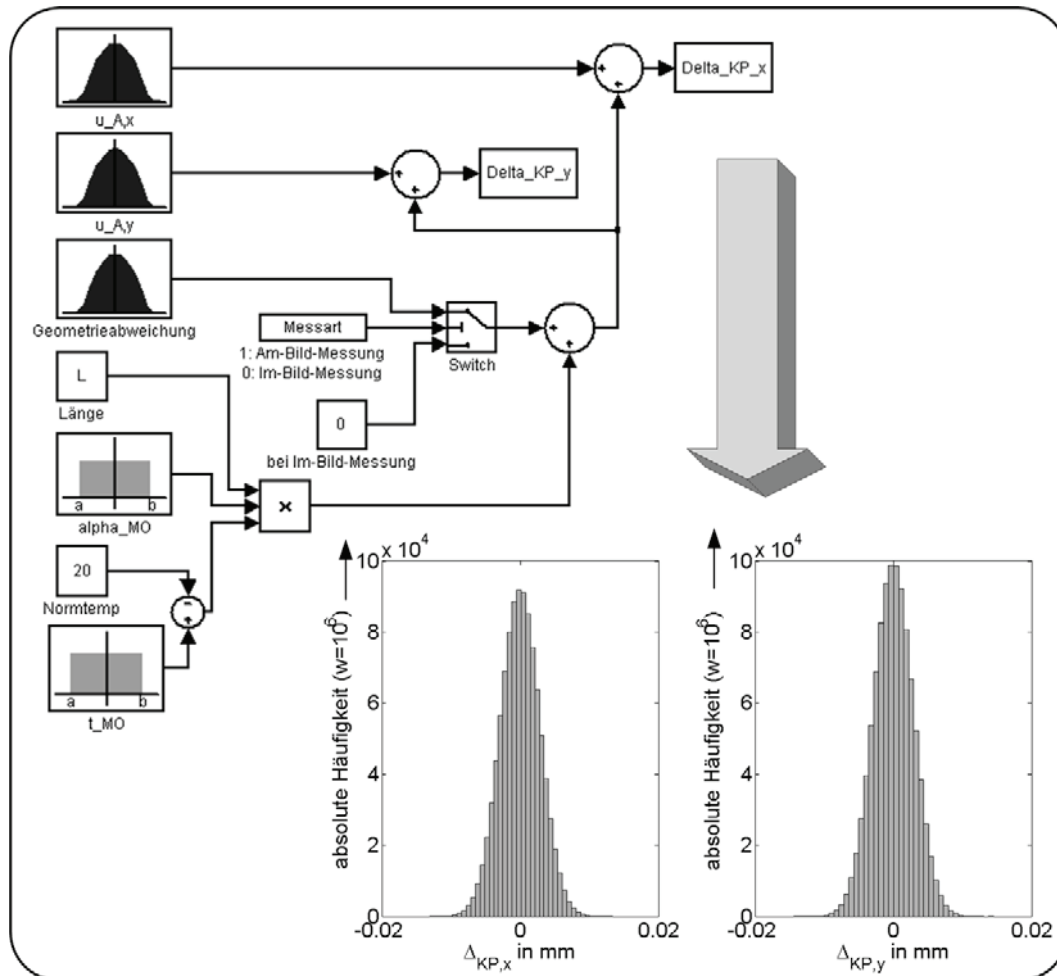


Bild 5.8.: Simulink-Modell der Messabweichungen für Koordinatenpunkte mit beispielhaften Histogrammen der Messabweichungen für x- und y-Koordinatenwerte

6. Ermittlung der prüfmerkmalbezogenen Messunsicherheit

Typische Prüfmerkmale in der KMT sind z.B. der Abstand zweier paralleler Geraden (Bild 4.4) oder der Durchmesser eines Kreises. Prüfmerkmale müssen auf Parameter von Geometrieelementen oder Kombinationen aus diesen zurückzuführen sein. Zur Ermittlung eines Werts für das Prüfmerkmal sind abhängig von den einbezogenen Geometrieelementen unterschiedlich viele 2D-Koordinatenpunkte zu erfassen. Dabei werden deren Messabweichungen zu der des geforderten Prüfmerkmals fortgepflanzt.

6.1. Ausgleichsrechnung für Parameter von Geometrieelementen

Parameter der Geometrieelemente werden durch eine zugeordnete mathematische Funktion aus Koordinatenpunkten der Messung bestimmt. Dabei sind mindestens so viele Punkte erforderlich, wie Freiwerte in der Funktion festzulegen sind, z.B. ist eine Gerade durch zwei Punkte eindeutig bestimmt. Um zuverlässige Messergebnisse zu erzielen, wird üblicherweise in der Messtechnik eine größere Anzahl an Messpunkten angetastet, als erforderlich. Dann ist im Allgemeinen nicht zu erwarten, dass die Funktion des Geometrieelements durch alle Messpunkte verläuft. Daher ist es das Ziel, diejenige Funktion zu ermitteln, die sich den erfassten Messpunkten möglichst gut annähert. Mit der *Ausgleichsrechnung* nach Gauß hat sich hierfür ein Prinzip durchgesetzt, das darauf abzielt, die Summe der Quadrate der Abweichungen zu minimieren.

Die Ausgleichsrechnung ist eine mathematische Optimierungsmethode, um für eine Reihe von Messdaten die unbekannt Parameter einer vorgegebenen Funktion zu bestimmen. Im Allgemeinen wird die Ausgleichsrechnung unter Anwendung der Methode der kleinsten Fehlerquadratsumme durchgeführt. Dabei werden die Abweichungen zwischen Modell- und Messdaten für das Geometrieelement minimiert [Pap94].

$$S_{\min} = \sum_{i=1}^n (y_i - f(x_i))^2 \rightarrow \text{Minimum} \quad (6.1)$$

Die bei den Messungen innerhalb dieser Arbeit verwendete Softwarebibliothek *Quick Image Development* (QID) wendet zur Lösung der Minimierungsprobleme die Cholesky-Zerlegung an. Iterativ werden so die für die eingehenden Messdaten optimalen Parameter der Geometrieelemente berechnet. Die in [DIN09b] beschriebenen Softwaretests zur Beurteilung der Qualität von Auswertesoftware für KMGs wurden von den im Rahmen dieser Arbeit eingesetzten Algorithmen erfolgreich bestanden. Grundlage für die Softwaretests sind synthetisch erzeugte Datensätze für verschiedene Geometrieelemente.

6. Ermittlung der prüfmerkmalbezogenen Messunsicherheit

Tabelle 6.1.: Typische Prüfmerkmale mit zugeordneten Geometrieelementen

Prüfmerkmal	Geometrieelement	Messpunktanzahl
Länge (Abstand)	Punkt, Gerade	≥ 3
Länge (Abstand)	Gerade, Gerade	≥ 4
Länge (Abstand)	Punkt, Kreis	≥ 4
Länge (Abstand)	Gerade, Kreis	≥ 5
Länge (Abstand)	Kreis, Kreis	≥ 6
Winkel	Gerade, Gerade	≥ 4
Länge (Durchmesser)	Kreis	≥ 3

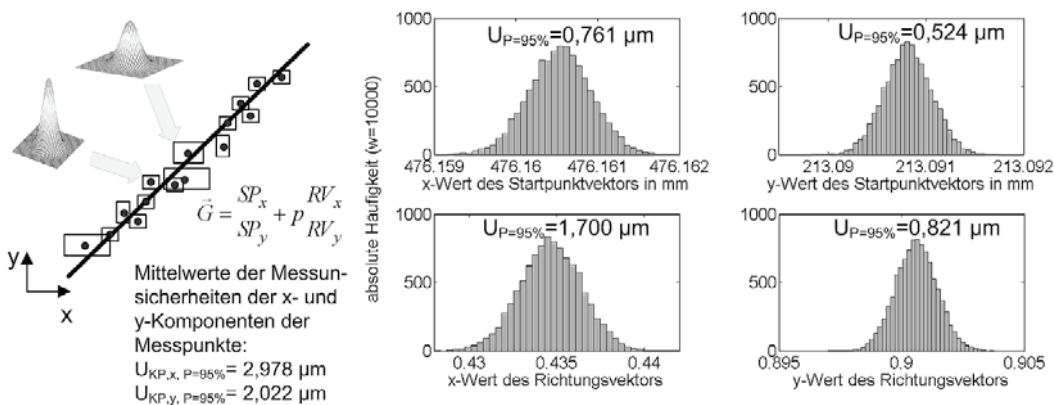


Bild 6.1.: Fortpflanzung der Standardunsicherheiten von 2D-Koordinatenmesspunkten zu Parametern von Geometrieelementen am Beispiel einer Geraden aus experimentell bestimmten Messpunkten

Für typische 2D-Messaufgaben sind in Tabelle 6.1 Prüfmerkmale mit den zu deren Ermittlung erforderlichen Geometrieelementen mit zugehöriger Mindestanzahl an zu messenden Koordinatenpunkten zusammengefasst.

Um die Standardunsicherheiten der Koordinatenpunkte zu Unsicherheiten der Parameter von Geometrieelementen fortpflanzen zu können, muss die Ausgleichsrechnung in die MCM mit einbezogen werden. Bild 6.1 zeigt, ein beispielhaftes MCM-Ergebnis für eine Gerade aus 20 Messpunkten. Für die Parameter der Geraden sind annähernd normalverteilte Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen in Form von Histogrammen dargestellt. Die erweiterte Messunsicherheit wurde nach der Quantil-Methode (Abschnitt 2.2.4) berechnet. Die Messunsicherheiten der x- und y-Komponenten der Messpunkte wurden experimentell bestimmt (Anhang A2). Messabweichungen von Geometrieelementparametern sind meist deutlich geringer als die der einfließenden Messpunktkoordinaten. Dabei ist das Ausmaß der Reduzierung der Messabweichungen auch von der Anzahl der Messpunkte abhängig. Im dargestellten Beispiel betragen die Messabweichungen der Komponenten des Startpunktvektors bzw. Schwerpunkts SP und des Richtungsvektors RV im Mittel ca. 38 % der Messpunktkoordinatenabweichungen. Das Beispiel zeigt auch, dass höhere Messabweichungen der x-Komponenten der Messpunkte zu vergleichsweise höheren Abweichungen der x-Komponenten der Geometrieelementparameter führen.

6.2. Zusammenhang von prüfmerkmalbezogener Messunsicherheit und Form- und Standardabweichung von Geometrieelementen

Abweichungen von Geometrieelementparametern hängen wesentlich von der Anzahl und Anordnung der Messpunkte auf der Oberfläche des Messobjekts ab. Zusätzlich zur Messunsicherheit, die aus der Fortpflanzung der Standardunsicherheiten der eingehenden Messpunkte hervorgeht, können zu Parametern von Geometrieelementen Streuungsmaße angegeben werden, die sich aus der Methode der kleinsten Fehlerquadratsumme ergeben. Der Zusammenhang der Streuungsmaße Formabweichung und Standardabweichung des Geometrieelements zur resultierenden Messunsicherheit aus der Unsicherheitsfortpflanzung von 2D-Koordinatenpunkten wird im Folgenden untersucht. Allgemein werden die Informationen zur Messobjektgestalt auf die Parameter der Geometrieelemente reduziert. Bei starken Formabweichungen des Messobjekts ist zu prüfen, ob die Messwerte auf der Grundlage der idealen Ausgleichsgeometrien noch eine ausreichende Aussagefähigkeit besitzen [Pet10].

Die Formabweichung FA eines Geometrieelements entspricht der Spannweite der Einzelpunktabweichungen $\Delta EP_{i,\max} - \Delta EP_{i,\min}$ eines nach der Methode der kleinsten Fehlerquadratsumme berechneten Ausgleichsgeometrieelements.

Bei Messungen an mikrostrukturierten Messobjekten haben Formabweichungen besonders starken Einfluss, da das Verhältnis von Geometriegröße zu Formabweichung geringer ist als bei makroskopischen Bauteilen [NHB⁺08]. Besonders Ausreißer führen zu sehr großen Formabweichungen. Immer öfter fungiert die Formabweichung auch selbst als Prüfmerkmal und wird gemeinsam mit der zugeordneten Messunsicherheit angegeben.

Die Standardabweichung s_{Rest} eines Geometrieelements ist die Wurzel aus der empirischen Restvarianz s_{Rest}^2 , welche ein Maß für die Streuung der Messpunkte um das Geometrieelement darstellt.

$$s_{\text{Rest}} = \sqrt{\frac{S_{\min}}{n-m}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta EP_i)^2}{n-m}} \quad (6.2)$$

Dabei ist n die Anzahl der eingehenden Messpunkte und m die Anzahl der Parameter des Geometrieelements.

Formabweichung und Standardabweichung eines Geometrieelements verschwinden genau dann, wenn alle einfließenden Koordinatenpunkte exakt der ermittelten mathematischen Funktion des Geometrieelements folgen.

Da Messabweichungen von Koordinatenpunkten in die Berechnung von Form- und Standardabweichung einfließen, kann auch für diese Parameter eine Messunsicherheit angegeben werden (Bild 6.3). Simulative Experimente haben gezeigt:

- Sind $FA \leq u_{\text{KP}}$ und $s_{\text{Rest}} \leq u_{\text{KP}}$ führen größere Werte für u_{KP} nicht nur zu größeren Unsicherheiten sondern auch zu größeren Erwartungswerten für FA und s_{Rest} (Bild 6.3 a)).

6. Ermittlung der prüfmerkmalbezogenen Messunsicherheit

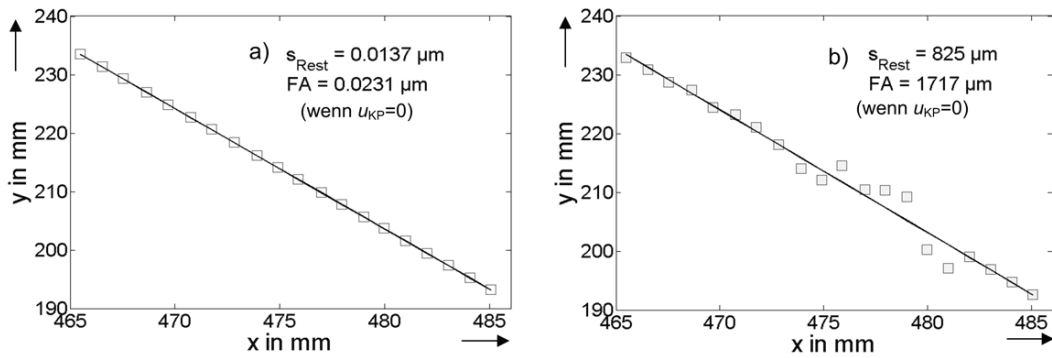


Bild 6.2.: Form- und Standardabweichung einer Geraden; a) Form- und Standardabweichung nahe Null; b) beträchtliche Form- und Standardabweichung

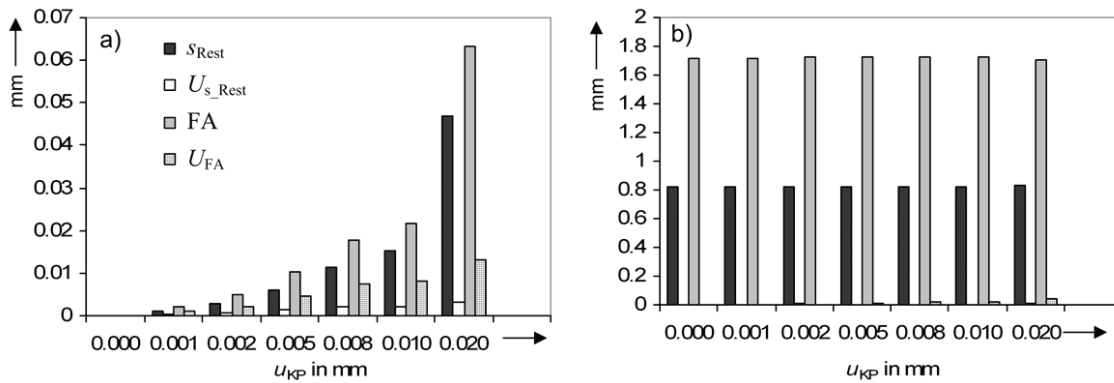


Bild 6.3.: Einfluss der Standardunsicherheit der Koordinatenpunkte u_{KP} auf Form- und Standardabweichung; a) Form- und Standardabweichung nahe Null; b) beträchtliche Form- und Standardabweichung

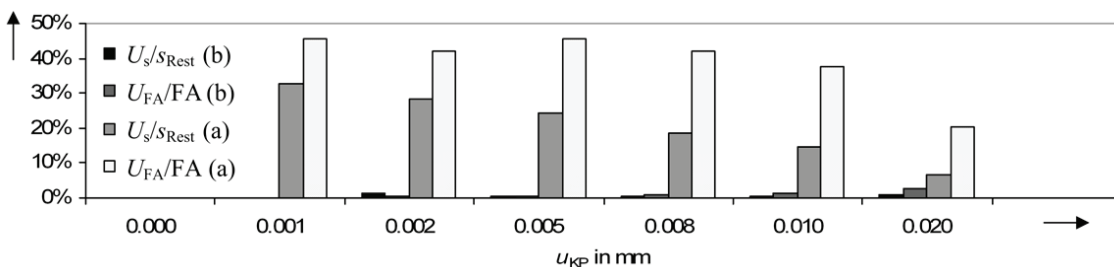


Bild 6.4.: Relative Bedeutung der Messunsicherheit von Standard- und Formabweichung

- Bei nahezu ideal ermittelten Geometrieelementen mit $FA \cong s_{\text{Rest}} \cong 0$ (Bild 6.2a)) ist der relative Einfluss der Messunsicherheit von Form- und Standardabweichung verhältnismäßig groß (Bild 6.4).
- Bei ermittelten Geometrieelementen mit sehr hoher Form- und Standardabweichung (Bild 6.2 b)) ist der relative Einfluss der Messunsicherheit von Form- und Standardabweichung vernachlässigbar klein (Bild 6.4). Selbst bei minimalen Messabweichungen der einfließenden Koordinatenpunkte wird das Geometrieelement nur unzureichend durch die zugehörigen Messpunkte repräsentiert. Die weitere Unsicherheitsfortpflanzung der Standardunsicherheiten von Geometrieelementparametern zu Prüfmerkmalen kann zu grob falschen Werten für das Messergebnis führen.

Bei Messungen, die dem Fall a) in Bild 6.2 entsprechen, können Form- und Standardabweichung für die Messunsicherheitsbewertung unberücksichtigt bleiben, da die Messabweichungen der Koordinatenmesspunkte vergleichsweise höher sind und zur adäquaten Messunsicherheit des Prüfmerkmals führen.

Bei Messungen, die dem Fall b) in Bild 6.2 entsprechen, ist die Messunsicherheit gegenüber Form- und Standardabweichung vernachlässigbar. Die Berücksichtigung von Form- und Standardabweichungen bei der Messunsicherheitsbewertung ist dann zwingend erforderlich. Die Messpunkteanordnung ist bei der Berechnung von Geometrieelementparametern und deren Messabweichungen mit zu berücksichtigen.

6.3. Prüfmerkmalbezogene Messunsicherheit für das Geometrieelement Gerade

Zur Demonstration des Gebrauchswerts der neu entwickelten Methode wird die prüfmerkmalbezogene Messunsicherheit für eine konkrete Messaufgabe ermittelt. In einer Vielzahl von Anwendungen entsprechen die zu erfassenden Strukturübergänge dem Geometrieelement Gerade. Typische Prüfmerkmale sind der Abstand zweier paralleler Geraden bzw. der Abstand einer Geraden zu einem Geradenpunkt (z. B. Startpunkt) einer weiteren Geraden (Bild 6.5).

Ein Prüfmerkmal ist eine in der Zeichnung oder im Prüfplan mit einer Toleranz angegebene geometrische Größe. Zu jedem ermittelten Messwert wird eine eigene, dem Prüfmerkmal zugeordnete Messunsicherheit bestimmt [PH08].

Bei der Berechnung eines Messwerts für ein Prüfmerkmal kommt es immer wieder zur Verdichtung von Messinformationen. Beispielsweise werden aus $n \geq 2$ (meist n bis 100) Messpunkten Gleichungen von Geometrieelementen bestimmt. Die Messunsicherheiten der Messpunkte werden zu Unsicherheitsangaben für die Parameter der Geometrieelemente fortgepflanzt. Aus den Gleichungen von Geometrieelementen wird letztlich ein Messwert für das geforderte Prüfmerkmal mit zugehöriger Messunsicherheit berechnet.

Am Beispiel (Bild 6.5) wird deutlich, dass die Messunsicherheit des Prüfmerkmals deutlich geringer als die eines einzelnen Messpunktes sein kann.

6. Ermittlung der prüfmerkmalbezogenen Messunsicherheit

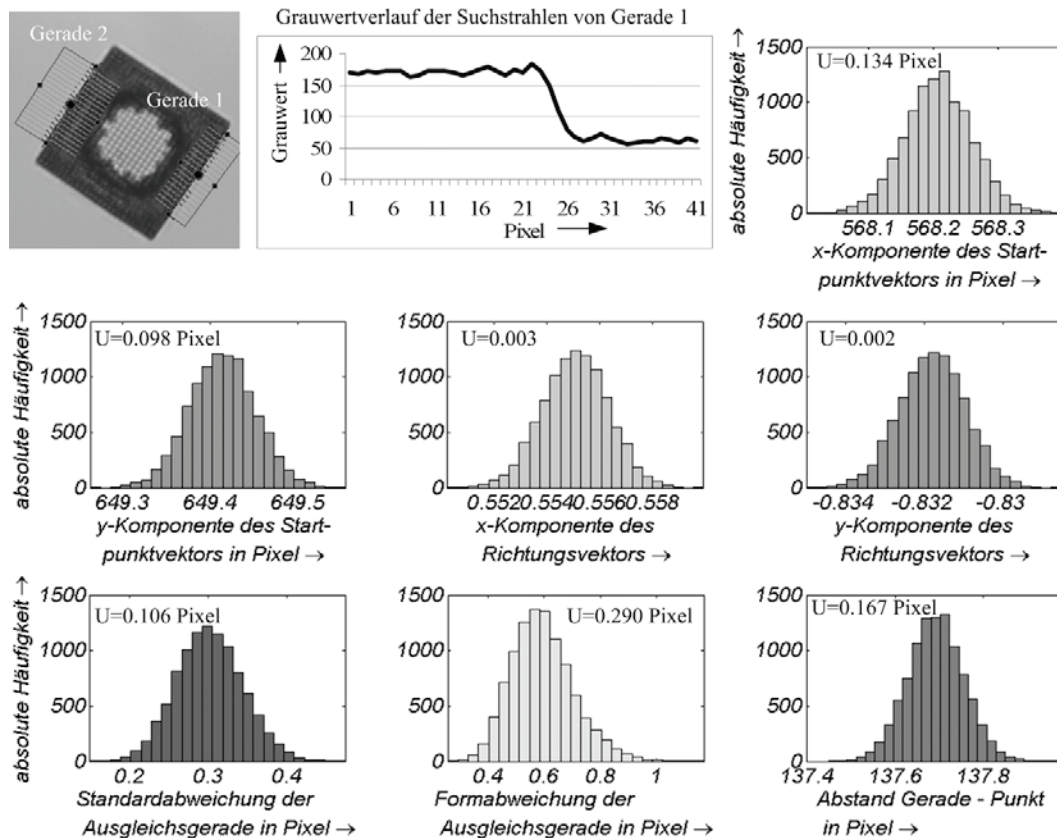


Bild 6.5.: Histogrammdarstellungen der x - und y -Komponenten des Startpunkt- und Richtungsvektors sowie der Standard- und Formabweichung einer Geraden und des Abstands zwischen Gerade und Startpunkt der gegenüberliegenden Geraden, Vertrauensniveau = 99 %, Anzahl der Suchstrahlen = Anzahl der Punkte für den Geradenausgleich = 20, Anzahl der Versuche der MCM = 10 000, $u_A = 3,2$ Pixel

6.4. Prüfmerkmalbezogene Messunsicherheit für das Geometrieelement Kreis

Häufig sind Prüfaufgaben unter Einbeziehung des Geometrieelements Kreis zu lösen. Für die Kreisparameter wurde die automatisierte Ermittlung der Messunsicherheit basierend auf dem entwickelten, wissensbasierten Verfahren unter Anwendung der MCM softwaretechnisch umgesetzt (Bild 6.6). Auch für die Kreisparameter konnte die Normalverteilungshypothese nicht verworfen werden.

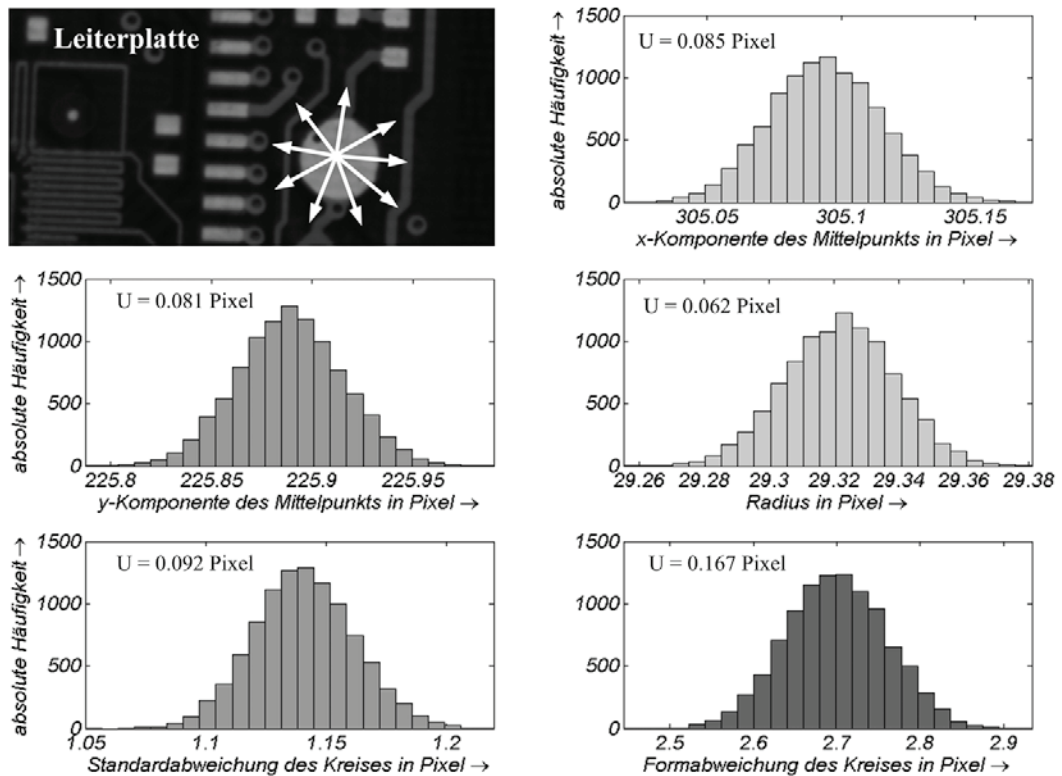


Bild 6.6.: Histogrammdarstellungen der x - und y -Komponenten des Mittelpunkts und des Radius sowie der Standard- und Formabweichung eines Kreises, Vertrauensniveau = 99 %, Anzahl der Suchstrahlen = Anzahl der Punkte für den Kreisausgleich = 9, Anzahl der Versuche der MCM = 10 000, $u_A = 0,49$ Pixel

7. Risiken bei der Qualitätsprüfung

Aufgrund der Messunsicherheit können in Abhängigkeit von Herstellungs- und Messprozessen Fehlentscheidungen hervorgerufen werden. Diese können in Form von Risikoangaben quantifiziert und analytisch berechnet werden. Da Fehlentscheidungen bei bestimmten Messobjekten erhebliche wirtschaftliche Folgen hervorrufen können, ist eine frühzeitige Abschätzung möglicher Folgen sinnvoll und sollte bei der Gestaltung von Prüfprozessen berücksichtigt werden [Lin05], [WZL05], [WL07], [SLSW06].

7.1. Fehlentscheidungen bei der Qualitätsprüfung

In der Konstruktions- oder Spezifikationsphase, beispielsweise in einer technischen Zeichnung, sind Entscheidungsbereiche (Übereinstimmung, Nichtübereinstimmung) durch scharfe Trennlinien abgegrenzt. In der Fertigungs- oder Prüfphase wird die Bedeutung der Ausdrücke *innerhalb* und *außerhalb* der Spezifikation bzw. Toleranz aufgrund der immer vorhandenen Messunsicherheit undeutlich. In der industriellen Fertigungsmesstechnik wird der Standpunkt vertreten, dass sich die exakten Grenzwerte oder Spezifikationen zu Unsicherheitsbereichen aufweiten, deren Breite der doppelten erweiterten Messunsicherheit entspricht. Diese Betrachtungsweise entspricht der internationalen Norm DIN EN ISO 14253-1 [ISO99], (Bild 7.1). Die Bereiche der Nichtkonformität, der Bereich der Konformität sowie die Unsicherheitsbereiche beziehen sich dabei stets auf die besten Schätzwerte der Messergebnisse, die der Konformitätsentscheidung zugrunde gelegt werden.

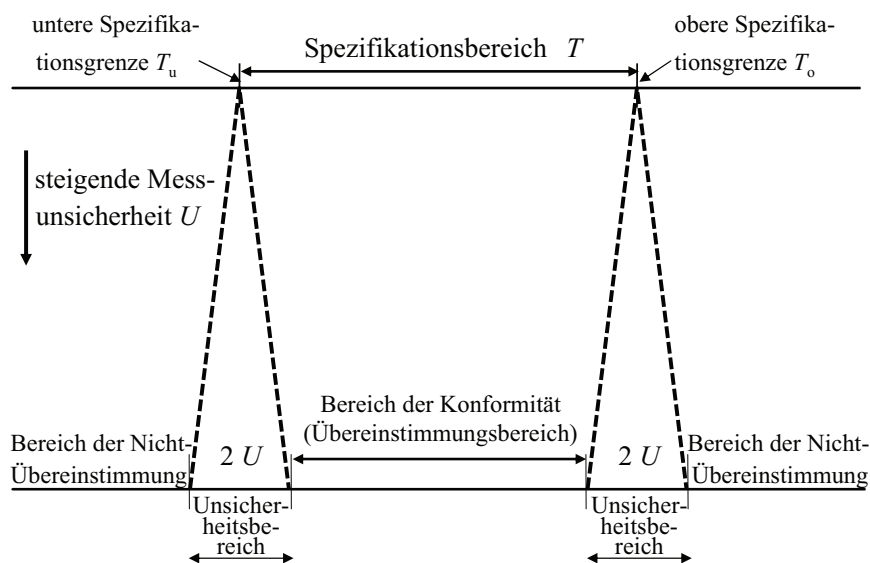


Bild 7.1.: Bereiche der Messunsicherheit, Übereinstimmung und Nichtübereinstimmung eines gemessenen Merkmals [ISO99]

Probleme bei der Konformitätsentscheidung treten dann auf, wenn der beste Schätzwert eines Mess- oder Kalibrierergebnisses nahe der oberen oder unteren Grenze der Spezifikation liegt (Bild 7.1). Entscheidungen zur Konformität sind folglich nicht möglich, wenn das Messergebnis bzw. sein bester Schätzwert plus bzw. minus der erweiterten Messunsicherheit eine der Spezifikationsgrenzen einschließt. Befinden sich die ermittelten besten Schätzwerte in diesen Intervallen, ist das weitere Vorgehen zwischen Hersteller und Anwender der Prüfobjekte zu vereinbaren [DIN09a]. Spezielle Vereinbarungen sind vor allem dann zu treffen, wenn die erweiterte Messunsicherheit U größer als die halbe Toleranz $T/2$ ist, was zur Folge hätte, dass gemäß dem Modell zur geometrischen Produktspezifikation nach [ISO99] praktisch kein Konformitätsbereich vorhanden ist. Die Grundlagennorm für das Qualitätsmanagement DIN EN ISO 9001 [DIN08] trifft im Abschnitt 7.6 Festlegungen zu den Anforderungen an die Lenkung von Überwachungs- und Messmitteln. Darin enthalten ist die Forderung nach einem angemessenen Verhältnis zwischen der Genauigkeit der Messung und der Toleranz des Prüfmerkmals.

