



Forschungsberichte aus dem
wbk Institut für Produktionstechnik
Universität Karlsruhe (TH)

Hrsg.: Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer
Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza
Dr.-Ing. Christian Munzinger
Prof. Dr.-Ing. Volker Schulze

Matthias Schlipf

**Statistische Prozessregelung
von Fertigungs- und Messprozess
zur Erreichung einer variabilitätsarmen
Produktion mikromechanischer Bauteile**

Band 148



Universität Karlsruhe (TH)
Forschungsuniversität • gegründet 1825

Statistische Prozessregelung von Fertigungs- und
Messprozess zur Erreichung einer variabilitätsarmen
Produktion mikromechanischer Bauteile

Zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften
von der Fakultät für Maschinenbau
der Universität Karlsruhe (TH)

genehmigte
Dissertation

von

Dipl.-Wi.-Ing. / Ing. dipl. (INPG) Matthias Schlipf M.Sc.
aus Aalen

Tag der mündlichen Prüfung:	16. Februar 2009
Hauptreferent:	Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer
Korreferenten:	Prof. Dr.-Ing. Bernd Scholz-Reiter Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza



Universität Karlsruhe (TH)
Forschungsuniversität • gegründet 1825

Vorwort der Herausgeber

Die schnelle und effiziente Umsetzung innovativer Technologien wird vor dem Hintergrund der Globalisierung der Wirtschaft der entscheidende Wirtschaftsfaktor für produzierende Unternehmen. Universitäten können als "Wertschöpfungspartner" einen wesentlichen Beitrag zur Wettbewerbsfähigkeit der Industrie leisten, in dem sie wissenschaftliche Grundlagen sowie neue Methoden und Technologien erarbeiten und aktiv den Umsetzungsprozess in die praktische Anwendung unterstützen.

Vor diesem Hintergrund soll im Rahmen dieser Schriftenreihe über aktuelle Forschungsergebnisse des Instituts für Produktionstechnik (wbk) der Universität Karlsruhe (TH) berichtet werden. Unsere Forschungsarbeiten beschäftigen sich sowohl mit der Leistungssteigerung von Fertigungsverfahren und zugehörigen Werkzeugmaschinen- und Handhabungstechnologien als auch mit der ganzheitlichen Betrachtung und Optimierung des gesamten Produktionssystems. Hierbei werden jeweils technologische wie auch organisatorische Aspekte betrachtet.

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer
Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza
Dr.-Ing. Christian Munzinger
Prof. Dr.-Ing. Volker Schulze

Vorwort des Verfassers

Die vorliegende wissenschaftliche Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Produktionstechnik (wbk) der Universität Karlsruhe (TH).

Herrn Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer danke ich für die mir entgegenbrachte persönliche und akademische Förderung während meiner Institutszeit. Seine unerschöpfliche Motivation und sein Ideenreichtum in angewandter Forschung und industriellem Technologietransfer haben meine berufliche Entwicklung stark geprägt.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Bernd Scholz-Reiter danke ich für das entgegengebrachte Interesse und die Übernahme des Korreferats.

Frau Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza danke ich für die Förderung meiner Person in allen Belangen des Institutslebens – eine Förderung, wie ich sie mir besser nicht hätte vorstellen können. Ihr Vertrauen und die fachlichen und persönlichen Diskussionen haben mir stets Kraft und Motivation gegeben.

Einen weiteren wesentlichen Beitrag zu dieser Arbeit leisteten die Freunde und Kollegen am wbk v.a. im Bereich Produktionssysteme. Ihnen bin ich ebenso zu Dank verpflichtet, wie den wissenschaftlichen Hilfskräften und DiplomandInnen, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Stellvertretend möchte ich mich hierfür bei Tim bedanken.

Ein ganz besonderer Dank gilt meinen Eltern, die mir diesen Weg ermöglichten und mich immer und in allen Lebenssituationen unterstützt und gestützt haben. Für Freude, Ablenkung und Abwechslung während den Höhen und Tiefen meiner Promotion sorgte meine Frau Carolin. Ihr gilt mein größter Dank. Ihr Lächeln sorgt für meine Lebensfreude und sie hat mir die nötigen Kreativpausen zur Gestaltung der Arbeit geschenkt.

Pfinztal, 17. Februar 2009

Matthias Schlipf



Abstract

Micro manufacturing processes are facing two major challenges with regards to quality assurance in production and process control. First, the quality results of micro manufacturing processes are characterised by a high degree of variability due to size effects and different environmental and process-related constraints in the micro world. Secondly, for the stringent accuracy requirements in the (sub) micrometer range, measurement process variability is of the same magnitude as micro manufacturing process variability, which renders a decision on approval or rejection of the measurement object with regard to its functionality very difficult.

This thesis aims at elaborating a methodology for the continuous reduction of micro manufacturing process variability and at developing a tool for the continuous visualisation, monitoring and separation of manufacturing and measurement process variability.

A quality control loop for quality assurance in production combining statistical modelling, feedback control and statistical process control was developed for the scope of micromechanical components and their geometric quality characteristics. A short-term reduction of process variability can be achieved by predictive control via an empirical regression model by eliminating known process perturbations. A statistical monitoring system for the measurement process quality and the quality of the control model used also helps to reduce process variability in the medium and long term. A new type of quality control chart with a variable weighting factor adaptable to the actual measurement variability was developed for the continuous monitoring of both the manufacturing and the measurement processes. This multivariate μ -EWMA chart allows for the separation of manufacturing variability and measurement process variability and, thus, calls for a simple root cause analysis to be performed if the control limits are surpassed.

The practicability of these approaches was shown both by simulation and empirically using the example of surface roughness control in micro orthogonal face turning.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abkürzungen und Formelzeichen	III
1 Einleitung	1
1.1 Motivation und Problemstellung	1
1.2 Zielsetzung und Begriffsdefinition	3
1.3 Aufbau der Arbeit	5
2 Stand der Forschung und Technik	6
2.1 Mikroproduktionstechnik	7
2.1.1 Mikrofertigungsverfahren	7
2.1.2 Mikro-Messtechnik	14
2.2 Fertigungsnahe Qualitätssicherung	25
2.2.1 Regelungstechnik und statistische Prozessregelung	25
2.2.2 Statistische Qualitätssicherung unter Einfluss von Messfehlern	41
2.3 Zusammenfassende Defizitbewertung	46
3 Lösungsansatz	48
4 Statistische Prozessregelung für Mikrofertigungsprozesse	52
4.1 Kombination von APC und SPC	53
4.2 Klassifizierung der Einflüsse auf den Fertigungsprozess	58
4.3 Quantifizierung der Einflüsse auf das Qualitätsergebnis	61
4.4 Reglerentwurf	64
4.4.1 Modellbildung	65
4.4.2 Umsetzung der Kovariablenschätzung	67
4.4.3 Regelungs- und Optimierungsalgorithmus	67
4.4.4 Umsetzung der Prozessüberwachung	71
4.4.5 Ergebnis	73
4.5 Statistische Verteilungsmodelle geometrischer Mikroqualitätsmerkmale	74
4.5.1 Empirische Untersuchungen	75
4.5.2 Ergebnis	77
4.6 QRK zur simultanen Visualisierung von Fertigungs- und Messprozess	78
4.6.1 Aufbau der multivariaten EWMA-Karte	78
4.6.2 Arbeitsweise der multivariaten EWMA-Karte	86

4.6.3	Ergebnis	88
4.7	QRK zur Trennung von Fertigungs- und Messprozess in der Mikroproduktion	88
4.7.1	Aufbau der multivariaten μ -EWMA-Karte	88
4.7.2	Arbeitsweise der multivariaten μ -EWMA-Karte	89
4.7.3	Validierung der multivariaten μ -EWMA Karte	92
4.7.4	Ergebnis	97
4.8	Zusammenfassung der entwickelten statistischen Prozessregelung für Mikrofertigungsprozesse	97
5	Prototypische Implementierung am Beispiel des Mikroorthogonaleinstechdrehens	101
5.1	Definition der Regelungsaufgabe	101
5.1.1	Regelgröße	101
5.1.2	Regelungsaufgabe	103
5.1.3	Klassifizierung der Einflüsse auf das Mikrodrehen	103
5.1.4	Schätzfunktion für die Kovariable Schneidkantenradius	104
5.2	Versuchsaufbau	106
5.2.1	Fertigungsprozess	106
5.2.2	Mess- und Analysetechnik	110
5.3	Regelkreisentwurf	112
5.3.1	Modellbildung: Prognose Oberflächenrauheit	112
5.3.2	Umsetzung der Kovariablenschätzung: Prognose des Schneidkantenradius	117
5.3.3	Regelungs- und Optimierungsalgorithmus	122
5.3.4	Prozessüberwachung: Implementierung der multivariaten μ -EWMA-Karte	125
5.4	Anwendung der statistischen Prozessregelung	135
5.4.1	Simulationsstudie	137
5.4.2	Empirische Versuche	149
5.5	Bewertung des Ansatzes	152
6	Zusammenfassung und Ausblick	159
6.1	Zusammenfassung	159
6.2	Ausblick	161
	Literaturverzeichnis	I
	Beitragende Studien- und Diplomarbeiten	XXI
	Anhang	XXII

Abkürzungen und Formelzeichen

Abkürzung	Bedeutung
ANOVA	Engl.: Analysis of variance (Varianzanalyse)
APC	Engl.: Automatic process control (Regelungstechnik)
ASPC	Engl.: Algorithmic statistical process control (Kombination von statistischer Prozessregelung und Regelungstechnik)
DIN	Deutsches Institut für Normung
EG (OEG, UEG)	Obere bzw. untere Eingriffsgrenze der Qualitätsregelkarte
EWMA	Engl.: Exponentially weighted moving average (exponentiell gewichteter Mittelwert)
GUM	Engl.: Guide to the expression of uncertainty in measurement (Leitfaden zur Messunsicherheitsquantifizierung)
ISO	Engl.: International Organization for Standardization (internationale Organisation für Standardisierung)
IT	Von der ISO festgelegte Toleranzen
KI	Künstliche Intelligenz
KMG	Koordinatenmessgerät
KMT	Koordinatenmesstechnik
KNN	Künstliches neuronales Netz
KUSUM	Kumulierte Summe
MPC	Engl.: Model predictive control (modellbasierte prädiktive Regelung)
MU	Messunsicherheit
PIM	Engl.: Powder injection molding (Pulverspritzguss)
QRK	Qualitätsregelkarte
REM	Rasterelektronenmikroskop
SFB	Sonderforschungsbereich
SPC	Engl.: Statistical process control (statistische Prozessregelung)
T (OT, UT)	Toleranz (obere und untere Toleranz)
VDI/VDE	Verband Deutscher Ingenieure/Elektrotechniker

Formelzeichen	Größe	Einheit
α	Wahrscheinlichkeit für einen Fehler 1. Art (Fehlalarm) / Signifikanzniveau	[-]
A	Spanungsquerschnitt	[μm^2]
ARL	Engl.: average run length = Lauflänge einer Qualitätsregelkarte	[-]
$ARL(0)$	Mittlere Lauflänge bei ungestörtem Prozess	[-]
$ARL(\delta)$	Mittlere Lauflänge bei Verschiebung der Prozesslage um δ	[-]
c_p	Fähigkeitsindice zur Beurteilung der Standardabweichung	[-]
c_{pk}	Fähigkeitsindice zur Beurteilung der Standardabweichung und der Lage	[-]
b	Spanungsbreite	[mm]
B_j	Matrix des Modellkoeffizienten j	[-]
β_j	Vektor von Modellkoeffizienten j	[-]
β	Wahrscheinlichkeit für einen Fehler 2. Art (unterlassener Alarm)	[-]
$Cov(X, Y)$	Kovarianz der Zufallsvariablen X und Y	[-]
\sum^x	Kovarianzmatrix eines Zufallsvektors X	[-]
χ^2_ν	χ^2 -Verteilung mit ν Freiheitsgraden	[-]
δ	Kritische Verschiebung (engl.: Shift) der Prozesslage	[-]
E	Systematischer Messfehler	[μm]
$E(X)$	Erwartungswert der Zufallsvariable X	[-]
ε	Modellfehler / Residuum	[-]
ε_x^i	Schätzfehler bezüglich der Variable x beim Ansatz i	[-]
f	Vorschub	[mm]

Formelzeichen	Größe	Einheit
$F_{\nu_1; \nu_2}$	Verteilungsfunktion der F -Verteilung mit ν_1 und ν_2 Freiheitsgraden	[-]
F_c	Schnittkraft	[N]
h	Schnitttiefe / Spannungsdicke	[μm]
k	Spezifischer Faktor zur Berechnung der Eingriffsgrenzen einer EWMA-Karte	[-]
$K(K0, K1, K2, K3)$	Korrekturfaktor für die Schneidkantenradiuschätzung	[-]
$k_{e1,x}$	(Materialbezogener) Hauptwert der spezifischen Schnittkraft für die Dekade x	[N/mm ²]
$L(\cdot)$	Verlustfunktion	[-]
l	Länge	[μm]
λ	Gewichtungskonstante/Glättungskonstante der EWMA Transformation ($0 < \lambda < 1$)	[-]
λ_t	Gewichtungsvariable in Abhängigkeit der aktuellen Messstreuung $s_{M,t}$ zum Zeitpunkt t	[-]
λ_{Max}	Maximaler λ -Wert bei der Verwendung der μ -EWMA-Karte	[-]
λ_0	Zur Referenzmessstreuung $s_{M,REF}$ zugehöriger λ -Wert, welcher bei einem asymptotischen Ansatz der μ -EWMA-Karte zu wählen ist	[-]
$m_{e1,x}$	Anstiegswert der spezifischen Schnittkraft für die Dekade x	[-]
m	Anzahl der Messwiederholungen	[-]
n	Stichprobenumfang	[-]
$N(\mu, \sigma)$	Normalverteilung mit Erwartungswert μ und Standardabweichung σ	[-]
r	Radius / euklidischer Abstand	[mm]

Formelzeichen	Größe	Einheit
R^2	Bestimmtheitsmaß	[-]
R_{corr}^2	Korrigiertes Bestimmtheitsmaß	[-]
R_{max}^2	Maximal erreichbares Bestimmtheitsmaß	[-]
R_a	Arithmetischer Mittenrauheitswert	[μm]
R_a^{grenz}	Grenzwert der Rauheit, oberhalb derer der Regler eingreift (Regelkriterium)	[μm]
R_a^{mess}	Messwert der Rauheit	[μm]
R_a^{soll}	Sollwert der Rauheit	[μm]
R_a^{ist}	Istwert der Rauheit	[μm]
$R_a^{ist''}$	Simulierter Istwert der Rauheit	[μm]
R_a^{min}, R_a^{max}	Minimal-/Maximalwert der zulässigen Rauheit	[μm]
\hat{R}_a^{prog-i}	Prognostizierte Rauheit nach Handlung i	[μm]
\hat{R}_a^{mod}	Prognostizierte Rauheit bei Verwendung real gemessener Schneidkantenradien	[μm]
\hat{R}_a^{Kx}	Prognostizierte Rauheit bei Verwendung von Korrekturfaktor x für die Prognose des Schneidkantenradius	[μm]
\hat{R}_a^{NB}	Prognostizierte Rauheit bei Verwendung der Nebenbedingung NB für den Regler	[μm]
r_β	Schneidkantenradius	[μm]
\hat{r}_β^i	Prognostizierter Schneidkantenradius bei Verwendung des Ansatzes i	[μm]
S	Korrigierte Stichprobenstandardabweichung einer Stichprobe	[-]
S^2	Korrigierte Stichprobenvarianz einer Stichprobe	[-]
S_E	Standardunsicherheit Messgerät (Rauheitsmessung)	[μm]

Formelzeichen	Größe	Einheit
s_{MP}	Standardunsicherheit Messprozess (Rauheitsmessung)	[μm]
s_F	Standardabweichung des Fertigungsprozesses aus einer Stichprobe	[μm]
s_M	Standardabweichung des Messprozesses aus einer Stichprobe	[μm]
$s_{M,REF}$	Standardabweichung des Messprozesses aus einer Stichprobe unter Idealbedingungen	[μm]
s_P	Stichprobenstandardabweichung des Gesamtprozesses (Mess- und Fertigungsprozess)	[μm]
σ	Standardabweichung	[-]
σ^2	Varianz	[-]
$\hat{\sigma}$	Schätzer für die Standardabweichung	[-]
σ_F	Standardabweichung des Fertigungsprozesses der Grundgesamtheit	[μm]
σ_M	Standardabweichung des Messprozesses der Grundgesamtheit	[μm]
σ_ε	Standardabweichung der Residuen / Unsicherheit des Regressionsmodells	[μm]
σ_{r_β}	Standardabweichung der Differenz zwischen gemessenem r_β und prognostiziertem \hat{r}_β	[μm]
σ_P	Standardabweichung des Gesamtprozesses (Mess- und Fertigungsprozess) der Grundgesamtheit	[μm]
t	Zeit, Zeitpunkt	[s]
τ	Sollwert	[-]
u_c	Standardunsicherheit aus der Kalibrierung	[μm]
u_p	Standardunsicherheit aus dem Messprozess (KMG-Messung)	[μm]

Formelzeichen	Größe	Einheit
u_w	Standardunsicherheit bedingt durch Streuung der Produktionsprozesse (KMG-Messung)	[μm]
μ	Erwartungswert	[-]
V	Zufallsvariable	[-]
v_c	Schnittgeschwindigkeit	[m/min]
$v_{c,t+1}^*$	Vom Regler vorgegebene optimale Schnittgeschwindigkeit in Schritt $t+1$	[m/min]
x	Einzelmesswert	[-]
\bar{x}	Arithmetisches Mittel einer Stichprobe	[-]
$\bar{\bar{x}}$	Totaler Stichprobenmittelwert (Arithmetisches Mittel der Mittelwerte)	[-]
X	Hebelfaktor	[-]
Y	Zielgröße/Ergebnismesswert	[-]
y_{grenz}	Grenzwert der Zielgröße außerhalb derer die Regelung eingreift	[-]
$y_{\text{mess},t+1}$	Gemessene Zielgröße zum Zeitpunkt $t+1$	
$\hat{y}_{\text{korr},t+1}$	Prognostizierte Zielgröße zum Zeitpunkt $t+1$ nach der Regelung	[-]
y_{max}	Maximal erlaubter Wert der Zielgröße	[-]
z_α	α -Quantil der Standardnormalverteilung	[-]
Z	Kovariable	[-]
$Z_{F,t}$	Prüfstatistik für den Fertigungsprozess zum Zeitpunkt t	[-]
$Z_{M,t}$	Prüfstatistik für den Messprozess zum Zeitpunkt t	[-]
$Z_{P,t}$	Prüfstatistik für die Überlagerung von Fertigungs- und Messprozess zum Zeitpunkt t	[-]

1 Einleitung

1.1 Motivation und Problemstellung

Die Mikrosystemtechnik zählt zu den bedeutendsten Querschnittstechnologien dieser Zeit [Fhg06]. Die fortschreitende Miniaturisierung von Produkten ermöglicht es, vielfältige Funktionen in Systeme zu integrieren, welche die Anforderungen nach einem kleinen Bauraum und geringem Gewicht stellen. Diese Mikrosysteme kommen bereits in verschiedenen Anwendungsbereichen wie dem Automobilbau, den Life Sciences, der Medizintechnik oder dem Maschinen- und Anlagenbau zum Einsatz.