Die Prüfprozesseignung ist die Eigenschaft eines Prüfprozesses, ein Prüfmerkmal mit einer ausreichenden Genauigkeit zu prüfen. Sie wird anhand des Verhältnisses der Messunsicherheit U des Prüfverfahrens zur Toleranz T des Prüfmerkmals beurteilt. Diese Vorgehensweise entspricht der Goldenen Regel der Fertigungsmesstechnik, die bereits in den 20er Jahren des 20. Jahrhunderts formuliert wurde und ein Verhältnis von $U/T \leq 0,1 \dots 0,2$ fordert [VDA10], [Her07], [Hul71].

Tabelle 7.1.: Anforderungen an das Messunsicherheits-Toleranz-Verhältnis U/T

Gebiet der Messtechnik	U/T	Literatur
Fertigungsmesstechnik allgemein	0,1 ... 0,2	[NT72], [WD84]
ISO-Toleranzen	0,2 ... 0,35	[ISO91]
Prüftechnik	$\leq 0,3$	[Dut72]
Messmittelprüfung	$\leq 0,1$	[NT72], [WD84]

Die Messunsicherheit geht in der industriellen Fertigungsmesstechnik immer zulasten des Partners, Herstellers oder Abnehmers, der den Nachweis über Konformität oder Nichtkonformität erbringen muss. Der Hersteller muss den Übereinstimmungsnachweis erbringen:

$$T_u + U < y < T_o - U. \quad (7.1)$$

Der Abnehmer muss den Nichtübereinstimmungsnachweis erbringen:

$$y < T_u - U \text{ oder } y > T_o + U. \quad (7.2)$$

- T_u = untere Toleranzgrenze/Spezifikationsgrenze,
- T_o = obere Toleranzgrenze/Spezifikationsgrenze,
- y = bester Schätzwert/Erwartungswert für das Messergebnis,
- U = erweiterte Messunsicherheit der speziellen Messaufgabe.

In den Bereichen: $T_u - U \leq y \leq T_u + U$ und $T_o - U \leq y \leq T_o + U$ kann weder Übereinstimmung noch Nichtübereinstimmung nachgewiesen werden.

7.2. Berechnung von Risiken bei der Qualitätsprüfung

Aufgrund der Messunsicherheit von Messverfahren, der Messunsicherheit von Normalen, und der Unvollkommenheit zu prüfender Werkstücke, kann von einem Messergebnis nicht in jedem Fall eindeutig auf den Wert des gemessenen Qualitätsmerkmals geschlossen werden. Die Folge sind Fehlentscheidungen bei der Konformitätsbewertung. Hierbei werden zwei Arten unterschieden:

- a) das Abnehmerrisiko R_A gibt die Wahrscheinlichkeit dafür an, dass sich der Wert des Qualitätsmerkmals außerhalb des Spezifikationsintervalls $[T_u; T_o]$ befindet, während das Messergebnis einen besten Schätzwert innerhalb der Akzeptanzgrenzen $[T_u + U; T_o - U]$ liefert,
- b) das Herstellerrisiko R_H gibt die Wahrscheinlichkeit dafür an, dass sich der Wert des Qualitätsmerkmals innerhalb des Spezifikationsintervalls $[T_u; T_o]$ befindet, während das Messergebnis einen besten Schätzwert außerhalb der Akzeptanzgrenzen $[T_u + U; T_o - U]$ liefert.

Beide Arten von Fehlentscheidungen können bei zweiseitig begrenzten Prüfmerkmalen sowohl an der unteren als auch an der oberen Toleranzgrenze auftreten.

Für die Risikoberechnung müssen Herstellungsprozess und Messprozess durch Zufallsgrößen in Form von Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen (PDF) charakterisiert werden [Zin05], [KSE10]. In Anlehnung an den zentralen Grenzwertsatz der Wahrscheinlichkeitsrechnung wird der Herstellungsprozess $\varphi_H(x_H)$ als normalverteilt angenommen, da die Nacheinanderausführung einzelner Fertigungs- und Montageprozesse, die im Laufe der Wertschöpfungskette eines Werkstücks durchzuführen sind, der Addition von Zufallsgrößen entspricht. Dabei wird vorausgesetzt, dass keine der beteiligten Zufallsgrößen den Gesamtprozess entscheidend dominiert [VDI85]. Der Normalverteilungsnachweis für den Messprozess $\varphi_M(x_M)$ wurde bereits im Abschnitt 5.1.5 erbracht. Die resultierenden Risiken sind aus der gemeinsamen PDF $\varphi_R(x)$ zu berechnen. Die PDF $\varphi_R(x)$ geht aus der Faltung der Verteilungen $\varphi_H(x_H)$ und $\varphi_M(x_M)$ hervor:

$$\varphi_R(x) = \varphi_H(x_H) * \varphi_M(x_M) \quad (7.3)$$

$$= \int_{-\infty}^{+\infty} \varphi_M(x - x_H) \cdot \varphi_H(x_H) dx_H \quad (7.4)$$

$$= \int_{-\infty}^{+\infty} \varphi_H(x - x_M) \cdot \varphi_M(x_M) dx_M. \quad (7.5)$$

Voraussetzung für die Faltung ist die Unabhängigkeit der beteiligten Zufallsgrößen. Das Ergebnis aus der Faltung der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen zweier Zufallsgrößen entspricht der Summe aus beiden Zufallszahlen. Um das Verhalten von Herstellungsabweichungen und Messabweichungen an den Toleranzgrenzen untersuchen zu können, ist es sinnvoll die Faltung der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen räumlich zu betrachten (Bild 7.2).

Die Berechnung der Faltungsintegrale als Grundlage für die Risikoquantifizierung wird durch die im Rahmen der Arbeit entwickelte Applikation analytisch durchgeführt, da auf diese Weise allgemeingültige und exakte Lösungen erzielt werden können. Zur Überprüfung der dabei verwendeten Algorithmen sind stichprobenartig

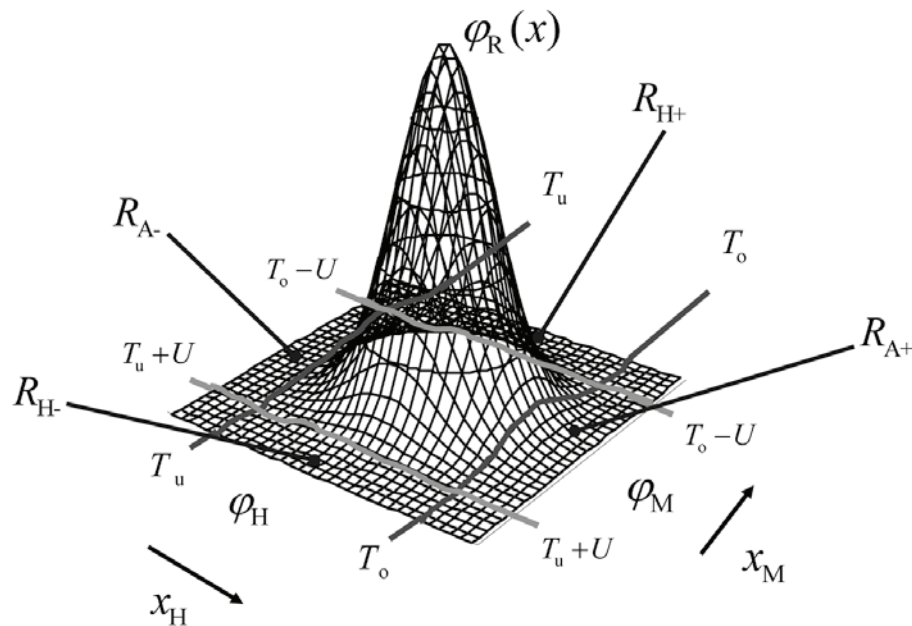


Bild 7.2.: Faltungsgebirge zweier unabhängiger normalverteilter Zufallsgrößen (Herstellungsprozess und Messprozess) mit der Kennzeichnung der Risikobereiche [Zin05]

einige Beispiele durch den Einsatz der Monte-Carlo-Methode überprüft worden. Die Übereinstimmung der Ergebnisse lag im Rahmen der stochastischen Messunsicherheit des Verfahrens [WKLS08b], [WLS06].

Für spezielle Anwendungsfälle dienen Risikoangaben der Prognose von Fehler- und Fehlerfolgekosten und sind die Basis für Optimierungen in vielen Bereichen, beispielsweise für die Auswahl technisch und wirtschaftlich geeigneter Prüfmittel [WW06].

7.3. Optimierung von Messprozessen auf der Grundlage von Risiken

Im Beiblatt 1 zur DIN EN ISO 14253-1 wird ein iteratives Verfahren zur vereinfachten Ermittlung der Messunsicherheit, die *Prozedur für das Unsicherheitsmanagement* (PUMA), beschrieben (Bild 7.3). Dabei wird für einen bestehenden Messprozess abgeschätzt, ob eine vorgegebene Zielmessunsicherheit zu realisieren ist [ISO00]. Die PUMA-Methode eröffnet die Möglichkeit der Dokumentation und Optimierung eines Mess- oder Kalibriervorgangs durch die Berücksichtigung technischer und wirtschaftlicher Kriterien. Die iterative Methode ist ein Mittel zur Gewinnsteigerung und zur Minimierung der Kosten messtechnischer Aktivitäten in einem Unternehmen. Das Messunsicherheitsmanagement wird auf der Grundlage einer definierten Messaufgabe und einer gegebenen Zielmessunsicherheit U_Z durchgeführt. Die Zielmessunsicherheit ist das Ergebnis einer Managemententscheidung, die beispielsweise Konstruktion, Produktion, Qualitätssicherung, Dienstleistung, Marketing, Verkauf und Vertrieb betrifft. Bei der Festlegung von U_Z sind Spezi-

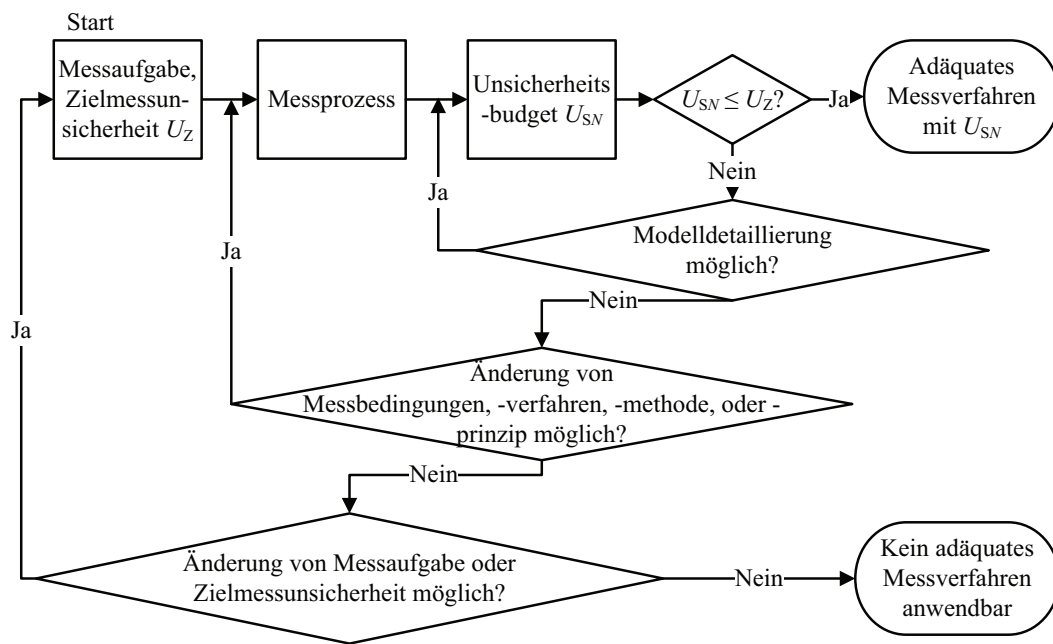


Bild 7.3.: Iteratives Verfahren zur Ermittlung der Messunsicherheit - Prozedur für das Messunsicherheitsmanagement [ISO00]

fikationen, Möglichkeiten, Kosten und Schwierigkeiten des Verfahrens sowie die Anforderungen von ISO 9000 ff., [DIN08] und ISO 14253-1, [ISO99] zu berücksichtigen. Folgende Schritte sind bei der Anwendung der PUMA-Methode bei gegebener Messaufgabe und Zielmessunsicherheit nacheinander auszuführen:

- Festlegung von Messprinzip, Messmethode, Messverfahren, Messbedingungen und Vorgabe der Zielmessunsicherheit U_Z ,
- Berechnung der Anfangsmessunsicherheit U_{S1} durch Schätzverfahren (1. Iteration),
- Analyse der dominierenden Messunsicherheitskomponenten, wenn $U_{S1} > U_Z$,
- Präzisierung der Schätzungen für dominierende Messunsicherheitskomponenten,
- Ermittlung der Messunsicherheit U_{S2} (2. Iteration),
- Änderung von Messmethode, Messverfahren, Messbedingungen, Messprinzip in folgenden Iterationen, wenn $U_{Si} > U_Z$ bzw. Abbrechen des Verfahrens, wenn Änderungen keine weiter Reduzierung der Messunsicherheit bewirken.

Die Systematik der PUMA-Methode kann im Rahmen dieser Arbeit genutzt werden, um bei Vorgabe eines Zielrisikos eine Aussage zur Eignung eines Messprozesses zu erhalten (Bild 7.4). Als Zielparame- ter eignet sich das Abnehmerrisiko, denn dadurch verursachbare Fehler- und Fehlerfolgekosten dominieren gegenüber internen Kosten, welche durch ein zu hohes Herstellerrisiko hervorgerufen werden [WZL05], [WL07]. Durch den die PUMA-Methode ergänzenden iterativen Algorithmus wird bei bekanntem Herstellungsprozess und Vorgabe eines Zielrisikos die Berechnung der maximal zulässigen Messunsicherheit bewirkt. Dieser Wert wird mit der gemäß dem wissensbasierten Verfahren ermittelten Messunsicherheit verglichen.

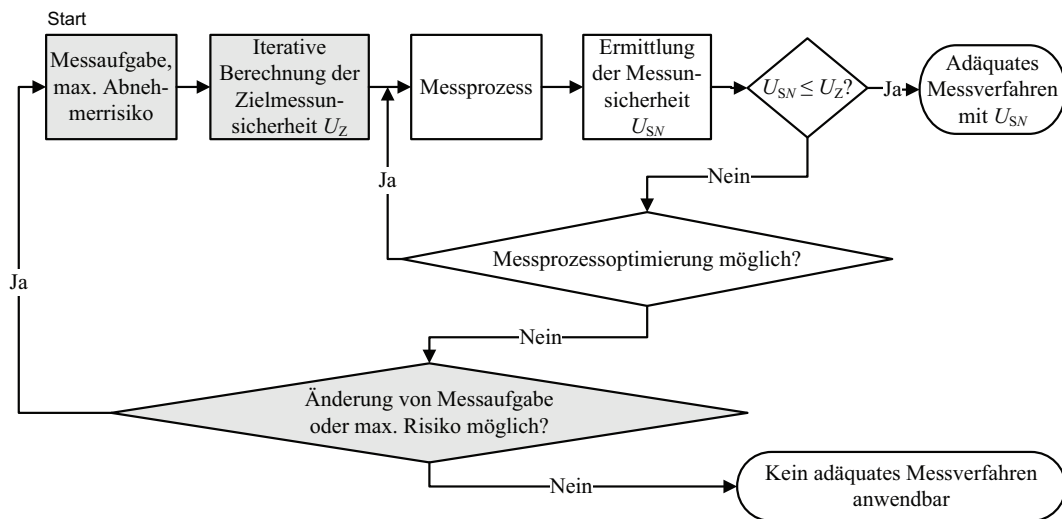


Bild 7.4.: Erweiterung der PUMA-Methode um einen iterativen Algorithmus zur Berechnung der Zielmessunsicherheit aus einem Zielwert für das Abnehmerisiko

Analog zur PUMA-Methode kann durch Veränderungen am Messequipment eine prüfmerkmalbezogene Prozessoptimierung realisiert werden.

8. Programmablaufplan zur Messunsicherheitsermittlung in der Präzisionskoordinatenmesstechnik mit Bildsensoren

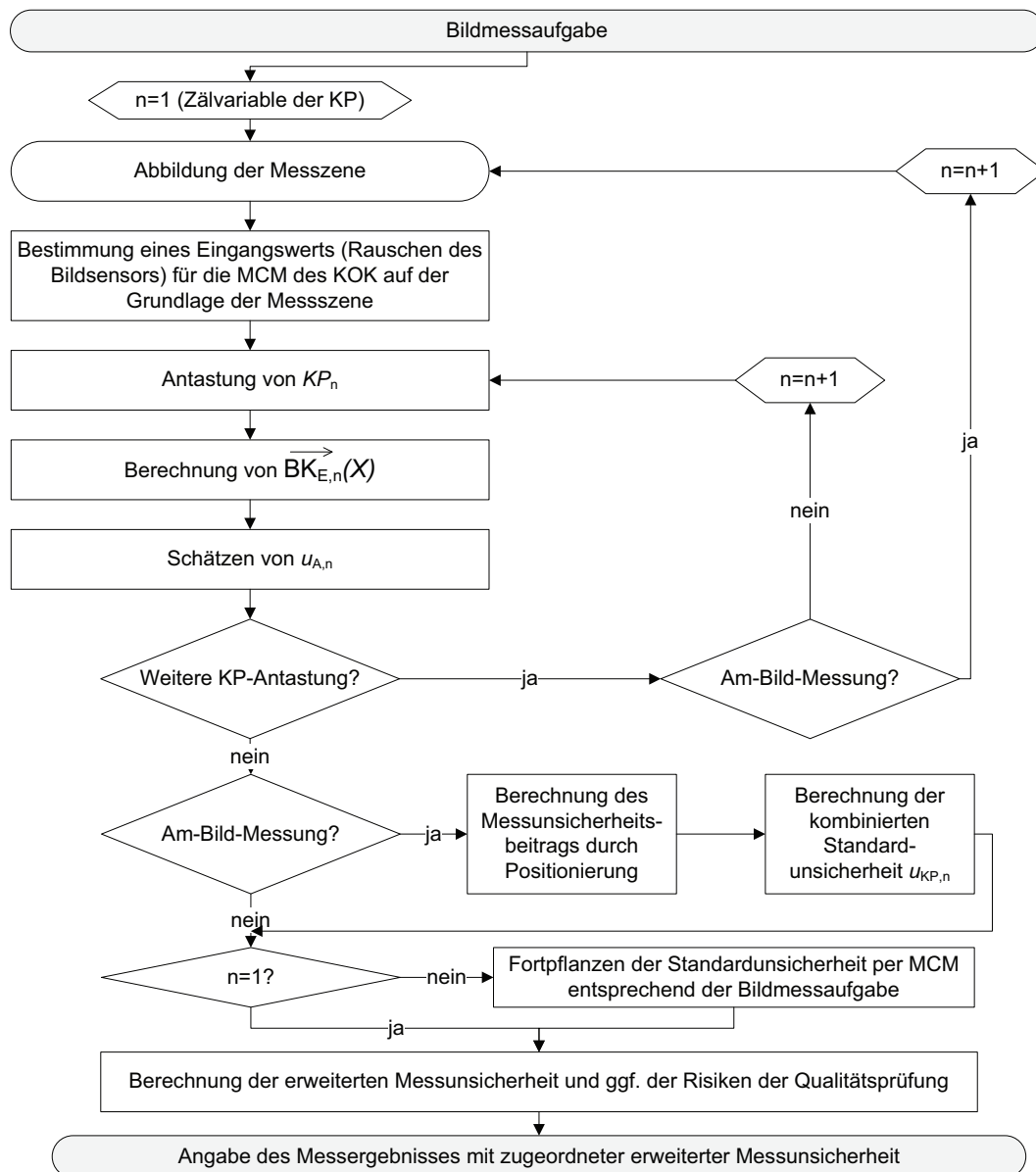


Bild 8.1.: Programmablaufplan zur Messunsicherheitsermittlung in der Präzisionskoordinatenmesstechnik mit Bildsensoren

Teil III.

EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN ZUR PRÜFMERKMALBEZOGENEN MESSUNSICHERHEITSERMITTLUNG IN DER PRÄZISIONSKOORDINATENMESSTECHNIK MIT BILDSENSOREN

9. Versuchsanordnung und Messobjekte

Im vorliegenden Abschnitt werden der für die Voruntersuchungen genutzte Messaufbau und die charakteristischen Eigenschaften der Messobjekte beschrieben.

9.1. Versuchsanordnung

Im Rahmen der Voruntersuchungen wurde das optische Zweikoordinatenmessgerät ZKM 250 verwendet (Bild 9.1 a)). Entsprechend der Nomenklatur nach VDI/VDE Richtlinie 2617 [VDI97] besitzt das kalibrierte Messgerät folgende Grenzwerte für die Längenmessabweichungen:

- 1D Längenmessabweichung der x - und y -Achse bei Abbildungsmaßstab 10:1:
 $MPE_{E1} = (1,1 + L/450) \mu\text{m}$,
- 2D-Längenmessabweichung der x/y -Ebene bei Abbildungsmaßstab 10:1:
 $MPE_{E2} = (1,6 + L/360) \mu\text{m}$.

Als Antastsystem kam eine CCD-Kamera Adimec MX12P (Bild 9.1 b)) in Verbindung mit einem Objektiv mit Abbildungsmaßstab 10:1 zum Einsatz. Die Beleuchtung wurde mit polychromatischem bzw. weißem Licht realisiert. Die Beleuchtungsmöglichkeiten am eingesetzten optischen Koordinatenmessgerät umfassen koaxiales Hellfeldauflicht und homogenes Hellfelddurchlicht.

Weiterführende Untersuchungen und die Verifizierung der Software zur wissenschaftlichen Schätzung der Messunsicherheit wurden an verschiedenen Versuchsanordnungen mit unterschiedlichen Bildsensoren durchgeführt. Dabei konnte die Hardwareunabhängigkeit des wissenschaftlichen Verfahrens nachgewiesen werden.

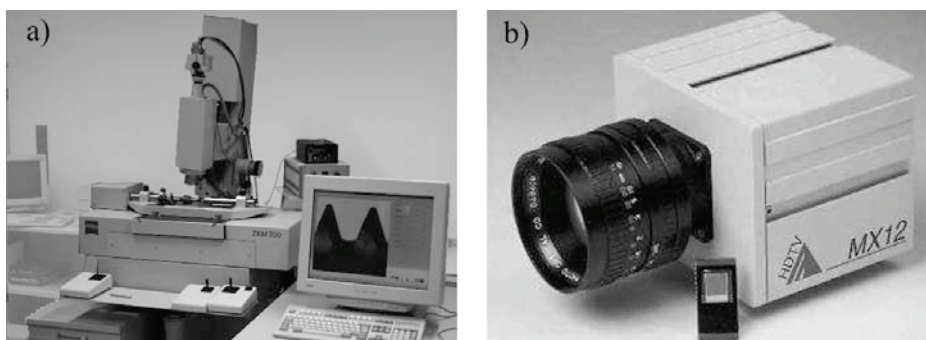


Bild 9.1.: Versuchsanordnung für Voruntersuchungen; a) Optisches Zweikoordinatenmessgerät ZKM 250; b) Adimec CCD-Kamera mit 1024 x 1024 quadratischen Pixeln (7,5 μm x 7,5 μm)

9.2. Auswahl geeigneter Messobjekte



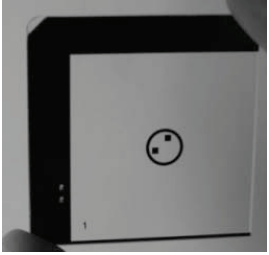
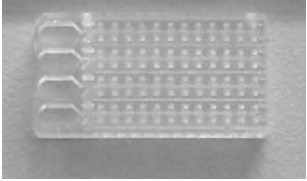
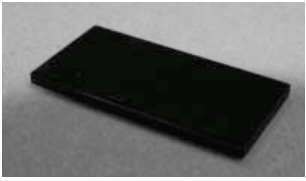

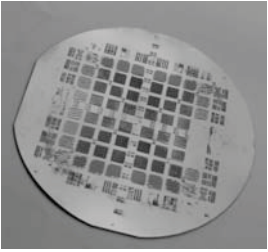
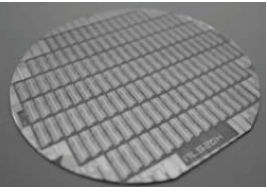
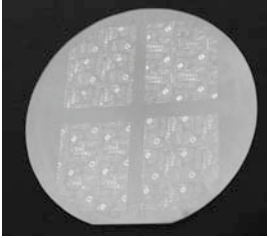
Für experimentelle Untersuchungen zur prüfmerkmalbezogenen Messunsicherheitsermittlung in der Präzisionskoordinatenmesstechnik mit Bildsensoren und dem angestrebten Aufbau einer Wissensbasis wurden neben Kalibriernormalen mit definierten Strukturübergängen Messobjekte aus dem Bereich der Mikrosystemtechnik ausgewählt, die über eine große Anzahl an Prüfmerkmalen verfügen, die meist nur berührungslos messbar sind (Tabelle 9.1). Typisch für die Mikrosystemtechnik sind Strukturen mit Abmaßen im Bereich von 1000 bis 10 μm mit geforderten Toleranzen von 100 bis $<1 \mu\text{m}$.

Bei den im Rahmen der Voruntersuchungen durchgeführten Messungen wurde ausschließlich Durchlicht verwendet. Hierfür liefern Kantenortkriterien, wie der *Dynamische Schwellwert* in Kombination mit auf Integration beruhenden Subpixelverfahren, zuverlässige und robuste Ergebnisse. In wissenschaftlichen Untersuchungen [Töp08], [Küh97] wurde diese Variante der Kantendetektion als für Durchlichtmessungen besonders gut geeignet bewertet. Da gerade daher bei Durchlichtmessungen besonders hohe Reproduzierbarkeiten erreicht werden, sind diese, wenn es die Geometrie des Prüfmerkmals zulässt, hervorragend für Anwendungen an mikrostrukturierten Bauteilen geeignet. Die Angabe der Messunsicherheit ist somit bei Durchlichtmessungen im Vergleich zu Auflichtmessungen wesentlich zweckmäßiger.

Im weiteren Verlauf dieser Arbeit ist zu untersuchen, wie gut die wissensbasierte Messunsicherheitsschätzung mit auf der Basis von Wiederholmessungen berechneten Messunsicherheiten übereinstimmt.

9. Versuchsanordnung und Messobjekte

Tabelle 9.1.: Im Rahmen der Voruntersuchung verwendete Messobjekte

 <p>A circular metal frame with a central black disc. The disc has a white circle in the center and the number '262055-7071.631' printed below it.</p>	 <p>A black square frame containing a white grid with four small black circles arranged vertically in the center.</p>	 <p>A black square frame containing a white square with a small black circle in the center.</p>
<p>Chrom-Glas-Kreisschablone</p>	<p>R2 Normal</p>	<p>Chrom-Glas-Kante</p>
 <p>A rectangular, transparent plastic component with a grid of small holes and three larger rectangular openings on the left side.</p>	 <p>A dark, rectangular, flat plate.</p>	 <p>A dark, rectangular, flat plate with a grid of small holes.</p>
<p>Lab-on-Chip-Bauelement</p>	<p>Spektrometerplatte</p>	<p>Mikrostrukturfritte</p>
 <p>A circular, light-colored wafer with a grid of small squares and some text printed on it.</p>	 <p>A circular, light-colored wafer with a grid of small squares and some text printed on it.</p>	 <p>A circular, light-colored wafer with a grid of small squares and some text printed on it.</p>
<p>Siliziumwafer</p>	<p>Halbtransparente Leiterplatte</p>	<p>Transparenter Kunststoffwafer</p>


10. Wissensbasis für das induktive Inferenzverfahren zur Messunsicherheitsermittlung

Die Grundidee des im Rahmen der vorliegenden Arbeit entwickelten Verfahrens basiert auf dem Ziehen von Rückschlüssen aus vorhandenem Wissen. Dieses experimentell gewonnene Wissen wird für die spezielle Zielstellung der Arbeit, die Schätzung der Messunsicherheit, durch die Standardabweichung aus Wiederholmessungen und zugehörigen Bildkenngrößen repräsentiert.

10.1. Wiederholmessungen von 2D-Koordinatenpunkten

In Abschnitt 5 wurde die Konzeption einer Vorgehensweise zur Ermittlung der Messunsicherheit von 2D-Koordinatenpunkten beschrieben. Gemäß dieser Vorgehensweise wurden an Strukturübergängen der in Tabelle 9.1 aufgeführten Messobjekte 2D-Koordinatenpunkte wiederholt (500 mal) angetastet. Der Messtyp entspricht der in Abschnitt 9.1 beschriebenen Hard- und Softwarekonfiguration. Im Rahmen der experimentellen Untersuchungen wurden die Grauwertsignalverläufe ausgewertet und die Bildkenngrößen berechnet. Eine Auswahl der durchgeführten Experimente zeigt Tabelle 10.1.