Die anfangs entwickelten monolithischen Herstellungsverfahren entstammen der Mikroelektronik und sind für die Fertigung einer hohen Anzahl gleichartiger Teile vornehmlich für eine Industriebranche optimiert. Die Fertigung monolithischer Mikroprodukte ist auf 2- bis 2½-dimensionale Bauteile und wenige Werkstoffe beschränkt [Kah06].

Um weitere Anwendungen zu erschließen, muss allen voran die bearbeitbare Materialpalette erweitert werden. Daher entwickelte sich die hybride Mikroproduktionstechnik als Fortführung der Fein- und Feinstwerktechnik hin zur Ultrapräzisionsbearbeitung im Mikrobereich [Men05]. Hierbei werden traditionelle Fertigungsketten - abformende Verfahren wie der Mikrospritzguss oder spanende Verfahren wie das Mikrodrehen und -fräsen – aus dem Makrobereich „herabskaliert“. Diese Verfahren ermöglichen die wirtschaftliche Bearbeitung verschleißarmer Werkstoffe wie Metalle und Keramiken über fast alle Stückzahlen hinweg [Kot08].

Aufgrund der engen Toleranzvorgaben bei Mikrobauteilen im (Sub/)Mikrometerbereich müssen die Prozesse sehr präzise arbeiten. Allerdings treten beim „Herabskalieren“ der Prozesskette von der Prozessführung bis zur Qualitätssicherung an vielen Stellen neue Herausforderungen auf (Abbildung 1.1). Hierbei gibt es vor allem in den folgenden zwei Themengebieten Handlungsbedarf:

1. Es wirken die s.g. **Größeneffekte**, die neue Lösungsansätze erfordern. Ein Größeneffekt ist beispielsweise das mit der Miniaturisierung stark anwachsende Verhältnis von Oberfläche zu Volumen. Dadurch leistet die

Oberfläche bei Mikrobauanteilen in der Regel einen höheren Beitrag zur Gesamtfunktionalität des Bauteils und Oberflächeneigenschaften des Werkstückmaterials haben erhöhten Einfluss auf beispielsweise die Festigkeit des Bauteils. Außerdem kann das Werkstoffverhalten nicht mehr als geometrieunabhängig angesehen werden, da die Dimensionen des Werkstücks nicht mehr um Größenordnungen über der Gefügestruktur des Werkstoffs liegen. Bekannte Prozessparametereinstellungen aus dem Makrobereich können daher nicht ohne weiteres in den Mikrobereich transferiert werden [Klo07, Kot08, Scho07a].

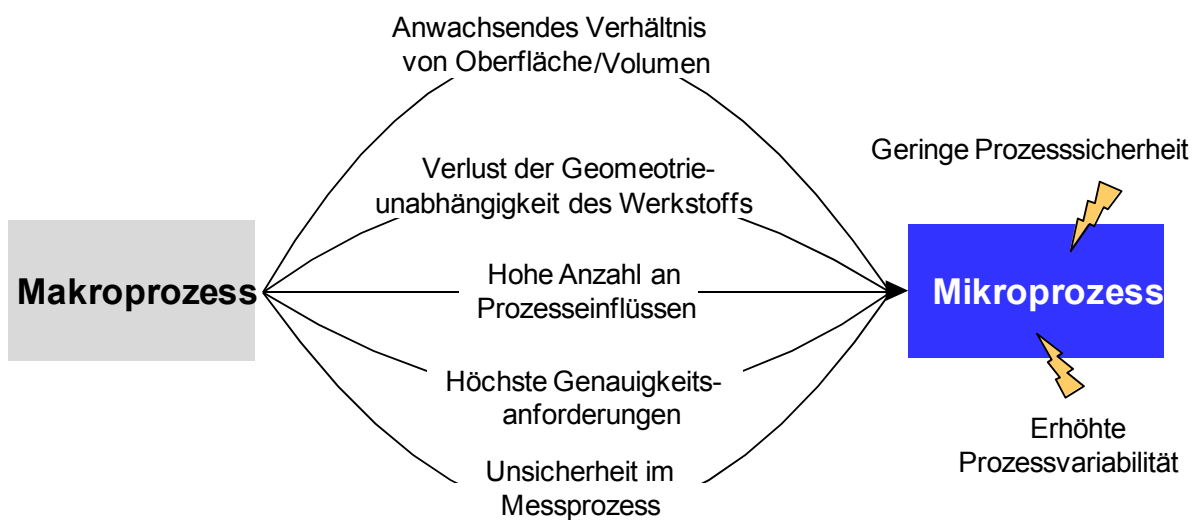


Abbildung 1.1: Effekte beim Übergang vom Makro- zum Mikroprozess

In der Summe resultieren diese veränderten Umwelt- und Prozessbedingungen in einer großen **Variabilität des Qualitätsergebnisses** der Mikrofertigungsprozesse. Die wichtigste Aufgabe einer mikrospezifischen Qualitätssicherung besteht daher in der Gewährleistung der Prozesssicherheit, was aber aus den oben angeführten Gründen derzeit in vielen Fällen nicht möglich ist [Klo05a, Klo07, Scho06]. Die Qualitätssicherung hat die Aufgabe, die Fertigungsprozessstreuung sowohl kurzfristig als auch langfristig zu verringern, um die Prozesssicherheit zu erhöhen. Dazu müssen qualitätssichernde Maßnahmen entwickelt werden, um zum Einen aktiv und prädiktiv den laufenden Mikrofertigungsprozess zu beeinflussen und zum Anderen die Streuung des Fertigungsprozesses und der erzeugten Produktqualität auf Störeinflüsse zu überwachen [Klo05a, Scho07a].

2. Zusätzlich stellen die hohen **Genauigkeitsanforderungen** im Mikro- und Submikrobereich eine Herausforderung an die Qualitätssicherung und hier insbesondere an die Messtechnik dar [Klo05a, Scho05, Wec04]. Die Messunsicherheit von Mikromesssystemen liegt oft im Größenbereich der vorgegebenen geometrischen Toleranzen und erschwert die Entscheidung über Annahme oder Ablehnung des Messobjektes bezogen auf dessen Funktionstüchtigkeit. Eine Regelung von Fertigungsprozessen fundiert immer auf den zugrunde liegenden Messdaten. Auch diese Messdaten unterliegen einer Streuung aufgrund der vielfältigen Unsicherheiten im Messprozess [Die04]. Messdaten setzen sich daher immer aus einer Überlagerung der Streuung aus dem Fertigungsprozess und der Streuung aus dem Messprozess zusammen. Da in der Mikroproduktionstechnik die Streuung des Messprozesses in der Größenordnung der Streuung des Fertigungsprozesses liegt, ist im Gegensatz zur Makrowelt diese **Unsicherheit im Messprozess** nicht mehr vernachlässigbar [Hor05, Lan08a].

Daher sind Methoden und Werkzeuge gefordert, welche eine kontinuierliche Überwachung, Regelung und Trennung der Streuung von Fertigungs- und Messprozess ermöglichen. Erst dann kann eine Regelung des Mikrofertigungsprozesses und nicht fälschlicherweise die Regelung der Überlagerung von Fertigungs- und Messprozess garantiert werden.

1.2 Zielsetzung und Begriffsdefinition

Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Entwicklung und Implementierung einer Qualitätssicherungsmethodik, die durch den Einsatz statistischer Verfahren die Regelung und kontinuierliche Verbesserung von Mikrofertigungsprozessen ermöglicht. Die genannten Herausforderungen überwindend soll das Potential einer fertigungsnahen statistischen Qualitätssicherung und damit die Regelung von Fertigungsprozessen auch für Unternehmen und Forschungseinrichtungen der Mikroproduktionstechnik erschlossen werden.

Erstes Teilziel ist die Entwicklung einer Methodik zur kontinuierlichen Reduzierung der Variabilität von Mikrofertigungsprozessen. Wesentlich ist hierbei, sowohl die aktive maschinennahe Regelung einer begrenzten Anzahl an mess- und regelbaren Prozessparametern als auch die Überwachung der restlichen Prozessparameter und der Umweltrandbedingungen zu garantieren. Zu letzteren gehört die im

Vergleich zu den geforderten Toleranzen große Streuung des Messprozesses zur geometrischen Charakterisierung der Bauteile.

Zweites Teilziel ist daher die Entwicklung eines Werkzeugs zur kontinuierlichen Visualisierung, Überwachung und Trennung der Streuung von Fertigungs- und Messprozess, damit nur der Mikrofertigungsprozess und nicht fälschlicherweise eine Überlagerung von Fertigungs- und Messprozess geregelt wird.

Der Begriff Mikrobauteil oder Mikrostrukturierung wird in der vorliegenden Arbeit verstanden als ein 2½- oder 3-dimensionales Bauteil, wovon mindestens eines dessen Qualitätsmerkmale Abmessungen zwischen einem Mikrometer und einem Millimeter aufweist oder Toleranzanforderungen im Mikro- oder Submikrometerbereich zu erfüllen sind. Im Folgenden werden die Präfixe „Mikro“ und „Makro“ verwendet, um die herkömmliche Produktionstechnik („Makro“) und die Produktionstechnik im Mikrobereich („Mikro“) zu unterscheiden. Analog dazu erfolgt die Verwendung der Präfixe für andere Begriffe wie Fertigungsprozess, Produktion etc.

Die Abweichung eines aus Messungen gewonnenen Wertes vom wahren Wert der Messgröße wird als Messabweichung oder Messfehler [DIN 1319-1] bezeichnet. In der vorliegenden Arbeit wird der Begriff Messfehler aufgrund dessen breiteren Gebrauchs verwendet.

In Bezug auf die zu untersuchende Qualität wurde der Betrachtungsumfang auf geometrische Qualitätsmerkmale wie die Grob- und Feingestalt nach [DIN 4760] der Bauteile beschränkt.

Für die Anwendung der entwickelten Methoden und deren Bewertung wurde stellvertretend für die Mikroproduktionstechnik der Fertigungsprozess der Mikrozerspanung als Validierungsbeispiel gewählt. Zum Einen zeichnet sich die Mikrozerspanung durch eine hohe Anzahl an zu bearbeitenden Materialien und durch ihre Flexibilität und Wirtschaftlichkeit aus. Zum Anderen ist die Mikrozerspanung stellvertretend für andere Mikrofertigungsverfahren zum gegenwärtigen Zeitpunkt aufgrund der genannten Rahmenbedingungen (vgl. Kapitel 1.1) noch nicht ausreichend beherrscht [Kot08] und erfordert daher eine Methodik zur Reduzierung der Prozessvariabilität. Die Mikrozerspanung wird dabei in Anlehnung an [Mor95] durch Spannungsdicken zwischen 100 µm und 1 µm charakterisiert.

1.3 Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Arbeit ist in sechs Kapitel zuzüglich Literaturverzeichnis und Anhang gegliedert (Abbildung 1.2). Im Anschluss an die Einleitung sowie die Darstellung des Stands der Forschung und Technik folgen der Lösungsansatz und die Herleitung einer statistischen Prozessregelung für mikrofertigungstechnische Prozesse. Die Ergebnisse der Anwendung der entwickelten mikrospezifischen statistischen Prozessregelung am Beispiel der Mikrozerspanung schließen sich innerhalb eines Umsetzungskapitels an. Zusammenfassung und Ausblick bilden das letzte Kapitel der Arbeit.

Kap. 1: Einleitung <ul style="list-style-type: none"> • Motivation • Zielsetzung • Aufbau der Arbeit 	Kap. 2: Stand der Forschung und Technik <ul style="list-style-type: none"> • Mikroproduktionstechnik • Fertigungsnahe Qualitätssicherung • Zusammenfassende Defizitbewertung
Kap. 3: Lösungsansatz	
Kap. 4: Statistische Prozessregelung von Fertigungs- und Messprozess für die Produktion mikromechanischer Bauteile	
<ul style="list-style-type: none"> • Kombination von APC und SPC • Klassifizierung der Einflüsse auf den Fertigungsprozess • Quantifizierung der Einflüsse auf das Qualitätsergebnis • Reglerentwurf • Statistische Verteilungsmodelle geometrischer μ-Qualitätsmerkmale • QRK zur simultanen Visualisierung von Fertigungs- und Messprozess • QRK zur Trennung von Fertigungs- und Messprozess in der μ-Produktion • Zusammenfassung des entwickelten Ansatzes 	
Kap. 5: Prototypische Implementierung am Beispiel des μ-Orthogonaleinstechdrehens <ul style="list-style-type: none"> • Definition Regelungsaufgabe • Versuchsaufbau • Regelkreisentwurf • Anwendung und Ergebnisse • Bewertung 	Kap. 6: Abschließende Betrachtung
Literaturverzeichnis und Anhang	

Abbildung 1.2: Aufbau der Arbeit

2 Stand der Forschung und Technik

Zur umfassenden Darstellung der bereits erfolgten Arbeiten im Umfeld der genannten Zielsetzung werden im Stand der Forschung und Technik die folgenden zwei Hauptthemenbereiche mit entsprechenden Unterbereichen behandelt:

- Mikroproduktionstechnik
 - Mikrofertigungsverfahren (Kapitel 2.1.1)
 - Mikromesstechnik (Kapitel 2.1.2)
- Fertigungsnahe Qualitätssicherung
 - Regelungstechnik und statistische Prozessregelung (Kapitel 2.2.1)
 - Statistische Qualitätssicherung unter Einfluss von Messfehlern (Kapitel 2.2.2)

Jedes der folgenden vier Unterkapitel (vgl. Kapitel 2.1.1, Kapitel 2.1.2, Kapitel 2.2.1 und Kapitel 2.2.2) schließt mit einem themenbezogenen Fazit ab. Die Zusammenfassung der resultierenden Defizite aus dem Stand der Forschung und Technik, die diese Arbeit motivieren, wird abschließend in Form eines Forschungsdeltas vorgenommen (vgl. Kapitel 2.3).

2.1 Mikroproduktionstechnik

Unter den Begriff Mikroproduktionstechnik fallen zum Einen die skalierten „klassischen“ mechanischen Fertigungsverfahren wie Fräsen, Bohren, Drehen etc. zur Herstellung dreidimensionaler Mikrobauteile [Ger06]. Bei diesen werkzeuggebundenen Fertigungsverfahren bestimmen die Geometrie und die Oberfläche des Werkzeugs die Gestalt des Produktes [Mas97]. Neben diesen mechanischen Mikrofertigungsprozessen werden zum Anderen noch die energieunterstützten oder abtragenden (u.a. Erodieren, Laserablation) und replikativen (u.a. Urformen, Umformen) Verfahren der Mikroproduktionstechnik zugeordnet [Hes02] (Abbildung 2.1). Als begleitende und periphere Prozesse sind für die Mikroproduktionstechnik darüber hinaus Handhabung und Qualitätssicherung zu nennen [Bis04].