Tabelle 10.1.: Im Rahmen der Voruntersuchungen analysierte Kantenübergänge und Grauwert-Signalverläufe

Bild	Grauwertverlauf und Histogramm
 <p>Siliziumwafer</p>	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div data-bbox="550 1489 933 1736"> <p style="text-align: center;">Grauwertverlauf</p> </div> <div data-bbox="965 1489 1348 1736"> <p style="text-align: center;">Histogramm der Grauwerte</p> </div> </div>

10. Wissensbasis für das induktive Inferenzverfahren zur Messunsicherheitsermittlung

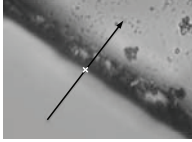
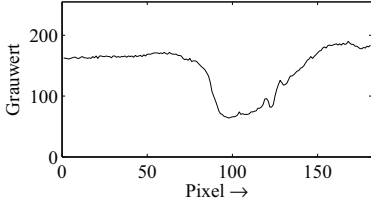
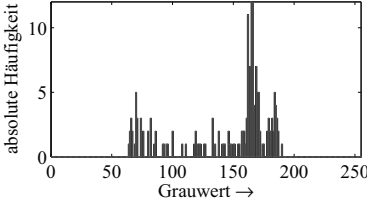

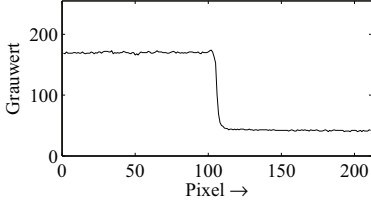
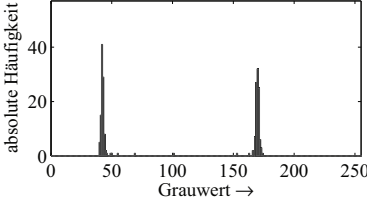
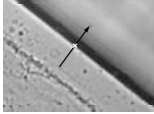
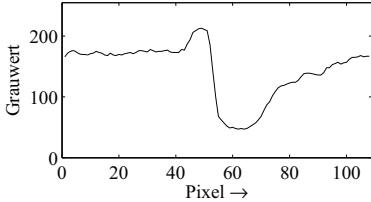
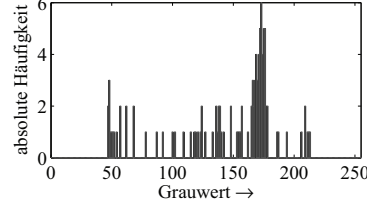
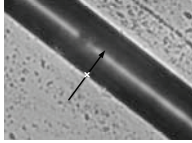
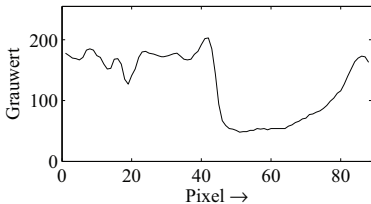
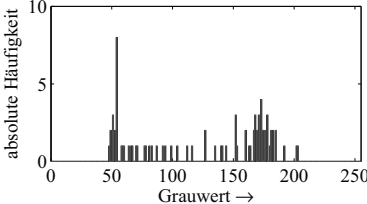
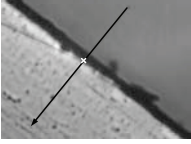
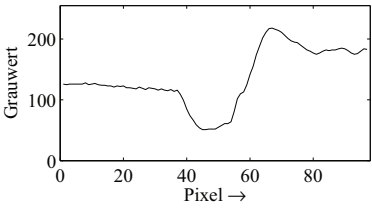
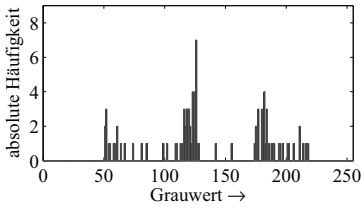

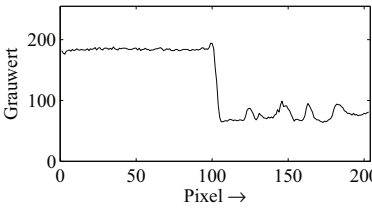
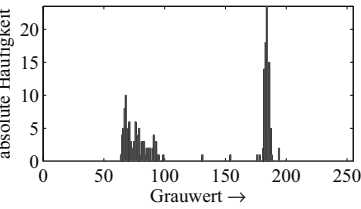
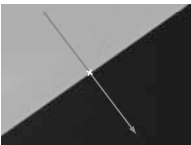
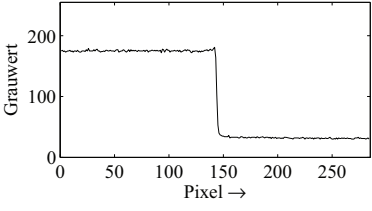
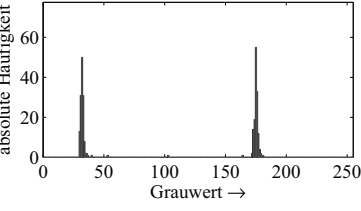
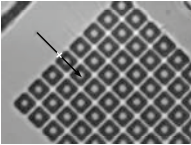
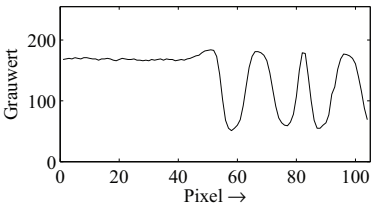
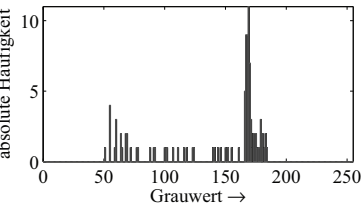
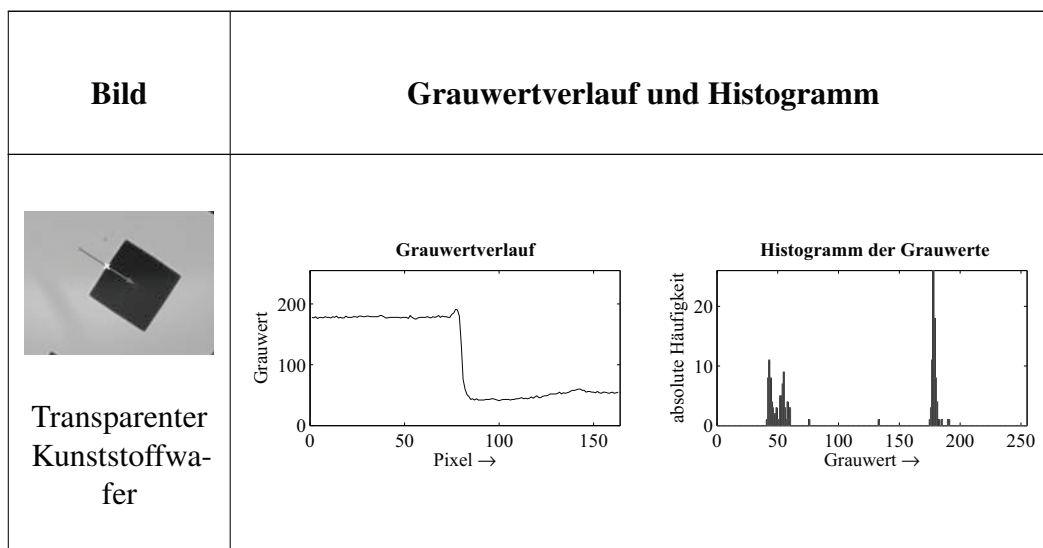
Bild	Grauwertverlauf und Histogramm	
 <p>transparenter Kunststoffwafer</p>	<p>Grauwertverlauf</p> 	<p>Histogramm der Grauwerte</p> 
 <p>Chrom-Glas-Kante</p>	<p>Grauwertverlauf</p> 	<p>Histogramm der Grauwerte</p> 
 <p>Halbtransparente Leiterplatte</p>	<p>Grauwertverlauf</p> 	<p>Histogramm der Grauwerte</p> 
 <p>Lab-on-Chip-Bauelement</p>	<p>Grauwertverlauf</p> 	<p>Histogramm der Grauwerte</p> 

Bild	Grauwertverlauf und Histogramm	
 <p>Mikrostruktur- fritte</p>	<p>Grauwertverlauf</p> 	<p>Histogramm der Grauwerte</p> 
 <p>Spektrometer- platte</p>	<p>Grauwertverlauf</p> 	<p>Histogramm der Grauwerte</p> 
 <p>R2 Normal</p>	<p>Grauwertverlauf</p> 	<p>Histogramm der Grauwerte</p> 
 <p>Transparenter Kunststoffwa- fer</p>	<p>Grauwertverlauf</p> 	<p>Histogramm der Grauwerte</p> 



10.2. Bildkenngößenbasierte Schätzung der Messunsicherheit

Für den Aufbau der Wissensbasis wurden in Voruntersuchungen zum festgelegten Messtyp an 49 Strukturübergängen je 500 Wiederholmessungen durchgeführt und die Standardabweichung als bester Schätzwert für die jeweilige Standardunsicherheit ermittelt. Parallel dazu sind für jeden der Strukturübergänge die Werte der im Rahmen der theoretischen Untersuchungen definierten 35 Bildkenngößen (BK) berechnet worden (Tabelle 5.1, Anhang A3). Zwischen den Bildkenngößen und der aus den Wiederholmessungen resultierenden Standardabweichungen wurde jeweils der Grad der Stärke der Abhängigkeit in Form des Korrelationskoeffizienten bestimmt. Die 10 signifikanten BK (Tabelle 5.2) wurden für weiterführende Untersuchungen und zur Ermittlung einer Zuordnungsvorschrift genutzt.

Wie in Abschnitt 5.1.4 beschrieben, wurde die multiple Regressionsanalyse zur Berechnung der Koeffizienten der Zuordnungsvorschrift angewandt (Tabelle 10.2). Auffallend ist der dominante Einfluss des Koeffizienten für die BK $u_{R,MCM}$. Dabei wird die starke Korrelation zwischen fortgepflanztem Grauwertgesamtrauschen und Messunsicherheit deutlich. Gleichzeitig wurde daraufhin die Frage aufgeworfen, ob die ausschließliche Berücksichtigung der BK $u_{R,MCM}$ zur Schätzung der Messunsicherheit ausreichen kann.

Abbildung 10.1 zeigt, dass bei Verwendung aller signifikanten Bildkenngößen im Vergleich zur ausschließlichen Berücksichtigung der BK $u_{R,MCM}$ geringere Abweichungen zwischen Schätzung und experimentell ermittelter Messunsicherheit aus Wiederholmessungen resultieren. Bei ausschließlicher Berücksichtigung der BK $u_{R,MCM}$ ergibt sich eine mittlere Abweichung zwischen Schätzung und Messunsicherheit aus Wiederholmessungen von ca. 26 %. Bei Verwendung aller signifikanten Kenngrößen resultiert eine mittlere Abweichung zwischen Schätzung und Messunsicherheit aus Wiederholmessungen von ca. 20 %. Vor allem bei Voruntersuchung Nr. 34 wird ersichtlich, dass die Berücksichtigung der untergeordneten Kenngrößen zur Verbesserung der Schätzung beiträgt.

Tabelle 10.2.: Koeffizienten der Multiplen Regressionsanalyse

<i>BK</i>	<i>Koeffizienten</i>
Konstante	2,86E-004
SP_u	-5,28E-007
ΔSP	-3,87E-007
$GW_{SP,min}$	-5,53E-007
K_{SP}	-6,28E-009
K_m	4,00E-007
I_m	6,67E-007
Δ_{Sprung}	-1,93E-007
s_{norm}	7,76E-007
A_R	-2,02E-004
$u_{R,MCM}$	1,27E+000

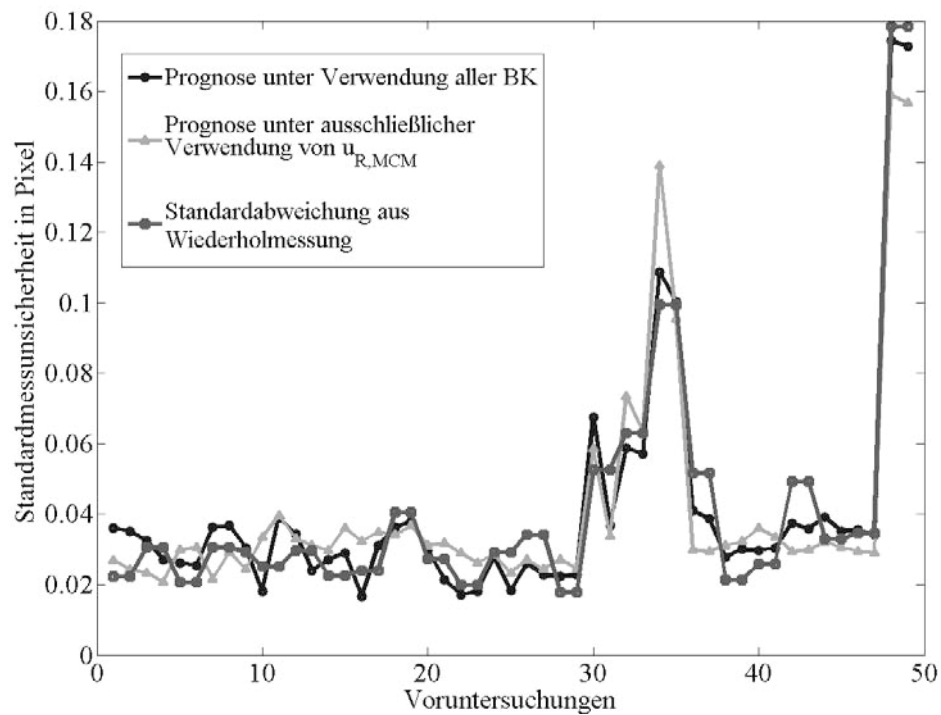


Bild 10.1.: Vergleich zwischen der geschätzten Messunsicherheit unter Verwendung aller signifikanten BK, unter ausschließlicher Verwendung der BK $u_{R,MCM}$ und der Standardabweichung aus Wiederholmessungen als Schätzwert für die Standardunsicherheit

Optimierung des Ausleseumfangs n für die Bestimmung des Grauwertgesamtrauschens

In Abschnitt 5.1.3 wurde die Bestimmung des Grauwertgesamtrauschens R_{GW} als Eingangsgröße für die Fortpflanzung innerhalb des Kantenortkriteriums (KOKs) zu der Bildkenngröße $u_{R,MCM}$ beschrieben. Dafür werden automatisiert n -fach wiederholt Grauwerte von Bildpunkten der aktuellen Messszene ausgelesen und der Mittelwert der Standardabweichung der Grauwerte jedes Bildpunktes herangezogen (Bild 5.2). Die Berechnung von R_{GW} ist abhängig vom Ausleseumfang n . Experimentell wurde ein geeigneter Wert für den Ausleseumfang von $n = 10$ bestimmt (Bild 10.2). In Bild 10.2 a) ist R_{GW} bei 5 Wiederholmessungen für verschiedene Ausleseumfänge $n = 5$ bis $n = 100$ dargestellt. Für $n = 10$ ist die geringste Standardabweichung von R_{GW} festzustellen. Bei größeren Ausleseumfängen n erhöht sich die Messzeit. Zugleich wirken sich Änderungen der Umgebungsbedingungen während des längeren Auslesevorgangs direkt auf den Wert R_{GW} aus. Daher ist die Standardabweichung von R_{GW} bei $n = 100$ vergleichsweise hoch. Eine zu geringe Anzahl wiederholter Auslesevorgänge ist mit einer höheren statistischen Unsicherheit verbunden. In Bild 10.2 b) ist die durch die wissensbasierte Methode geschätzte Messunsicherheit U eines Kreisradius in Abhängigkeit vom Ausleseumfang n dargestellt. Als Referenz ist die aus 10 Wiederholmessungen empirisch ermittelte erweiterte Messunsicherheit im Diagramm eingetragen. Der Schätzwert für $n = 10$ weist die geringste Abweichung (0,0018 Pixel \approx ca. 8 %) vom empirisch bestimmten Messunsicherheitswert auf. Daher wird für die folgenden Untersuchungen ein Ausleseumfang von $n = 10$ festgelegt.

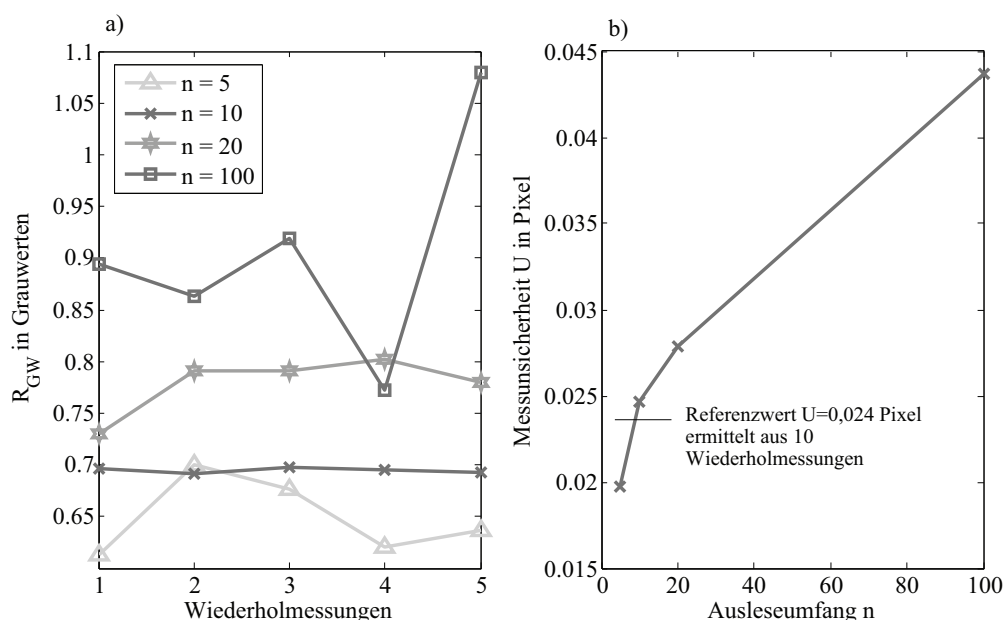


Bild 10.2.: Optimierung des Ausleseumfangs n für die Bestimmung des Grauwertgesamtrauschens R_{GW} ; a) Grauwertgesamtrauschen bei 5 Wiederholmessungen für verschiedene Ausleseumfänge; b) durch die wissensbasierte Methode geschätzte Messunsicherheit U eines Kreisradius in Abhängigkeit vom Ausleseumfang n

10.3. Verifizierung des wissensbasierten Verfahrens zur Messunsicherheitsschätzung

10.3.1. Statistische Verifizierung

Durch statistische Kenngrößen wurde die Güte bzw. die Qualität der Approximation des ermittelten theoretischen Modells bewertet (Tabelle 10.3). Mit einem Wert von 0,94 für das Bestimmtheitsmaß wurde die sehr gute Übereinstimmung zwischen der auf der Grundlage des neuen Verfahrens geschätzten Messunsicherheit und in Voruntersuchungen experimentell ermittelten Standardabweichungen nachgewiesen.

Tabelle 10.3.: Regressions-Statistik

Multipler Korrelationskoeffizient	0,9735
Bestimmtheitsmaß	0,9476
Adjustiertes Bestimmtheitsmaß	0,9338
Standardfehler	6,41E-006
Beobachtungen	49

10.3.2. Experimentelle Verifizierung

Das in Abschnitt 5 entwickelte Verfahren zur Ermittlung der Messunsicherheit von 2D-Koordinatenpunkten soll im Folgenden anhand experimenteller Untersuchungen verifiziert werden. An einer Chrom-Glas-Kreisschablone (Tabelle 9.1) wurden 2D-Koordinatenpunkte entlang eines Kreises gemessen und die Standardunsicherheiten der visuellen Antastung $u_{A,x}$ und $u_{A,y}$ von x - und y -Komponenten der 2D-Koordinatenpunkte unter Einsatz des Schätzverfahrens bestimmt. Anschließend wurden 100 Wiederholmessungen durchgeführt und die Standardabweichungen s_x und s_y als beste Schätzwerte für die Standardunsicherheit berechnet (Bild 10.3). Die charakteristischen Veränderungen von Standardunsicherheit und Standardabweichung in Abhängigkeit von der Lage des Suchstrahls sind für die x - und y -Komponenten jeweils identisch. Diese sind auf den Algorithmus zur Kantendetektion zurückzuführen, der einen eindimensionalen subpixelgenauen Kantenort SPKO auf dem vorgegebenen Suchstrahl liefert. Unter Anwendung der Vektorrechnung wird daraus ein 2D-Koordinatenpunkt bestimmt und die Messunsicherheit entsprechend dem Algorithmus auf beide Komponenten aufgeteilt (Anhang A1).

Die mittlere Abweichung der Standardunsicherheit der visuellen Antastung $u_{A,x}$ von der experimentell bestimmten Standardabweichung s_x beträgt 19,4 %. Die mittlere Abweichung zwischen $u_{A,y}$ und s_y beträgt 20,8 %. Die durchschnittliche Abweichung der geschätzten Standardunsicherheiten für 2D-Koordinatenpunkte liegt damit im Bereich des bei den Voruntersuchungen bestimmten theoretischen Werts von ± 20 %. Da es sich hierbei um positive Abweichungen handelt, das heißt, die wissensbasierte Schätzung liefert höhere Standardunsicherheiten, wird der Anteil der auf der Basis des Messergebnisses zu treffenden Fehlentscheidungen, die zu Fehler- und Fehlerfolgekosten führen würden, nicht erhöht. Es kann sichergestellt werden, dass die geforderte Genauigkeit der Messunsicherheitsschätzung von ca. ± 20 % bei Messungen von 2D-Koordinatenpunkten eingehalten werden kann.

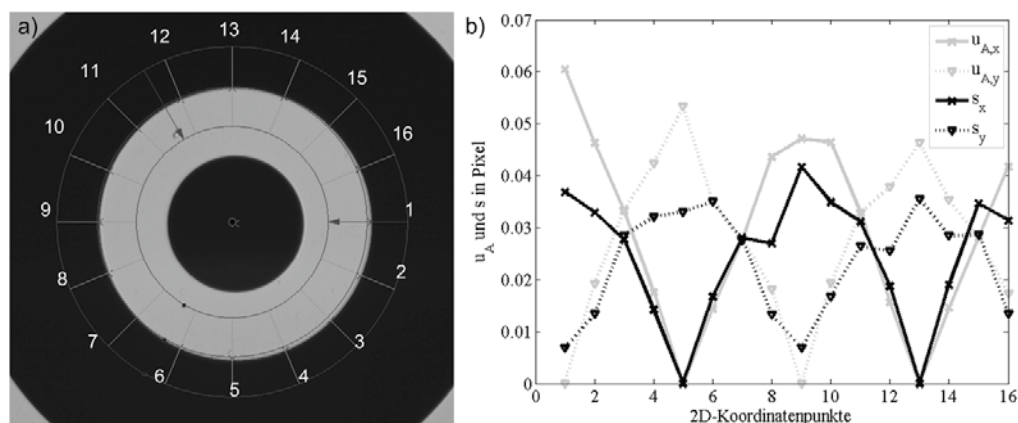


Bild 10.3.: Verifizierung des wissensbasierten Messunsicherheitsschätzverfahrens; a) Chrom-Glas-Kreisschablone mit 16 Suchstrahlen zur Antastung von 2D-Koordinatenpunkten; b) Vergleich von Standardunsicherheiten der visuellen Antastung $u_{A,x}$ und $u_{A,y}$ mit empirischen Standardabweichungen s_x und s_y aus 100 Wiederholmessungen der 16 2D-Koordinatenpunkte (Pixelfaktor = 0,71715 $\mu\text{m}/\text{Pixel}$)

Aus theoretischen Überlegungen heraus wurde für zuverlässige Ergebnisse bei der Anwendung des wissensbasierten Schätzverfahrens die Übereinstimmung des Messstyps (Hard- und Softwarekonfiguration) bei Voruntersuchungen und Messung gefordert. Im folgenden Experiment wurde untersucht, welche Abweichungen resultieren, wenn das wissensbasierte Verfahren an einem Versuchsaufbau mit sich im Vergleich zu den Voruntersuchungen stark unterscheidenden Hardwarekomponenten angewendet wird. An einem Versuchsaufbau mit einer IDS uEye-Kamera UI-1411-M und einem C-Mount-Standardobjektiv (25 mm Brennweite, 14 cm Arbeitsabstand) wurden 50 2D-Koordinatenpunkte an einer Chrom-Glas-Kante (Tabelle 9.1) in 10 Wiederholmessungen detektiert (Bild 10.4). Als Beleuchtung wurde diffuses Hellfeld-Auflicht eingesetzt. Die Software und eingesetzte Algorithmen wurden im Vergleich zu den Voruntersuchungen nicht verändert. Die mittlere Abweichung zwischen der wissensbasierten Schätzung der Standardunsicherheit und der empirischen Standardabweichung beträgt $u_{A,x} = u_{A,y} = 21,6\%$ und weicht damit gering vom Durchschnittswert von ca. $\pm 20\%$ des eigentlichen Messstyps der Voruntersuchungen ab.

10.3.3. Präzision der wissensbasierten Schätzmethode

Zur Bewertung der Qualität der wissensbasierten Schätzmethode wurde deren Präzision in Form der Standardabweichung von Ergebnissen aus wiederholten Schätzungen herangezogen. Bei realen Messbedingungen im Livebild (online) wurde die Schätzung der Messunsicherheit eines Radius der Chrom-Kreisschablone 10-fach wiederholt durchgeführt (Bild 10.5). Die prozentuale Standardabweichung der Schätzwerte beträgt 1,8%. Im Vergleich dazu wurden die gleichen Messungen im gespeicherten Bild (offline) durchgeführt. Hierfür wurden erwartungsgemäß geringere Werte für die erweiterte Messunsicherheit des Radius erzielt (Bild 10.5). Die prozentuale Standardabweichung der Schätzwerte im Offline-Modus beträgt 3,4%.

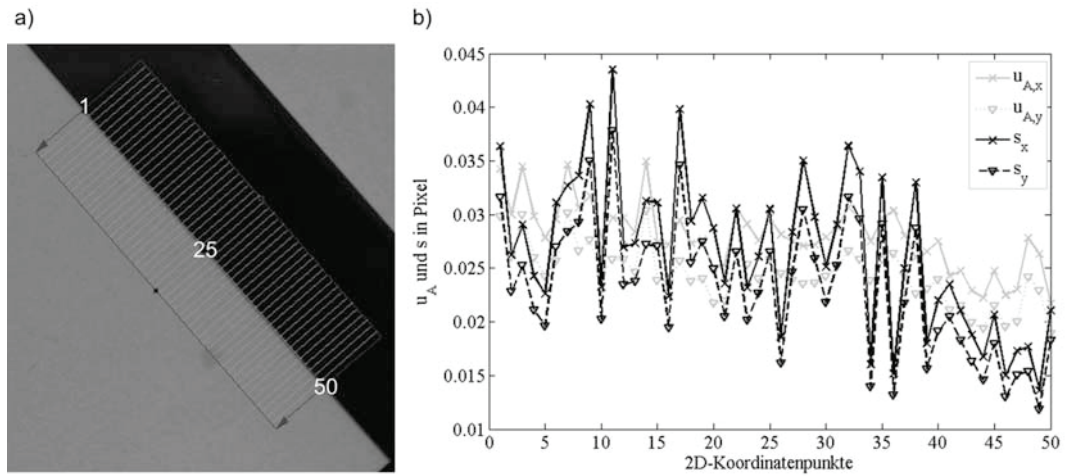


Bild 10.4.: Test des wissensbasierten Messunsicherheitsschätzverfahrens an einem von der Voruntersuchung abweichenden Messtyp; a) Visualisierung des Messobjekts Chrom-Glas-Kante mit 50 Suchstrahlen zur Antastung von 2D-Koordinatenpunkten; b) Vergleich von Standardunsicherheiten der visuellen Antastung $u_{A,x}$ und $u_{A,y}$ des Schätzverfahrens mit empirischen Standardabweichungen s_x und s_y aus 10 Wiederholmessungen der 50 2D-Koordinatenpunkte (Pixelfaktor = 4,906 $\mu\text{m}/\text{Pixel}$)

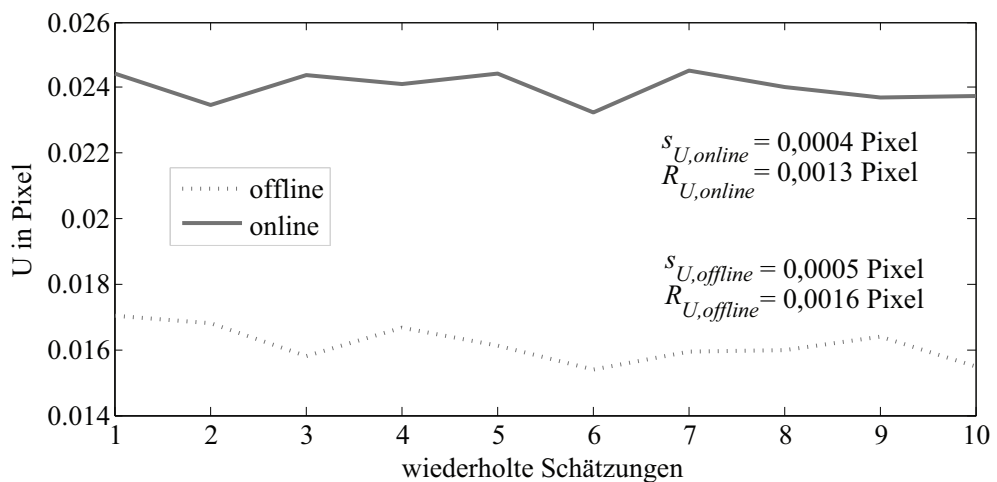


Bild 10.5.: Streuung der Messunsicherheitsschätzung für den Radius an einer Chrom-Glas-Kreisschablone im Livebild (online) und an einem gespeicherten Bild der Messszene (offline)

11. Softwarebasierte Umsetzung der Messunsicherheitsschätzung in der Präzisionskoordinatenmesstechnik mit Bildsensoren

Parallel zur konzeptionellen Entwicklung wurde das Verfahren softwarebasiert umgesetzt, um die Funktionsweise zu testen und die Zuverlässigkeit der wissensbasierten Schätzung weiter zu verbessern. Als Grundlage dafür diente die im Fachgebiet Qualitätssicherung der Universität Ilmenau verfügbare und durch das Steinbeis Transferzentrum (STZ) für Qualitätssicherung und Bildverarbeitung entwickelte objektorientierte Softwarebibliothek *Quick Image Development (QID)* für Bildverarbeitung, Qualitätssicherung, Messtechnik und Automation (Bild 11.1) [Ste10].

11.1. Softwarestruktur zur Ermittlung der Messunsicherheit von 2D-Koordinatenpunkten

Für die neuen Algorithmen zur wissensbasierten Messunsicherheitsbewertung wurde die Bibliotheksklasse *Q_MU* erstellt. Diese interagiert mit verschiedenen Klassen der Softwarebibliothek *QID*, die für die Testapplikation auf einer elementaren grafischen Benutzeroberfläche aufsetzen (Bild 11.2).

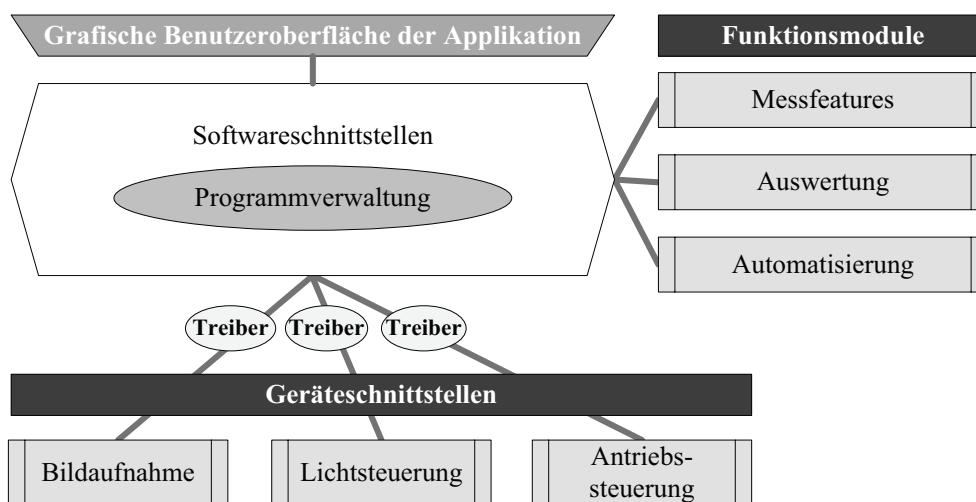


Bild 11.1.: Struktureller Aufbau einer Applikation mit QID [Ste10]

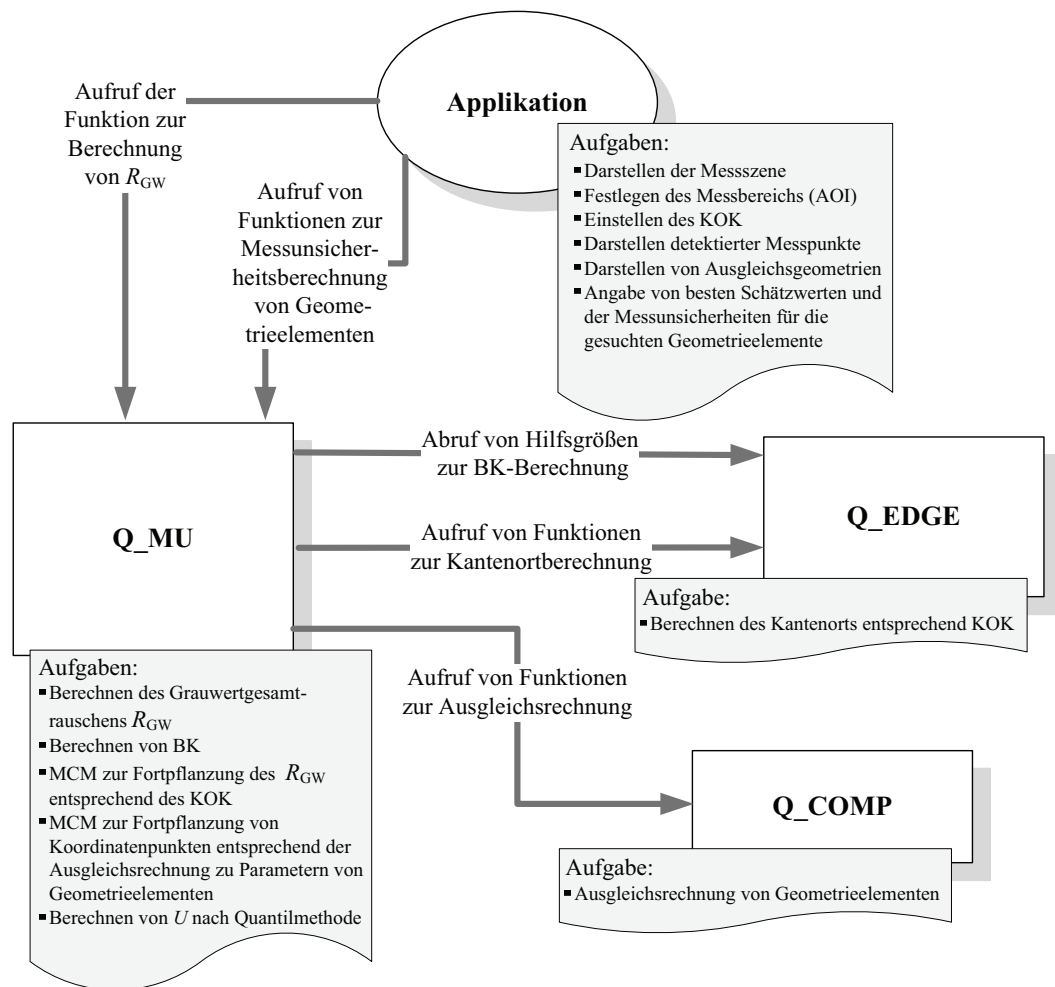


Bild 11.2.: Softwarestruktur der Testapplikation zur automatisierten, wissensbasierten Messunsicherheitsschätzung

Nach der Festlegung eines AOI durch den Nutzer wird automatisch der Algorithmus zur Ermittlung des Grauwertgesamttrauschens R_{GW} gemäß Bild 5.2 gestartet. Hierzu wurde im Voraus experimentell der Verteilungstyp des Grauwertgesamttrauschens untersucht (Bild 11.6). Die Normalverteilungshypothese konnte mit dem Lilliefors-Testverfahren nicht widerlegt werden. Daher wurde der Verteilungstyp der Normalverteilung innerhalb der Softwarealgorithmen zur Messunsicherheitsfortpflanzung von R_{GW} zu Grunde gelegt.

Wie in Abschnitt 2.2.4 dieser Arbeit beschrieben, wird zur Messunsicherheitsfortpflanzung die Monte-Carlo-Methode verwendet. Jeder Wert des Grauwertsignalverlaufs wird mit der ermittelten normalverteilten Messunsicherheit versehen. Mit den *unsicheren* Signalen wird der Kantenort mit den in der *QID* vorhandenen Kantenanastastverfahren (Bibliotheksklasse *Q_Edge*) berechnet. Der auf diese Weise berechnete Kantenort wird ebenfalls als Zufallsgröße betrachtet.

Durch softwarebasierte Realisierung der Quantil-Methode (Abschnitt 2.2.4) wird die Standardunsicherheit $u_{R,MCM}$ des subpixelgenauen Kantenorts, die sich durch numerische Fortpflanzung von R_{GW} auf dem jeweiligen Suchstrahl ergibt, berechnet.

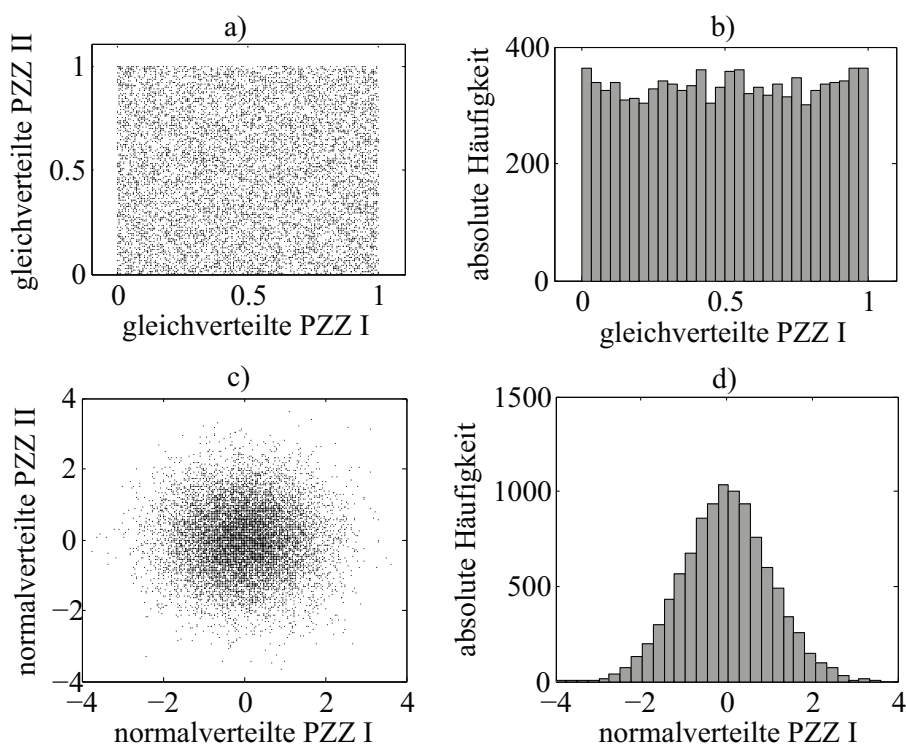


Bild 11.3.: Visualisierungen von je 10000 Pseudozufallszahlen; a) Nachweis der Nicht-Korrelation (Korrelationskoeffizient $r = 0,0006$) der generierten gleichverteilten Pseudozufallszahlen (PZZ) zwischen 0 und 1; b) Histogramm der gleichverteilten PZZ; c) Nachweis der Nicht-Korrelation ($r = -0,0034$) der durch rationale Approximation [ZS65] aus a) erzeugten normalverteilten PZZ mit Erwartungswert $\mu = 0$ und Standardabweichung $s = 1$; d) Histogramm der normalverteilten PZZ

Software-Algorithmus zur Monte-Carlo-Methode

Da bei der MCM die Variierung der Eingangsgrößen durch Zufallszahlen realisiert wird, kommt deren Erzeugung eine wichtige Bedeutung zu. Echte Zufallszahlen, deren Folge nicht reproduzierbar ist, können ausschließlich auf der Grundlage physikalischer Prozesse, z. B. Transistorrauschen, erzeugt werden. Im Gegensatz dazu basieren rechnergestützte Simulationen auf deterministisch, über einen Algorithmus erzeugten, gleichverteilten *Pseudozufallszahlen* (PZZ) [VDI85]. Es konnte experimentell nachgewiesen werden, dass die PZZ der dieser Arbeit zu Grunde liegenden Software über keine signifikanten künstlichen Korrelationen untereinander verfügen (Bild 11.3). In theoretischen Untersuchungen (Abschnitt 5.1.5) wurde, basierend auf Verteilungstests festgestellt, dass die x - und y -Werte der 2D-Koordinatenpunkte als normalverteilt angenommen werden können. Aus gleichverteilten PZZ können theoretisch mittels der Inversionsmethode für jeden beliebigen univariaten Verteilungstyp PZZ erzeugt werden [Übe95]. Für die invertierte Normalverteilung existiert kein geschlossener Formelausdruck. In der Fachliteratur sind Approximationsverfahren basierend auf Polynomen oder rationalen Funktionen zu finden, die zur Erzeugung von normalverteilten PZZ verwendet werden können.

Für die softwarebasierte Umsetzung wurde als Näherungslösung folgende rationale Approximation angewandt [ZS65]:

$$\Phi(p) = h - \frac{c_0 + c_1 h + c_2 h^2}{1 + d_1 h + d_2 h^2 + d_3 h^3}; \quad h = \sqrt{\ln \frac{1}{p^2}} \quad (11.1)$$

$$c_0 = 2,515517; \quad c_1 = 0,802853; \quad c_2 = 0,010328$$

$$d_1 = 1,432788; \quad d_2 = 0,189269; \quad d_3 = 0,001308$$

Diese Näherungslösung gilt für $0 < p \leq 0,5$. Für Werte der gleichverteilten PZZ $p > 0,5$ gilt $\Phi(p) = -\Phi(1 - p)$.

Zur Ermittlung einer geeigneten Anzahl der Experimente w bei der Monte-Carlo-Methode und zur Untersuchung der Stabilität wurden experimentelle Untersuchungen durchgeführt (Bild 11.5). Als Indikator für die Stabilität wurde der Quotient aus Standardabweichung und Mittelwert der wiederholt simulierten erweiterten Messunsicherheit U definiert. Der Abstand einer Geraden aus fünf Punkten zum Schwerpunkt einer zweiten Geraden (Bild 11.4) wurde als beispielhafte Messaufgabe definiert. Mit konstanten Eingangsdaten wurde die MCM für verschiedene Standardunsicherheiten der 2D-Koordinatenpunkte und unter Variation von w je 1000 mal durchgeführt. Im Ergebnis wurde festgestellt:

- Die Veränderung der Standardabweichung der Geometrielemente hat keinen Einfluss auf die Stabilität der MCM.
- Die Variation der Standardunsicherheiten u der 2D-Koordinatenpunkte hat keinen Einfluss auf die Stabilität der MCM.
- Mit steigender Anzahl w an Monte-Carlo-Versuchen steigt die Stabilität der MCM und damit verbunden die Rechenzeit. Für ausreichend zuverlässige Ergebnisse ($s_U/\bar{U} \cong 1\%$) wird die Anzahl der Experimente $w = 10000$ festgelegt. Damit ist die Messunsicherheitsschätzung nahezu ohne zeitliche Beeinträchtigung des Messablaufs mit der vorhandenen Rechentechnik möglich.

Software-Algorithmus für die Quantil-Methode

Entsprechend der eingestellten Anzahl w der Experimente bei der MCM werden w Werte für den subpixelgenauen Kantenort ermittelt. Diese werden aufsteigend sortiert. Gemäß dem vorgegebenen Vertrauensniveau $(1 - \alpha)$ werden obere und untere Grenzen bestimmt:

- unterer Werte-Index: $\alpha/2 \cdot w$,
- oberer Werte-Index: $(1 - \alpha/2) \cdot w - 1$.

Die Standardunsicherheit $u_{R,MCM}$ wird wie folgt berechnet:

$$u_{R,MCM} = ((1 - \alpha/2) \cdot w - 1) - \alpha/2 \cdot w / 4. \quad (11.2)$$

Eingangsdaten zur Berechnung weiterer signifikanter BK des gewählten KOKs werden in einer Struktur global gespeichert. Aus den BK und der hinterlegten Zuordnungsvorschrift wird die Standardunsicherheit des detektierten Kantenorts auf dem Suchstrahl ermittelt (Bild 11.6).

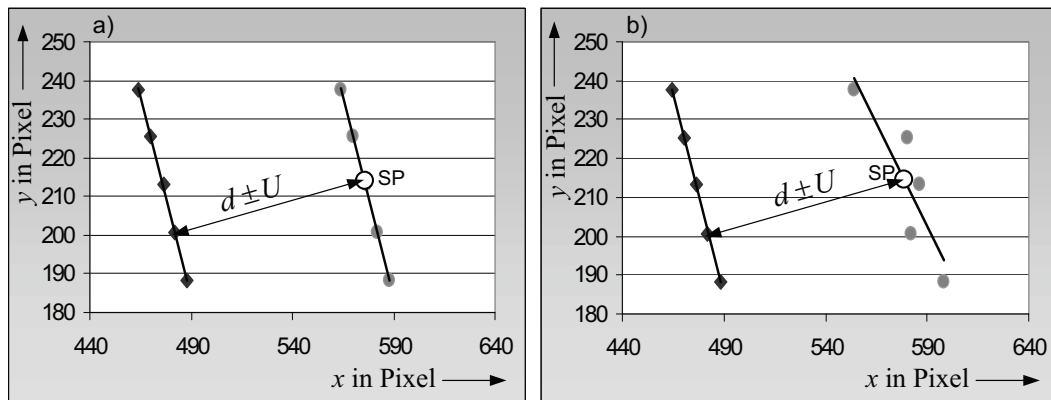


Bild 11.4.: Messaufgabe: Abstand Gerade-Punkt; a) minimale Standardabweichung der beiden Geraden; b) erhöhte Standardabweichung der zweiten Gerade

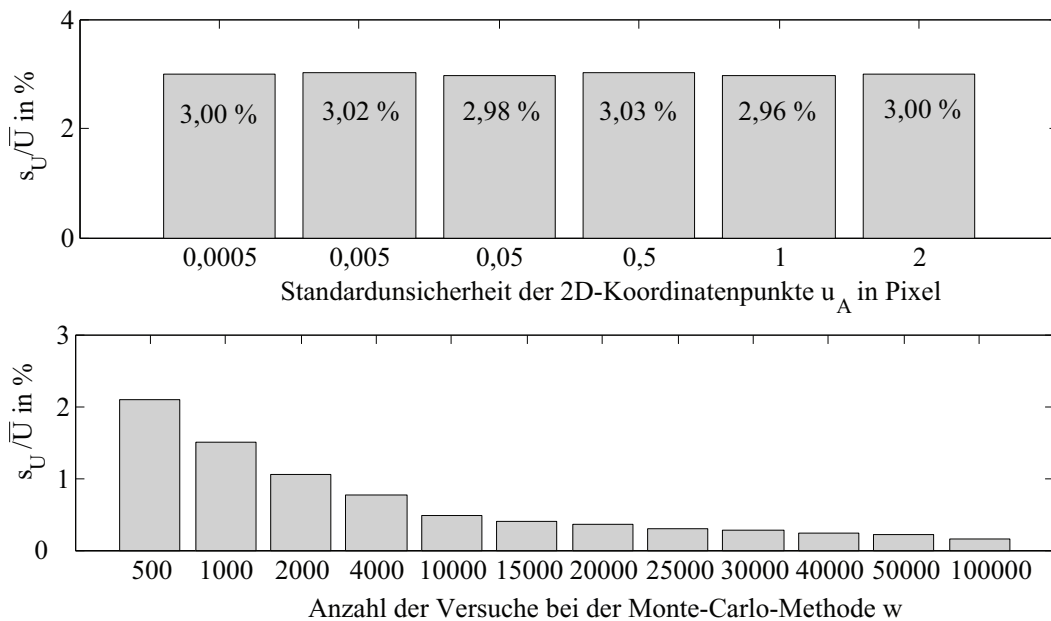


Bild 11.5.: Darstellung der Stabilität der MCM am Beispiel der Messaufgabe Abstand Gerade-Punkt; a) Darstellung der Unabhängigkeit von Standardunsicherheiten u der 2D-Koordinatenpunkte und der Stabilität der MCM für $w = 1000$; b) Visualisierung des Zusammenhangs zwischen Anzahl der Experimente w und der Stabilität s_U/\bar{U} der Monte-Carlo-Methode

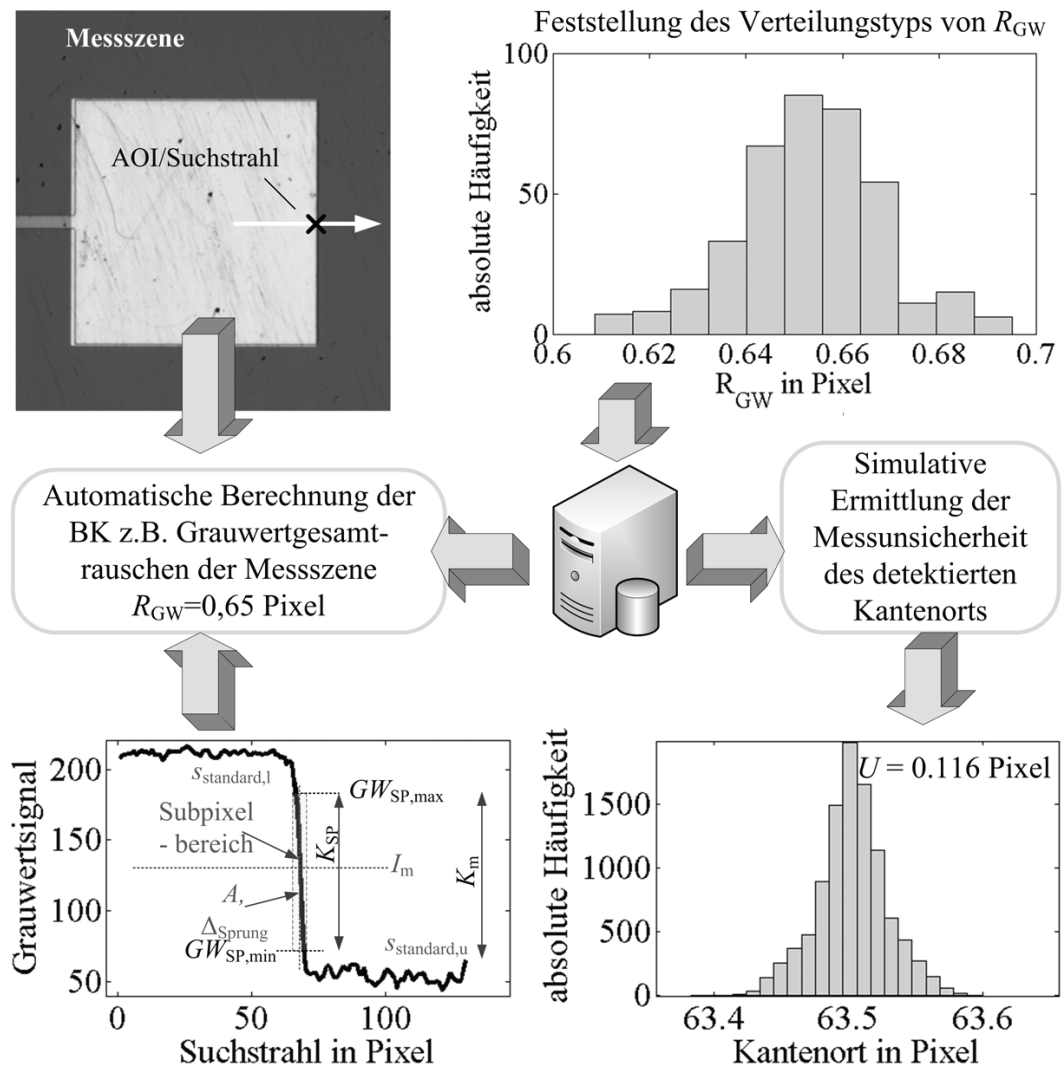


Bild 11.6.: Abstraktion der Programmabläufe bei der softwarebasierten Ermittlung der Messunsicherheit des detektierten Kantenorts

11.2. Softwarestruktur zur Ermittlung der prüfmerkmalbezogenen Messunsicherheit

Da die Angabe der Unsicherheit von 2D-Koordinatenpunkten für die meisten industriellen Messaufgaben nicht ausreicht, müssen die Punktmessunsicherheiten zur Messunsicherheit von Prüfmerkmalen fortgepflanzt werden. Da für Geometriemessungen Gaußsche Ausgleichsalgorithmen zum Einsatz kommen, welche durch die Software in Form iterativer Algorithmen umgesetzt sind, kann keine lineare oder linearisierbare Modellgleichung hergeleitet werden. Für die Realisierung der Unsicherheitsfortpflanzung der Standardunsicherheiten von 2D-Koordinatenpunkten kommen nur numerische Methoden in Frage. Als sehr effektives Verfahren hierfür wurde die *Monte-Carlo-Methode* (MCM), welche im Beiblatt 1 des GUM [BB107] als alternatives Werkzeug zur quadratischen Unsicherheitsfortpflanzung nach Gauß beschrieben ist, ausgewählt (Abschnitt 2.2.4). Der Ausgangspunkt der MCM ist die Erstellung eines Modells, mit dessen Hilfe das Verhalten des betrachteten Systems unter dem Einfluss verschiedener Eingangsgrößen so genau wie möglich nachgestellt werden kann. Das Modell muss in der Lage sein, den Endzustand des Systems in Abhängigkeit von den Eingangsgrößen korrekt wiedergeben zu können [Bai04]. Für die Problemstellung dieser Arbeit ist das Modell durch die bereits in der Softwarebibliothek (Bibliotheksklasse *Q_COMP*) enthaltenen Ausgleichsalgorithmen gegeben. Die x - und y -Komponenten der 2D-Koordinatenpunkte mit ihren gemäß Kapitel 5.1.5 durch Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen (PDF) charakterisierten Unsicherheiten sind die Eingangsgrößen des dieser Arbeit zu Grunde liegenden Modells. Durch w -fach wiederholte Experimente werden w diskrete Werte der Ausgangsgröße bzw. des Prüfmerkmals ermittelt, wobei die Eingangsgrößen entsprechend den zugewiesenen PDFs stochastisch variiert werden. Die PDFs der Eingangsgrößen und die auf der Messaufgabe basierenden Ausgleichsalgorithmen bestimmen die charakteristische PDF der Ausgangsgröße. Durch statistische Auswertung der diskreten Werte der Ausgangsgröße werden quantitative Kenngrößen berechnet, die Rückschlüsse auf das betrachtete System erlauben, obwohl nur unvollständige bzw. unsichere Erkenntnisse über die Eingangsgrößen vorliegen. Zur Ermittlung der Messunsicherheit der Messgröße aus den w diskreten Werten wurde wiederum die Quantil-Methode verwendet.

12. Demonstration der wissensbasierten Messunsicherheitsschätzung an praxisrelevanten Messaufgaben

12.1. Vergleich der Messunsicherheit von 2D-Koordinatenpunkten an unterschiedlichen Messobjekten

Zur beispielhaften Demonstration der neuen Methode zur wissensbasierten Abschätzung der Messunsicherheit wurden 2D-Koordinatenpunkte an verschiedenen Messobjekten angetastet. Bei den folgenden Experimenten zur Demonstration des wissensbasierten Messunsicherheits-Schätzverfahrens wird ein 95 %-Vertrauensniveau zu Grunde gelegt. Messobjekte mit definierten Mikrostrukturen und idealen Strukturübergängen sind Mikronormale. Es ist anzunehmen, dass die Kantendetektion an derartigen Strukturübergängen niedrige Messunsicherheiten liefert. Experimentell konnte diese Annahme bestätigt werden. Die mittlere Standardunsicherheit angetasteter 2D-Koordinatenpunkte entlang eines Kreises auf dem Mikronormal (Bild 12.1 a)) beträgt ca. $0,12 \mu\text{m}$, automatisiert berechnet durch die neu entwickelte Methode. Im Vergleich dazu beträgt die mittlere Standardunsicherheit von Koordinatenpunkten entlang eines Kreises einer industriell gefertigten Leiterplatte (Bild 12.1 b)) ca. $0,20 \mu\text{m}$. Im Diagramm (Bild 12.1 c)) wird gezeigt, dass die geschätzten Standardunsicherheiten der 2D-Koordinatenpunkte (Mittelwert aus x - und y -Standardunsicherheit) des Mikronormals im Vergleich zur Leiterplatte wesentlich homogener und geringer sind.

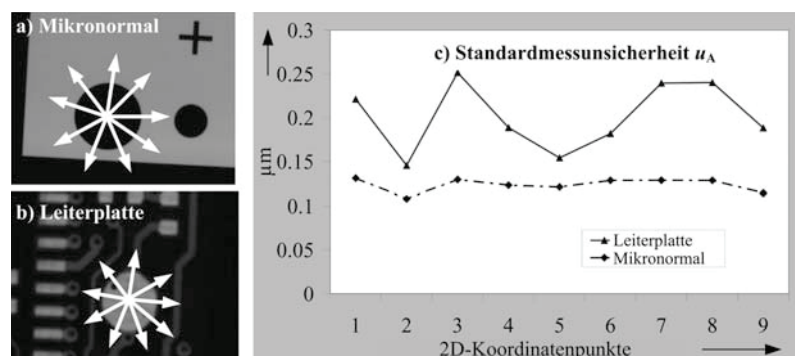


Bild 12.1.: Vergleich von Standardunsicherheiten u_A angetasteter 2D-Koordinatenpunkte entlang eines Kreises; a) Messobjekt Mikronormal mit Darstellung der Suchstrahlen zur Kantendetektion; b) Messobjekt Leiterplatte mit Darstellung der Suchstrahlen zur Kantendetektion; c) Vergleich der geschätzten Standardunsicherheiten u_A (Mittelwerte aus x - und y -Komponenten) der detektierten 2D-Koordinatenpunkte [WKL10]

12.2. Messunsicherheitsschätzung an einem LTCC-Elektronikbauteil

Als Alternative zu organischen Leiterplatten haben sich in den letzten Jahren LTCC-Bauteile (Low Temperature Cofired Ceramic) vor allem für Hochfrequenz-, Automotive- und Mikrosystemanwendungen herausgestellt. An einem LTCC-Bauelement für Hochfrequenzanwendungen wird das wissensbasierte Verfahren zur Messunsicherheitsschätzung im Folgenden demonstriert. Als Prüfmerkmal wurde der Radius einer Kreisstruktur festgelegt. Um die Qualität des geschätzten Messunsicherheitswerts für den Kreisradius zu bewerten, wurden 10 Messungen am gleichen Messobjekt unter Wiederholbedingungen durchgeführt (Tabelle 12.1).

Die unter Anwendung des wissensbasierten Schätzverfahrens bestimmte erweiterte Messunsicherheit $U = 0,2045$ Pixel weicht um 7,37 % von der experimentell ermittelten Messunsicherheit von $U = 0,1905$ Pixel ab (Bild 12.2).