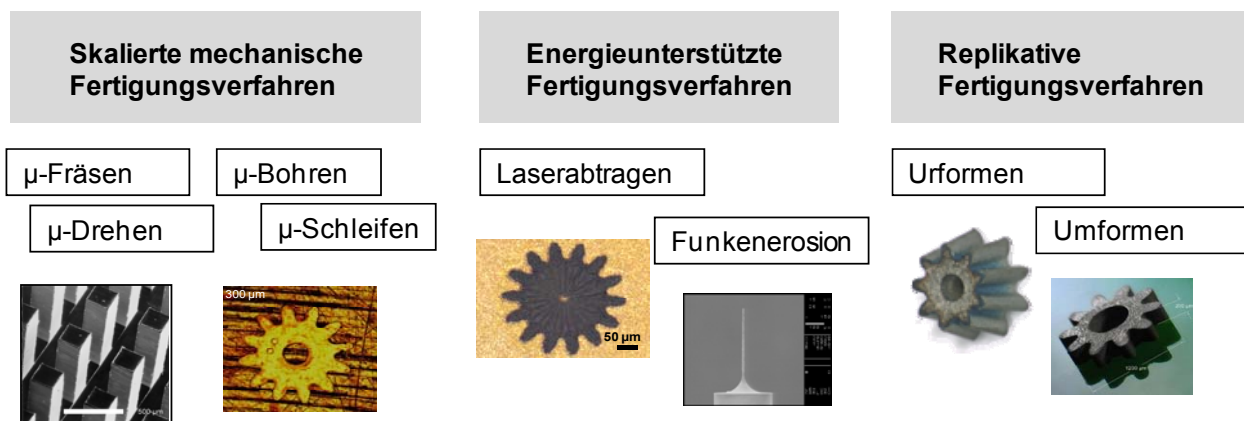


Abbildung 2.1: Verfahren der Mikroproduktionstechnik [Buc05]

2.1.1 Mikrofertigungsverfahren

In Kapitel 2.1.1.1 werden die Herausforderungen bei der Herstellung von dreidimensionalen mikromechanischen Mikrobauteilen aus verschleißarmen Werkstoffen (Metalle und Keramiken) für die Klein- bis Großserie vorgestellt. Der Fokus wird hierbei auf die Herausforderungen bezüglich der Prozessstabilität bezogen auf die Grob- und Feingestalt der erzeugten Mikrostrukturen gelegt. Da im späteren Verlauf der Arbeit die mikrospezifische Prozessregelung am Beispiel des Mikroorthogonaleinstechdrehens validiert wird, behandelt Kapitel 2.1.1.2 detailliert die Prozesseinflüsse und Herausforderung der Prozessstabilität der Mikrozerspannung mit geometrisch bestimmter Schneide.

2.1.1.1 Prozessstabilität bei mikrofertigungstechnischen Prozessen

Die Erzeugnisqualität von Mikrofertigungsprozessen weist im Vergleich zu Prozessen in Makrodimensionen eine höhere Variabilität auf, was auf verschiedene Ursachen zurückgeführt werden kann (Abbildung 2.2).



Abbildung 2.2: Herausforderung von Mikrofertigungsprozessen

Geometrische Toleranzanforderungen an mikromechanische Komponenten und Systeme reichen bis in den Submikrometerbereich [u.a. Fle08a, Hor05, Lan08a]. Die Fertigungsverfahren müssen sich demnach der Herausforderung höchster Genauigkeitsanforderungen stellen.

Einflüsse, welche in Makrodimensionen bzw. bei weniger hohen Toleranzanforderungen keinen signifikanten Effekt auf den Fertigungsprozess bzw. das Qualitätsergebnis haben, werden in der Mikroproduktionstechnik plötzlich bedeutsam. Bei energieunterstützten Verfahren wie der Mikrofunktenerosion kann im Gegensatz zur Makrowelt z.B. nicht mehr von einem kräftefreien Prozess gesprochen werden [Klo05a]. Der Druck im Plasmakanal übt Kräfte auf das zu bearbeitende Bauteil und die Elektrode aus, die nicht mehr zu vernachlässigen sind. Beim Drahterodieren erfordert die geringe thermische und mechanische Belastbarkeit der dünnen Drähte neue Handlungsrichtlinien. Bei der Laserablation bedingt eine höhere Laserleistung z.B. einen größeren Wärmeeinfluss in das Material und führt so zu Schmelz- und Dropletbildung [Fle05]. Darüber hinaus macht die gaußförmige Intensitätsverteilung des

Laserstrahls die Herstellung von geraden Wänden sehr schwierig [Fle05, Fle07c]. Auch bei den replikativen Verfahren gibt es die Herausforderung einer Vielzahl an Einflussfaktoren. Beim Mikropulverspritzguss (μ -PIM, englisch: micro powder injection molding) nimmt die exakte Temperaturführung des Werkzeuges einen höheren Stellenwert als im Makrospritzguss ein [Bau02, Löh05]. Für ein vollständig gefülltes Bauteil sind neben der angesprochenen Temperierung weiterhin die Einspritzgeschwindigkeit und der Einspritzdruck material-, werkzeug- und maschinenabhängig einzustellen [Wal99, Buc05]. Um eine vollständige Füllung von sacklochartigen Mikrostrukturen im Werkzeug zu erzielen und um Defekte zu verhindern, die durch die Kompression und Erhitzung von Luft verbunden mit der Zerstörung von Kunststoffanteilen (Diesel-Effekt) verursacht werden, ist weiterhin ein Evakuieren des Werkzeugs erforderlich [Bau02]. Alle diese Einflüsse wirken sich u.a. auf die Maßhaltigkeit der gesinterten Bauteile aus. Die Garantie der Maßhaltigkeit der fertigen Bauteile stellt eine der Hauptherausforderung für durch μ -PIM hergestellte Mikrokomponenten dar [Pio08]. Die erreichbare Bauteilpräzision wird nach wie vor als limitierende Prozessgröße angesehen [Bec07, Bec08] und ist daher Gegenstand von Forschungsarbeiten im makro- wie im mikroskopischen Bereich [Bar03, Gre07, Li07]. Mikrofertigungsprozesse unterliegen also aufgrund einer größeren Anzahl signifikanter bzw. neuer Prozesseinflüsse einer höheren Streuung als im Makrobereich.

Darüber hinaus müssen in der Mikrowelt „neue“ physikalische Effekte wie Abrasion, Adhäsions- und Kapillarkräfte beachtet werden [Els03, Lan07, Scho07a, Voll07]. Die Mikrostruktur (Kornverteilung, Korngröße, Lunker, Einschlüsse, Risse etc.) des zu bearbeitenden Werkstoffes in Form einer inhomogenen Gefügestruktur und werkstoffinhärenter Eigenschaften hat einen großen Einfluss auf die Variabilität der Maßhaltigkeit und Oberflächenrauheit der erzeugten Mikrostrukturen [Fle06, Klo05a, Scho07a].

Die oft unbekanntenen Werkstoffeigenschaften und komplexen Ursache-/Wirkungsbeziehungen [Scho07a] führen zu einem bisher mangelnden Wissen über die Wahl der Prozessparameter der einzelnen Mikrofertigungsverfahren. Desweiteren ist die Mikroproduktionstechnik als relativ „junge“ Technologie noch durch wenig Erfahrungswissen und Anweisungsempfehlungen, wie die Prozessparameter der einzelnen Fertigungsverfahren zu wählen und die Umwelteinflüsse zu überwachen

sind, charakterisiert. Im Gegensatz zur Produktionstechnik in Makrodimensionen, in welcher optimale und stabile Prozesseinstellungen (oft) bekannt sind, gibt es in der Mikroproduktionstechnik noch wenig Gesetzmäßigkeiten über die Auswirkungen und v.a. Wechselwirkungen der unterschiedlichen Einflüsse auf den Fertigungsprozess. Abbildung 2.3 fasst die große Anzahl an Prozesseinflüssen und Prozessunsicherheiten auf einen Mikrofertigungsprozess zusammen.

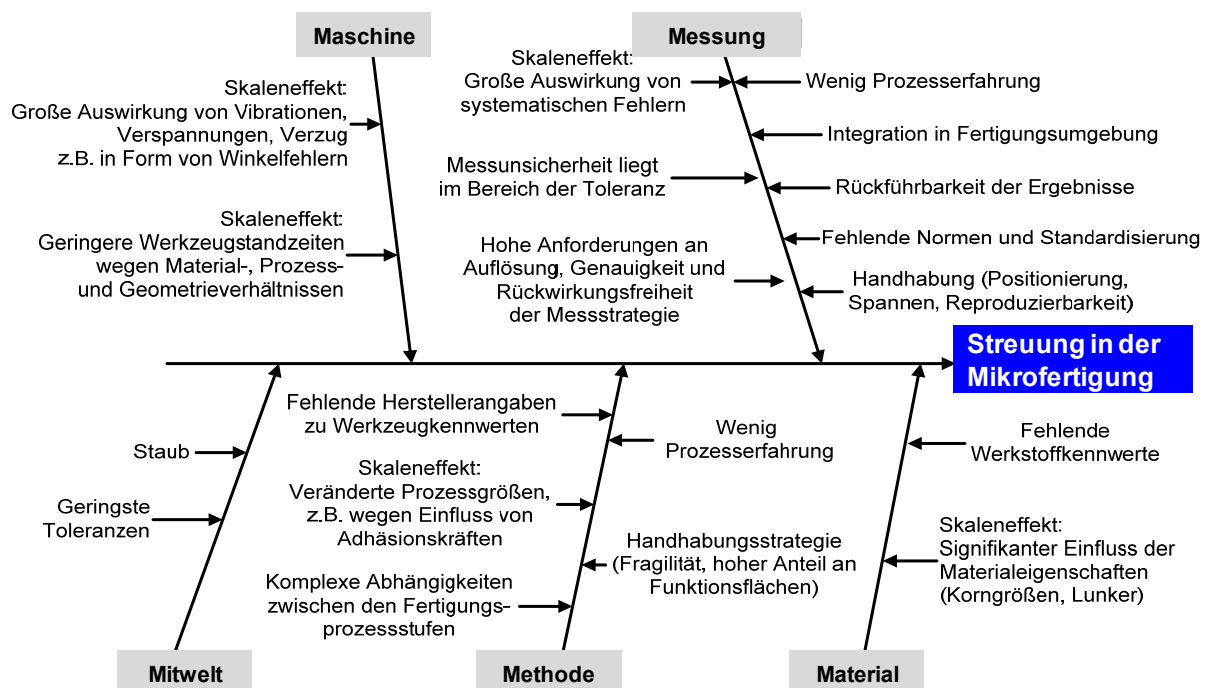


Abbildung 2.3: Ursache-Wirkungsdiagramm für die zusätzlichen Quellen der Streuung in der Mikroproduktionstechnik

In der Literatur finden sich zahlreiche Beiträge, die sich mit Optimierung einzelner Parameter bezogen auf eine bestimmte Materialsorte für mechanische, energieunterstützte oder replikative Mikrofertigungsprozesse beschäftigen [u.a. Bec07, Bec08, Bie08, Bru07a, Cha07, Hau08, Klo08, Kua06, Lei01, Sha05, Sha06, Tam92, Voll04, Wan02, Zhe07]. Dabei bleibt festzuhalten, dass nur wenige Autoren die Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Prozessparametern z.B. anhand statistischer Versuchsplanung quantifiziert haben.

Zusammenfassend bleibt festzuhalten, dass die genannten Gründe zu einer höheren Streuung von Mikrofertigungsprozessen im Vergleich zu Prozessen in Makrodimensionen führen und damit die Regelung von Mikrofertigungsprozessen erschweren.

2.1.1.2 Prozessstabilität in der Mikrozerspanung mit geometrisch bestimmter Schneide

Für die Anwendung der in Kapitel 4 zu entwickelnden Methoden und deren Bewertung wurde stellvertretend für die Mikroproduktionstechnik der Fertigungsprozess der Mikrozerspanung als Validierungsbeispiel gewählt. Spanende Mikrofertungsverfahren sind durch ihre hohe Flexibilität in Bezug auf die herzustellenden Formen und die bearbeitbaren Materialien charakterisiert [u.a. Fle08b, Klo07, Kot08], da die Werkzeuge im Allgemeinen werkstückunabhängig sind (Abbildung 2.4). Dadurch können hohe qualitätsbezogene Vorgaben hinsichtlich der Fertigungsgenauigkeit und Oberflächenrauheit erfüllt und eine breite Palette an Werkstoffen von Nichteisenmetallen, Kunststoffen bis zu Werkzeugstählen bearbeitet werden. Zudem sind nahezu alle Stückzahlen wirtschaftlich umsetzbar [Kot08].

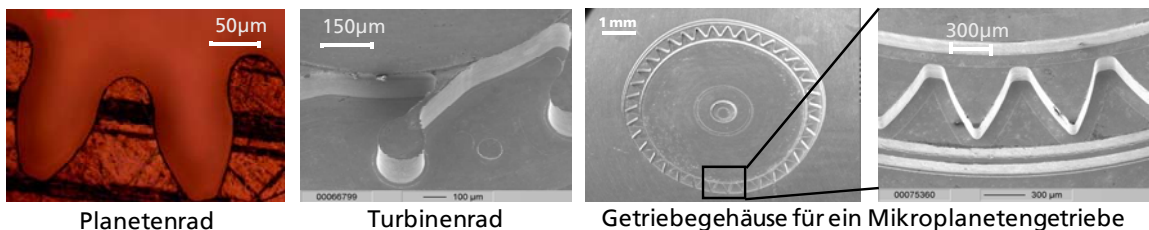


Abbildung 2.4: Gefräste Mikrostrukturen innerhalb des SFB 499 [Fle07a]

Trotz der hohen Potentiale und Vorteile, welche die Mikrozerspanung bietet, besteht noch Handlungsbedarf in der Prozessstabilität der Verfahren. Die erhöhte Prozessvariabilität rührt v.a. von der großen Anzahl an Einflussfaktoren, den hohen Genauigkeitsanforderungen im Mikrobereich und den Größeneffekten, die beim Herabskalieren des Makroprozesses auftreten [Bru07b, Kot08]. Abbildung 2.5 gibt einen Überblick über die Ursachen der auftretenden Variabilität im Bereich der Mikrozerspanung.

So sind in der Mikrozerspanung höhere Drehzahlen (also veränderte Schnittgrößen) notwendig, um eine konstante Schnittgeschwindigkeit zu gewährleisten. Diese kann zu hochfrequenten Schwingungen führen, die sich auf die Werkzeugstandzeit und die Bearbeitungsergebnisse auswirken [Wan05].

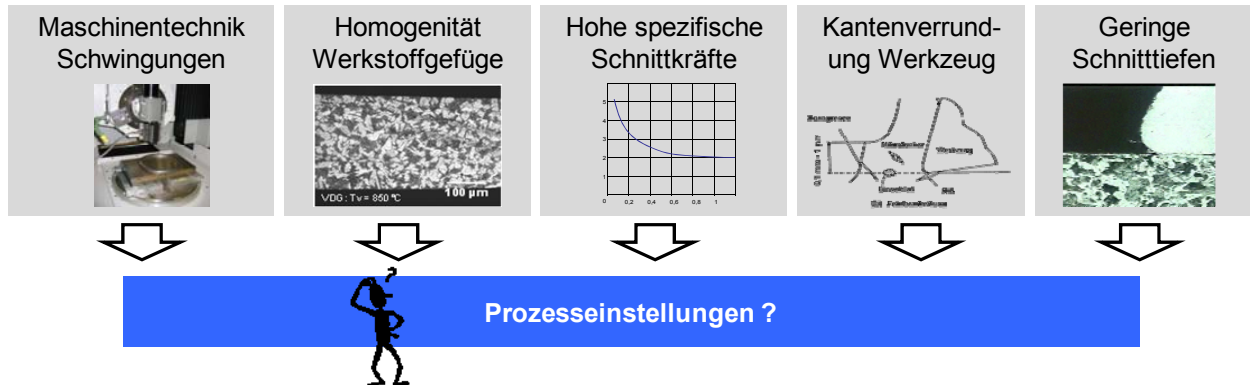


Abbildung 2.5: Ursachen für Prozessvariabilität in der Mikrozerspanung

Im konventionellen Fall ist die Mikrostruktur eines Werkstoffs um Größenordnungen kleiner als die geometrischen Abmaße des Werkstücks, weshalb die Werkstoffeigenschaften in der Regel als geometrieunabhängig angesehen werden können [Men05]. Diese Geometrieunabhängigkeit ist in der Mikrozerspanung nicht mehr gegeben. Bei der Miniaturisierung wirkt sich neben dem verringerten Volumen auch das umgekehrt wachsende Verhältnis von Oberfläche/Volumen aus. Dies zeigt sich unter anderem

- in einem wachsenden Einfluss von molekularen Kräften (Adhäsion, Diffusion) sowie anderer Oberflächeneigenschaften des Werkstückmaterials (Härte, Korrosionsfestigkeit) [Men05] und
- in einer höheren Bedeutung einer homogenen Gefügestruktur auf das Fertigungsergebnis und die Standfestigkeit der Werkzeuge [Fle05, Klo07].

Die werkstoffinhärenten Eigenschaften bestimmen zusammen mit der Wahl der Schnittgrößen und der Mikrogeometrie des Werkzeugs die auftretenden Zerspankräfte und damit die erreichbare Qualität des Fertigungsergebnisses und die Standzeit des Werkzeugs [Bie08, Bru07b, Jem08, Kot08]. Die relativ hohen spezifischen Zerspankräfte können zu einer Durchbiegung des filigranen Werkzeugs führen, was die Fertigungsgenauigkeit begrenzt [Kuh04] und zu frühzeitigem Verschleiß und Werkzeugbruch führt [Klo07].