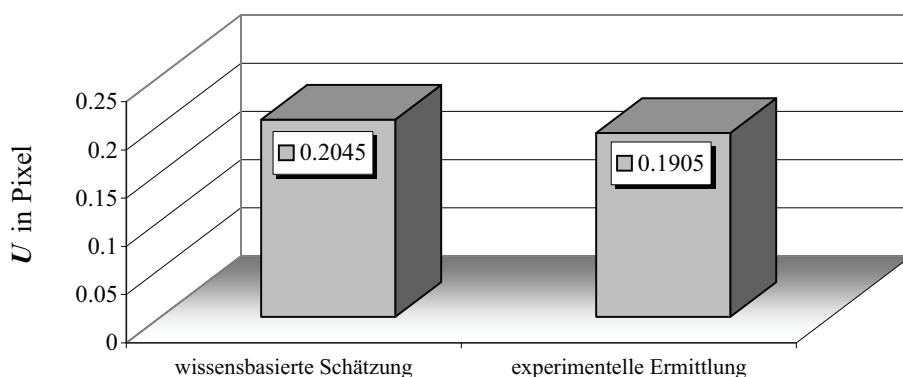


Bild 12.2.: Vergleich der erweiterten Messunsicherheit U des Radius an einem LTCC-Elektronikbauteil resultierend aus der wissensbasierten Schätzung und der experimentellen Ermittlung

Tabelle 12.1.: Wiederholmessungen des Kreisradius an einem LTCC-Elektronikbauteil

Messwert in Pixel	Berechnung der Messunsicherheit
28,4472	<p>Standardabweichung:</p> $s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (x_{mj} - \bar{x}_m)^2} \text{ (Gleichung 2.1)}$ <p>$s = 0,0586$ Pixel</p> <p>Erweiterte Messunsicherheit:</p> $U = s \cdot t_{1-\alpha/2, n-1} \text{ (Gleichung 2.37)}$ <p>$U = 0,0586 \cdot 3,25$ (für $\alpha = 0,01$ und $n = 10$)</p> <p>$U = 0,1905$ Pixel</p>
28,4388	
28,4669	
28,3861	
28,3435	
28,4499	
28,5603	
28,5017	
28,4585	
28,4372	

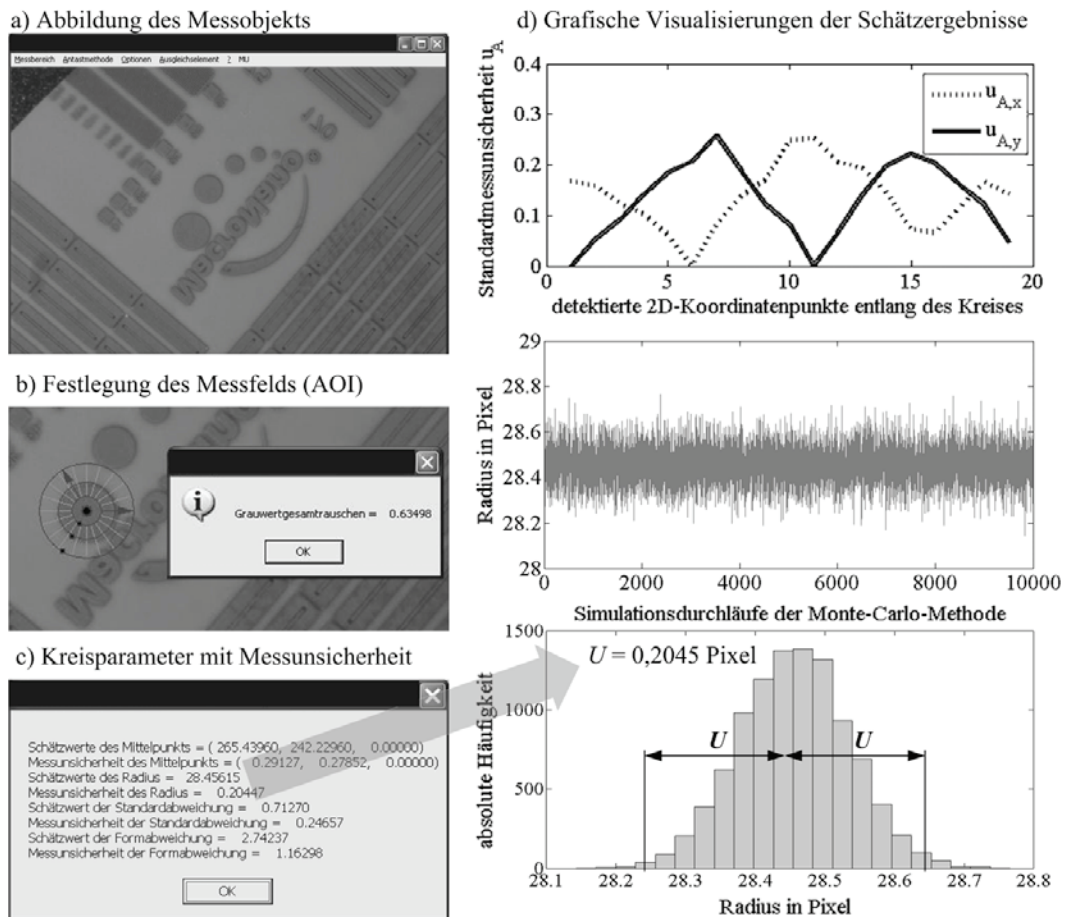


Bild 12.3.: Radiusmessung an einem LTCC-Elektronikbauteil; a) Abbildung der Messszene am Messobjekt; b) manuelle Festlegung des Messfelds (AOI) durch den Nutzer und automatisierte Berechnung des Grauwertgesamtrauschens; c) Angabe der Messergebnisse und der geschätzten Messunsicherheit für alle Kreisparameter; d) grafische Visualisierungen der Messunsicherheitsschätzung für die detektierten 2D-Koordinatenpunkte und den Kreisradius (Pixelfaktor = 4,906 $\mu\text{m}/\text{Pixel}$)

Zu Beginn des Messprozesses erfolgten die Positionierung des Messobjekts und die Parametrierung des Bildsensors zur optimalen Abbildung des zu messenden Geometrieelements (Bild 12.3 a)). Anschließend wurde das Messfeld (AOI) zur Erfassung des Geometrieelements festgelegt und die Suchstrahlanzahl eingestellt. In Bild 12.3 b) ist das Kreis-AOI mit 20 Suchstrahlen dargestellt. Direkt nach der Definition des AOI wurde automatisiert das Grauwertgesamtrauschen als Ausgangswert für die Bildkenngröße $u_{R,MCM}$ berechnet. Der Menübefehl `MU > Kreis mit Unsicherheit` bewirkt die Detektion von 2D-Koordinatenpunkten entlang der Suchstrahlen, die Schätzung der zugehörigen Messunsicherheiten und die Fortpflanzung der Standardunsicherheiten von 2D-Koordinatenpunkten zu Messunsicherheitsschätzwerten der Kreisparameter innerhalb der Ausgleichsrechnung. Nahezu ohne Zeitverzug wurden die Messergebnisse bestimmt (Bild 12.3 c)). Für den Kreismittelpunkt und den Kreisradius werden Erwartungswerte und erweiterte Messunsicherheiten angegeben. Außerdem werden, als zusätzliche Information, die aus der Ausgleichsrechnung resultierenden Kenngrößen Standardabweichung und Formabweichung mit zugehörigen erweiterten Messunsicherheiten angezeigt. In den Diagrammen (Bild 12.3 d)) sind die mit dem neuen Ansatz ermittelten Schätzwerte visualisiert. Im obersten Diagramm sind die Standardunsicherheiten u_A von x - und y -Komponenten der detektierten 2D-Koordinatenpunkte dargestellt. Bedingt durch den Algorithmus der Kantendetektion liegt die Messunsicherheit einer 2D-Koordinatenpunkt-Komponente nahezu bei Null, wenn der zugehörige Suchstrahl in etwa parallel zu der jeweils anderen Bildkoordinatenachse verläuft. Die jeweils andere 2D-Koordinatenpunkt-Komponente weist dann eine entsprechend höhere Messunsicherheit auf. Die Ursache dieses Effekts ist die Umrechnung der eindimensionalen Messunsicherheit für den entlang des Suchstrahls detektierten subpixelgenauen Kantenort *SPKO* zu Messunsicherheiten für die x - und y -Komponenten eines 2D-Koordinatenpunkts (Anhang A1). Das mittlere Diagramm zeigt die unter Anwendung der Monte-Carlo-Methode berechneten 10000 Werte für den Kreisradius. In Bild 12.3 d) unten ist das Histogramm aller Werte für den Radius mit dessen erweiterter Messunsicherheit dargestellt. Es ist ersichtlich, dass der Verteilungstyp der Normalverteilung durch die numerische Fortpflanzung der Standardunsicherheiten von 2D-Koordinatenpunkten zum Kreisradius bei der Ausgleichsrechnung kaum verändert wurde. Obwohl die Messungen und auch die Messunsicherheitsschätzung an dem alternativen Messaufbau (Abschnitt 10.3.2) erfolgten, ist die Abweichung der erweiterten Messunsicherheit von 7,37 % wesentlich geringer als die der Standardunsicherheit von 2D-Koordinatenpunkten. Eine Ursache hierfür liegt in der Berücksichtigung der Anzahl an Wiederholmessungen bei der Berechnung der erweiterten Messunsicherheit.

12.3. Messunsicherheitsschätzung an einem Kalibriernormal

Zur Kalibrierung von KMGs mit visuellen Sensoren werden Messobjekte mit idealen Strukturübergängen, wie beispielsweise Chrom-Glas-Übergänge, verwendet. An einer kalibrierten Chrom-Glas-Kreisschablone mit Kreisgeometrien erfolgte eine weitere Untersuchung zur Bewertung des neu entwickelten Messunsicherheitsschätzverfahrens (Bild 12.5).

Bei der experimentellen Messunsicherheitsermittlung auf der Basis von 10 Wiederholmessungen wurde eine erweiterte Messunsicherheit von 0,0212 Pixel für den Radius berechnet (Bild 12.4). Die Abweichung zwischen wissensbasierter Schätzung und experimenteller Ermittlung beträgt 5,16 %. Diese Untersuchung erfolgte am gleichen Messaufbau, an dem auch die Voruntersuchungen durchgeführt wurden. Wie schon bei der experimentellen Untersuchung am LTCC-Elektronikbauteil festgestellt wurde, ist die Abweichung zwischen wissensbasiertem Schätzverfahren und empirisch ermittelter erweiterter Messunsicherheit des Kreisradius wesentlich geringer als die der Standardunsicherheit der 2D-Koordinatenpunkte. Innerhalb dieses Experiments wurde die MCM mit nur $w = 1000$ Versuchen realisiert. Die Histogrammdarstellung der simulierten Werte des Radius weicht aus diesem Grund etwas von einer idealen Normalverteilung ab (12.5 d)).

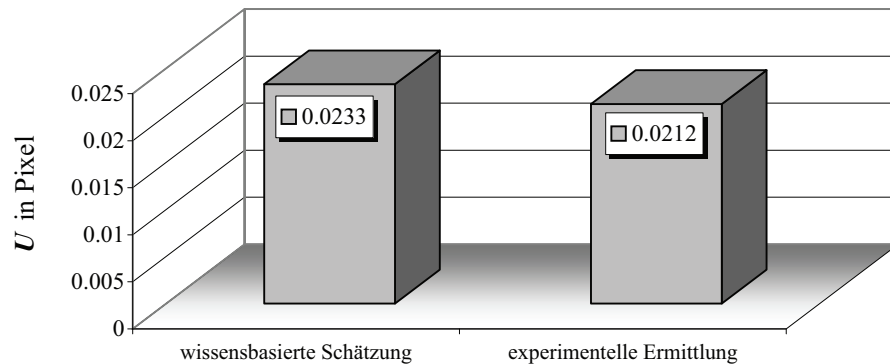


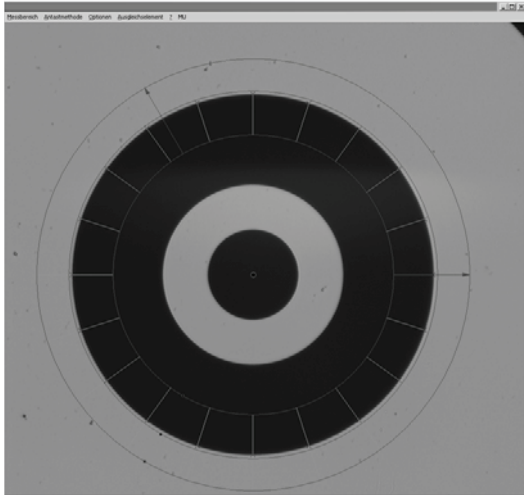
Bild 12.4.: Vergleich der erweiterten Messunsicherheit U des Radius einer Chrom-Glas-Kreisschablone resultierend aus der wissensbasierten Schätzung und experimentellen Ermittlung

12.4. Messunsicherheitsschätzung an einer Leiterplatte

Die Qualitätssicherung von Leiterplatten mit aufgebrachten Elektronikbauteilen gewinnt mit der zunehmenden Miniaturisierung immer mehr an Bedeutung. Typische Prüfmerkmale an Leiterplatten sind Breiten, Längen und Dicken. Diese Messgrößen können durch Kombination von Geometrieelementen bestimmt werden. Am Beispiel der Breitenmessung einer Komponente auf einer halbtransparenten Leiterplatte wurden Untersuchungen zur Verifizierung des neu entwickelten Messunsicherheits-Schätzverfahrens durchgeführt (Bild 12.8). Die Messung erfolgte unter Einsatz von Aufsichtbeleuchtung an einem von den Voruntersuchungen abweichenden Messplatz. Die Breite wurde auf der Basis des Abstands der beiden Außenkanten der Leiterplattenkomponente bestimmt. Die Messunsicherheiten der Parameter der beiden Geraden wurden weiter fortgepflanzt (Bild 12.6). Bei der experimentellen Messunsicherheitsermittlung auf der Basis von 10 Wiederholmessungen wurde eine erweiterte Messunsicherheit von 0,0341 Pixel berechnet (Bild 12.7). Die Abweichung zwischen wissensbasierter Schätzung und experimenteller Ermittlung beträgt 1,7 %.

12. Demonstration der wissensbasierten Messunsicherheitsschätzung an praxisrelevanten Messaufgaben

a) Festlegung des AOI in der Abbildung des Messobjekts



b) Angabe des Grauwertgesamtrauschens



c) Kreisparameter mit Messunsicherheit



d) Grafische Visualisierungen der Schätzergebnisse

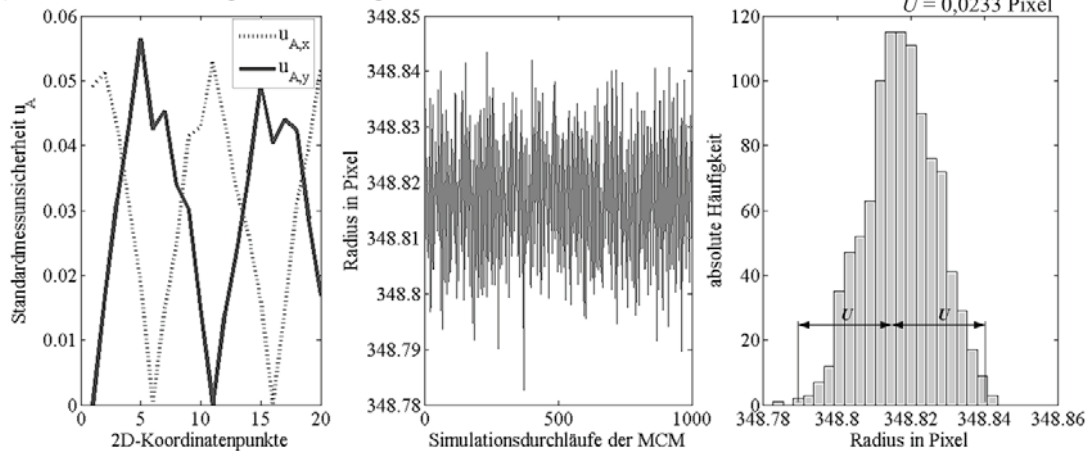


Bild 12.5.: Radiusmessung eines Kreises auf einer Chrom-Glas-Kalibrierschablone;
 a) Abbildung des Messobjekts mit manueller Festlegung des Messfelds (AOI) durch den Nutzer; b) automatisierte Berechnung des Grauwertgesamtrauschens; c) Angabe der Messergebnisse und der geschätzten Messunsicherheit für alle Kreisparameter; d) grafische Visualisierungen der Messunsicherheitsschätzung für die 20 detektierten 2D-Koordinatenpunkte und den Kreisradius (Pixelfaktor = 0,73989 $\mu\text{m}/\text{Pixel}$)

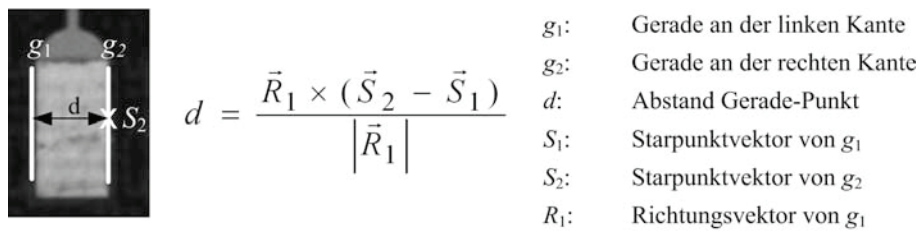


Bild 12.6.: Messung der Breite einer Elektronikkomponente auf einer Leiterplatte durch Ermittlung der beiden Geraden entlang der Außenkanten und anschließender Abstandsberechnung

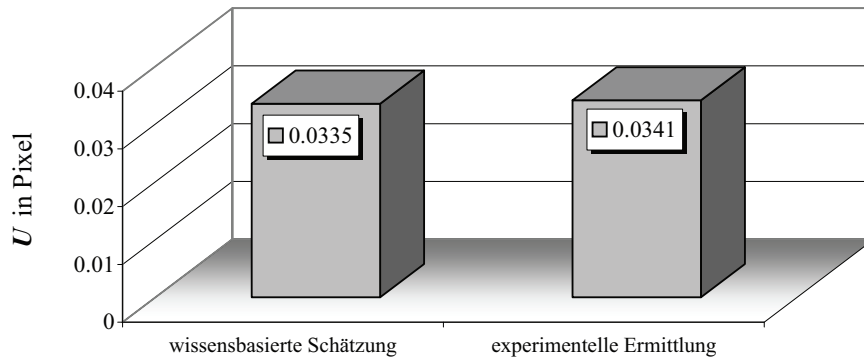


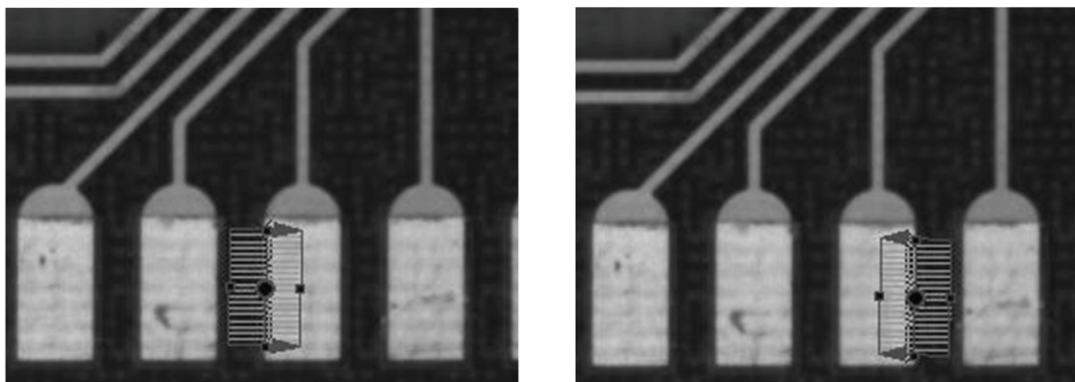
Bild 12.7.: Vergleich der erweiterten Messunsicherheit U der Breite einer Elektronikkomponente auf einer Leiterplatte resultierend aus der wissensbasierten Schätzung und experimentellen Ermittlung

12.5. Messunsicherheitsschätzung an einem Siliziumwafer

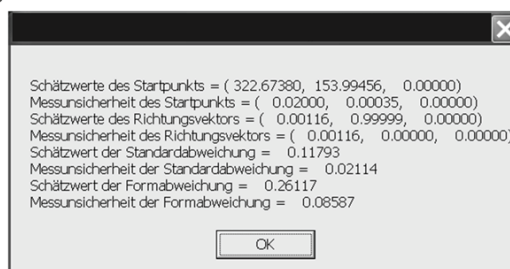
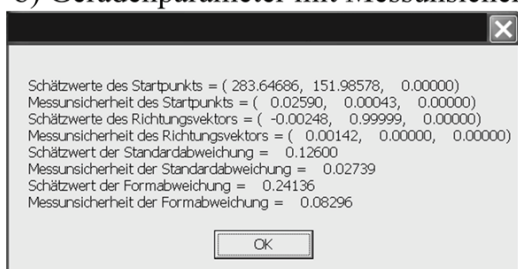
In der Mikrosystemtechnik finden vermehrt quadratische und kreisrunde ca. 1 mm dicke Scheiben, so genannte Wafer, Anwendung. Diese werden als Substrat für mikromechanische und elektronische Bauelemente, beispielsweise integrierte Schaltungen, verwendet [ITW10]. Am Beispiel einer Kreismessung auf einem Siliziumwafer wurden weitere Untersuchungen zur Verifizierung des neu entwickelten Messunsicherheits-Schätzverfahrens durchgeführt (Bild 12.10). Bei der experimentellen Messunsicherheitsermittlung auf der Basis von 10 Wiederholmessungen wurde eine erweiterte Messunsicherheit von 0,0461 Pixel berechnet. Die Abweichung zwischen wissensbasierter Schätzung und experimenteller Ermittlung beträgt 4,4 % (Bild 12.9).

12. Demonstration der wissensbasierten Messunsicherheitsschätzung an praxisrelevanten Messaufgaben

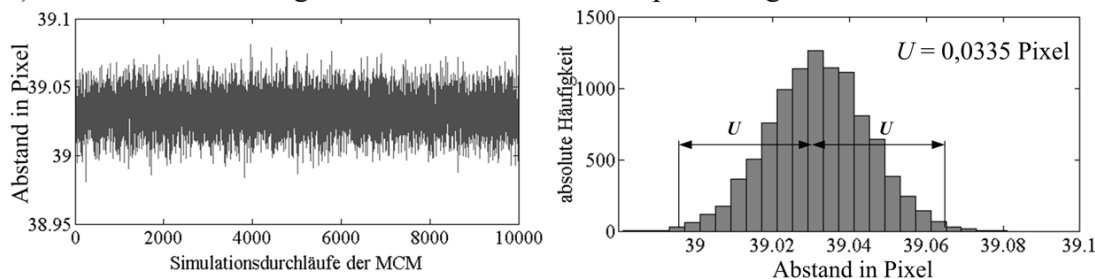
a) Festlegung der beiden Linien-AOIs als Grundlage für die Abstandsbestimmung



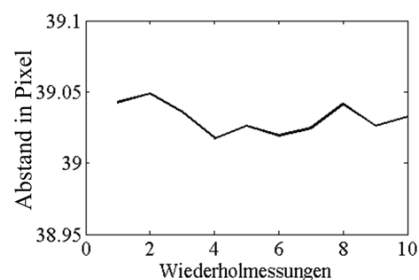
b) Geradenparameter mit Messunsicherheit



c) Abstandsberechnung mit Messunsicherheitsfortpflanzung durch MCM



d) Verifizierung der wissensbasierten Schätzung durch Wiederholmessungen



Mittelwert: $\bar{x} = 39,0315$ Pixel
 Standardabweichung: $s = 0,0105$ Pixel
 Erweiterte Messunsicherheit: $U = 0,0341$ Pixel
 Abweichung der wissensbasierten Schätzung: 1,7 %

Bild 12.8.: Abstandsmessung eines Bauelements auf einer Leiterplatte; a) Abbildung des Messobjekts mit manueller Festlegung der Messfelder (AOIs) durch den Nutzer; b) automatisierte Berechnung der Geradenparameter mit Messunsicherheiten; c) Angabe der Messergebnisse und der geschätzten Messunsicherheit für den Abstand; d) Verifizierung der Messunsicherheitsschätzung durch 10 Wiederholmessungen (Pixelfaktor = 4,906 $\mu\text{m}/\text{Pixel}$)

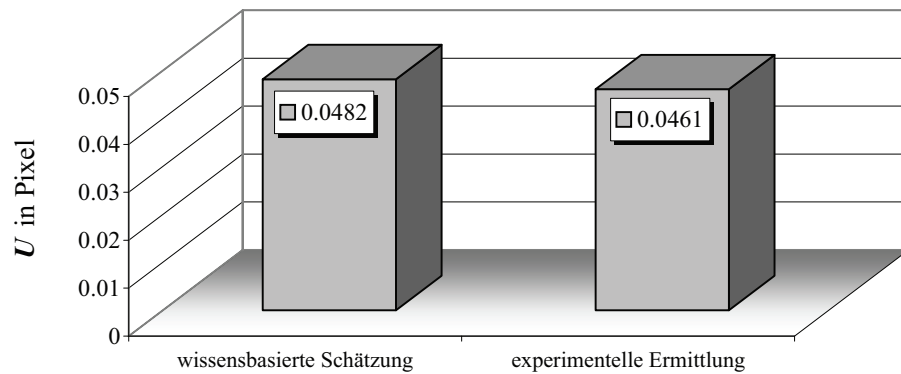


Bild 12.9.: Vergleich der erweiterten Messunsicherheit U des Radius am Siliziumwafer resultierend aus der wissensbasierten Schätzung und experimentellen Ermittlung

12.6. Messunsicherheitsschätzung an einem Kunststoffwafer

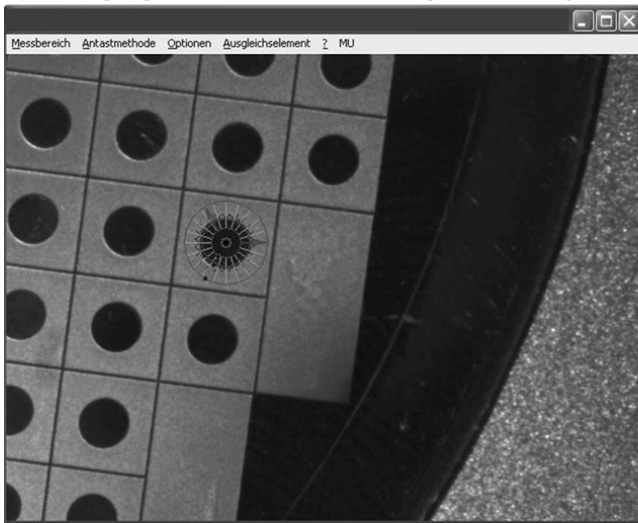
Bereits im Rahmen der Voruntersuchungen wurden Messungen an einem transparenten Kunststoffwafer durchgeführt (Tabelle 9.1). Dieses Messobjekt wurde auch für experimentelle Untersuchungen zur Verifizierung des entwickelten Schätzverfahrens genutzt. Für das Prüfmerkmal, den Radius einer kreisrunden Aussparung auf dem Wafer, wurde die Messunsicherheit unter Einsatz des wissensbasierten Schätzverfahrens und auf der Basis von 100 Wiederholmessungen ermittelt (Bild 12.13 und 12.11).

Die Detektion von 2D-Koordinatenpunkten gestaltete sich aufgrund der Transparenz des Messobjekts und dem damit verbundenen kurzen Kantenübergang als schwierig, was zu vergleichsweise hohen Standardabweichungen und Messunsicherheiten für den subpixelgenauen Kantenort führte (Bild 12.12 und Bild 12.13 c)). Diese pflanzten sich auf den Radius fort. In Abbildung 12.13 c) sind die stark streuenden Standardunsicherheiten u_A der angetasteten 2D-Koordinatenpunkte bei zwei wiederholt durchgeführten Messunsicherheitsschätzungen dargestellt. Die Signalverläufe der Grauwerte entlang des Prüfmerkmals sind material- und fertigungsbedingt sehr variabel, was sich in der vergleichsweise hohen Messunsicherheit widerspiegelt. Bei zwei Schätzungen variierten auch die Erwartungswerte des Radius um 0,0077 Pixel, was im Bereich der geschätzten Messunsicherheit liegt.

Zur Verifizierung der Messunsicherheitsschätzungen wurde die Radiusmessung 100-fach unter Wiederholbedingungen durchgeführt. Es wurde eine erweiterte Messunsicherheit von $U = 1,0563$ Pixel berechnet (Bild 12.13 d)). Die Abweichungen der beiden Messunsicherheitsschätzungen von der experimentell ermittelten Messunsicherheit betragen 0,8 % und 8,1 %.