Für die Mikrozerspanung von Stahl werden meist miniaturisierte beschichtete Werkzeuge aus Hartmetall eingesetzt. Die geringsten erhältlichen Durchmesser betragen bei Mikrofräsern 20 bis 30 µm bei einem Schneidenradius von 3 – 7 µm [Fle07b]. Die Mikrogeometrie des Werkzeuges setzt sich vor allem aus dem Schneidkantenradius zusammen. Da es keine ideale Schneide gibt, findet die Mikrozerspanung im Bereich des

Schneidkantenradius statt. Um dennoch eine definierte Spanabnahme zu ermöglichen, müssen möglichst scharfe Schneiden erzeugt werden [Hes03]. Diese „scharfen“ Schneiden sind auch wegen der geringen Spannungsdicken erforderlich, da die Unterschreitung einer Mindestspannungsdicke zu so genannten Quetsch- und Pflügevorgängen (Ploughing-Effekt) führt [Alb60]. Dabei treten starke plastische Verformungen anstatt einer sauberen Materialabtrennung auf [Bis08, Kah06, Kot08]. Der Ploughing-Effekt wird durch ein großes Verhältnis von Schneidkantenradius zu Spannungsdicke begünstigt und hat Auswirkungen auf die Werkzeugstandzeit und das Bearbeitungsergebnis.

Diese Aufzählung ist nur ein kleiner Ausschnitt aus den veränderten Verhältnissen bei der Mikrozerspanung. Ausführlichere Informationen zu diesen und weiteren Aspekten bieten unter anderem [Bru07b, Kah06, Klo05b, Kot08, Men05, Schm99, Schm01]. Zusammenfassend erschweren die hohen Genauigkeitsanforderungen an die Mikrobauteile, die auftretenden Größeneffekte und die geänderten Rahmenbedingungen die Aufrechterhaltung der Prozessstabilität in der Mikrozerspanung.

Fazit:

In der Literatur lassen sich Beiträge finden, die sich mit der Thematik beschäftigen, die Prozessstabilität eines bestimmten Mikrofertigungsprozesses zu erhöhen. Allen genannten Ansätzen gemein ist der Versuch, eine spezielle Größe oder oft nur einen Parameter im Fertigungsprozess zu optimieren. Die Wechselwirkungen unterschiedlicher Prozessparameter-Kombinationen zueinander oder zu Umwelteinflüssen wie Werkzeug, Material oder Messsystem können so jedoch nicht identifiziert oder quantifiziert werden. Daher ist die Aufstellung eines funktionalen Modells zwischen Prozess und Qualitätsergebnis bei den meisten Arbeiten nicht gegeben. Zudem fehlen bisher eine Überwachung der Änderungen der Umweltbedingungen und deren Einfluss auf den Mikrofertigungsprozess. Diese Erkenntnisse lassen sich neben den genannten Verfahren auch auf die weiteren Fertigungsverfahren der Mikroproduktionstechnik übertragen.

Ein universeller Ansatz, der es erlaubt eine Variabilitätsreduzierung für ein breites Spektrum an Mikrofertigungsverfahren basierend auf allen signifikanten Prozesseinflussfaktoren und deren Wechselwirkungen herbeizuführen ist somit bisher nicht gegeben.

2.1.2 Mikro-Messtechnik

Im Kapitel 2.1.1 wurde auf die Herausforderungen in der Prozessführung von Mikrofertigungsverfahren eingegangen. Zusammenfassend wird es durch die veränderten Größenverhältnisse erschwert, eine ausreichende Prozesssicherheit zu gewährleisten [Klo07]. Eine Prozessführung und –optimierung basiert im Mikro- wie im Makrobereich auf Messdaten aus dem Fertigungsprozess und/oder den Mess-/Prüfergebnissen der Qualität des hergestellten fertigen Produktes. Zur Anpassung der Prozessbedingungen (Technologie, Werkzeug, Parametereinstellungen etc.) ist es daher erforderlich, Systeme zur Prozessüberwachung und –regelung einzusetzen, um eine bestmögliche Qualität der Erzeugnisse zu erzielen. Durch die Rückführung und zeitnahe Analyse der Messergebnisse können notwendige Anpassungen am Prozess angestoßen werden. Der erste Schritt zur Prozessverbesserung besteht dabei in der Auswahl und der Charakterisierung der relevanten Qualitätsmerkmale.

2.1.2.1 Qualitätsmerkmale im produktionstechnischen Umfeld

Als Grundvoraussetzung für eine effiziente Qualitätssicherung müssen Verfahren zur Verfügung stehen, die eine zuverlässige Messung der qualitätsrelevanten Merkmale garantieren. Zur Beurteilung der Qualitäts- bzw. Funktionsfähigkeit eines Bauteils im System leiten sich in der Produktionstechnik die Messaufgaben aus der technischen Zeichnung ab [Wec99], die über die Angabe von Toleranzen für Abweichungen von der idealen Bauteilgestalt den Zusammenhang zur Funktionsfähigkeit darstellt. Gemäß einer Studie von Weckenmann [Wec99] sind ca. 85 % der Qualitätsmerkmale im Maschinenbau durch die Fein- und Grobgestalt der Bauteile festgelegt (Abbildung 2.6, oben links). Die Feingestalt bezieht sich dabei auf Welligkeit und Rauheit, während die Grobgestalt die Ausprägungen von Maß-, Form- und Lagemerkmalen [DIN 4760], welche hauptsächlich durch Standardformelemente verkörpert sind (Abbildung 2.6, unten), umfasst. Nur ca. 15 % der Qualitätsmerkmale basieren auf Werkstoff- oder Randzoneneigenschaften.

Wesentlicher Informationslieferant der Qualitätssicherung ist also die geometrische Messtechnik. Aufgrund dieser gestellten Messaufgaben sowie den immer kleiner werdenden und mit höheren Toleranzanforderungen versehenen Strukturen wurden die Messsysteme zur Bestimmung geometrischer Größen stetig weiterentwickelt.

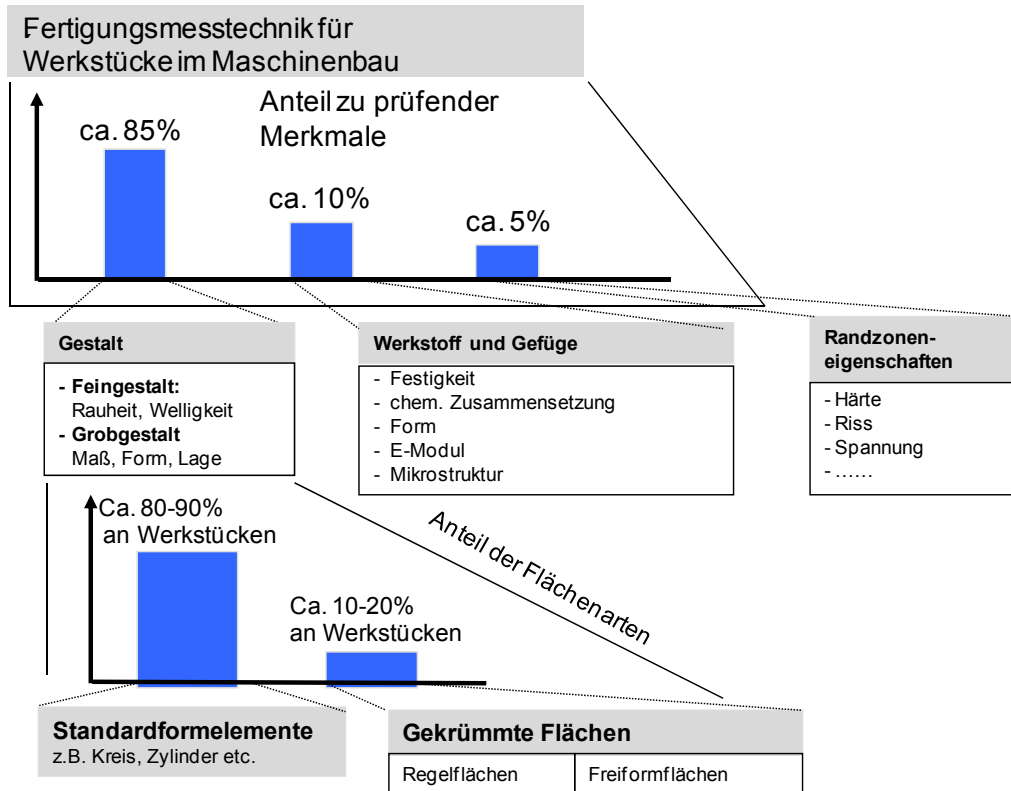


Abbildung 2.6: Qualitätsmerkmale im Maschinenbau [Wec99]

2.1.2.2 Mikromessverfahren zur Bauteilcharakterisierung

Zur Charakterisierung von Qualitätsmerkmalen aus dem Mikrobereich steht ein breites Spektrum an Messverfahren zur Verfügung. Im Folgenden werden die unterschiedlichen Verfahren in Anlehnung an [Buc08 und Schl06] getrennt nach den Kategorien hochauflösende Verfahren, optische Verfahren und taktil/hybride Verfahren auf ihre Verwendbarkeit in der geometrischen Mikromesstechnik untersucht (Abbildung 2.7).

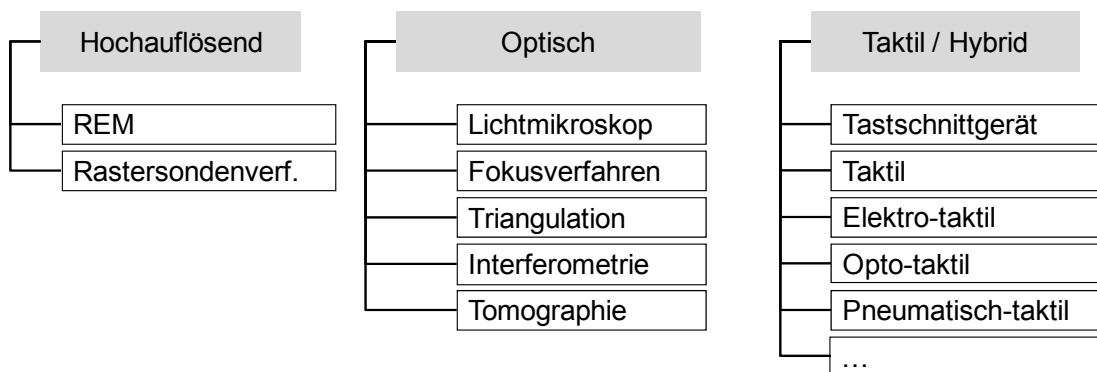


Abbildung 2.7: Strukturierung der Mikromessverfahren nach [Buc08, Schl06]

Hochauflösende Verfahren

Zu den hochauflösenden Verfahren werden zum Einen die Rasterelektronenmikroskopie (REM) und zum Anderen die Rastersondenverfahren gezählt.

Das REM gewährleistet sowohl eine hohe Vergrößerung (bis zu 5×10^5) als auch ein großes Auflösungsvermögen bis zu 2 nm [Han06] für die zu messenden Mikrobauerteile und erlaubt daher die Generierung von detaillierten und hochpräzisen Bildern der Mikrostrukturen. Geometrische Informationen über das Mikrobauerteil können jedoch nur gewonnen werden, indem manuell ein Maßstab in das Bild integriert wird. Zudem wird diese Auswertung durch die REM-typische Verzerrung des Bildes erschwert. Da REM-Messungen nur in einer speziellen Reinraumumgebung stattfinden können und nur leitfähige Werkstoffe verwendet werden können, ist der Messvorgang zeitaufwendig, was eine schnelle fertigungsnahe Regelung der Fertigungsprozesse unmöglich macht. Daher sind REM-Verfahren für die geometrische Messung von Mikrobauerteilen nur schwer zu verwenden.

Rastersondenverfahren, wie die Rasterkraftmikroskopie oder die Rastertunnelmikroskopie, scannen das Messobjekt mit atomarer Auflösung, um Informationen über die Oberflächencharakteristik zu erhalten. Im Gegensatz zum REM sind bei Rastersondenverfahren keine zeitaufwendigen Vorbereitungen und kein Reinraum vorauszusetzen, dennoch sind die Messungen aufgrund der sequentiellen Linienscannung zeitintensiv [Dan06] und es ist darüber hinaus nicht möglich 3D-Messungen für Mikrobauerteile durchzuführen [Buc08].

Optische Verfahren

Auf dem Gebiet der optischen Messtechnik gibt es eine große Vielfalt an unterschiedlichen Sensorprinzipien. Für die Messung mikrostrukturierter Bauteile haben optische Verfahren den Vorteil, dass sie im Vergleich zur taktilen Messung innerhalb kürzester Zeit eine relativ hohe Punktzahl berührungslos aufnehmen können [Schw02]. Bei der Bewertung der verfügbaren optischen Verfahren setzen sich besonders Verfahren wie die konfokale Mikroskopie und die Mikrostreifenprojektion durch [Pfe05]. Die konfokale Mikroskopie stellt die Höheninformation in einem Punktraster dar [Hor02] und eignet sich damit zur Bestimmung von Oberflächenrauheiten und Mikroprofilen [Hes03]. In [Hor02, Kah06, Kot08] wurden zum Beispiel

auch Zerspanwerkzeuge mittels eines konfokalen Weißlichtmikroskops gemessen.

Der alleinige Einsatz optischer Verfahren für die Messung der Grobgestalt von Mikrobautteilen kann jedoch ausgeschlossen werden, da die Messgenauigkeit aufgrund der geforderten Kontrast- und Kantenschärfe abhängig von der optischen Charakteristik der Mikrobautteile [Schw02, Lon02] und somit bereits für die Messung in Makrodimensionen nicht hinreichend geeignet ist. Die Auflösung hoher Aspektverhältnisse wird durch die Tiefenschärfe begrenzt und die Darstellung von Hinterschnitten ist nur bedingt möglich [Weu01]. Außerdem sind optische Verfahren, die auf Triangulation oder Autofokussuche basieren, für die Messung stark reflektierender Oberflächen ungeeignet [Hes03]. Eine hochpräzise, nur durch optische Verfahren geführte Messung ist in vielen Fällen aufgrund von Ecken- und Kantenverrundungen oder hohen Aspektverhältnissen nicht möglich.

Aufgrund dieser Einschränkung der optischen Sensoren in Hinblick auf die Messgenauigkeit bleibt die Untersuchung von Mikrosensoren, die eine taktile Antastung ermöglichen.

Taktile / taktil-hybride Verfahren

Tastschnittgeräte, die v.a. für die Rauheitsmessung eingesetzt werden, scannen die Oberfläche der Bauteile und geben so die entsprechenden Höheninformationen an. Den Vorteilen eines genormten Verfahrens und der Möglichkeit relativ große Messbereiche zu charakterisieren [Han06], stehen die Nachteile einer zeitaufwendigen Messung und dem Risiko der Bauteilbeschädigung durch die wirkenden Antastkräfte entgegen.

Der Vorteil von taktilen Sensoren liegt in deren Fähigkeit zur Messung in drei Dimensionen. Messende Taster ermöglichen über Scanning-Verfahren die schnelle 3 D-Messung von Bauteilen. Der Hauptnachteil von taktilen Sensoren liegt in deren minimalem Kugelantastradius von 200 µm begründet [Buc08], mit welchem die Messung noch kleinerer Geometrien im Mikrometer-Bereich nicht möglich ist. Vor diesem Hintergrund wurden hybride Mikrotasterkonzepte entwickelt, die das Prinzip der taktilen Antastung mit einem anderen physikalischen Wirkprinzip (z.B.: optische, elektrische, pneumatische Messung) vereinigen [Wec04]. Die taktilen bzw.

hybrid-taktilen Verfahren basieren dabei auf dem Prinzip der Koordinatenmesstechnik [Wec99].

Für eine detaillierte Beschreibung der unterschiedlichen taktil/hybriden Sensorkonzepte wird auf [Ber04, Bra01, Bra02, Büt03, DeP05, DeP06a, DeP06b, Hai01, Kle99, Mel03, Mel04, Mit04, Peg99, Por02] verwiesen. Eine sehr gute Zusammenfassung bietet auch [Buc08].

Als Fazit ergibt sich, dass sich für die Charakterisierung der Feingestalt von Mikrostrukturen optische Verfahren wie die konfokale Mikroskopie und die Mikrostreifenprojektion anbieten. Aufgrund der berührenden und somit die Oberfläche beeinflussenden und u.U. zerstörenden Antastung sowie der zeitaufwendigen Charakterisierung von flächenhaften Strukturen scheiden Tastschnittgeräte aus, wenn die schnelle Messung der Mikrostrukturen bzw. die schnelle Regelung der zugrundeliegenden Fertigungsprozesse Ziel ist.

Für die Charakterisierung der Grobgestalt der Mikrostrukturen lässt sich schließen, dass kein Messverfahren alleine den genannten Anforderungen an die Mikromesstechnik genügt. Um die zum Teil komplementären Vorteile der optischen und hybrid-taktilen Verfahren zu nutzen, bietet sich die Integration von mehreren Sensoren in einer Messmaschine an. Die industrielle Praxis [Chr03, DeP06] und die Literatur [Neu05, Han06] empfiehlt aufgrund deren Universalität und Flexibilität den Einsatz multisensorieller Koordinatenmessgeräte. Die Fähigkeit, zahlreiche Messaufgaben in einer Aufspannung ohne Fixierungswechsel und damit einhergehender Genauigkeitsverluste zu bearbeiten, sowie die Verfügbarkeit von speziell für die Messung von Mikrostrukturen entwickelten Maschinenkonzepten und Sensoren sind hierbei die Hauptvorteile der multisensoriellen Koordinatenmessgeräte [Buc08].

Infolgedessen werden im Rahmen der vorliegenden Arbeit ein konfokales Weißlichtmikroskop zur Charakterisierung der Feingestalt und ein multisensorielles Koordinatenmessgerät mit einem opto-taktilen Mikrotaster zur Charakterisierung der Grobgestalt der Mikrobauerteile eingesetzt.