12. Demonstration der wissensbasierten Messunsicherheitsschätzung an praxisrelevanten Messaufgaben

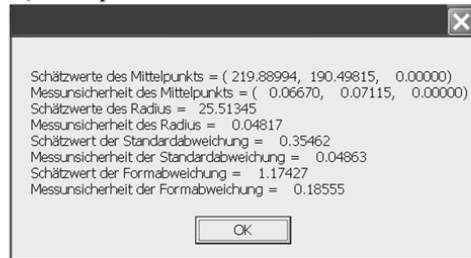
a) Festlegung des AOI in der Abbildung des Messobjekts



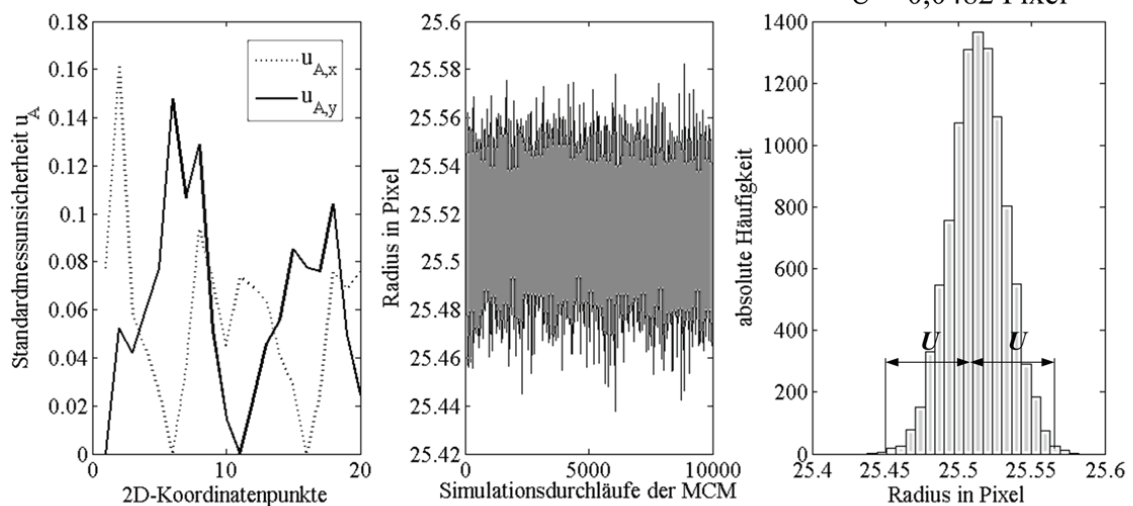
b) Angabe des Grauwertgesamttrauschens



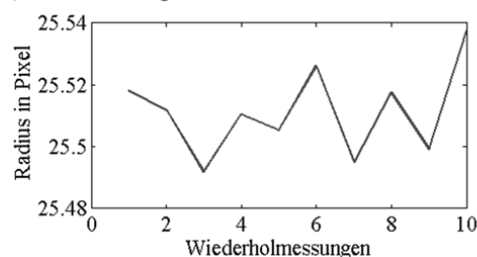
c) Kreisparameter mit Messunsicherheit



d) Grafische Visualisierungen der Schätzergebnisse



e) Verifizierung der wissensbasierten Schätzung durch Wiederholmessungen



Mittelwert: $\bar{x} = 25,5113$ Pixel
 Standardabweichung: $s = 0,0142$ Pixel
 Erweiterte Messunsicherheit: $U = 0,0461$ Pixel
 Abweichung der wissensbasierten Schätzung: 4,4 %

Bild 12.10.: Radiusmessung an einem Siliziumwafer; a) Abbildung des Messobjekts mit manueller Festlegung des Messfelds (AOI) durch den Nutzer; b) automatisierte Berechnung des Grauwertgesamttrauschens; c) automatisierte Berechnung der Kreisparameter mit Messunsicherheiten; d) grafische Visualisierungen der Schätzergebnisse; e) Verifizierung der Messunsicherheitsschätzung durch 10 Wiederholmessungen (Pixelfaktor = 4,906 $\mu\text{m}/\text{Pixel}$)

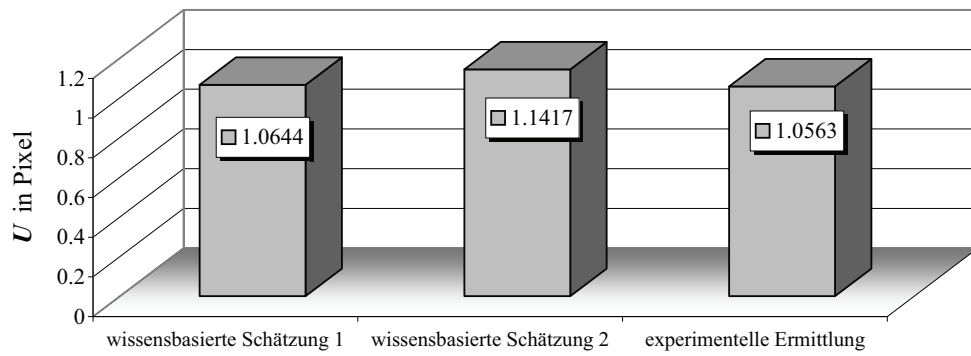


Bild 12.11.: Vergleich der erweiterten Messunsicherheit U des Radius an einem Kunststoffwafer resultierend aus der wissensbasierten Schätzung und experimentellen Ermittlung

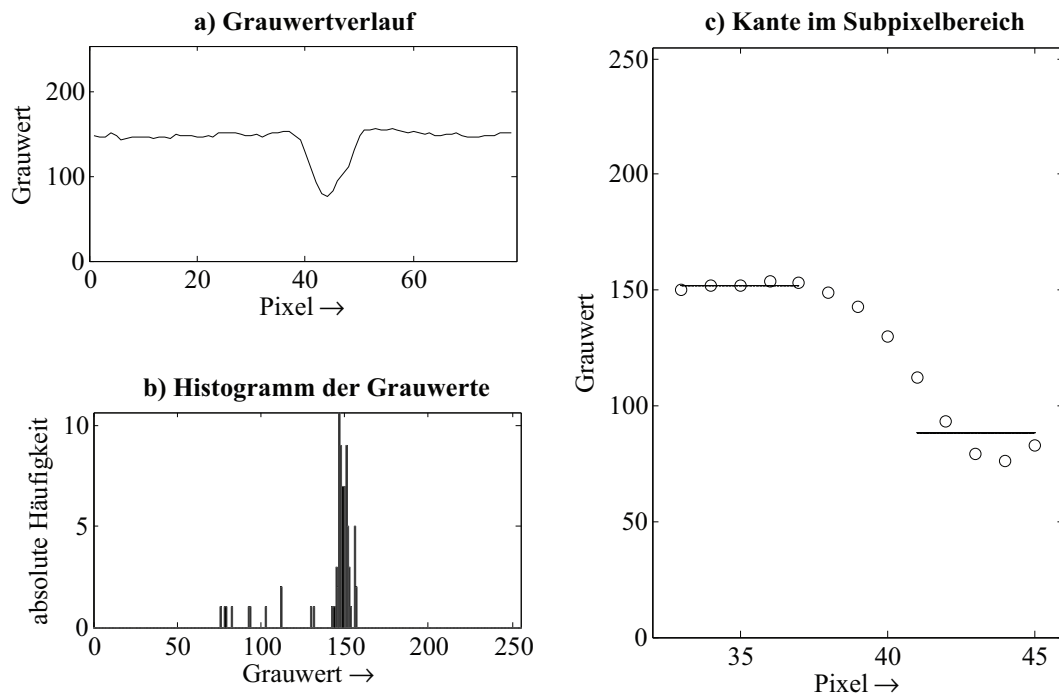


Bild 12.12.: a) Visualisierung des Grauwert-Signalverlaufs; b) Darstellung des Histogramms; c) Detektion des subpixelgenauen Kantenorts SPKO

12. Demonstration der wissensbasierten Messunsicherheitsschätzung an praxisrelevanten Messaufgaben

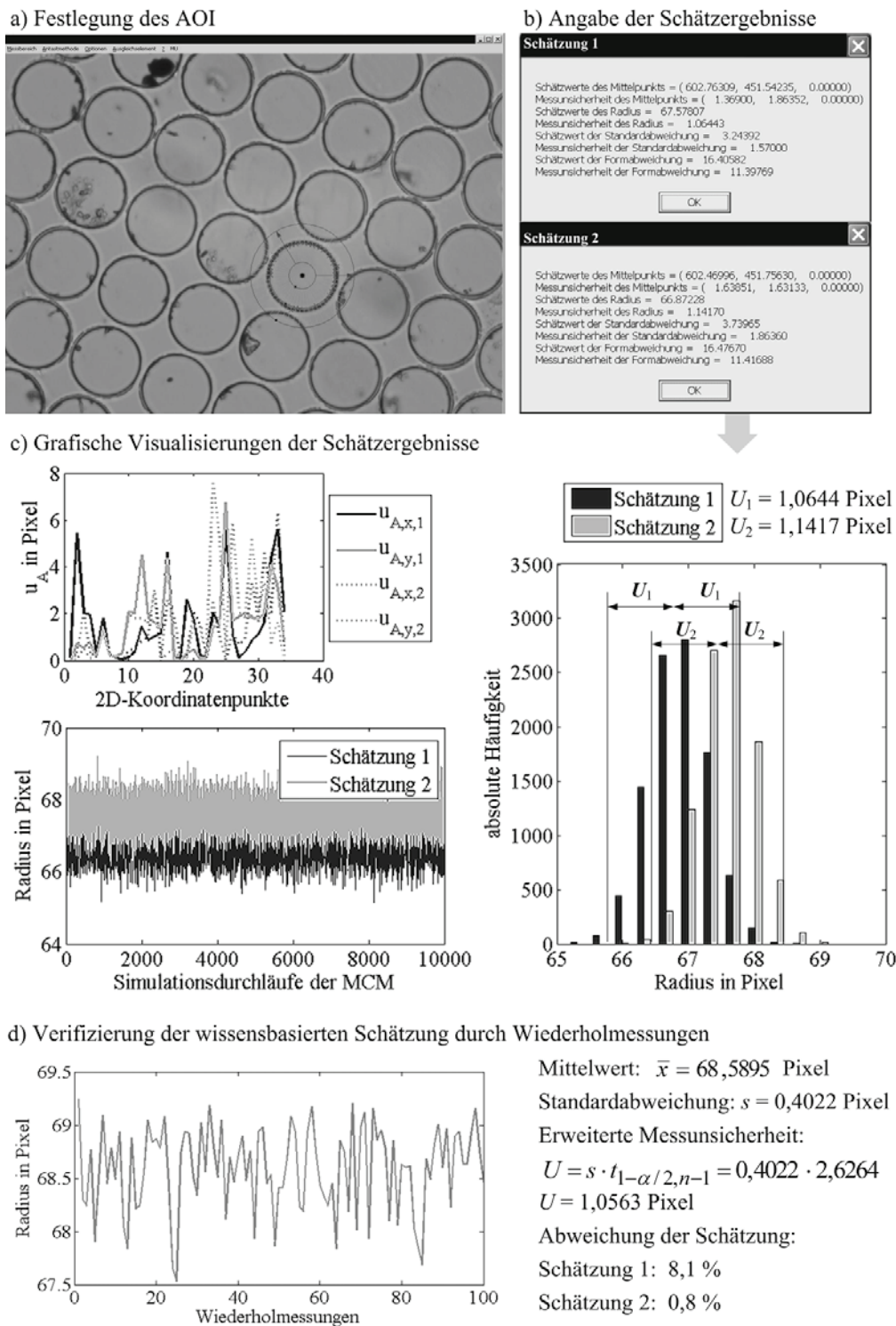


Bild 12.13.: Radiusmessung an einer kreisrunden Aussparung auf einem transparenten Kunststoffwafer; a) Abbildung des Messobjekts mit manueller Festlegung des Messfelds (AOI); b) automatisierte Berechnung der Kreisparameter mit Messunsicherheiten (zweifache Schätzung); c) Visualisierungen der Schätzergebnisse; d) Verifizierung der Messunsicherheitsschätzung durch 100 Wiederholmessungen (Pixelfaktor = 0,71715 $\mu\text{m}/\text{Pixel}$)

12.7. Auswertung der wissensbasierten Messunsicherheitsschätzung an praxisrelevanten Messaufgaben

Zur Demonstration der Funktionalität und der Genauigkeit der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten wissensbasierten Messunsicherheits-Schätzmethode wurden an sieben verschiedenen Messobjekten und an zwei unterschiedlichen Versuchsaufbauten Experimente durchgeführt.

Für fünf Prüfmerkmale wurden zur Verifizierung der geschätzten Messunsicherheitsangaben Wiederholmessungen durchgeführt (Bild 12.14). Die wissensbasierte Schätzung lieferte Werte für die erweiterte Messunsicherheit, die geringfügig oberhalb der empirisch ermittelten Ergebnisse lagen.

Die durchschnittliche prozentuale Abweichung zwischen Schätzung und auf Basis von Wiederholmessungen bestimmter erweiterter Messunsicherheit beträgt 4,6 %. Die durchschnittliche Abweichung der erweiterten Messunsicherheit von praxisrelevanten Prüfmerkmalen ist damit wesentlich geringer als die der Standardunsicherheit von 2D-Koordinatenpunkten.

Anhand der durchgeführten Experimente konnte gezeigt werden, dass die Art des Versuchsaufbaus für die Zuverlässigkeit der Schätzung weniger von Bedeutung ist, als aus theoretischen Überlegungen heraus angenommen wurde.

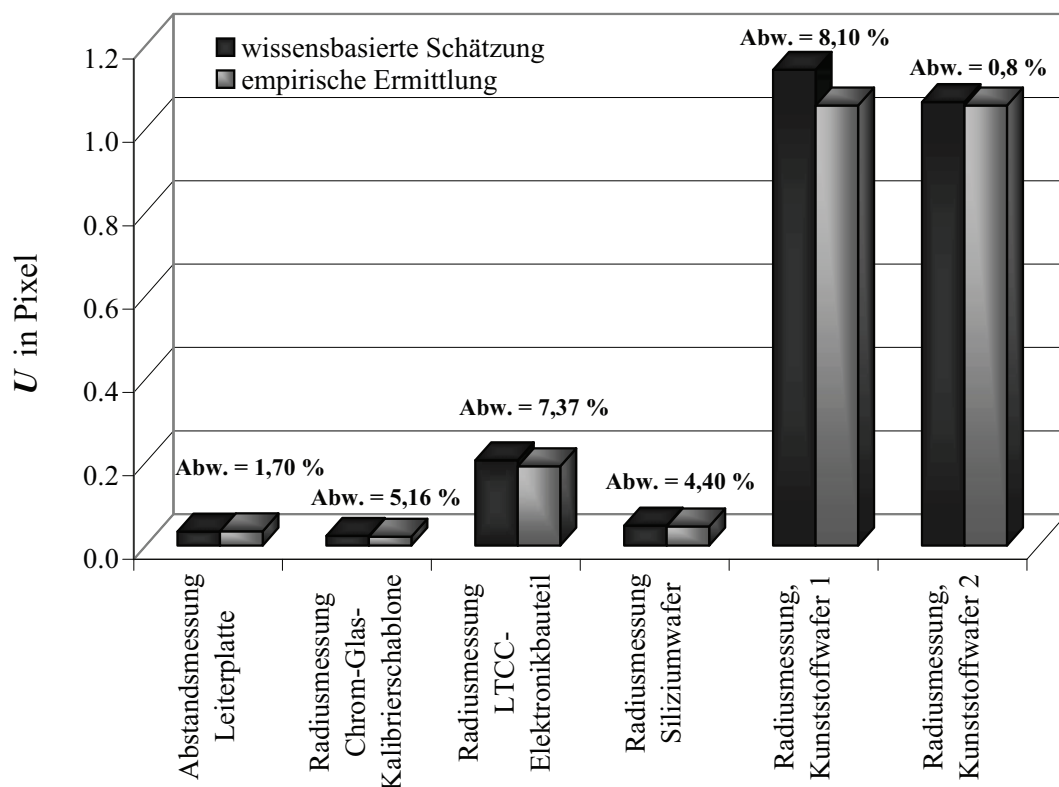


Bild 12.14.: Vergleich von wissensbasiert geschätzter und durch Wiederholmessung empirisch bestimmter erweiterter Messunsicherheit für Prüfmerkmale an fünf verschiedenen Messobjekten

13. Zusammenfassung und Ausblick

13.1. Zusammenfassung

Das Ziel dieser Arbeit war es, erstmalig automatisiert eine Aussage über die prüfmerkmalbezogene Messunsicherheit für Präzisionskoordinatenmessungen mit Bildsensoren zu treffen, ohne zusätzlich aufwendige Wiederholmessungen an Referenzmessobjekten oder am Messobjekt selbst durchführen zu müssen.

Auf der Grundlage experimenteller Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass das neu entwickelte wissensbasierte Verfahren universell für Präzisionskoordinatenmessungen mit Bildsensoren anzuwenden ist. Durch die Vielfalt in Material und Form der eingesetzten Messobjekte konnte die Unabhängigkeit des Messunsicherheits-Schätzverfahrens von individuellen Messobjekteigenschaften nachgewiesen werden. In Ergänzung zur Ermittlung der Messunsicherheit gemäß dem Standard-GUM-Verfahren, welches die Analyse und Messunsicherheitsbewertung aller Einflüsse auf den Messprozess in Ursache-Wirkung-Richtung empfiehlt [DIN99b], beinhaltet das neu konzipierte Verfahren die Bewertung der Bildqualität am ermittelten Kantenort. Die Ursachen der Messabweichungen werden dabei vorrangig nicht untersucht, stattdessen wird deren Wirkung anhand ausgewählter Bildkenngrößen (BK) analysiert und unter Nutzung eines induktiven Inferenzverfahrens verdichtet. Adaptiv wird zu jeder Messszene die Bildqualität quantitativ erfasst. Während der Detektion eines Koordinatenpunktes wird ein Vektor definierter Bildkenngrößen, als Träger signifikanter Bildinformationen, bestimmt und damit das Modell zur Messunsicherheitsschätzung adäquat angepasst. Im Ergebnis erfolgt automatisierbar und ohne zusätzlichen Messaufwand die Angabe der Messunsicherheit für 2D-Koordinatenpunkte bzw. aus ihnen durch Ausgleichsalgorithmen bestimmter Geometrielemente und Prüfmerkmale. Für die Fortpflanzung der Standardunsicherheiten von von 2D-Koordinatenpunkten zu praxisrelevanten Prüfmerkmalen hat sich die Monte-Carlo-Methode (MCM) als sehr gut geeignetes Mittel erwiesen.

Zum Zweck der Demonstration wurde das Verfahren softwarebasiert umgesetzt und die Funktionsweise an einer ausgewählten Hard- und Softwarekonfiguration (Messtyp) getestet (Kapitel 11). Dafür wurden in Voruntersuchungen 35 BK definiert und für das Kantenortkriterium Dynamischer Schwellwert mit integralem Subpixeling untersucht. Folglich wurden 10 signifikante BK basierend auf ihrer Korrelation zur Standardabweichung aus Wiederholmessungen ausgewählt und für die wissensbasierte Schätzung genutzt. Die wesentlichen Ergebnisse sind im Folgenden zusammengefasst.

- Die Standardmessunsicherheit von 2D-Koordinatenpunkten kann mit einer durchschnittlichen Abweichung von 20 % im Vergleich zu in den Voruntersuchungen experimentell durch je 500 Wiederholmessungen erzielten Standardabweichungen geschätzt werden (Kapitel 10).
- Für die prüfmerkmalbezogene erweiterte Messunsicherheit wurde bei experimentellen Untersuchungen an industriellen Messobjekten eine mittlere

prozentuale Abweichung von nur 4,6 % zu in Wiederholmessungen empirisch ermittelten erweiterten Messunsicherheiten festgestellt. Zur Verifizierung der wissensbasierten Schätzmethode wurden an sieben verschiedenen Messobjekten und an zwei unterschiedlichen Versuchsaufbauten Experimente durchgeführt. Die Abweichungen zwischen Schätzung und experimenteller Methode liegen zwischen 0,8 % und 8,1 % (Kapitel 11).

- Entgegen theoretischer Annahmen wurde eine überwiegende Unabhängigkeit des Verfahrens von der verwendeten Messhardware (Kamera, Objektiv, Beleuchtung) beobachtet.
- Die Präzision des wissensbasierten Schätzverfahrens wurde experimentell untersucht und als geeignet bewertet (Abschnitt 10.3.3).
- Die Unabhängigkeit der Stabilität der MCM von Form- und Standardabweichung der Geometrielemente und Standardunsicherheiten der 2D-Koordinatenpunkte wurde festgestellt (Kapitel 11).
- Es konnte nachgewiesen werden, dass für ausreichend zuverlässige Ergebnisse der MCM ($s_U/\bar{U} \cong 1\%$) eine Anzahl $w = 10000$ Experimente geeignet ist (Kapitel 11).
- Es wurde mehrfach gezeigt, dass Messobjekteigenschaften, wie Material und Oberflächenstruktur, bei der wissensbasierten Messunsicherheitsschätzung erfasst werden und Berücksichtigung finden (Kapitel 12).
- Die Untersuchungen zum Zusammenhang von prüfmerkmalbezogener Messunsicherheit und Form- und Standardabweichungen von Geometrielementen haben gezeigt, dass die Anordnung und die Anzahl der zu Grunde liegenden 2D-Koordinatenpunkte mit zu berücksichtigen sind. Bei beträchtlicher Formabweichung verliert die Messunsicherheit eines Geometrielements an Aussagekraft (Abschnitt 6.2).
- Die Vorgehensweise führt nur dann zu zuverlässigen Ergebnissen, wenn der Messprozess gut kontrolliert wird und systematische Messabweichungen hinreichend gut bekannt sind und korrigiert werden.

Bei der Messunsicherheitsermittlung gemäß der konzipierten Vorgehensweise handelt es sich um ein automatisierbares Verfahren. Im Gegensatz zu bisherigen Lösungen [VDI97], [VDI05b], [DIN09c] ist es universell einsetzbar, d.h. unabhängig von speziellen Eigenschaften des Messobjekts und äußeren Einflüssen. Damit werden Voraussetzungen für die automatisierte Angabe eines vollständigen Messergebnisses, bestehend aus bestem Schätzwert und erweiterter Messunsicherheit, wie in [DIN99b] gefordert, für praxisrelevante Messungen an industriellen Messobjekten geschaffen, ohne zusätzlichen Aufwand für die Messunsicherheitsermittlung.

Eine relativ zu den geforderten Spezifikationen ausreichend exakte und automatisierte Schätzung der Messunsicherheit würde die Effizienz von Qualitätsprüfungen in der Industrie entscheidend erhöhen. Eine damit verbundene automatisierte Angabe von Hersteller- und Abnehmerrisiken, vor allem bei sicherheitsrelevanten Bauteilen, würde den Aufwand für die Planung qualitätsbezogener Kosten und damit verbundener Managemententscheidungen wesentlich reduzieren.

13.2. Ausblick

Für künftige Anwendungen der wissensbasierten Schätzmethode ist zu prüfen, ob die Klassifizierung von Messtypen (Hard- und Softwarekonfiguration) generell notwendig ist oder ob eine sehr umfangreiche Wissensbasis mit Messungen verschiedenster Messtypen auch adäquate, ausreichend genaue Schätzwerte liefert. Erste Ergebnisse dieser Arbeit zeigten, dass nur geringe Abweichungen bei der Anwendung des Verfahrens auf Messungen eines anderen Messtyps resultieren (Abschnitt 10.2).

Zur Erhöhung des Gebrauchswerts kann der entwickelte Algorithmus für 3D-Messungen erweitert werden. Ansätze hierzu werden in [Cri00] vorgestellt. Für die Umsetzung der wissensbasierten Messunsicherheitsschätzung für Am-Bild-Messungen, wie in Abschnitt 5.2 beschrieben, muss der Messunsicherheitsbeitrag für die Geometrieabweichung des verwendeten Koordinatenmessgerätes erfasst werden. Weiterhin sollte für die industrielle Anwendung der wissensbasierten Messunsicherheitsschätzung der thermisch verursachte Messunsicherheitsbeitrag Berücksichtigung finden. Durch den Einsatz von Temperatursensoren am Messgerät und bei Bedarf am Messobjekt kann die Korrektur systematischer Messabweichungen erfolgen und die verbleibende Messabweichung entsprechend Abschnitt 8 erfasst werden. In Bezug auf den wettbewerbsbedingten Trend zur Veränderung und die Verlagerung der Messtechnik in die Produktion ist es das Ziel der zukünftigen Forschungsarbeiten, eine Kombination des wissensbasierten Messunsicherheits-Schätzverfahrens mit Verfahren der automatisierten Selbstkalibrierung bei Präzisionskoordinatenmessungen mit Bildsensoren zu entwickeln. Dadurch kann zur Steigerung der Messgenauigkeit beigetragen werden, da neben zufälligen auch systematische Messabweichungen erfasst und gegebenenfalls korrigiert werden können.

Literaturverzeichnis

- [Adu00] ADUNKA, Franz: *Messunsicherheiten: Theorie und Praxis*. 2. Auflage. Essen : Vulkan-Verlag, 2000
- [Adu04] ADUNKA, Franz: Das Konzept Messunsicherheit. In: HOFFMANN, Jörg (Hrsg.): *Taschenbuch der Messtechnik*. München, Wien : Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, 2004, S. 564–591
- [Bai04] BAI, Alexander: *Der Einsatz von Simulationen zur Untersuchung von Fehlereinflüssen in der Interferometrie*. Fraunhofer Institut Produktionstechnologie, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Diss., 2004
- [Bar98] BARTSCH, Hans-Jochen: *Kleine Formelsammlung Mathematik*. Fachbuchverlag Leipzig, 1998
- [BB107] *Evaluation of measurement data — Supplement 1 to the Guide to the expression of uncertainty in measurement — Propagation of distributions using a Monte Carlo method*. ISO - International Organization for Standardization. Genf: ISO, 2007
- [BB2] *Evaluation of measurement data — Supplement 2 to the Guide to the expression of uncertainty in measurement — Models with any number of output quantities*. Joint Committee for Guides in Metrology JCGM 102. In Vorbereitung
- [Übe95] ÜBERHUBER, Christoph: *Computer Numerik 2*. Berlin : Springer, 1995
- [Bib93] BIBEL, Wolfgang: *Wissenspräsentation und Inferenz*. Braunschweig, Wiesbaden : Vieweg, 1993
- [BK54] BERNDT, Georg ; KIENZLE, Otto ; LEINWEBER, Paul (Hrsg.): *Taschenbuch der Längenmesstechnik*. Berlin, Göttingen, Heidelberg : Springer Verlag, 1954
- [BKI08] BEIERLE, Christoph ; KERN-ISBERNER, Gabriele: *Methoden wissensbasierter Systeme*. 4. Auflage. Wiesbaden : Vieweg+Teubner, 2008
- [Bod03] BODENDORF, Freimut: *Daten- und Wissensmanagement*. Berlin, Heidelberg : Springer, 2003
- [Bos03] *Schriftenreihe Qualitätssicherung in der Bosch-Gruppe Nr. 8, Messunsicherheit*. Robert Bosch GmbH. Stuttgart, 2003

- [Che87] CHEESEMAN, Peter: A Method of Computing Maximum Entropy Probability Values for Expert Systems. In: SMITH, C. R. (Hrsg.) ; ERICKSON, Gary J. (Hrsg.): *Maximum Entropy and Bayesian Spectral Analysis and Estimation Problems*, Reidel Publishing Company, 1987, S. 229–240
- [CN96] CHRISTOPH, Ralf ; NEUMANN, Hans J.: *Teubner-Taschenbuch der Mathematik*. Leipzig : B.G. Teubner Verlagsgesellschaft, 1996
- [CN03] CHRISTOPH, Ralf ; NEUMANN, Hans J.: *Multisensor-Koordinatenmesstechnik*. Landsberg/Lech : Verlag moderne Industrie, 2003
- [Cri00] CRIMINISI, Antonio: *Accurate Visual Metrology from Single and Multiple Uncalibrated Images*, University of Oxford, Diss., 2000
- [CS06] COX, Maurice G. ; SIEBERT, Bernd R. L.: The use of a Monte Carlo method for evaluating uncertainty and expanded uncertainty. In: *Metrologia* 43 (2006), S. 178–188
- [DIN82] *DIN 13303 - Stochastik, Wahrscheinlichkeitstheorie, Gemeinsame Grundbegriffe der mathematischen und der beschreibenden Statistik*. DIN - Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin: Beuth Verlag, 1982
- [DIN95] *DIN 1319-1 - Grundlagen der Messtechnik - Teil 1: Grundbegriffe*. Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN). Berlin: Beuth Verlag, 1995
- [DIN99a] *DIN 1319-4 - Grundlagen der Messtechnik - Teil 4: Auswertung von Messungen, Messunsicherheit*. DIN - Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin: Beuth Verlag, 1999
- [DIN99b] *DIN V ENV 13005 - Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen*. DIN - Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin: Beuth Verlag, 1999
- [DIN02a] *DIN 53804-1 - Statistische Auswertungen - Teil 1: Kontinuierliche Merkmale*. Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN). Berlin: Beuth Verlag, 2002
- [DIN02b] *DIN ISO 5725-6 - Genauigkeit (Richtigkeit und Präzision) von Messverfahren und Messergebnissen - Teil 6: Anwendung von Genauigkeitswerten in der Praxis*. Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN). Berlin: Beuth Verlag, 2002
- [DIN03a] *DIN ISO 5725-3 - Genauigkeit (Richtigkeit und Präzision) von Messverfahren und Messergebnissen - Teil 3: Präzisionsmaße eines vereinheitlichten Messverfahrens unter Zwischenbedingungen*. Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN). Berlin: Beuth Verlag, 2003
- [DIN03b] *DIN EN ISO 10360-1 - Annahmeprüfung und Bestätigungsprüfung für Koordinatenmessgeräte (KMG)-Teil 1: Begriffe*. DIN - Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin: Beuth Verlag, 2003

- [DIN05] *DIN 18709-4 - Begriffe, Kurzzeichen und Formelzeichen im Vermessungswesen - Teil 4: Ausgleichsrechnung und Statistik.* Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN). Berlin: Beuth Verlag, 2005
- [DIN06] *DIN EN ISO 10360-2 - Annahmeprüfung und Bestätigungsprüfung für Koordinatenmessgeräte (KMG)-Teil 2: KMG angewendet für Längenmessungen (Entwurf).* DIN - Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin: Beuth Verlag, 2006
- [DIN08] *DIN EN ISO 9001 - Qualitätsmanagementsysteme Anforderungen.* Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN). Berlin: Beuth Verlag, 2008
- [DIN09a] *DIN ISO 10576-1 - Statistische Verfahren - Leitfaden für die Beurteilung der Konformität mit vorgegebenen Anforderungen - Teil 1: Allgemeine Grundsätze.* Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN). Berlin: Beuth Verlag, 2009
- [DIN09b] *DIN EN ISO 10360-6 - Annahmeprüfung und Bestätigungsprüfung für Koordinatenmessgeräte (KMG)-Teil 6: Fehlerabschätzung beim Berechnen zugeordneter Geometrielemente nach Gauß.* DIN - Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin: Beuth Verlag, 2009
- [DIN09c] *DIN EN ISO 15530-3 - Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Verfahren zur Ermittlung der Messunsicherheit von Koordinatenmessgeräten (KMG) - Teil 3: Anwendung von kalibrierten Werkstücken oder Normalen.* DIN - Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin: Beuth Verlag, 2009
- [Dut72] DUTSCHKE, Wolfgang: *Prüfplanung in der Fertigung.* 7. Auflage. Leipzig : Fachbuchverlag, 1972
- [EAL96] *EAL-R2 Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration.* European cooperation for Accreditation of Laboratories. 1996
- [EWC07] ELSTER, Clemens ; WÖGER, Wolfgang ; COX, Maurice G.: Draft GUM Supplement 1 and Bayesian analysis. In: *Metrologia* 44 (2007), S. L31–L32
- [Gra05] GRABE, Michael: *Measurement Uncertainties in Science and Technology.* Heidelberg New York : Springer Verlag, 2005
- [HB04] HOFFMANN, Jörg ; BIERMANN, Jürgen: Das Konzept Messfehler. In: HOFFMANN, Jörg (Hrsg.): *Taschenbuch der Messtechnik.* München, Wien : Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, 2004, S. 524–562
- [Hec01] HECHT, Eugene (Hrsg.): *Optik.* München, Wien : R. Oldenbourg Verlag, 2001

- [Her00] HERNLA, Michael: Messabweichungen einfach abschätzen. In: *Qualität und Zuverlässigkeit (QZ)* 4 (2000), S. 458–464
- [Her07] HERNLA, Michael: *Messunsicherheit bei Koordinatenmessungen*. Renningen : Expert Verlag, 2007
- [HLW97] HART, Hans ; LOTZE, Werner ; WOSCHNI, Eugen-Georg: *Messgenauigkeit*. 3. Auflage. München, Wien : R. Oldenbourg Verlag, 1997
- [Hod61] HODAM, Fritz: *Optik in der Längenmesstechnik*. Berlin : VEB Verlag Technik Berlin, 1961
- [Hof79] HOFMANN, Dietrich: *Handbuch Messtechnik und Qualitätssicherung*. Berlin : VEB Verlag Technik, 1979
- [Hof88] HOFMANN, Dietrich: *Rechnergestützte Qualitätssicherung*. Berlin : VEB Verlag Technik, 1988
- [Hul71] HULTZSCH, Erasmus: *Ausgleichsrechnung mit Anwendungen in der Physik unter besonderer Berücksichtigung der Messtechnik*. Akademische Verlagsgesellschaft GEEST und PORTIG K.-G. Leipzig, 2. Auflage 1971
- [IS09] IMKAMP, Dietrich ; SOMMER, Klaus-Dieter: Für eine sichere Fertigung. In: *Qualität und Zuverlässigkeit (QZ)* 9 (2009), S. 31–33
- [ISO91] *DIN ISO 2768 - Allgemeintoleranzen Teil 1: Toleranzen für Längen- und Winkelmaße ohne einzelne Toleranzeintragung*. DIN - Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin: Beuth Verlag, 1991
- [ISO95] *GUM - Guide to the expression of uncertainty in measurement*. ISO - International Organization for Standardization. Genf: ISO, 1995
- [ISO99] *DIN EN ISO 14253-1 Prüfen von Werkstücken und Messgeräten durch Messen, Teil 1: Entscheidungsregeln für die Feststellung von Übereinstimmung oder Nichtübereinstimmung mit Spezifikationen*. DIN - Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin: Beuth Verlag, 1999
- [ISO00] *DIN EN ISO 14253-1 Prüfen von Werkstücken und Messgeräten durch Messen, Beiblatt zu Teil 1: Leitfaden zur Schätzung der Unsicherheit von GPS-Messungen bei der Kalibrierung von Messgeräten und bei der Produktprüfung*. DIN - Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin: Beuth Verlag, 2000
- [ISO08] *VIM - International vocabulary of basic and general terms in metrology*. ISO - International Organization for Standardization. Genf: ISO, 3. Auflage, 2008
- [ITW10] ITWISSEN. *Wafer*. <http://www.itwissen.info/definition/lexikon/Wafer-wafer.html>. 2010

- [Jay68] JAYNES, Edwin T.: Prior Probabilities. In: *IEEE Transactions on Solid-State Circuits* 4 (1968), S. 227–241
- [Jay83] JAYNES, Edwin T.: Where Do We Stand on Maximum Entropy? (1978). In: ROSENKRANTZ, R. D. (Hrsg.): *Papers on Probability, Statistics and Statistical Physics*. Dordrecht : D. Reidel Publishing Company, 1983
- [Jay03] JAYNES, Edwin T. ; BRETTTHORST, G. L. (Hrsg.): *Probability theory - The logic of science*. Cambridge : Cambridge University Press, 2003
- [Kes98] KESSEL, Wolfgang: Messunsicherheit, ein wichtiges Element der Qualitätssicherung. In: *PTB-Mitteilungen* 108 (1998), S. 377–382
- [Küh97] KÜHN, Olaf: *Ein Beitrag zur hochauflösenden zweidimensionalen Geometriemessung mit CCD-Zeilensensoren*, Technische Universität Ilmenau, Diss., 1997
- [KKS10] KESSEL, Rüdiger ; KACKER, Raghu N. ; SOMMER, Klaus-Dieter: A More General Type A Evaluation. In: *Proceedings of the 10th International Symposium on Measurement and Quality Control 2010, Osaka, Japan, September 5-9* (2010)
- [Kla08] KLAUS, Ferdinand. *Einführung in Techniken und Methoden der Multisensor-Datenfusion*. http://deposit.ddb.de/cgi-bin/dokserv?idn=971151989&dok_var=d1&dok_ext=pdf&filename=971151989.pdf. 2008
- [KSE10] KRYSSTEK, Michael ; SOMMER, Klaus-Dieter ; ESTLER, W. T.: Measurement Uncertainty in the Assessment of Conformity. In: *Proceedings of the 10th International Symposium on Measurement and Quality Control 2010, Osaka, Japan, September 5-9* (2010)
- [KT01] KARAGIANNIS, Dimitris ; TELESKO, Rainer: *Wissensmanagement*. München, Wien : Oldenbourg, 2001
- [KTH06] KACKER, Raghu ; TOMAN, Blaza ; HUANG, Ding: Comparison of ISO-GUM, draft GUM Supplement 1 and Bayesian statistics using simple linear calibration. In: *Metrologia* 43 (2006), S. 167–177
- [Lap12] DE LAPLACE, Pierre Simon: *Theorie analytique des probabilités*. Paris, 1812
- [Lee94] LEE, Peter M.: *Bayesian Statistics: An Introduction*. 3rd Edition. New York : Halsted Press, 1994
- [Lin65] LINDLEY, D. V.: *Introduction to Probability and Statistics from a Bayesian Viewpoint*. Cambridge : Cambridge University Press, 1965
- [Lin05] LINSS, Gerhard: *Qualitätsmanagement für Ingenieure*. 2. Auflage. Leipzig : Fachbuchverlag, 2005

- [Lin06] LINSS, Gerhard: *Statistiktraining im Qualitätsmanagement*. Leipzig : Fachbuchverlag Leipzig, 2006
- [LV10] LANZA, Gisela ; VIERUNG, Benjamin: Proposal of a Cylindrical Standard to Evaluate the Uncertainty of Measurement for Micro Gear Measurements. In: *Proceedings of the 10th International Symposium on Measurement and Quality Control 2010, Osaka, Japan, September 5-9 (2010)*
- [LW06] LIRA, Ignacio ; WÖGER, Wolfgang: Comparison between the conventional and Bayesian approaches to evaluate measurement data. In: *Metrologia* 43 (2006), S. 249–259
- [Mar05] MARI, Luca P.: Models of the Measurement Process. In: SYDENHAM, Peter (Hrsg.) ; THORN, Richard (Hrsg.): *Handbook of measuring system design*. Chichester : John Wiley & Sons, Inc., 2005
- [Mes99] MESCHÉDE, Dieter: *Optik, Licht und Laser*. Stuttgart, Leipzig : Teubner Verlag, 1999
- [Mis00] MISCHO, Horst K.: *Das virtuelle Interferometer - Modellgestützte Optimierung*. Fraunhofer Institut Produktionstechnologie, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Diss., 2000
- [MSA02] *Measurement Systems Analysis, Reference Manual*. A.I.A.G. - Chrysler Corp., Ford Motor Co., General Motors Corp. Michigan, USA: 3. Auflage, 2002
- [Neu08] NEUMANN, Hans J.: Messen mit geringem Temperatureinfluss. In: *Qualität und Zuverlässigkeit (QZ)* 53 (2008), S. 30–33
- [New87] NEWMAN, William I.: The Maximum Entropy Method: The Problem of Missing Data. In: SMITH, C. R. (Hrsg.) ; ERICKSON, Gary J. (Hrsg.): *Maximum Entropy and Bayesian Spectral Analysis and Estimation Problems*, Reidel Publishing Company, 1987, S. 99–125
- [NHB⁺08] NEUGEBAUER, Michael ; HILPERT, Uwe ; BARTSCHER, Markus ; GERWIEN, Norbert ; KRYSZEK, Michael: Untersuchungen zur Messung von Mikrogeometrien mit großen taktilen KMGs und Anwendung bei einem Prüfkörper für Mikro-CT-Messsysteme. In: *Technisches Messen (tm)* 75 (2008), S. 187–198
- [NT72] NITSCHKE, Karl ; TRUMPHOLD, Harry: *Einführung in die Längenmesstechnik*. 7. Auflage. Fachbuchverlag Leipzig, 1972
- [Pap94] PAPULA, Lothar: *Mathematik für Ingenieure und Naturwissenschaftler Band 3*. Wiesbaden : Vieweg, 1994
- [Pet10] PETERS, Jochen C.: *Bewertung des Einflusses von Formabweichungen in der Mikro-Koordinatenmesstechnik*, Karlsruher Institut für Technologie, Diss., 2010

- [PH08] PRESSEL, Hans-Gerd ; HAGENEY, Theo: *Messunsicherheit von Prüfmerkmalen in der Koordinatenmesstechnik*. Renningen : Expert Verlag, 2008
- [S⁺08] SCHMITT, Robert [u. a.]: Virtuelle Messgeräte. In: *Technisches Messen* 5 (2008)
- [Sch99] SCHWENKE, Heinrich: *Abschätzung von Messunsicherheiten durch Simulation an Beispielen aus der Fertigungsmesstechnik*. Physikalisch Technische Bundesanstalt, Technische Universität Chemnitz, Diss., 1999
- [SJNI09] SCHMITT, Robert ; JATZKOWSKI, Philipp ; NISCH, Susanne ; IMKAMP, Dietrich: Größer, genauer und integrierter. In: *Qualität und Zuverlässigkeit (QZ 54)* (2009), S. 44–47
- [SKSW00] SCHWENKE, Heinrich ; KUNZMANN, Horst ; SIEBERT, B. R. L. ; WÄLDELE, Franz: Assessment of Uncertainties in Dimensional Metrology by Monte Carlo Simulation: Proposal of a Modular and Visual Software. In: *Annals of the CIRP* 49 (2000), S. 395–398
- [SLSW06] SOMMER, Klaus-Dieter ; LINSS, Gerhard ; SIEBERT, Bernd R. L. ; WEISSENSEE, Karina: Messunsicherheit und Konformitätsbewertungen im gesetzlichen Messwesen. In: *PTB-Mitteilungen* 116 (2006), Heft 1, ISSN 0030-834X (2006)
- [SS04a] SIEBERT, Bernd R. L. ; SOMMER, Klaus-Dieter: Weiterentwicklung des GUM und Monte-Carlo-Techniken. In: *Technisches Messen (tm)* 71 (2004), S. 67–80
- [SS04b] SOMMER, Klaus-Dieter ; SIEBERT, Bernd R. L.: Grundlagen und praktische Umsetzung der Messunsicherheitsbestimmung nach GUM. In: *Messunsicherheit praxisgerecht bestimmen VDI-Berichte 1867* (2004), S. 25–41
- [SS04c] SOMMER, Klaus-Dieter ; SIEBERT, Bernd R. L.: Praxisgerechtes Bestimmen der Messunsicherheit nach GUM. In: *Technisches Messen* 71 (2004), S. 52–66
- [Ste10] STEINBEIS TRANSFERZENTRUM QUALITÄTSSICHERUNG UND BILDVERARBEITUNG (STZ). *Quick Image Development*. <http://www.stz-ilmenau.de/products/index.php?group=7>. 2010
- [SW63] SHANNON, Claude E. ; WEAVER, Warren: *The Mathematical Theory of Communication*. Illinois : Illini Books edition, 1963
- [Töp08] TÖPFER, Susanne C. N.: *Automatisierte Antastung für die hochauflösende Geometriemessung mit CCD-Bildsensoren*, Technische Universität Ilmenau, Diss., 2008

- [VDA10] *VDA Band 5: Prüfprozesseignung*. VDA - Verband der Automobilindustrie. 2. Auflage, Frankfurt: VDA, 2010
- [VDI85] *VDI 4009 Blatt 7 - Numerische Verfahren zur Bestimmung von Verteilungsparametern in der Zuverlässigkeitsrechnung*. VDI - Verein Deutscher Ingenieure. VDI-Verlag GmbH Düsseldorf, 1985
- [VDI89] *VDI/VDE 2617 Blatt 3 - Genauigkeit von Koordinatenmessgeräten - Kenngrößen und deren Prüfung, Komponenten der Messabweichung des Gerätes*. VDI - Verein Deutscher Ingenieure, VDE - Verband der Elektrotechnik, Elektronik, Informationstechnik. Berlin: Beuth Verlag, 1989
- [VDI97] *VDI/VDE 2617 Blatt 6 - Genauigkeit von Koordinatenmessgeräten - Kenngrößen und deren Prüfung, Koordinatenmessgeräte mit optischer Antastung - Grundlagen*. VDI - Verein Deutscher Ingenieure, VDE - Verband der Elektrotechnik, Elektronik, Informationstechnik. Berlin: Beuth Verlag, 1997
- [VDI99] *VDI 4008 Blatt 6 - Monte-Carlo-Simulation*. VDI - Verein Deutscher Ingenieure. VDI-Verlag GmbH Düsseldorf, 1999
- [VDI01] *VDI/VDE 2617 Blatt 5 - Genauigkeit von Koordinatenmessgeräten - Kenngrößen und deren Prüfung, Überwachung durch Prüfkörper*. VDI - Verein Deutscher Ingenieure, VDE - Verband der Elektrotechnik, Elektronik, Informationstechnik. Berlin: Beuth Verlag, 2001
- [VDI05a] *VDI/VDE 2617 Blatt 2.1 - Genauigkeit von Koordinatenmessgeräten - Kenngrößen und deren Prüfung, Leitfaden zur Anwendung von DIN EN ISO 10360-2 zur Prüfung von Längenmaßen*. VDI - Verein Deutscher Ingenieure, VDE - Verband der Elektrotechnik, Elektronik, Informationstechnik. Berlin: Beuth Verlag, 2005
- [VDI05b] *VDI/VDE 2617 Blatt 6.1 - Genauigkeit von Koordinatenmessgeräten - Kenngrößen und deren Prüfung, Koordinatenmessgeräte mit optischer Antastung - Leitfaden zur Anwendung von DIN EN ISO 10360 für Koordinatenmessgeräte mit optischen Sensoren für laterale Strukturen*. VDI - Verein Deutscher Ingenieure, VDE - Verband der Elektrotechnik, Elektronik, Informationstechnik. Berlin: Beuth Verlag, 2005
- [VDI05c] *VDI/VDE 2617 Blatt 6.2 - Genauigkeit von Koordinatenmessgeräten - Kenngrößen und deren Prüfung, Koordinatenmessgeräte mit optischer Antastung - Leitfaden zur Anwendung von DIN EN ISO 10360 für Koordinatenmessgeräte mit optischen Abstandssensoren*. VDI - Verein Deutscher Ingenieure, VDE - Verband der Elektrotechnik, Elektronik, Informationstechnik. Berlin: Beuth Verlag, 2005
- [VDI06a] *VDI/VDE 2617 Blatt 7 - Genauigkeit von Koordinatenmessgeräten - Kenngrößen und deren Prüfung, Ermittlung der Unsicherheit von Messungen auf Koordinatenmessgeräten durch Simulation*. VDI - Verein

- Deutscher Ingenieure, VDE - Verband der Elektrotechnik, Elektronik, Informationstechnik. Berlin: Beuth Verlag, 2006
- [VDI06b] *VDI/VDE 2617 Blatt 8 - Genauigkeit von Koordinatenmessgeräten - Kenngrößen und deren Prüfung, Prüfprozesseignung von Messungen mit Koordinatenmessgeräten.* VDI - Verein Deutscher Ingenieure, VDE - Verband der Elektrotechnik, Elektronik, Informationstechnik. Berlin: Beuth Verlag, 2006
- [VDI09] *VDI/VDE 2617 Blatt 11 - Genauigkeit von Koordinatenmessgeräten - Kenngrößen und deren Prüfung, Ermittlung der Unsicherheit von Messungen auf Koordinatenmessgeräten durch Messunsicherheitsbilanzen.* VDI - Verein Deutscher Ingenieure, VDE - Verband der Elektrotechnik, Elektronik, Informationstechnik. Berlin: Beuth Verlag, 2009
- [Vis08] VISION ACADEMY GMBH. *Lexikon der industriellen Bildverarbeitung.* http://www.vision-academy.org/mv_wbuch/np/E511672F6464D434C1256D48003071BE.htm. 2008
- [Wäl04] WÄLDELE, Franz: Die Messunsicherheit von Koordinatenmessungen in Normen. In: *Messunsicherheit praxisgerecht bestimmen* VDI-Berichte Nr. 1867 (2004), S. 209–222
- [WD84] WARNECKE, Hans-Jürgen ; DUTSCHKE, Wolfgang: *Handbuch Fertigungsmesstechnik.* Berlin : Springer Verlag, 1984
- [WKHO07] WEISSENSEE, Karina ; KÜHN, Olaf ; HEIDENBLUT, Stefan ; OHRMANN, Stefan: Assistenzsystem für die Modellbildung zur Messunsicherheitsbewertung in der Mikrosystemtechnik. In: *Mikrosystemtechnik Kongress 2007* (15.-17. Oktober 2007)
- [WKL08] WEISSENSEE, Karina ; KÜHN, Olaf ; LINSS, Gerhard: Modelling of an Optical Coordinate Measurement Process for Uncertainty Estimation. In: *Proceedings of the 53rd Internationales Wissenschaftliches Kolloquium, Ilmenau, September 8-12* (2008)
- [WKL⁺09] WEISSENSEE, Karina ; KÜHN, Olaf ; LINSS, Gerhard ; TÖPFER, Susanne ; ROSENBERGER, Maik. *Verfahren zur Ermittlung der Messunsicherheit von Koordinatenpunkten bei der Geometriemessung.* WO 2009/141333 A1. 26.11.2009
- [WKL10] WEISSENSEE, Karina ; KÜHN, Olaf ; LINSS, Gerhard: Knowledge-based uncertainty estimation of dimensional measurements using visual sensors. In: *13th IMEKO TC1-TC7 joint Symposium Without Measurement No Science, Without Science No Measurement, London/UK, September 1-3, Journal of Physics: Conference Series Volume 238* (2010), S. 012023
- [WKLS08a] WEISSENSEE, Karina ; KÜHN, Olaf ; LINSS, Gerhard ; SOMMER, Klaus-Dieter: Novel Approach to the Computer-Aided Modelling of

- Measurement Processes for Uncertainty Estimation. In: *Proceedings of the 12th IMEKO TC1-TC7 joint Symposium on Man Science and Measurement, Annecy/France, September 3-5 (2008)*, S. 373–378
- [WKLS08b] WEISSENSEE, Karina ; KÜHN, Olaf ; LINSS, Gerhard ; SOMMER, Klaus-Dieter: Risk of Erroneously Deciding Conformity of Measuring Instruments. In: *Accreditation Quality Assurance (2008)*, S. 663–669
- [WL07] WEISSENSEE, Karina ; LINSS, Gerhard: Quantifizierung von Fehlentscheidungsrisiken bei der Qualitätsprüfung. In: *Berichte zum Qualitätsmanagement, GQW Jahrestagung, Band 9/2007 (2007)*
- [WMR07] WOLF, Marco ; MÜLLER, Martin ; RÖSSLEIN, Matthias: Modellierung und Simulation komplexer Messvorgänge mittels der Monte-Carlo-Methode. In: *Technisches Messen (tm) 74 (2007)*, S. 485–493
- [Wol75] WOLF, Helmut: *Ausgleichsrechnung*. Bonn : Dümmler, 1975
- [WS02] WÄLDELE, Franz ; SCHWENKE, Heinrich: Automatische Bestimmung der Messunsicherheit auf KMGs auf dem Weg in die Praxis. In: *Technisches Messen (tm) 69 (2002)*, S. 550–557
- [WSLS06] WEISSENSEE, Karina ; SOMMER, Klaus-Dieter ; LINSS, Gerhard ; SIEBERT, Bernd R. L.: Ermittlung von Fehlentscheidungsrisiken bei der Konformitätsbewertung von Messgeräten. In: *VDI-Tagung Messunsicherheit praxisgerecht bestimmen, Erfurt 2006 (14./15. November 2006)*
- [WW92] WEISE, Klaus ; WÖGER, Wolfgang: A Bayesian theory of measurement uncertainty. In: *Measurement Science and Technology 3 (1992)*, S. 1–11
- [WW99] WEISE, Klaus ; WÖGER, Wolfgang: *Messunsicherheit und Messdatenauswertung*. Weinheim : Wiley-VCH, 1999
- [WW04] WECKENMANN, Albert ; WIEDENHÖFER, Thomas: Übersicht und Vergleich verfügbarer GUM-basierter Messunsicherheits-Software. In: *Messunsicherheit praxisgerecht bestimmen VDI-Berichte 1867 (2004)*, S. 317–324
- [WW05] WECKENMANN, Albert ; WIEDENHÖFER, Thomas: Software zur Unterstützung bei der Ermittlung der Messunsicherheit. In: *Technisches Messen 72 (2005)*, S. 278–285
- [WW06] WECKENMANN, Albert ; WALZ, Matthias: Bedeutung der Messunsicherheit bei der Bewertung von Messergebnissen. In: *Seminar Messtechnik des Instituts für Mess- und Regelungstechnik der ETH Zürich: Zentralthema "Der lange Weg von der Messgröße zur Messunsicherheit - Verschiedene Bedürfnisse und Methoden" (23.03.2006)*

- [WZL05] WEISSENSEE, Karina ; ZINNER, Carsten ; LINSS, Gerhard: Economic Consequences of Incorrect Decision Caused by Measurement Uncertainty - Assessment of Risk and Error-Follow-Up Cost. In: *Joint International IMEKO TC1+TC7 Symposium, Ilmenau, September 21-24* (2005)
- [Zin05] ZINNER, Carsten: *Ein Beitrag zu Verteilungsmodellen und deren Einfluss auf die Auswahl von technisch und wirtschaftlich geeigneten Prüfmitteln zur Sicherung der Qualität*, Technische Universität Ilmenau, Diss., 2005
- [ZS65] ZELEN, Marvin ; SEVERO, Norman C.: Probability Functions. In: ABRAMOWITZ, Milton (Hrsg.) ; STEGUN, Irene A. (Hrsg.): *Handbook of Mathematical Functions*. New York : Dover Publications, 1965

Anhang

A1. Funktionsweise des Kantenortkriteriums Dynamischer Schwellwert

1. Zuordnung von Grauwerten (GW) zu Bildpunkten (Pixeln) entlang eines Suchstrahls (Bild A1.1 a)); Abbruch, wenn Anzahl der Pixel ≤ 14
2. Berechnung des zum Grauwertverlauf zugehörigen Histogramms mit 256 Klassen für GW von 0 bis 255 (Bild A1.1 b))
3. Ermittlung der ersten GW-Histogrammklasse GW_u mit Häufigkeit $H(GW_u)$ von mindestens 2 Pixeln (Bild A1.1 b))
4. Ermittlung der letzten GW-Histogrammklasse GW_o mit Häufigkeit $H(GW_o)$ von mindestens 2 Pixeln (Bild A1.1 b))
5. Berechnung der Differenz $GW_o - GW_u$; bei einem Wert ≤ 8 ist das Verfahren aufgrund des zu geringen Kontrasts nicht anwendbar
6. Berechnung des mittleren Grauwerts $GW_m = (GW_o + GW_u)/2$ (Bild A1.1 b))
7. Ermittlung der größten Häufigkeit $H_{\max,u}$ im Bereich $[GW_u; GW_m]$
8. Berechnung der mittleren Häufigkeit im Bereich $[GW_u; GW_m]$:
 $H_{m,u} = (H(GW_u) + H_{\max,u})/2$ (Bild A1.1 b))
9. Ermittlung der größten Häufigkeit $H_{\max,o}$ im Bereich $[GW_m; GW_o]$
10. Berechnung der mittleren Häufigkeit im Bereich $[GW_m; GW_o]$:
 $H_{m,o} = (H(GW_o) + H_{\max,o})/2$ (Bild A1.1 b))
11. Berechnung des Schwerpunktes SP_u im unteren Bereich:

$$SP_u = \frac{\sum_{i=A}^B (GW_i \cdot H(GW_i) \mid H(GW_i) \geq H_{m,u})}{\sum_{i=A}^B (H(GW_i) \mid H(GW_i) \geq H_{m,u})} \quad (\text{A1.1})$$

$$\text{mit: } A = \max[(GW(H_{\max,u}) - 8); GW_u],$$

$$B = \min[(GW(H_{\max,u}) + 8); GW_o]$$

12. Berechnung des Schwerpunktes SP_o im oberen Bereich:

$$SP_o = \frac{\sum_{i=A}^B (GW_i \cdot H(GW_i) \mid H(GW_i) \geq H_{m,o})}{\sum_{i=A}^B (H(GW_i) \mid H(GW_i) \geq H_{m,o})} \quad (\text{A1.2})$$

$$\text{mit: } A = \max[(GW(H_{\max,o}) - 8); GW_u],$$

$$B = \min[(GW(H_{\max,o}) + 8); GW_o]$$

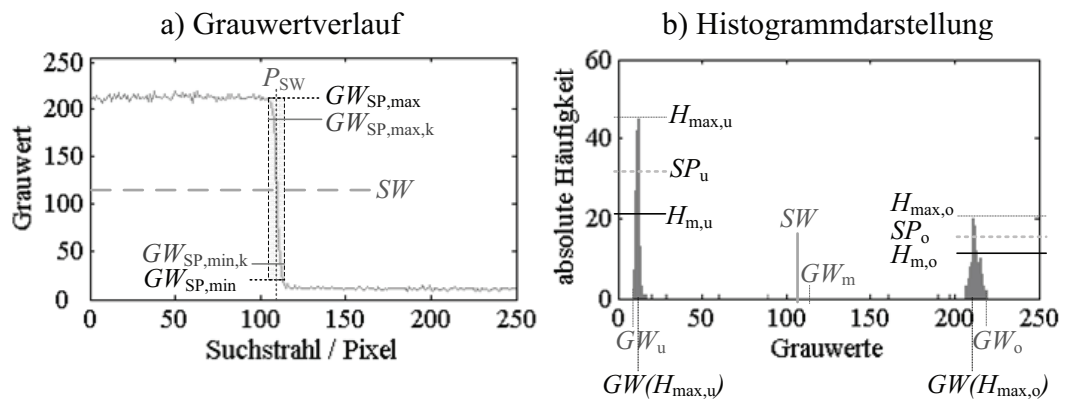


Bild A1.1.: Kantenortkriterium Dynamischer Schwellwert mit Kennwerten des Kantenortkriteriums; a) Grauwertverlauf; b) Histogramm

13. Ermittlung des pixelgenauen Schwellwerts SW (Bild A1.1) (Abbruch des Verfahrens bei Nichteinhaltung der Bedingungen):

$$SW = SP_u + (SP_o - SP_u)/2 \mid (SP_o - SP_u) \geq 4 \quad (A1.3)$$

14. Ermittlung des Pixels P_{SW} , an dem SW überschritten (Dunkel-Hell-Übergang) bzw. unterschritten (Hell-Dunkel-Übergang) wird (Bild A1.1 a))
15. Ermittlung des Intervalls $[P_{SW} - d; P_{SW} + d]$ für das Subpixeling (Die Breite des Subpixelbereichs ist von den Kenngrößen des optischen Systems und von Eigenschaften des Messobjekts abhängig. Messungen in dieser Arbeit beruhen auf einem Wert von $d = 6$)
16. Ermittlung des kleinsten Grauwerts $GW_{SP,min}$ in diesem Bereich
17. Ermittlung des größten Grauwerts $GW_{SP,max}$ in diesem Bereich
18. Berechnung der Differenz $GW_{SP,max} - GW_{SP,min}$; bei einem Wert ≤ 8 ist das Verfahren aufgrund des zu geringen Kontrastes nicht anwendbar
19. Korrektur des größten und kleinsten Grauwerts zur Eliminierung von Rausch-
effekten:

$$GW_{SP,min,k} = GW_{SP,min} + 0,1 \cdot (GW_{SP,max} - GW_{SP,min}) - 0,5 \quad (A1.4)$$

$$GW_{SP,max,k} = GW_{SP,min} + 0,9 \cdot (GW_{SP,max} - GW_{SP,min}) + 0,5 \quad (A1.5)$$

20. Ermittlung des Pixels auf dem Suchstrahl P_{SP} , welcher von der Subpixel-Kante geschnitten wird, durch Vergleich der Flächen links (F_L) und rechts (F_R) von P_{SW} :

Dunkel-Hell-Übergang:

$$F_L = \sum_{i=P_{SW}-6}^{P_{SW}-1} ((GW_i - GW_{SP,min,k}) \mid (GW_i - GW_{SP,min,k}) > 0)$$

$$F_R = \sum_{i=P_{SW}}^{P_{SW}+4} ((GW_{SP,max,k} - GW_i) \mid (GW_{SP,max,k} - GW_i) > 0)$$

Für $F_L < F_R$: $P_{SW} = P_{SW} + 1$; → erneute Berechnung von F_L und F_R

Für $F_L \geq F_R$: $P_{SP} = P_{SW} - 1$

(A1.6)

Hell-Dunkel-Übergang:

$$F_L = \sum_{i=P_{SW}-6}^{P_{SW}-2} ((GW_{SP,max,k} - GW_i) \mid (GW_{SP,max,k} - GW_i) > 0)$$

$$F_R = \sum_{i=P_{SW}-1}^{P_{SW}+4} ((GW_i - GW_{SP,min,k}) \mid (GW_i - GW_{SP,min,k}) > 0)$$

Für $F_L < F_R$: $P_{SW} = P_{SW} + 1$; → erneute Berechnung von F_L und F_R

Für $F_L \geq F_R$: $P_{SP} = P_{SW} - 1$

(A1.7)

21. Berechnung des Subpixel-Kantenorts $SPKO$:

Dunkel-Hell-Übergang:

$$F_L = \sum_{i=P_{SP}-6}^{P_{SP}-2} ((GW_i - GW_{SP,min,k}) \mid (GW_i - GW_{SP,min,k}) > 0)$$

$$F_R = \sum_{i=P_{SP}}^{P_{SP}+4} ((GW_{SP,max,k} - GW_i) \mid (GW_{SP,max,k} - GW_i) > 0)$$

$$SPKO = P_{SP} + \frac{(F_R - F_L + GW_{SP,max,k} - GW(P_{SP}))}{(GW_{SP,max,k} - GW_{SP,min,k})} - 0,5$$

(A1.8)

Hell-Dunkel-Übergang:

$$F_L = \sum_{i=P_{SP}-5}^{P_{SP}-1} ((GW_{SP,max,k} - GW_i) \mid (GW_{SP,max,k} - GW_i) > 0)$$

$$F_R = \sum_{i=P_{SP}+1}^{P_{SP}+5} ((GW_i - GW_{SP,min,k}) \mid (GW_i - GW_{SP,min,k}) > 0)$$

$$SPKO = P_{SP} - \frac{(F_L - F_R + GW_{SP,max,k} - GW(P_{SP}))}{(GW_{SP,max,k} - GW_{SP,min,k})} + 0,5$$

(A1.9)

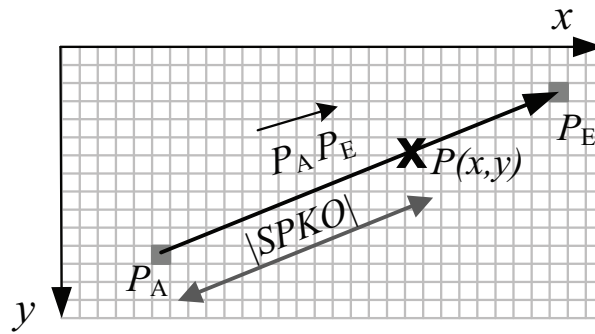


Bild A1.2.: Visualisierung der Berechnung des 2D-Koordinatenpunkts $P(x,y)$ basierend auf Anfangs- und Endpunkt des Suchstrahls P_A und P_E sowie dem Subpixel-Kantenort $SPKO$

22. Berechnung der 2D-Koordinatenpunkte $P(x,y)$ aus dem Subpixel-Kantenort (Bild A1.2):

$$P(x,y) = \overrightarrow{0P_A} + SPKO \cdot \frac{\overrightarrow{P_A P_E}}{|\overrightarrow{P_A P_E}|} \quad (\text{A1.10})$$

Bei der Berechnung der 2D-Koordinatenpunkte sind die Koordinaten der Suchstrahl-Anfangs- und -Endpunkte P_A und P_E konstante Eingangswerte. Für sie wird der Pixelmittenwert zu Grunde gelegt. Die einzige unsicherheitsbehaftete Größe in (A1.10) ist der subpixelgenaue Kantenort $SPKO$. Für Suchstrahlen, die parallel zu einer der Bild-Koordinatenachsen verlaufen, ergibt sich für eine der beiden Komponenten des Vektors $\overrightarrow{P_A P_E}$ Null, was dazu führt, dass $SPKO$ keinen Einfluss auf diesen Koordinatenwert hat. Dies erklärt die experimentell festgestellten Abhängigkeiten zwischen dem Winkel des Suchstrahls im Pixelraster des CCD-Bildsensors und der experimentell ermittelten Standardabweichung (Abschnitte 10.3, 12).