2.1.2.3 Herausforderungen der Mikromesstechnik

Neben den in Kapitel 2.1.2.2 genannten Anforderungen an die Messtechnik sind weitere mikrospezifische Besonderheiten der zu messenden Bauteile zu nennen. Die Herausforderungen bei der Messung von Mikrobauerteilen können dabei in drei Gruppen unterteilt werden [Fle07d] (Abbildung 2.8):

1. das Messobjekt selbst,
2. Effekte, welche die Messung von Mikrobauteilen erschweren und
3. diffizile Randbedingungen, die sich über die Messauswertung im Mikrobereich ergeben.

Aufgrund der kleinen Strukturen und der damit verbundenen geringen Messbasen lassen sich beispielsweise mit taktilen Sensoren, bedingt durch die Größe ihres Tastelements, kleinste Bohrungen oder Kanäle nur schwer antasten. Zudem sind gerade bei zu prüfenden Toleranzen im Mikro- und Submikrometerbereich die fertigungsabhängigen Gestalt- und Formabweichungen bei der Messstrategieplanung einzubeziehen. Kantenverrundungen, Konizitäten oder leichte Variationen der Bauteiloberfläche in Farbe oder Reflexionseigenschaft sind gerade bei optischen Sensoren sehr kritisch. Zudem ist das Oberflächen-/Volumenverhältnis (O/V) von Mikro- zu Makrobauteilen deutlich größer, und beeinflusst stark die geometrische Steifigkeit.

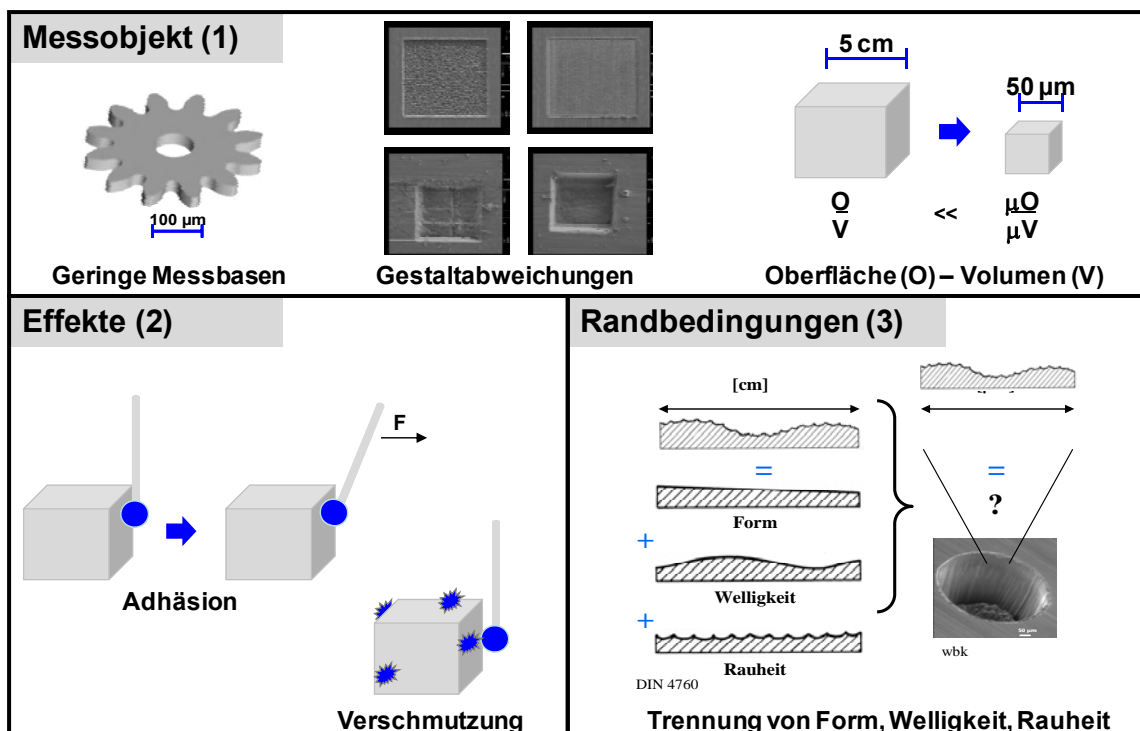


Abbildung 2.8: Herausforderungen für Mikro-KMG-Messungen [Fle07d]

Um Messabweichungen zu verhindern, sind desweiteren Adhäsions- und Verunreinigungseffekte zu berücksichtigen. Verunreinigungen an

Messobjekt oder Sensor wirken sich bei Mikroteilen deutlicher auf das Messergebnis aus als in Makrodimensionen.

Des Weiteren „verschmelzen“ bei der Charakterisierung von Strukturen mit Abmessungen bis zu 1 µm die Grenzen von Form, Welligkeit und Rauheit. Speziell zur Rauheitscharakterisierung sind die von der [DIN EN ISO 4288] geforderten Messstrecken auf Mikrobautteilen meist nicht verkörpert. Eine Norm zur Trennung von Form, Welligkeit und Rauheit an Mikroteilen ist bisher nicht gegeben.

Erschwerend hinzu kommen noch die hohen Toleranzanforderungen im (Sub-) Mikrometerbereich für die herzustellenden Mikrostrukturen. Greift man die goldene Regel der Messtechnik [Ber68] auf,

$$\text{Messunsicherheit} < 0,1 * \text{Toleranz}$$

$$\text{Auflösung} < 0,1 * \text{Messunsicherheit}$$

so müssten die Messunsicherheiten der eingesetzten Messsysteme für die Charakterisierung der Mikrostrukturen im Nanometer(nm)-Bereich oder darunter liegen. Hornfleck [Hor05] zeigt die hohen Anforderungen an Fertigungs- und Messprozess exemplarisch an der Messung von zwei Nennmaßen 0,5 mm und 3 mm, falls die Grundtoleranzgrade IT1, IT9 und IT13 [ISO 286] zugrunde liegen (Tabelle 2.1).

Nennmaß in mm		Grundtoleranzgrad				
		IT1	...	IT9	...	IT13
über	bis	Grundtoleranzen in µm				
---	3	0,8		25		140

Tabelle 2.1: Auszug aus ISO 286 Grundtoleranzen IT für Nennmaße

Entsprechend diesem Beispiel liegen die Toleranzen zwischen dem 0,0003 fachen und dem 0,28 fachen des Nennmaßes (Tabelle 2.2). Leitet man in Analogie zu diesem Rechenbeispiel die Bauteiltoleranz für eine gefertigte Mikrostruktur mit minimalen lateralen Abmessungen von 2 µm bis maximal 10 µm ab, so müsste die geforderte Toleranz des Bauteils zwischen 0,6 nm und 2,8 µm liegen. In Anlehnung an die "Goldene Regel der Messtechnik" würde dann eine Messunsicherheit von kleiner gleich 0,06 nm gefordert werden. Solche Genauigkeiten sind auch mit den im Kapitel 2.1.2.2 genannten Messverfahren nicht möglich.

Nennmaß in mm	Grundtoleranzgrad				
	IT1	...	IT9	...	IT13
	Toleranz / Nennmaß				
0,5	0,0016		0,05		0,28
3	0,0003		0,008		0,047

Tabelle 2.2: Verhältnisse der Toleranz zum Nennmaß in Abhängigkeit der Grundtoleranz

Zusammenfassend lässt sich schließen, dass die Qualitätssicherung von Mikrostrukturen vor der Herausforderung steht, mit noch nicht hinreichend ausgereifter Messtechnik Aussagen über die Funktionstüchtigkeit der Mikrobauteile zu treffen und Informationen für die Regelung der zugrunde liegenden Fertigungsprozesse bereitzustellen. Gerade für die Fertigungsregelung, welche auf Messdaten beruht, bedeutet dies, dass im Mikrobereich der Messprozess und dessen Genauigkeit ständig überwacht werden muss.

2.1.2.4 Messunsicherheit und Messstreuung

Die Messunsicherheit (MU) ist das international einheitlich definierte und normativ geforderte Gütemaß einer Messung [GUM95, ISO 14253-1]. Das Ergebnis einer Messung ist grundsätzlich ohne Angabe der MU wertlos [Dut05]. Die MU ist definiert als ein „dem Messergebnis zugeordneter Parameter, der die Streuung der Werte kennzeichnet, die vernünftigerweise der Messgröße zugeordnet werden könnte“ [GUM95]. Die MU setzt sich aus systematischen und zufälligen Messabweichungen zusammen, die zum Beispiel durch das Gerät, die Umgebung, den Bediener oder die Messstrategie verursacht werden.

Zur Charakterisierung der Feingestalt und somit der Oberflächenrauheit von Mikrobauteilen bieten sich optische Verfahren wie die konfokale Mikroskopie an. Da die Oberflächenkennwerte (R_a -, R_t -, R_z -Wert) ursprünglich nur für die Verwendung eines Tastschnittgerätes konzipiert waren, gibt es zur Bestimmung der MU entsprechende Normen [DIN EN ISO 12179]. Aufgrund ihrer breiten Anwendung und industriellen Akzeptanz wurden die genannten Oberflächenkennwerte auch in die optische Messtechnik übertragen. Richtlinien zur MU-Bestimmung optischer Sensoren zur Charakterisierung der Oberflächenrauheit werden derzeit

erarbeitet [VDI/VDE2643 1 3; VDI/VDE 2655] und bauen auf den Normen für Tastschnittgeräte auf. Dabei wird ein Normal mehrmals an unterschiedlichen Stellen gemessen. Die Bestandteile des MU-Budgets sind hierbei die Kalibrierunsicherheit des Referenzobjekts u_C , die Unsicherheit des Messgerätes s_E und die Unsicherheit aus dem Messprozess s_{MP} . Die Komponenten s_E und s_{MP} werden dabei durch die Wiederholmessungen quantifiziert und anschließend über eine Varianzanalyse ermittelt. Die kombinierte Standardunsicherheit ergibt sich dabei zu:

$$U = \sqrt{u_C^2 + s_E^2 + s_{MP}^2} \quad (2-1)$$

Zur Charakterisierung der Grobgestalt von Mikrobauanteilen bieten sich wie in Kapitel 2.1.2.2 aufgezeigt Multisensor-Koordinatenmessgeräte (KMG) an. In der Koordinatenmesstechnik (KMT) ist die MU eine messaufgabenspezifische Kenngröße, da aufgrund der universellen Einsetzbarkeit von KMG jede Messung durch andere Ausprägungen von MU-Einflüssen beeinflusst wird. Zur Bestimmung dieser aufgabenspezifischen MU in der KMT gibt es verschiedene Vorgehensweisen [Wil01]. Die entsprechenden Standards sind im Rahmen der [DIN 32881/ISO 15530] zu finden. Es gibt die Sensitivitätsanalyse nach [GUM95], simulative Ansätze [Bal99, Phi97, Wäl02], die MU-Abschätzung basierend auf der Messhistorie [Wil01], die Möglichkeit, die MU ausgehend von Expertenwissen abzuschätzen und hybride Konzepte, welche die verschiedenen Ansätze kombinieren [Wil01]. Darüber hinaus wurde ein experimenteller Ansatz vorgeschlagen [DIN 32881-3], bei dem basierend auf wiederholten Messungen an werkstückähnlichen, kalibrierten Objekten unter Berücksichtigung der Ähnlichkeitsabweichungen die MU abgeschätzt wird.

Da die Vorgehensweisen aufbauend auf der Messhistorie und dem alleinigen Rückgriff auf Expertenwissen das Risiko einer subjektiven oder unausgewogenen, nicht repräsentativen Daten- oder Erfahrungsgrundlage bergen und simulative Ansätze für eine flexible und praxisnahe Anwendung zu komplex sind, bietet v.a. der Ansatz zur experimentellen MU-Ermittlung [DIN-32881-3] eine flexible und industriennahe Möglichkeit das MU-Budget abzuschätzen.

Abbildung 2.9 veranschaulicht die Vorgehensweise zur Abschätzung der experimentellen MU anhand der drei Unsicherheitskomponenten u_C , u_P und

u_w , wobei u_c für die Standardunsicherheit aus der Kalibrierung steht, u_p die Standardunsicherheit aus dem Messprozess symbolisiert und mit u_w die bedingt durch die Streuung der Produktionsprozesse variierenden bauteilabhängigen Einflussgrößen berücksichtigt werden (2-2). Über E wird die systematische Abweichung zwischen dem Absolutwert der Kalibrierung des Referenzobjekts und dem Mittelwert aus den Wiederholmessungen quantifiziert.

$$U = K \cdot \sqrt{u_c^2 + u_p^2 + u_w^2} + E \quad (2-2)$$

Die Variable K ist dabei als Erweiterungsfaktor zu verstehen und wird meistens als $K=2$ gewählt. Die Wahl von $K>1$ bedeutet für die Mikrowelt aber gerade, dass die hierdurch quantifizierte MU oft größer als das geforderte Toleranzband ist. Schätzt man mit einem Faktor $K=2$ im Falle des verwendeten Multisensor-KMG Werth Videocheck HA®, so ist eine $MU>1 \mu\text{m}$ für Mikromessaufgaben keine Sonderheit.

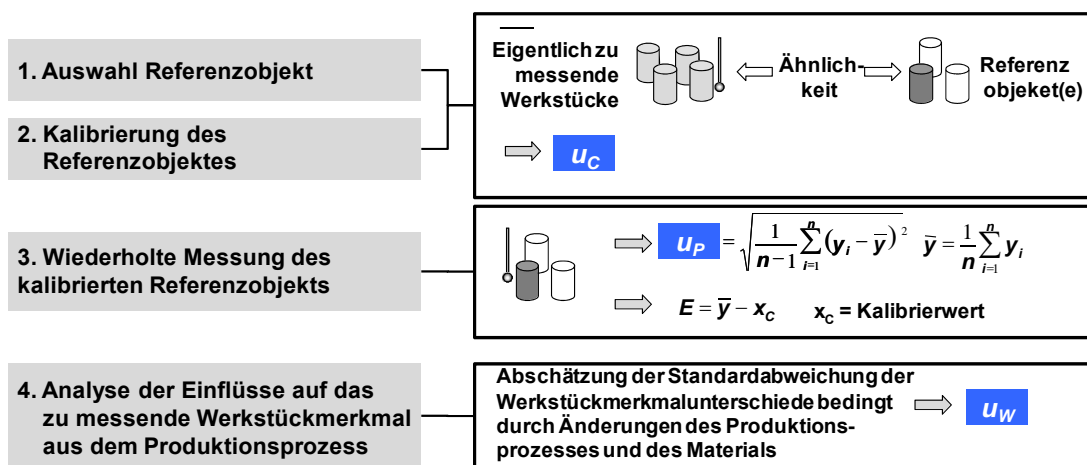


Abbildung 2.9: Vorgehen zur Bestimmung der Unsicherheitsfaktoren bei der experimentellen MU-Abschätzung

Es gibt zahlreiche Einflüsse und Randbedingungen, die auf die Messung einwirken und somit als Komponenten für das MU-Budget auftreten [The08]. Bei der Messung mit einem Weißlichtmikroskop können Unsicherheitskomponenten herrührend aus der Wechselwirkung „Gerät-Messobjekt“, den Umweltbedingungen wie Temperatur oder Verschmutzung des Messobjektes oder des Sensors und den Einflüssen stammend aus den Mess- und Auswertverfahren unterschieden werden [VDI 2655]. Tabelle 2.3 zeigt einen Überblick über mögliche Unsicherheitsquellen.

Unsicherheit aus der Wechselwirkung zwischen Gerät und Messobjekt	Unsicherheit resultierend aus Mess- und Auswerteverfahren
Wellenlänge des Lichts	Topografie der Probe
Lokale Phaseninhomogenität in der Oberfläche	Globale Phaseninhomogenität in der Oberfläche
Linearität der Kamera in Bezug auf Lichtintensität	Breiten- und Tiefenabhängigkeit der Ebenheitsabweichung durch Defokussierung
Digitalisierung der Intensität des Interferogramms	Ausrichtung des Profils bei der Auswertung

Tabelle 2.3: Unsicherheitsquellen für die Messung mit einem Weißlichtmikroskop [VDI 2655]

Auffallend ist hierbei, dass der Großteil der Einflüsse von der Beschaffenheit des Messobjektes und den Umweltbedingungen abhängen. In einer kontinuierlichen Fertigung unterscheiden sich die gefertigten Bauteile in kleinsten Details in Form, Reflexionseigenschaften etc. Im besten Fall müsste die detaillierte Angabe der MU also für jedes Bauteil separat erfolgen. Variationen im MU-Budget rühren aus den Komponenten s_E und s_{MP} (optische Oberflächencharakterisierung) bzw. aus u_P und u_W (KMG-Messung). Alle diese Komponenten werden zu einem Teil aus Wiederholmessungen gewonnen. In der kontinuierlichen Durchführung von Wiederholmessungen besteht also ein flexibles, praxisnahes und einfach durchzuführendes Instrument, um einen Teil des MU-Budgets über die Zeit zu quantifizieren und somit Störungen im Messprozess aufzudecken [Fle08a, Lan08a].

Fazit:

Zusammenfassend lässt sich schließen, dass es zahlreiche Einflüsse und zu beachtende mikrospezifische Randbedingungen gibt, die auf die Messung und die Komponenten des Messunsicherheit-Budgets einwirken. Ein sich änderndes MU-Budget aufgrund der Variationen des Messobjekts und äußerer Einflüsse (Temperaturwechsel, Verunreinigungen auf dem Bauteil etc.) kann zu einem großen Teil durch Wiederholmessungen am gleichen Messobjekt quantifiziert werden. Vor dem Hintergrund der hohen Genauigkeitsanforderungen im Mikrobereich bedeutet dies, dass gerade die durch Wiederholmessungen quantifizierte Streuung des Messprozesses ständig überwacht werden sollte.

2.2 Fertigungsnahe Qualitätssicherung

Wie in Kapitel 2.1.1 aufgezeigt sind robuste und stabile Mikrofertigungsprozesse aufgrund der Größeneffekte und der Vielzahl an Prozesseinflüssen bisher nicht gegeben. In der Summe erzeugen diese veränderten Bedingungen eine erhebliche Variabilität der Qualitätsergebnisse eines Mikroprozesses. Um dem entgegen zu wirken, müssen die Prozesskomponenten wie Werkzeuge oder Maschinen und die entsprechenden Parameter angepasst werden [Kah06, Klo05a, Scho05]. Kapitel 2.2.1 zeigt daher bisherige Qualitätssicherungsansätze aus dem Stand der Forschung und Technik auf, die zum Ziel haben, die Prozessvariabilität eines Fertigungsprozesses zu verringern und die Prozesssicherheit zu erhöhen.

Eine Verringerung der Prozessvariabilität und damit eine Regelung der Fertigungsprozesse setzen fehlerfrei erhobene Messdaten voraus. Im Mikrobereich liegen die Toleranzanforderungen im Größenbereich der Messunsicherheit bzw. die Fertigungstreuung im Größenbereich der Streuung des Messprozesses. Daher wird in Kapitel 2.2.2 der Stand der Forschung und Technik der fertigungsnahe Qualitätssicherung unter Einfluss von Messfehlern untersucht.

2.2.1 Regelungstechnik und statistische Prozessregelung

2.2.1.1 Begriffsklärung

Bereits in den 1920er Jahren wurden statistische Methoden zur Qualitätsregelung in der Fertigung eingesetzt [Dut64, Mas07]. Seitdem haben sie sich zu dem wichtigsten Werkzeug im Rahmen der fertigungsnahe Qualitätssicherung entwickelt [Die05].

Die Gründe hierfür sind vielfältig. Statistische Methoden bieten die Möglichkeit, aus einer geringen Prüfmenge (= Stichproben) Aussagen über die Eigenschaften der Grundgesamtheit und die Verlässlichkeit dieser Aussagen zu treffen [Dut64]. Dieses erspart Kosten und Zeit vor allem, wenn die Prüfung aufwendig oder gar zerstörend ist. Zudem ist das Phänomen der Variabilität oder Streuung ausschließlich statistisch beschreibbar. Nimmt man eine Stichprobe vom Output eines Fertigungsprozesses und untersucht ein beliebiges Qualitätsmerkmal jedes einzelnen Elements der Stichprobe auf die Einhaltung einer bestimmten Spezifikation, dann ist festzustellen, dass sich alle gemessenen Werte unterscheiden und über einen Bereich verteilt

sind. Diese Schwankungen der Produktqualität bzw. des Prozessergebnisses sind bei allen Prozessen zu beobachten und werden als Variabilität bezeichnet [Mon91].

Um eine konkrete Aussage über das Maß und die Größe der Variabilität eines Prozesses treffen zu können, werden geeignete Kenngrößen benötigt. Die Statistik liefert solche Kenngrößen in Form der Varianz, der Standardabweichung, der Spannweite, dem Interquartilsabstand, der mittleren absoluten Abweichung etc. [Mon91]. Da die Variabilität nur statistisch beschreibbar ist, bieten sich auch statistische Methoden und Werkzeuge an, um die Variabilität zu senken und damit einhergehend die Prozesse stabiler zu machen bzw. die Produktqualität zu erhöhen [Mon91]. Um diese Variabilität zu reduzieren, unterscheidet man in der fertigungsnahen Prozessregelung zwischen maschineninternen und maschinennahen Regelkreisen [Pfe01] (Abbildung 2.10).

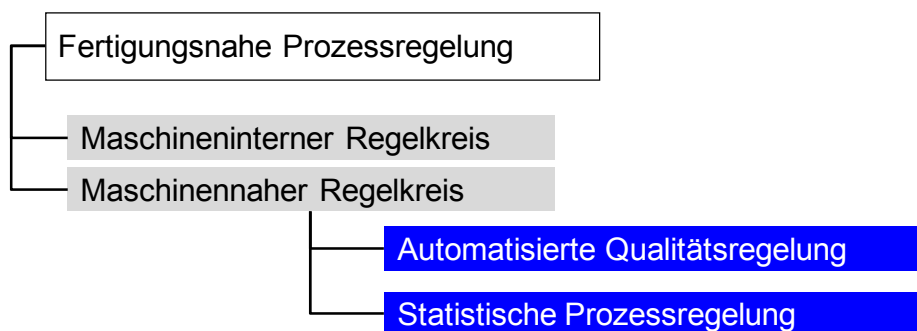


Abbildung 2.10: Ansätze zur fertigungsnahen Qualitätssicherung [Pfe01]

Bei den maschineninternen Regelkreisen erfolgt die Erfassung der benötigten Information direkt an der Maschine und die Qualitätsregelung wirkt sich direkt auf das gefertigte Produkt aus. Ein solcher maschineninterner Regelkreis muss jedoch jeweils speziell auf die vorhandene Fertigungsmaschine abgestimmt sein und kann nicht universell eingesetzt werden bzw. ist meistens nur für die Kompensation einer Einflusskomponente konzipiert.

Maschinennahe Regelkreise können dagegen zur Überwachung mehrerer Einflussgrößen verwendet werden. Hierbei wird die Zielgröße erst nach dem Abschluss des Prozesses erfasst und analysiert. Die Analyse garantiert dabei die kontinuierliche Verbesserung zukünftiger Erzeugnisse. Die maschinennahe Regelung kann in die zwei Klassen *automatisierte Qualitätsregelung* und *statistische Prozessregelung* eingeteilt werden [Pfe01].

Automatisierte Qualitätsregelung / Regelungstechnik

Mit einer automatisierten Regeleinrichtung (engl. automatic process control, APC) wird das Ziel verfolgt, eine oder mehrere interessierende Ausgangsgrößen gegebenen Sollwerten nachzuführen. Die Nachführung sollte zügig und ohne bleibende Abweichungen erfolgen. Der zu regelnde Prozess wird dabei als Regelstrecke bezeichnet und unterliegt unvorhersehbaren Einflüssen, den s.g. Störgrößen. Die Beeinflussung zur Beseitigung der Abweichung (Regeldifferenz) erfolgt über die Stellgröße. Dadurch entsteht die in Abbildung 2.11 als Blockschaltbild dargestellte geschlossene Regelkreisstruktur.

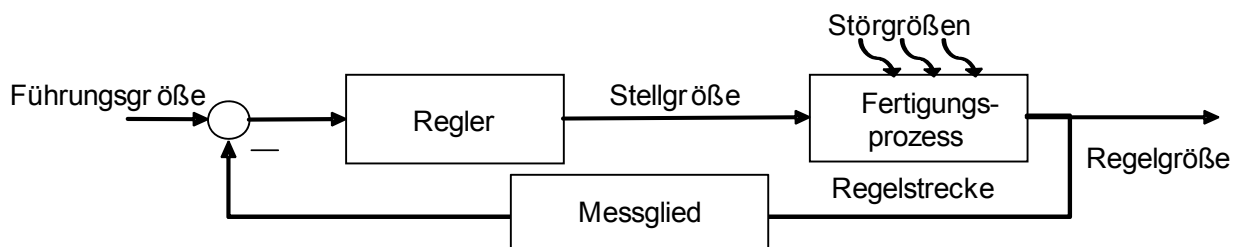


Abbildung 2.11: Klassische Regelkreisstruktur für die automatisierte Qualitätsregelung

Das wesentliche Merkmal einer Regelung ist daher der Rückkopplungszweig, über den Mess- und Stellort verbunden werden [Reu04]. Die Leistungsfähigkeit der automatisierten Qualitätsregelung hängt also in großem Maße von der Güte der Modellierung der Regelstrecke und von der Kenntnis der Störgrößen ab. Eine Überwachung von Prozesseinflüssen, die über das Reglermodell hinausgehen, kann über die APC nicht erfolgen.

Statistische Prozessregelung

Die statistische Prozessregelung (SPC) wird in der Praxis häufig als Synonym für kontinuierliche Prozessüberwachung verstanden. Dazu wird die Prozessleistung mittels einer fortlaufenden Analyse von Messwerten des interessierenden Merkmals überwacht. Ziel ist es, natürliche von speziellen Prozesszuständen zu trennen [Pfe01]. Die (Qualitäts-)Regelkarten (QRK) sind das wichtigste Werkzeug der SPC für die Prozessüberwachung. Über eine QRK kann der zeitliche Verlauf einer Prüfgröße aufgezeichnet und analysiert werden [Bla89]. Dazu wird die Prüfgröße oder eine aus ihr berechnete Kennzahl, zum Beispiel der Mittelwert einer Stichprobe, über der aufsteigenden Probennummer aufgetragen (Abbildung 2.12). Grundsätzlich

gilt hierbei, dass ein Punkt außerhalb der festgelegten Eingriffsgrenzen (EG) der QRK ein Indikator für eine vorliegende Prozessstörung ist. Die EG einer QRK werden aus den frei wählbaren Quantilen (meistens 1 % und 99 %) der dem zu überwachenden Qualitätsmerkmal zugrunde liegenden Verteilung bestimmt (Abbildung 2.12 links). Diese statistischen Verteilungen von geometrischen Mikroqualitätsmerkmalen wurden bisher noch nicht bestimmt und müssen für eine Anwendung in der Mikroproduktionstechnik analysiert werden [Lan08a].

Die SPC bzw. die QRK erlaubt somit die Überwachung der Auswirkungen praktisch aller Einflüsse auf das abgetragene Qualitätsmerkmal des Fertigungsprozesses. Die SPC macht jedoch weder Aussagen über die Ursache einer Prozessstörung, noch versucht sie aktiv und somit kurzfristig die Prozessvariabilität zu senken.

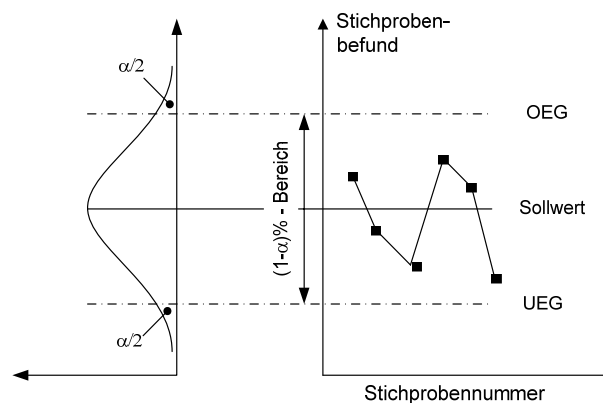


Abbildung 2.12: Aufbau einer Qualitätsregelkarte nach [Dut64]

Fazit:

Im Hinblick auf eine Anwendbarkeit in der Mikrofertigung sprechen der große Aufwand für die Handhabung und Positionierung der Werkstücke zur Messung für eine Stichprobenprüfung. Im Hinblick auf die erschwerten Bedingungen der Messtechnik ist es außerdem wünschenswert, die statistische Aussagekraft der Prüfergebnisse zu kennen [Kle03]. Des Weiteren muss eine Bestimmung der statistischen Verteilungen von geometrischen Mikroqualitätsmerkmalen noch erfolgen.

Für eine Anwendung der automatisierten Qualitätsregelung spricht deren Fähigkeit, eine oder mehrere interessierende Ausgangsgrößen gegebenen Sollwerten nachzuführen und damit auch kurzfristig die Prozessvariabilität zu senken.

2.2.1.2 Anforderungen an eine fertigungsnahe statistische Prozessregelung für Mikrofertigungsprozesse

Die Mikrofertigung unterliegt aufgrund der Größeneffekte zahlreichen Einflüssen, die in Anbetracht der engen Toleranzen zu einer insgesamt höheren Variabilität der Prozesse führen. Ziel ist es, die Verringerung dieser Variabilität zu erreichen. Es ergibt sich folgende Ausgangssituation:

1. Die Fertigung unterliegt signifikanten, aber bekannten Störungen wie z.B. dem Werkzeugverschleiß. Der Einfluss dieser Störung ist systematisch.
2. Es wird angenommen, dass die systematischen Störungen messbar sind.
3. Mikroprozesse unterliegen einer Vielzahl weiterer z.T. unbekannter oder nicht quantifizierbarer Einflussfaktoren.
4. Die Streuungen von Fertigungs- und Messprozess liegen in der gleichen Größenordnung und sind über die Zeit variabel.

Aus diesen Rahmenbedingungen lassen sich mehrere Anforderungen an einen fertigungsnahen Qualitätsregelkreis für Mikrofertigungsprozesse ableiten (Tabelle 2.4).

Die Prozessregelung muss die bekannten systematischen Störungen identifizieren und letzteren schnell entgegenwirken, um Ausschuss zu vermeiden. Um auch unbekannte oder nicht quantifizierbare Störgrößen zu detektieren, sollte der Regler darüberhinaus die Integration einer Überwachungsfunktion ermöglichen. Diese Überwachungsfunktion muss wie in Kapitel 2.1.2 aufgezeigt, besonders die Überwachung des Messprozesses gewährleisten. Um eindeutige Aussagen, über die Ursache von Störungen treffen zu können, muss eine Trennung der Streuung von Fertigungs- und Messprozess erfolgen.

Die Implementierung und Anwendung des Reglers und der Überwachungsfunktion sollte möglichst wenig Vor- und Expertenwissen voraussetzen. Zudem muss der Aufwand für den Anwender bei einer Regelung oder Überwachung auf die geänderten Rahmenbedingungen zu reagieren, möglichst gering gehalten werden. Mikromechanische Produkte sind meistens das Ergebnis mehrerer hybrider Mikrofertigungsprozesse. Um nicht für jedes einzelne Fertigungsverfahren einen speziellen Regler bzw. eine spezielle Überwachungseinheit konzipieren zu müssen, sollte die Mikro-Prozessregelung universell anwendbar sein.

In den folgenden Kapiteln werden bestehende Lösungen und Forschungsarbeiten analysiert, die sich mit der **Regelung** und **Überwachung** von Fertigungsprozessen befassen. Um einen schlüssigen Vergleich ziehen zu können, werden die Ansätze anhand des Kriterienkatalogs aus Tabelle 2.4 anhand der Kategorien „++“ (sehr gut erfüllt) über „o“ (erfüllt) bis hin zu „--“ (unzureichend erfüllt) bewertet.

Regelungsfunktion	
Regelaufgabe	Ausregeln von systematischen Störungen
	Schnelligkeit
	Integration einer Überwachungsfunktion möglich
Einrichtung / Flexibilität	Geringes Vor- und Expertenwissen
	Geringer Aufwand für Einstellung und Anpassung an veränderte Rahmenbedingungen
	Universelle Anwendbarkeit auf ein breites Spektrum an Mikrofertigungsverfahren
Überwachungsfunktion	
Überwachungsaufgabe	Identifikation von Prozessstörungen
	Übertragbarkeit der Überwachung auf ein breites Spektrum an Mikrofertigungsverfahren
	Automatisierbarkeit der Auswertung
	Überwachung des Messprozesses
	Trennung der Streuung von Fertigungs- und Messprozess
Einrichtung / Flexibilität	Geringes Vor- und Expertenwissen vorausgesetzt
	Geringer Aufwand für Anpassung an veränderte Rahmenbedingungen
	Geringer Aufwand für Sensorik

Tabelle 2.4: Bewertungskatalog für den Mikroregelkreis

Die Kapitel 2.2.1.3 bis 2.2.1.6 befassen sich vornehmlich mit der Reglerfunktion und die Kapitel 2.2.1.7 sowie 2.2.1.8 behandeln die Überwachungsfunktion eines mikrogerechten maschinennahen Qualitätsregelkreises.

2.2.1.3 Lineare Regelung

Der allgemeine lineare Reglerentwurf erzielt in den meisten Fällen hervorragende Lösungen, wenn eine gewisse Robustheit gegen Modellunsicherheiten vorgesehen wird. Automatisierte Regeleinrichtungen sind dann einzusetzen, wenn eine interessierende Ausgangsgröße auf einen gegebenen Sollwert überführt oder gehalten werden soll. Daher scheint ein automatisierter Regler für die Erfüllung der ersten beiden Teilaufgaben aus Tabelle 2.4 eine geeignete Lösung zu sein.

Allerdings ist ein charakteristisches Merkmal der klassischen Regelung, dass sie erst bei einer eingetretenen Abweichung eingreift. Je nach vorhandener Totzeit der Regelung ist damit nicht gewährleistet, dass für jedes Werkstück die optimalen Fertigungsparameter ermittelt werden. Möglicher produzierter Ausschuss ist die Folge.

Eine automatisierte Regelung ist zudem nur bedingt in der Lage, signifikante Prozessveränderungen zu kompensieren bzw. zu erkennen. Da die Regelung aber im Allgemeinen digital ausgeführt wird, können die verwendeten Signale einer externen Überwachung zugeführt werden.

Auch in Bezug auf die Einrichtung und die flexible Anpassung der Regelung an veränderte Rahmenbedingungen empfiehlt sich der lineare Entwurf nur eingeschränkt. Eine Voraussetzung für den Einsatz einer linearen Regelung ist, dass das Systemverhalten linear oder linearisierbar ist. Je höher die Anforderungen an die Regelgüte sind, desto aufwendiger kann sich der Modellbildungsprozess gestalten [Dit04].