A2. Messpunkte für die Anwendung der Monte-Carlo-Methode

Tabelle A2.1.: x- und y-Koordinatenwerte experimentell angetasteter Messpunkte mit zugehöriger Standardunsicherheit

Messpunkt	x in mm	y in mm	u_x in mm	u_y in mm
1	489,553217	240,953208	0,001243	0,000984
2	488,080752	237,856316	0,000853	0,001134
3	486,686925	235,014225	0,001532	0,000894
4	485,203692	232,018467	0,000942	0,000984
5	483,796295	229,147419	0,002040	0,000899
6	482,568231	226,260346	0,001535	0,001163
7	481,165628	223,342643	0,001533	0,000894
8	479,811092	220,441698	0,001145	0,001164
9	478,381764	217,557469	0,002004	0,000994
10	477,004498	214,599575	0,002001	0,000894
11	475,544279	211,697983	0,001533	0,000991
12	474,194651	208,754161	0,002013	0,001344
13	472,700328	205,836843	0,001894	0,000987
14	471,238838	202,881449	0,001533	0,000897
15	469,810266	199,950525	0,001754	0,001363
16	468,321529	196,930746	0,000985	0,000978
17	466,801312	194,002263	0,001643	0,000789
18	465,526063	191,112387	0,000983	0,000984
19	463,948966	188,176995	0,001175	0,000894
20	462,872373	185,281638	0,001432	0,000984

@BOOKLETBB1-GUM, title=„Evaluation of measurement data — Supplement 1 to the Guide to the expression of uncertainty in measurement — Propagation of distributions using a Monte Carlo method“, howpublished=„ISO - International Organization for Standardization“, YEAR= „Genf: ISO, 2007“, Key=BB1-GUM

A3. Voruntersuchungen

Tabelle A3.2.: Voruntersuchungen

BK	Versuch-Nr.					
	1	2	3	4	5	6
s_x in mm	1,95E-005	1,95E-005	3,36E-005	3,36E-005	2,07E-005	2,07E-005
s_y in mm	2,51E-005	2,51E-005	2,77E-005	2,77E-005	2,09E-005	2,09E-005
$u_{R,MCM,x}$	1,34E-005	1,19E-005	1,28E-005	1,08E-005	1,58E-005	1,67E-005
$u_{R,MCM,y}$	1,50E-005	1,30E-005	1,06E-005	8,97E-006	1,68E-005	1,71E-005
GW_u	32,00	30,00	20,00	20,00	42,00	43,00
GW_o	190,00	178,00	172,00	176,00	173,00	174,00
GW_m	111,00	104,00	96,00	98,00	107,50	108,50
K_{glob}	158,00	148,00	152,00	156,00	131,00	131,00
$H_{max,u}$	47,00	68,00	66,00	56,00	56,00	49,00
$GW_{max,u}$	34,00	31,00	22,00	22,00	43,00	44,00
$H_{max,o}$	26,00	67,00	62,00	83,00	51,00	39,00
$GW_{max,o}$	177,00	174,00	160,00	159,00	170,00	172,00
$H_{m,u}$	28,50	47,50	49,00	43,50	54,50	29,50
$H_{m,o}$	16,50	35,00	32,00	42,50	27,00	21,50
SP_u	34,39	31,48	21,55	21,97	43,00	44,00
SP_o	177,52	174,09	159,11	159,41	170,45	171,58
ΔSP	143,13	142,62	137,55	137,44	127,45	127,58
$GW_{SP,min}$	38,00	33,00	25,00	25,00	47,00	48,00
$GW_{SP,max}$	185,00	182,00	181,00	184,00	175,00	176,00
K_{SP}	147,00	149,00	156,00	159,00	128,00	128,00
F_L	27,80	9,60	11,90	16,60	28,40	23,40
F_R	9,80	25,20	36,80	34,20	4,70	9,70
A_{Pixel}	355,00	355,00	424,00	440,00	300,00	250,00
$A_{Pixel,L}$	174,00	173,00	207,00	214,00	145,00	120,00
$A_{Pixel,R}$	170,00	171,00	206,00	215,00	144,00	119,00
$K_{abs,L}$	15,00	6,00	16,00	19,00	7,00	6,00
$K_{abs,R}$	7,00	4,00	6,00	6,00	7,00	5,00
K_{abs}	158,00	152,00	161,00	164,00	134,00	133,00
KK	3,90	3,72	3,58	3,58	3,49	3,38
K_m	146,40	142,86	137,80	137,51	127,01	126,08
s_L	4,40	1,07	1,85	1,89	1,29	1,36
s_R	1,32	0,86	1,18	1,26	1,13	1,29
\overline{GW}_L	180,76	174,24	159,58	159,43	170,01	170,96
\overline{GW}_R	34,36	31,37	21,78	21,92	42,99	44,87
I_m	107,56	102,81	90,68	90,68	106,50	107,92
Δ_{Sprung}	45,20	36,40	42,40	43,60	40,40	44,40
$NS_{f''}$	5,00	4,00	4,00	1,00	3,00	4,00
A_R	1,06	0,79	1,06	0,75	0,66	0,68
s_{norm}	1,12	0,38	0,59	0,62	0,47	0,52

BK	Versuch-Nr.					
	7	8	9	10	11	12
s_x in mm	3,07E-005	3,07E-005	2,79E-005	2,56E-005	2,56E-005	3,15E-005
s_y in mm	3,06E-005	3,06E-005	3,07E-005	2,46E-005	2,46E-005	2,79E-005
$u_{R,MCM,x}$	1,13E-005	1,80E-005	1,25E-005	1,98E-005	2,53E-005	2,09E-005
$u_{R,MCM,y}$	9,72E-006	1,37E-005	1,26E-005	1,77E-005	2,11E-005	1,62E-005
GW_u	20,00	19,00	36,00	45,00	45,00	39,00
GW_o	170,00	170,00	189,00	215,00	215,00	182,00
GW_m	95,00	94,50	112,50	130,00	130,00	110,50
K_{glob}	150,00	151,00	153,00	170,00	170,00	143,00
$H_{max,u}$	34,00	62,00	13,00	19,00	23,00	33,00
$GW_{max,u}$	23,00	20,00	56,00	54,00	55,00	49,00
$H_{max,o}$	16,00	25,00	12,00	8,00	12,00	17,00
$GW_{max,o}$	168,00	169,00	187,00	168,00	164,00	143,00
$H_{m,u}$	18,50	33,00	8,00	10,50	15,00	18,50
$H_{m,o}$	12,00	15,50	8,50	5,00	7,00	9,50
SP_u	22,50	20,92	53,70	54,09	54,51	49,02
SP_o	167,07	167,41	187,00	169,10	167,87	143,37
ΔSP	144,57	146,49	133,30	115,01	113,36	94,35
$GW_{SP,min}$	27,00	33,00	35,00	74,00	61,00	51,00
$GW_{SP,max}$	154,00	162,00	175,00	208,00	115,00	176,00
K_{SP}	127,00	129,00	140,00	134,00	54,00	125,00
F_L	0,00	0,00	0,00	20,10	13,20	31,00
F_R	125,60	87,80	83,00	19,20	25,30	9,00
A_{Pixel}	266,00	449,00	277,00	254,00	328,00	404,00
$A_{Pixel,L}$	125,00	219,00	131,00	120,00	152,00	196,00
$A_{Pixel,R}$	130,00	219,00	135,00	123,00	165,00	197,00
$K_{abs,L}$	7,00	12,00	23,00	54,00	16,00	40,00
$K_{abs,R}$	23,00	28,00	24,00	57,00	125,00	102,00
K_{abs}	151,00	152,00	154,00	172,00	171,00	144,00
KK	3,22	3,55	3,60	3,58	3,69	3,42
K_m	139,65	138,75	129,50	129,29	128,71	108,86
s_L	1,29	1,68	6,44	15,65	3,61	12,67
s_R	6,15	8,05	7,39	6,59	18,92	17,22
\overline{GW}_L	22,62	21,66	49,00	181,93	51,36	159,53
\overline{GW}_R	162,27	160,41	178,50	52,64	180,06	50,66
I_m	92,44	91,03	113,75	117,29	115,71	105,10
Δ_{Sprung}	23,20	35,60	18,80	67,20	52,40	43,60
NS_{F^*}	7,00	3,00	6,00	5,00	4,00	7,00
A_R	0,87	0,59	0,91	0,98	0,59	0,73
s_{norm}	1,45	1,90	2,70	4,34	4,40	5,84

BK	Versuch-Nr.					
	13	14	15	16	17	18
s_x in mm	3,15E-005	1,92E-005	1,92E-005	2,04E-005	2,04E-005	3,97E-005
s_y in mm	2,79E-005	2,59E-005	2,59E-005	2,77E-005	2,77E-005	4,13E-005
$u_{R,MCM,x}$	1,99E-005	1,39E-005	1,88E-005	1,62E-005	1,79E-005	1,85E-005
$u_{R,MCM,y}$	1,46E-005	1,82E-005	2,26E-005	1,97E-005	2,18E-005	2,00E-005
GW_u	29,00	47,00	46,00	49,00	37,00	30,00
GW_o	177,00	209,00	213,00	185,00	172,00	171,00
GW_m	103,00	128,00	129,50	117,00	104,50	100,50
K_{glob}	148,00	162,00	167,00	136,00	135,00	141,00
$H_{max,u}$	17,00	3,00	3,00	8,00	7,00	20,00
$GW_{max,u}$	39,00	48,00	47,00	54,00	40,00	31,00
$H_{max,o}$	12,00	6,00	8,00	4,00	4,00	7,00
$GW_{max,o}$	149,00	173,00	175,00	173,00	170,00	170,00
$H_{m,u}$	10,50	2,50	3,00	5,00	4,50	13,00
$H_{m,o}$	9,50	4,00	5,00	3,00	3,00	4,50
SP_u	40,09	48,00	46,50	54,00	40,42	31,47
SP_o	149,00	173,00	174,50	172,54	168,57	168,00
ΔSP	108,91	125,00	128,00	118,54	128,15	136,53
$GW_{SP,min}$	64,00	49,00	50,00	48,00	41,00	40,00
$GW_{SP,max}$	170,00	213,00	210,00	203,00	195,00	170,00
K_{SP}	106,00	164,00	160,00	155,00	154,00	130,00
F_L	30,80	11,10	23,00	10,00	46,20	1,50
F_R	20,80	38,20	62,50	35,00	51,30	74,50
A_{Pixel}	330,00	108,00	110,00	88,00	93,00	115,00
$A_{Pixel,L}$	160,00	47,00	49,00	38,00	41,00	52,00
$A_{Pixel,R}$	159,00	50,00	50,00	39,00	41,00	52,00
$K_{abs,L}$	32,00	43,00	43,00	58,00	43,00	7,00
$K_{abs,R}$	46,00	121,00	109,00	125,00	53,00	12,00
K_{abs}	149,00	166,00	168,00	155,00	158,00	141,00
KK	3,36	2,60	2,51	1,90	1,72	1,90
K_m	124,09	57,88	78,60	82,35	114,80	134,00
s_L	9,71	8,32	11,58	12,97	9,38	1,36
s_R	7,95	42,30	39,42	41,47	14,18	3,38
\overline{GW}_L	162,99	175,04	178,84	168,53	164,39	31,73
\overline{GW}_R	38,91	117,16	100,24	86,18	49,59	165,73
I_m	100,95	146,10	139,54	127,35	106,99	98,73
Δ_{Sprung}	52,00	36,80	72,40	74,00	72,80	47,60
$NS_{f''}$	2,00	4,00	2,00	4,00	3,00	6,00
A_R	0,38	0,77	0,58	0,87	0,47	0,84
s_{norm}	3,45	9,89	9,96	10,63	4,60	0,93

BK	Versuch-Nr.					
	19	20	21	22	23	24
s_x in mm	3,97E-005	2,67E-005	2,67E-005	1,94E-005	1,94E-005	2,86E-005
s_y in mm	4,13E-005	2,79E-005	2,79E-005	2,04E-005	2,04E-005	2,97E-005
$u_{R,MCM,x}$	2,16E-005	1,67E-005	1,72E-005	1,55E-005	1,34E-005	1,54E-005
$u_{R,MCM,y}$	2,06E-005	1,76E-005	1,81E-005	1,57E-005	1,39E-005	1,54E-005
GW_u	30,00	40,00	48,00	45,00	40,00	45,00
GW_o	171,00	173,00	178,00	174,00	160,00	165,00
GW_m	100,50	106,50	113,00	109,50	100,00	105,00
K_{glob}	141,00	133,00	130,00	129,00	120,00	120,00
$H_{max,u}$	39,00	41,00	40,00	11,00	36,00	41,00
$GW_{max,u}$	31,00	42,00	59,00	46,00	41,00	46,00
$H_{max,o}$	15,00	32,00	32,00	16,00	15,00	41,00
$GW_{max,o}$	170,00	170,00	170,00	165,00	153,00	162,00
$H_{m,u}$	24,00	23,00	21,50	8,00	24,50	24,50
$H_{m,o}$	9,50	17,50	18,50	9,00	8,50	22,50
SP_u	31,00	42,41	58,92	48,21	41,00	46,42
SP_o	169,15	169,98	171,18	167,56	153,71	162,44
ΔSP	138,15	127,56	112,27	119,34	112,71	116,02
$GW_{SP,min}$	42,00	45,00	54,00	57,00	45,00	48,00
$GW_{SP,max}$	165,00	174,00	181,00	174,00	160,00	164,00
K_{SP}	123,00	129,00	127,00	117,00	115,00	116,00
F_L	0,20	8,60	10,80	31,60	23,00	5,90
F_R	127,60	11,60	20,80	6,80	9,00	14,90
A_{Pixel}	140,00	211,00	392,00	175,00	151,00	209,00
$A_{Pixel,L}$	64,00	99,00	190,00	85,00	70,00	98,00
$A_{Pixel,R}$	65,00	101,00	191,00	79,00	70,00	100,00
$K_{abs,L}$	11,00	7,00	14,00	8,00	9,00	4,00
$K_{abs,R}$	10,00	6,00	12,00	14,00	6,00	5,00
K_{abs}	141,00	134,00	133,00	129,00	120,00	120,00
KK	2,24	3,23	3,75	2,89	2,29	3,09
K_m	135,56	127,62	115,32	117,29	112,80	116,07
s_L	1,91	1,24	3,03	2,11	2,25	0,95
s_R	2,88	1,10	3,00	3,67	1,09	1,05
\overline{GW}_L	31,61	169,92	171,80	167,65	154,07	162,78
\overline{GW}_R	167,17	42,30	56,48	50,35	41,27	46,71
I_m	99,39	106,11	114,14	109,00	97,67	104,74
Δ_{Sprung}	50,80	39,60	40,00	42,40	45,60	12,40
$NS_{F''}$	5,00	4,00	7,00	4,00	4,00	7,00
A_R	0,54	0,91	0,70	0,63	0,61	0,70
s_{norm}	0,93	0,46	1,18	1,13	0,65	0,39

BK	Versuch-Nr.					
	25	26	27	28	29	30
s_x in mm	2,86E-005	3,35E-005	3,35E-005	1,82E-005	1,82E-005	4,45E-005
s_y in mm	2,97E-005	3,50E-005	3,50E-005	1,76E-005	1,76E-005	6,08E-005
$u_{R,MCM,x}$	1,16E-005	1,51E-005	1,23E-005	1,51E-005	1,30E-005	3,13E-005
$u_{R,MCM,y}$	1,19E-005	1,34E-005	1,27E-005	1,38E-005	1,22E-005	4,14E-005
GW_u	46,00	45,00	45,00	46,00	45,00	29,00
GW_o	166,00	166,00	167,00	166,00	165,00	186,00
GW_m	106,00	105,50	106,00	106,00	105,00	107,50
K_{glob}	120,00	121,00	122,00	120,00	120,00	157,00
$H_{max,u}$	19,00	27,00	28,00	33,00	55,00	12,00
$GW_{max,u}$	47,00	47,00	47,00	46,00	46,00	30,00
$H_{max,o}$	33,00	31,00	33,00	33,00	52,00	23,00
$GW_{max,o}$	164,00	164,00	164,00	164,00	163,00	184,00
$H_{m,u}$	16,00	14,50	15,00	33,00	35,50	8,00
$H_{m,o}$	21,00	17,50	18,00	18,50	30,50	13,00
SP_u	48,46	47,12	47,41	46,00	46,00	30,80
SP_o	164,43	163,58	163,54	163,57	163,00	183,28
ΔSP	115,97	116,47	116,13	117,57	117,00	152,48
$GW_{SP,min}$	48,00	48,00	48,00	48,00	48,00	31,00
$GW_{SP,max}$	168,00	166,00	167,00	166,00	165,00	168,00
K_{SP}	120,00	118,00	119,00	118,00	117,00	137,00
F_L	24,00	10,70	8,60	13,70	0,80	38,60
F_R	0,50	10,70	12,60	7,70	26,80	10,80
A_{Pixel}	181,00	159,00	193,00	159,00	252,00	378,00
$A_{Pixel,L}$	86,00	74,00	92,00	76,00	121,00	185,00
$A_{Pixel,R}$	84,00	74,00	90,00	72,00	120,00	182,00
$K_{abs,L}$	7,00	5,00	6,00	4,00	4,00	35,00
$K_{abs,R}$	6,00	4,00	5,00	5,00	7,00	34,00
K_{abs}	123,00	122,00	122,00	121,00	120,00	157,00
KK	2,84	2,53	2,96	2,59	3,24	3,87
K_m	115,92	116,62	116,27	117,16	116,33	125,63
s_L	1,12	1,02	1,14	0,88	1,02	10,88
s_R	1,74	0,95	1,24	0,88	1,20	11,03
\overline{GW}_L	164,33	163,81	163,77	163,88	162,88	172,92
\overline{GW}_R	48,40	47,19	47,50	46,72	46,54	47,29
I_m	106,37	105,50	105,64	105,30	104,71	110,11
Δ_{Sprung}	26,40	13,60	13,60	30,00	13,60	68,40
$NS_{f''}$	6,00	6,00	6,00	5,00	5,00	4,00
A_R	0,65	0,66	0,77	0,65	0,72	0,70
s_{norm}	0,56	0,38	0,46	0,34	0,43	4,28

BK	Versuch-Nr.					
	31	32	33	34	35	36
s_x in mm	4,45E-005	6,08E-005	6,08E-005	1,05E-004	1,05E-004	5,83E-005
s_y in mm	6,08E-005	6,52E-005	6,52E-005	9,40E-005	9,40E-005	4,49E-005
$u_{R,MCM,x}$	1,65E-005	4,53E-005	3,77E-005	9,77E-005	6,65E-005	2,04E-005
$u_{R,MCM,y}$	2,16E-005	4,83E-005	4,18E-005	8,78E-005	5,82E-005	1,22E-005
GW_u	28,00	41,00	41,00	70,00	97,00	22,00
GW_o	181,00	251,00	239,00	180,00	185,00	179,00
GW_m	104,50	146,00	140,00	125,00	141,00	100,50
K_{glob}	153,00	210,00	198,00	110,00	88,00	157,00
$H_{max,u}$	25,00	4,00	7,00	5,00	7,00	118,00
$GW_{max,u}$	29,00	101,00	96,00	114,00	100,00	23,00
$H_{max,o}$	11,00	5,00	7,00	11,00	9,00	70,00
$GW_{max,o}$	175,00	202,00	206,00	170,00	168,00	177,00
$H_{m,u}$	14,50	3,00	4,50	3,50	5,00	75,00
$H_{m,o}$	7,00	3,50	5,50	6,50	5,50	36,00
SP_u	29,00	96,65	96,93	114,00	99,54	23,00
SP_o	176,40	202,00	206,00	167,81	167,92	176,94
ΔSP	147,40	105,35	109,07	53,81	68,38	153,94
$GW_{SP,min}$	30,00	50,00	51,00	81,00	109,00	30,00
$GW_{SP,max}$	167,00	205,00	191,00	183,00	185,00	171,00
K_{SP}	137,00	155,00	140,00	102,00	76,00	141,00
F_L	17,40	75,00	41,00	170,90	29,70	30,80
F_R	32,60	78,00	47,50	195,50	16,80	17,80
A_{Pixel}	268,00	181,00	190,00	145,00	119,00	373,00
$A_{Pixel,L}$	130,00	86,00	88,00	66,00	53,00	180,00
$A_{Pixel,R}$	127,00	84,00	91,00	68,00	55,00	182,00
$K_{abs,L}$	34,00	95,00	61,00	17,00	20,00	7,00
$K_{abs,R}$	23,00	126,00	90,00	80,00	52,00	11,00
K_{abs}	153,00	213,00	198,00	113,00	93,00	158,00
KK	3,36	3,64	3,85	2,86	2,60	3,81
K_m	129,55	101,58	125,03	59,64	56,66	153,48
s_L	10,27	26,73	14,98	3,39	4,68	1,18
s_R	7,60	34,51	26,13	18,36	12,98	1,20
\overline{GW}_L	166,87	202,64	213,38	168,12	166,60	176,62
\overline{GW}_R	37,32	101,06	88,34	108,49	109,95	23,14
I_m	102,10	151,85	150,86	138,30	138,27	99,88
Δ_{Sprung}	72,40	151,20	124,80	179,60	101,60	59,20
$NS_{F''}$	5,00	7,00	2,00	3,00	5,00	4,00
A_R	0,72	0,47	0,45	0,80	0,45	0,66
s_{norm}	3,49	11,96	8,03	4,25	3,45	0,47

BK	Versuch-Nr.					
	37	38	39	40	41	42
s_x in mm	5,83E-005	1,59E-005	1,59E-005	2,43E-005	2,43E-005	4,18E-005
s_y in mm	4,49E-005	2,68E-005	2,68E-005	2,76E-005	2,76E-005	5,66E-005
$u_{R,MCM,x}$	1,98E-005	1,26E-005	1,34E-005	1,99E-005	1,78E-005	1,58E-005
$u_{R,MCM,y}$	1,23E-005	2,16E-005	2,24E-005	2,13E-005	2,00E-005	1,63E-005
GW_u	22,00	131,18	34,00	38,00	36,00	26,00
GW_o	179,00	183,00	183,00	177,00	176,00	176,00
GW_m	100,50	108,50	108,50	107,50	106,00	101,00
K_{glob}	157,00	149,00	149,00	139,00	140,00	150,00
$H_{max,u}$	133,00	17,00	15,00	28,00	29,00	63,00
$GW_{max,u}$	23,00	35,00	35,00	42,00	41,00	27,00
$H_{max,o}$	85,00	19,00	23,00	23,00	24,00	45,00
$GW_{max,o}$	176,00	177,00	177,00	171,00	169,00	173,00
$H_{m,u}$	96,50	10,00	14,50	22,50	15,50	40,50
$H_{m,o}$	43,50	13,50	12,50	14,00	13,00	25,00
SP_u	23,00	38,23	35,00	42,45	40,73	27,44
SP_o	176,44	177,63	176,81	172,93	171,78	173,04
ΔSP	153,44	139,40	141,81	130,48	131,05	145,59
$GW_{SP,min}$	30,00	44,00	39,00	44,00	44,00	33,00
$GW_{SP,max}$	171,00	184,00	183,00	175,00	175,00	168,00
K_{SP}	141,00	140,00	144,00	131,00	131,00	135,00
F_L	27,80	1,50	0,00	0,00	0,00	40,00
F_R	20,80	118,50	171,40	144,60	105,20	9,00
A_{Pixel}	458,00	256,00	231,00	286,00	294,00	330,00
$A_{Pixel,L}$	219,00	125,00	111,00	138,00	142,00	159,00
$A_{Pixel,R}$	228,00	120,00	109,00	137,00	141,00	160,00
$K_{abs,L}$	7,00	11,00	12,00	6,00	8,00	7,00
$K_{abs,R}$	11,00	10,00	10,00	9,00	9,00	9,00
K_{abs}	158,00	150,00	150,00	139,00	140,00	151,00
KK	3,96	3,49	3,41	3,47	3,47	3,61
K_m	153,29	139,05	139,47	131,25	131,03	145,26
s_L	1,08	3,28	3,25	1,93	1,95	1,43
s_R	1,14	2,52	2,47	2,34	2,33	1,28
\overline{GW}_L	176,30	39,46	38,32	41,25	40,46	172,95
\overline{GW}_R	23,01	178,51	177,80	172,50	171,49	27,69
I_m	99,66	108,98	108,06	106,88	105,97	100,32
Δ_{Sprung}	65,60	65,60	77,60	68,00	54,40	54,00
$NS_{f''}$	2,00	3,00	4,00	6,00	3,00	3,00
A_R	0,65	0,65	0,61	0,65	0,61	0,65
s_{norm}	0,43	1,13	1,12	0,84	0,84	0,53

BK	Versuch-Nr.						
	43	44	45	46	47	48	49
s_x in mm	4,18E-005	2,96E-005	2,96E-005	3,49E-005	3,49E-005	1,55E-004	1,55E-004
s_y in mm	5,66E-005	3,64E-005	3,64E-005	3,43E-005	3,43E-005	2,02E-004	2,02E-004
$u_{R,MCM,x}$	1,61E-005	1,77E-005	1,54E-005	1,62E-005	1,67E-005	9,17E-005	8,79E-005
$u_{R,MCM,y}$	1,64E-005	1,80E-005	1,81E-005	1,58E-005	1,47E-005	1,22E-004	1,22E-004
GW_u	25,00	147,92	26,00	27,00	27,00	65,00	62,00
GW_o	175,00	26,00	173,00	176,00	176,00	187,00	187,00
GW_m	100,00	173,00	99,50	101,50	101,50	126,00	124,50
K_{glob}	150,00	147,00	147,00	149,00	149,00	122,00	125,00
$H_{max,u}$	54,00	43,00	50,00	46,00	57,00	5,00	5,00
$GW_{max,u}$	28,00	28,00	27,00	28,00	28,00	70,00	66,00
$H_{max,o}$	49,00	51,00	53,00	59,00	50,00	14,00	19,00
$GW_{max,o}$	173,00	171,00	171,00	172,00	173,00	165,00	163,00
$H_{m,u}$	30,50	27,00	31,00	32,50	35,00	3,50	4,00
$H_{m,o}$	28,50	32,50	29,50	30,50	26,00	8,00	12,50
SP_u	27,15	27,97	27,00	28,94	28,81	70,00	65,56
SP_o	172,87	171,39	171,46	172,79	172,89	164,43	163,98
ΔSP	145,72	143,42	144,46	143,86	144,07	94,43	98,43
$GW_{SP,min}$	33,00	35,00	35,00	35,00	36,00	70,00	73,00
$GW_{SP,max}$	168,00	169,00	169,00	171,00	170,00	148,00	147,00
K_{SP}	135,00	134,00	134,00	136,00	134,00	78,00	74,00
F_L	30,00	0,00	0,00	0,00	6,10	28,10	46,40
F_R	19,00	92,40	128,40	127,70	78,30	46,10	39,30
A_{Pixel}	347,00	296,00	296,00	322,00	316,00	181,00	224,00
$A_{Pixel,L}$	166,00	142,00	141,00	156,00	153,00	81,00	105,00
$A_{Pixel,R}$	170,00	143,00	144,00	155,00	152,00	89,00	108,00
$K_{abs,L}$	6,00	7,00	7,00	6,00	7,00	21,00	22,00
$K_{abs,R}$	9,00	7,00	6,00	7,00	6,00	126,00	126,00
K_{abs}	150,00	147,00	148,00	149,00	149,00	126,00	126,00
KK	3,65	3,47	3,47	3,57	3,56	3,10	3,48
K_m	145,11	142,89	142,93	143,76	143,90	33,58	36,17
s_L	1,30	1,21	1,48	1,21	1,30	3,99	4,06
s_R	1,35	1,24	1,02	1,07	1,20	47,44	47,07
\overline{GW}_L	172,52	28,07	28,16	28,89	28,94	164,86	163,94
\overline{GW}_R	27,41	170,96	171,09	172,65	172,84	131,28	127,77
I_m	99,97	99,51	99,63	100,77	100,89	148,07	145,86
Δ_{Sprung}	61,20	50,00	57,60	52,80	53,60	64,80	64,00
NS_{F^*}	4,00	4,00	2,00	4,00	4,00	5,00	6,00
A_R	0,61	0,65	0,59	0,61	0,66	0,26	0,16
s_{norm}	0,52	0,48	0,49	0,45	0,49	10,05	9,99

Thesen zur Dissertation

1. Die prüfmerkmalbezogene Messunsicherheitsermittlung bei hochauflösenden Geometriemessungen mit Bildsensoren ist bedingt durch die hohe Anzahl an Einflussgrößen sehr komplex und wird meist auf der Grundlage von Wiederholmessungen realisiert.
2. Die Ursachen hoher Messunsicherheiten in der Präzisionskoordinatenmesstechnik mit Bildsensoren (z. B. Material und Oberfläche des Messobjekts, Erfahrungsgrad der Messperson) können variieren, während ihre Wirkung, z. B. ein geringer Kontrast, gleich ist. Es ist nicht möglich nur auf der Grundlage eines digitalen Bildes genaue Aussagen über die Ursachen der Messunsicherheit zu treffen.
3. Das digitale Bild des Messobjekts bildet bei Längenmessungen mit Bildsensoren die Grundlage zur Berechnung von Messgrößen.
4. Messungen mit Bildsensoren basieren auf der Kantendetektion durch Intensitätsunterschiede an Oberflächenstrukturen des Messobjekts.
5. Zur Schätzung der Messunsicherheit können signifikante Bildinformationen in Kombination mit Messresultaten aus Wiederholmessungen von Voruntersuchungen herangezogen werden.
6. Während der Detektion eines Koordinatenpunktes wird ein Vektor definierter Bildkenngrößen, als Träger signifikanter Bildinformationen, bestimmt und das Modell zur Messunsicherheitsschätzung adäquat angepasst.
7. Die Messung geometrischer Prüfmerkmale an Koordinatenmessgeräten erfordert nichtlineare Ausgleichsalgorithmen. Die Unsicherheitsfortpflanzung ist daher nur unter Anwendung numerischer Verfahren, wie der Monte-Carlo-Methode, möglich.
8. Bei der Messunsicherheitsermittlung gemäß der konzipierten Vorgehensweise handelt es sich um ein adaptives, automatisierbares Verfahren. Es ist universell einsetzbar, d. h. unabhängig von speziellen Eigenschaften des Messobjekts und äußeren Einflüssen.
9. Das neuartige wissenschaftsbasierte Schätzverfahren ist für die automatisierte Angabe eines vollständigen Messergebnisses, bestehend aus bestem Schätzwert und erweiterter Messunsicherheit, geeignet.
10. Die mittlere prozentuale Abweichung der wissenschaftsbasiert geschätzten erweiterten Messunsicherheit von Prüfmerkmalen an industriellen Messobjekten zu in Wiederholmessungen empirisch ermittelten erweiterten Messunsicherheiten beträgt 4,6 %.
11. Präzisionskoordinatenmessgeräte mit Bildsensoren erfahren durch die automatisierbare, wissenschaftsbasierte Messunsicherheitsermittlung eine Innovation, die zur Effizienzsteigerung bei industriellen Qualitätsprüfungen führt.