Eine Überwachung ist in linearen Reglern dagegen nicht integriert. Abbildung 2.13 zeigt eine Zusammenfassung der Stärken und Schwächen der linearen Regelung gemäß den Kriterien aus Tabelle 2.4.

Regelaufgabe	Einrichtung / Flexibilität					Überwachung						
Ausregeln von systematischen Störungen	Überwachung kann ergänzt werden	Geringes Vor- und Expertenwissen integriert (i) /	Aufwand für Einstellung und Validierung	Universelle Anwendbarkeit	Aufwand für Sensorik	Sicheres Detektieren von Prozessstörungen	Allgemeine Auswertestrategie	Überwachbare Auswertung	Trennung des Messprozess vom Fertigungsprozess			
Lineare Regelung	++	++	e	o	o	o	o	-	-	-	-	-

Abbildung 2.13: Bewertung der linearen Regelung

2.2.1.4 Prädiktive Regelung

Bei den prädiktiven Regelungsansätzen wird mit Hilfe des internen Prozessmodells der zukünftige Verlauf der Regelgröße vorhergesagt. Aufbauend auf der Vorhersage werden entsprechende Maßnahmen eingeleitet, um eine (mögliche) Abweichung gar nicht erst entstehen zu lassen (Abbildung 2.14). Prädiktive Regelungsansätze finden häufig in Form von MPC (Model Predictive Control)-Reglern in der Verfahrenstechnik Anwendung, in welcher für die Ermittlung wesentlicher Qualitätskenngrößen noch keine passende Sensorik vorhanden und eine In-line- oder Labormessung zu langsam für eine sinnvolle Regelungsführung ist [Dit04].

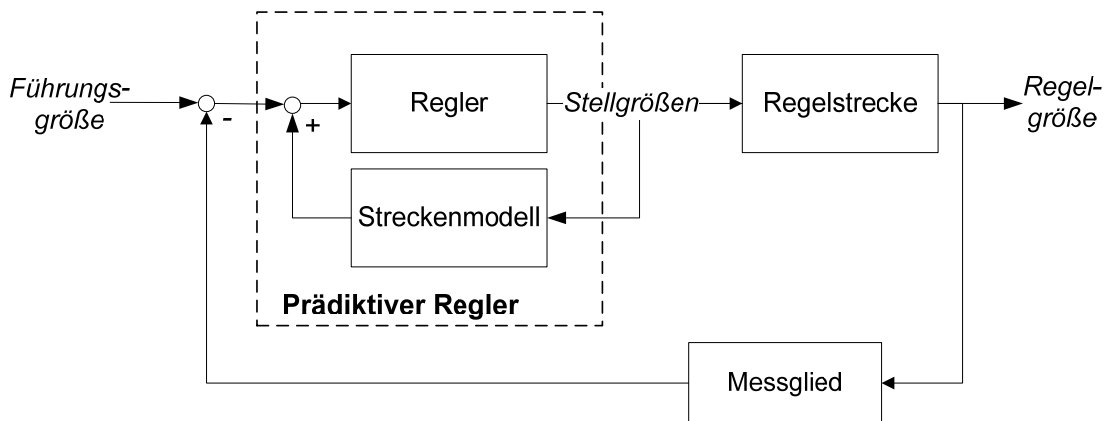


Abbildung 2.14 : Struktur einer prädiktiven Regelung nach [Lun06]

[Zha07a] beschreibt eine zweistufige prädiktive Rauheitsregelung für Fräsprozesse. Im ersten Schritt wird die Oberflächenrauheit für das nächste zu fertigende Werkstück prognostiziert. Dabei werden Werte der aktuellen Prozessgrößen berücksichtigt. Die prädiktive Regelung der Oberflächenqualität durch das Konzept von Zhang erzielte in der Validierungsphase in allen Versuchen einen Erfolg. Dadurch ist eine prädiktive Regelung im laufenden Prozess möglich. Sowohl die Berechnung des Prognosewerts als auch der Stellgröße erfolgen anhand expliziter Modelle. Sofern eine hinreichend schnelle Erfassung der Regelgrößen gewährleistet ist, ist die Regelung ausreichend schnell, um im laufenden Prozess eingesetzt zu werden.

Eine Überwachung ist in Zhangs Ansatz nicht integriert. Das bedeutet, dass die aktuellen Istwerte der Regelgröße im laufenden Prozess nicht an die Regelung zurückgeführt werden. Es werden lediglich die aktuellen

Schnittkräfte berücksichtigt. Somit wird nicht überwacht, ob die Funktionalität der Regelung nach wie vor erfüllt ist und die Anpassungen der Stellgröße den gewünschten Effekt erzielen.

Die verwendeten Modelle sind durch eine multiple Regression auf Basis empirischer Daten ermittelt worden. Die Modelle bilden auch die einzigen prozessspezifischen Aspekte der vorgestellten Reglerstruktur. Der größte Aufwand bei veränderten Rahmenbedingungen entsteht also durch das Erstellen neuer Modelle. Eine grundsätzliche Überarbeitung der Reglerstruktur für die Anwendung auf einen anderen Fertigungsprozess ist nicht notwendig. Abbildung 2.15 fasst die Evaluierung des prädiktiven Regelungsansatzes zusammen.

Regelaufgabe	Einrichtung / Flexibilität					Überwachung							
Ausregeln von systematischen Störungen	Überwachung kann ergänzt werden	Geringes Expertenwissen integriert (!) /	Aufwand für Vor- und Validierung	Universelle Einstellung	Aufwand für Sensorik	Sicheres Detektieren von Prozessstörungen	Allgemeine Auswertestrategie	Automatisierbare Auswertung	Überwachung vom Messprozess	Trennung des Fertigungs-			
Prädiktiver Regler [Zha07a]	++	++	e	++	++	+	o	-	-	-	-	-	

Abbildung 2.15: Bewertung der prädiktiven Regelung

2.2.1.5 Fuzzy Regler

Bei Fuzzy Reglern werden die vorliegenden Signalzustände in einen symbolischen Wert überführt, wobei sich die entsprechenden Kategorien in einem Intervall überlappen (Fuzzifizierung) [Reu04]. Anders ausgedrückt besteht statt einem „scharfen Grenzwert“ ein Unschärfebereich (engl.: fuzzy – unscharf) zwischen den Zuständen. Die Fuzzifizierung ist in Abbildung 2.16 dargestellt. Über die Zugehörigkeitsfunktion $\mu(x)$ erfolgt die Zuordnung zu den unterschiedlichen Klassen 1 bis 3, wobei der Übergang zwischen den Klassen fließend ist. Beispielsweise könnte durch die Fuzzifizierung die Einstufung des Ergebnisses einer Druckmessung in die Klassen „niedrig“, „mittel“ und „hoch“ erfolgen.

Das große Potential der Fuzzy Systeme liegt in der Fähigkeit, komplexe Informationen, die gegebenenfalls nur zu einem gewissen Grad wahr oder falsch sind, zu Entscheidungen zu verarbeiten [Unb07]. Sie eignen sich daher für die Regelung von Prozessen,

- deren Modell für die Echtzeitregelung stark vereinfacht werden muss (Unsicherheitsmodellierung),
- deren Modell nicht mathematisch beschreibbar ist, wie zum Beispiel der Betrieb durch einen manuellen Bediener.

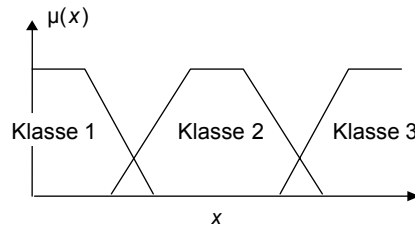


Abbildung 2.16: Prinzip der Fuzzifizierung

Es ist jedoch unbedingt erforderlich, dass genügend empirisches Prozesswissen vorhanden ist, um den Prozess sicher zu führen [Fro95]. Die verbale Formulierung der Entscheidungsregel(n) macht die Integration dieses Wissens einfach, da kein mathematisches Modell formuliert werden muss. Wenn alle Daten vollständig vorliegen, ist die Entwicklungszeit für den Fuzzy Regler entsprechend gering [Man05].

Fuzzy Regler sollten dennoch nur dann eingesetzt werden, wenn die gegebene Regelungsaufgabe nicht mit herkömmlichen Vorrichtungen erfüllt werden kann [Fur95]. Ab einer gewissen Anzahl an Einflussgrößen (> 5) wird die Regelfindung im Allgemeinen zu komplex [Scho95]. Die Folge können inkonsistente Regeln sein. Durch die Beschränkung auf wenige Einflussgrößen bleibt auch die Anschaulichkeit des Prozesses für den Laien erhalten, die durch die verbale Beschreibung der Entscheidungsregeln entsteht [Fro95].

Aus dem Verhalten des Reglers kann auf zusätzlich notwendige Regeln geschlossen werden, welche aber „von Hand“ erstellt werden müssen [Fro95]. Sofern außerdem die bekannten Zusammenhänge zwischen den Einflussgrößen über die Zeit nicht konstant bleiben, muss ein Fuzzy-System gegebenenfalls angepasst werden.

Im Hinblick auf die in dieser Arbeit gestellten Anforderungen zeigen die Fuzzy Regler insgesamt deutliche Schwächen in Bezug auf die Beschränkungen des Verfahrens bedingt durch die geringe Anzahl an Einflussgrößen und das erforderliche Vorwissen über den Prozess (Abbildung 2.17). Eine Überwachung ist auch bei Fuzzy-Reglern ursprünglich nicht integriert.

Regelaufgabe	Einrichtung / Flexibilität					Überwachung							
systematisches Ausregeln von Störungen	Überwachung kann ergänzt werden	Geringes Expertenwissen integriert (i)	Aufwand für Vor- und Validierung	Universelle Anwendbarkeit	Aufwand für Einstellung	Sicheres Detektieren von Prozessstörungen	Allgemeine Auswertestrategie	Überwachung Automatisierbare Auswertung	Trennung des Fertigungs- vom Messprozess				
Fuzzy Regler	++	+	e	--	+	o	o	-	-	-	-	-	

Abbildung 2.17: Bewertung der Fuzzy-Regelung

2.2.1.6 Regelung durch Künstliche Neuronale Netze

Ein künstliches neuronales Netz (KNN) besteht aus einer Eingabe-, beliebig vielen verdeckten, sowie einer Ausgabeschicht [Caw03]. Diese Schichten werden von s.g. Neuronen gebildet. Jedes Neuron wird dabei durch sein Eingangssignal, die Gewichte, eine Aktivierungsfunktion, und das Ausgabesignal charakterisiert (Abbildung 2.18). Das Netz muss mit realen Trainingsdaten angelernt werden, wofür verschiedene Lernalgorithmen verwendet werden [Reu04]. Dieses KNN ermittelt in der Folge gemäß den Eingangsvariablen und dem erlernten Wissen eine selbst entwickelte Prognose über den Prozessverlauf und regelt somit den Fertigungsprozess. So können KNN z.B. auch für die Lösung von Aufgaben in der Arbeitsplanung [Fel92] oder Produktionssteuerung [Scho08] verwendet werden.

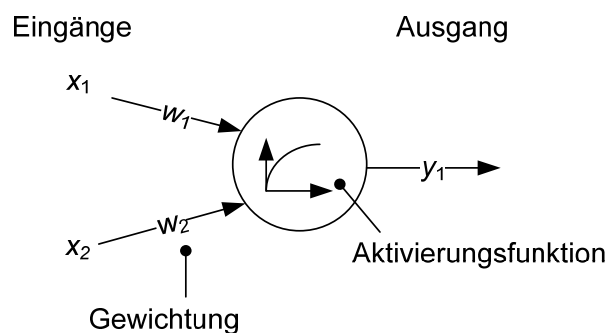


Abbildung 2.18: Struktur eines künstlichen Neurons

Im Gegensatz zu den Fuzzy Reglern sind KNN lernfähig und benötigen für das Anlernen keinerlei Vorwissen über den Prozess, sondern lediglich eine ausreichende Menge experimentell ermittelter Ein- und Ausgangssignale [Caw03]. KNN können jede Art von Zusammenhängen modellieren und sind nicht auf lineare Modelle beschränkt [Gra92].

Eine Vielzahl von Einflussgrößen - wie in es in der Mikroproduktion der Fall ist - stellt keine Restriktion dar, da die parallele Verarbeitung mit einer Vielzahl an Neuronen eine immense Rechenkapazität bedeutet [Gra92].

Im Umgang mit den KNN ergeben sich jedoch die folgenden Problemfelder [Fla95]:

- Konfiguration des Netzes.
- Benötigte Menge an Trainingsdaten.
- Stabilität der Systeme.
- Konvergenz gegen ein gegebenes Ziel.

Um den Lernaufwand und die verwendete Datenmenge möglichst gering zu halten, ist Erfahrung im Umgang mit KNN erforderlich. Es muss abgeschätzt werden, wie viele Neuronen und Schichten benötigt werden, um das Problem sinnvoll abzubilden. Gleichzeitig steht und fällt die Qualität des KNN mit der Qualität der Trainingsdaten. Diese sollten alle möglichen Zustände des Systems erfassen, da andernfalls nicht gewährleistet ist, dass das Netz im „ungelernten Bereich“ die richtigen Daten erzeugt [Caw03]. Auch die Menge der verwendeten Lerndaten ist relevant. Bei zu wenigen Daten droht eine Unter-, bei zu vielen Daten eine Überanpassung. Letztere macht das KNN weniger flexibel und robust, sofern die aktuellen Eingangsdaten sehr von den Lerndaten abweichen.

Die letzten beiden Punkte der obigen Aufzählung ergeben sich aus der Black-Box-Struktur der KNN. Der Lernprozess hat zum Einen den Vorteil, dass geringes Vorwissen vorausgesetzt wird. Andererseits bildet das KNN keine interpretierbaren Prozesszusammenhänge ab und man erhält daher keine oder nur begrenzte Information über die zugrunde liegenden Vorgänge [Caw03]. Bei einer grundlegenden Veränderung des Prozesses muss das Netz daher völlig neu trainiert werden, da Modifikationen aus den genannten Gründen schwierig umzusetzen sind.

Für die gestellte Aufgabe sind die KNN zwar wegen ihrer Fähigkeit, Verläufe vorherzusagen und nichtlineare Beziehungen abzubilden interessant - jedoch sprechen das erforderliche Methodenwissen und die hohe Anzahl an Trainingsdaten gegen eine Anwendung für die vorliegende Regelungsaufgabe (Abbildung 2.19).

Regelaufgabe	Einrichtung / Flexibilität				Überwachung								
Ausregeln von systematischen Störungen	Überwachung kann ergänzt werden	Geringes Expertenwissen integriert (i) / Expertenwissen ergänzt werden (e)	Aufwand für Vor- und Validierung	Universelle Anwendbarkeit	Aufwand für Einstellung	Sicheres Detektieren von Prozessstörungen	Auswertestrategie	Allgemeine Auswertung	Überwachbare Auswertung	Trennung des Messprozesses vom Fertigungsprozess			
KNN	+	++	e	++	-	+	o	-	-	-	-	-	-

Abbildung 2.19: Bewertung der Regelung durch KNN

2.2.1.7 Statistische Prozessregelung

Die SPC geht davon aus, dass ein Prozess im ungestörten Zustand in der Lage ist, Produkte der gewünschten Qualität zu fertigen, die allerdings innerhalb der vorgegebenen Eingriffsgrenzen (EG) streuen dürfen. Ihr Ziel ist es, die Variabilität des Prozesses insgesamt, jedoch nicht bezüglich eines Zielwertes zu reduzieren [Mon91]. Damit stellt sie ein effizientes Werkzeug dar, um eine grundsätzliche Verbesserung der Prozessstabilität zu erzielen [Ale04].

Die SPC greift nur in die laufende Produktion ein, wenn mit ausreichender Sicherheit von einer außergewöhnlichen Störung ausgegangen werden kann. In diesem Fall muss die Ursache der Störung untersucht und behoben werden, um den ursprünglich fähigen Prozesszustand wiederherzustellen.

Damit zielen sowohl die automatisierte wie die statistische Prozessregelung auf eine Reduktion der Prozessstreuung ab. Allerdings verfolgen sie unterschiedliche Philosophien [Van92]. Während die automatisierte Regelung aktiv versucht, auftretende Störungen zu kompensieren, stellt die SPC eine überwiegend passive Methode zur Prozessüberwachung dar, mit deren Hilfe ein Prozess grundsätzlich verbessert werden soll. Eine kontinuierliche Kompensation systematischer Prozesseinflüsse soll nicht erfolgen, da die Auswirkung der Streuungsquelle damit verdeckt und die Streuungsquelle nicht detektiert werden würde [Box92].

Der SPC-Ansatz ist jedoch nicht immer ausreichend. Die Streuung von Mikroprozessen ist gegenüber den Toleranzgrenzen sehr groß und muss bereits kurzfristig reduziert werden. Die SPC ist jedoch vielmehr langfristig auf die Behebung der Ursachen einer Störung ausgerichtet. Da keine direkte Rückführung der Qualitätsergebnisse in den Fertigungsprozess erfolgt, erfüllt die SPC daher die grundsätzliche Forderung nach einer Ausregelung der systematischen Störungen nicht.

Dagegen stellt die SPC Methoden bereit, um Prozessverständnis aufzubauen und Ursachenfindung zu betreiben [Woo00]. Die QRK-Technik stellt beispielsweise eine sinnvolle Methode der Prozessüberwachung auf zusätzliche unvorhergesehene Streuungsquellen dar, die somit die Möglichkeit zur Vorbereitung der Prozessanalyse bietet. Die Auswertung der unterschiedlichen QRK-Typen wurde in der Literatur umfangreich behandelt, [u.a. Bla89, Dut64, Mon91, Nel84, Owe89, siehe auch Anhang A.1]. Neuere Veröffentlichungen beschäftigen sich mit der automatischen Auswertung auf komplexere Linienverläufe [Wan98] und der Zuordnung von Ursache-/Wirkungs-Beziehungen [Hsu01, Zor98].

Die SPC ist an veränderte Rahmenbedingungen insofern anpassbar, dass jeweils für ein interessierendes Merkmal eine zusätzliche QRK eingeführt oder ein anderer QRK-Typ ausgewählt werden kann. Der Aufwand für die Sensorik wird als gering bewertet, da die QRK-Methode lediglich eine grafische Aufbereitung der (meist) ohnehin erfassten Messwerte darstellt.

Es gibt zahlreiche Untersuchungen zur Leistungsfähigkeit der SPC bei messabweichungsbehafteten Daten (siehe auch Kapitel 2.2.2) – eine Trennung der Streuung von Fertigungs- und Messprozess für eine SPC gelenkte Produktion ist dagegen außer den eigenen Arbeiten [Fle08a, Lan08a] nicht bekannt.

Regelaufgabe	Einrichtung / Flexibilität					Überwachung							
	Ausregeln von systematischen Störungen	Überwachung kann ergänzt werden (o)	Geringes Vor- und Expertenwissen integriert (!) / Ergänzt werden (e)	Aufwand für Vor- und Validierung	Universelle Einstellung	Aufwand für Sensorik	Sicheres Detektieren von Prozessstörungen	Allgemeine Auswertestrategie	Automatisierbare Auswertung	Überwachung vom Messprozess	Trennung des Fertigungs- vom Messprozess		
SPC	o	-	i	+	+	++	++	++	++	++	++	-	-

Abbildung 2.20: Bewertung der Überwachung durch SPC

2.2.1.8 Algorithmic Statistical Process Control

Die SPC hat ihren Ursprung in der Teilefertigung [Box92] und geht davon aus, dass die ausgewerteten Prozessdaten unabhängig und normalverteilt sind. Im Gegensatz dazu wurde die automatisierte Prozessregelung (APC) v.a. in der Verfahrenstechnik eingesetzt, um wandernde Prozesse zu steuern. Die Prozessergebnisse sind hierbei korreliert und damit nicht unabhängig

von zuvor herrschenden Umständen. In der Literatur finden sich jedoch vermehrt Ansätze, welche die Kombination von SPC und APC untersuchen, um von den komplementären Vorteilen zu profitieren [Van92, Tuc93, Fal93].

Eine Gegenüberstellung von SPC und APC geben [Box92] und [Mon91]. [Ale04] erstellte eine Übersicht über verschiedene Ansätze für die SPC-Überwachung von korrelierten Prozessen. Vielfach stehen hier modellbasierte Ansätze im Vordergrund, bei denen die Prozessdaten mit Hilfe des Modells von der Korreliertheit bereinigt werden [Ale04, Mon91]. Die Überwachung der Residuen kann dann wieder durch klassische QRK wie die Shewhart-Karte oder eine Gedächtnis-QRK erfolgen. Eine Verletzung der Eingriffsgrenzen (EG) bedeutet in diesen Fällen anschaulich, dass die Abhängigkeiten im Prozess verändert sind und darum das Residuum zwischen Messwert und bereinigten Daten ungewöhnlich hoch ist.

In [Van92, Tuc93, Fal93] wird ein integrierter Ansatz von SPC und automatisierter Regelung unter dem Namen „Algorithmic Statistical Process Control“ (ASPC) vorgestellt und auf einen verfahrenstechnischen Prozess angewandt. Durch den integrierten Ansatz kann zum Einen die kurzfristige, vorhersagbare Prozessstreuung reduziert werden. Zum Anderen wird durch die statistische Prozessüberwachung aber auch eine langfristige Verbesserung ermöglicht. Alle erwähnten Veröffentlichungen beschäftigen sich mit Prozessen der verfahrenstechnischen Industrie - die Kombination von APC und SPC für Prozesse der teilefertigenden Industrie wurde bisher nicht behandelt. In Anhang A.1.1 ist eine detaillierte Gegenüberstellung von APC und SPC zu finden.

Insgesamt zeigt der integrierte Ansatz von SPC und APC für die vorliegende Aufgabe großes Potential, wie die Bewertungsmatrix zeigt (Abbildung 2.21).

Regelaufgabe	Einrichtung / Flexibilität		Überwachung										
Ausregeln von systematischen Störungen	Überwachung kann ergänzt werden (e)	Geringes Vor- und Expertenwissen	Aufwand für Einstellung und Validierung	Universelle Anwendbarkeit	Aufwand für Sensorik	Sicheres Detektieren von Prozessstörungen	Auswertestrategie	Allgemeine Auswertung	Automatisierbare Auswertung	Überwachung Messprozess	Trennung des Fertigungs- vom Messprozess		
ASPC	++	+	i	+	o	o	++	++	+	++	-	-	

Abbildung 2.21: Bewertung der Regelung durch ASPC

Fazit:

Es wurden verschiedene Ansätze und Forschungsarbeiten aus den Bereichen Prozessregelung und –überwachung vorgestellt und anhand der in Kapitel 2.2.1.2 aufgestellten Kriterien einer Qualitätsregelung für Mikrofertigungsprozesse bewertet. Zusammenfassend ergibt sich folgendes Bild:

- **Prädiktive Regler** bewirken, dass die Regelung schon erfolgt bevor eine Abweichung eingetreten ist. Dies ist für die Mikrofertigung besonders interessant, da eine Nachbearbeitung der Werkstücke in aller Regel nur schwer möglich ist.
- Für die Ausführung des prädiktiven Reglers liefern **multiple Regressionsmodelle** ausreichende Ergebnisse. Der Mehraufwand für Methoden, die auf künstlicher Intelligenz (KI) z.B. künstliche neuronale Netze basieren, scheint für die vorliegende Regelungsaufgabe nicht gerechtfertigt.
- Bei den vorgestellten linearen und modellbasierten Regelungsansätzen ist bisher **keine Überwachung des geregelten Modells oder des Messsystems** vorgesehen, jedoch ist der Anschluss einer Überwachungseinrichtung in allen Fällen machbar.
- Durch den alleinigen **Einsatz von QRK** im Rahmen einer SPC wird das Regelungsziel nicht erreicht, da keine direkte Rückführung der Qualitätsergebnisse in den Fertigungsprozess erfolgt. QRK eignen sich dagegen hervorragend für die Überwachung des Gesamtsystems.
- Für eine **Überwachung des Messprozesses** und die **Separation von Fertigungs- und Messprozess** kann keines der vorgestellten Modelle direkt übernommen werden.

Ausgehend von dieser Betrachtung sollten für die Umsetzung der Regelung und Überwachung von Mikrofertigungsprozessen in einem Qualitätsregelkreis folgende Ansätze Verwendung finden:

1. Prädiktiver Regler mit empirischem Regressionsmodell.
2. Prozessüberwachung durch Qualitätsregelkarten.
3. Entwicklung eines Vorgehens zur Separation der Streuung von Mess- und Fertigungsprozess basierend auf der QRK-Technik.

2.2.2 Statistische Qualitätssicherung unter Einfluss von Messfehlern

Eine Regelung von Prozessen fundiert auf den zugrunde liegenden Messdaten. Auch diese Messdaten unterliegen einer Streuung aufgrund der vielfältigen Unsicherheiten im Messprozess. Ist die Messstreuung im Vergleich zu der zu regelnden Fertigungsstreuung klein, so ist die beobachtete Prozessstreuung (Überlagerung von Prozess- und Messstreuung) relativ nahe bei der tatsächlichen Prozessstreuung (Abbildung 2.22 links). Ist dagegen die Messstreuung in Relation zur Prozessstreuung groß, so weicht die beobachtete von der tatsächlichen Prozessstreuung signifikant ab (Abbildung 2.22 rechts). In der Mikroproduktionstechnik liegen die Toleranzen im Größenbereich der MU [Hor05] und die Messstreuung im Größenbereich der Fertigungsprozessstreuung [Fle08a, Lan08a]. Die Unsicherheit im Messprozess ist also nicht mehr vernachlässigbar in Relation zu den Toleranzen. Die Einhaltung der „Goldenen Regel“ der Messtechnik, wonach die MU höchstens ein Zehntel der Toleranz betragen darf [Ber68], kann für die flexible geometrische Messung von Mikrobauanteilen meist nicht eingehalten werden. Daher werden im folgenden Kapitel die Auswirkungen von Messfehlern auf die SPC bzw. QRK analysiert.

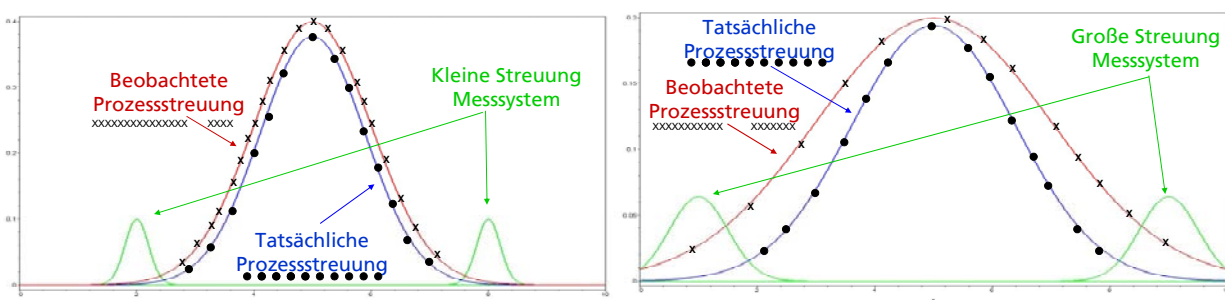


Abbildung 2.22: Überlagerung von Prozess- und Messstreuung nach [Die04]

2.2.2.1 Auswirkungen von Messfehlern auf Qualitätsregelkarten

Messfehler setzen sich aus einer systematischen und einer zufälligen Komponente zusammen. [Rin95] bezeichnet den Fall, in dem beide Komponenten additiv auf das Messergebnis wirken, als den Wichtigsten. Dieser stellt sich wie folgt dar:

$$Y_{mess} = X + V + E \quad (2-3)$$

Y_{mess} ist der gemessene Wert. X und V sind Zufallsvariablen, wobei X die wahre Abmessung des jeweiligen Qualitätsmerkmals darstellt. Auf X wirken Schwankungen im Fertigungsprozess ein wie in Kapitel 2.1.1 beschrieben. V stellt den zufälligen Messfehler dar und wird in Form der Messunsicherheit in Formel (2-1) bzw. (2-2) über s_E und s_{MP} für die Feingestalt bzw. über u_p und u_w für die Grobgestalt der Mikrobauteile quantifiziert [Fle08a]. Nach [Chr03] ist V meist zumindest normalverteilt, aber auch eine Gleich- oder Dreieckverteilung ist u.U. denkbar [Adu98]. Y_{mess} und V werden als unabhängig angenommen. Die Konstante E stellt den systematischen Messfehler dar (2-2).

Die Auswirkungen der beiden Fehlerarten auf eine Shewhart- \bar{x} -Karte unter der Annahme normalverteilter Messwerte werden im Folgenden gemäß [Rin95] beschrieben.

Auswirkung systematischer Messfehler

Ein systematischer Messfehler hat keinerlei Auswirkungen auf das Verhalten der QRK, sofern er sich schon in den Stichprobenwerten zur Einrichtung der Karte findet. In diesem Fall verschieben sich lediglich die EG um den Wert E . Anders verhält es sich, falls die EG der QRK nach dem Sollwert ausgerichtet sind, oder der systematische Fehler erst nach Einrichtung der QRK auftritt. Betrachtet werden nun die Auswirkungen eines solchen Falls (Abbildung 2.23).

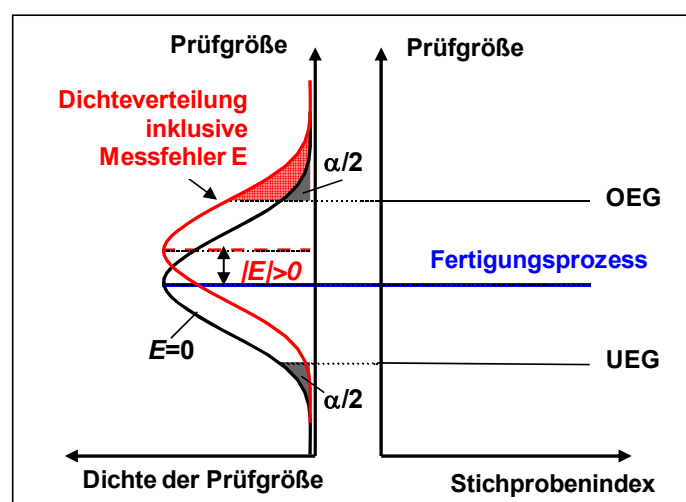


Abbildung 2.23 : Auswirkung eines systematischen Messfehlers

Es wird angenommen, dass die wahren Abmessungen X des Qualitätsmerkmals normalverteilt $N(\mu, \sigma)$ sind. Bei Vorliegen eines

systematischen Messfehlers ist die Prüfgröße Y nun nicht $N(\mu, \sigma/\sqrt{n})$ -verteilt, wie bei der Berechnung der EG angenommen, sondern $N(\mu + E, \sigma/\sqrt{n})$ -verteilt. Der gemessene Wert besteht also aus dem wahren Wert plus/minus dem Betrag des systematischen Messfehler E . Die oberen und unteren EG (OEG, UEG) basieren jedoch noch auf der ursprünglichen Dichteverteilung der Prüfgröße. Aufgrund dieses Messfehlers liegen Stichprobenmittelwerte, die in eine solche QRK abgetragen werden, häufig außerhalb der EG. Der Grund der EG-Verletzung wird dann fälschlicherweise im Fertigungsprozess und nicht im Messprozess gesucht – es steigt die Fehlerwahrscheinlichkeit 1. Art (siehe Anhang A.1.2).

Auswirkung zufälliger Messfehler

Wie zuvor wird $X \sim N(\mu, \sigma)$ angenommen. Für den zufälligen Messfehler V wird angenommen, er sei $N(0, \sigma_V)$ -verteilt. Durch den Erwartungswert 0, hat der Messfehler im Mittel also keinen Einfluss auf die gemessene Fertigungslage, d.h. es gilt $E(Y_{mess}) = \mu$.

Es wird zugrunde gelegt, dass die Varianz der Summe zweier normalverteilter Zufallsvariablen die Summe der Varianzen ist. Die Standardabweichung des arithmetischen Mittels der Messwerte $\sigma_{\bar{Y}, mess}$ ist also

$$\sigma_{\bar{Y}, mess} = \sqrt{\frac{\sigma^2}{n} + \frac{\sigma_V^2}{n}} = \sigma \cdot \sqrt{1 + \frac{\sigma_V^2}{\sigma^2}} \quad (2-4)$$

Die Standardabweichung der Prüfgröße Y wird durch den zufälligen Messfehler V um den Faktor $\sqrt{1 + \sigma_V^2/\sigma^2}$ vergrößert.

Auch der Einfluss des zufälligen Messfehlers hängt davon ab, ob dieser schon bei Berechnung der EG eingeht (=EG_{F+M} d.h. Streuung des Fertigungs- und des Messprozesses), oder erst während der Anwendung der Karte auftritt (=EG_F). Abbildung 2.24 zeigt die Auswirkungen auf die EG im ersten Fall.

Die festgelegten EG verschieben sich durch die aufgrund des zufälligen Messfehlers V größere Streuung nach außen – die EG sind also zu groß, da sie die Streuung des Fertigungs- und Messprozesses beinhalten. Im Gegensatz zum Fall eines systematischen Messfehlers kann hier eine Prozessstörung nur sehr schwer erkannt werden - es steigt die Fehlerwahrscheinlichkeit 2. Art (siehe Anhang A.1.2).

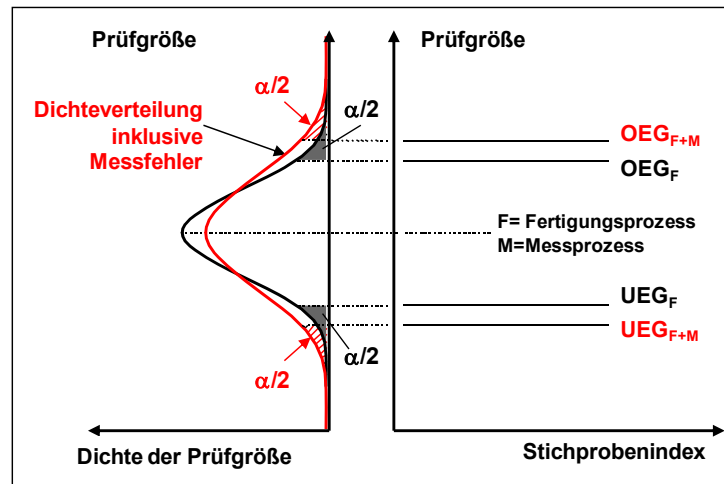


Abbildung 2.24: Auswirkung zufälliger Messfehler bei Einrichtung einer QRK

2.2.2.2 Bisherige Forschungsarbeiten

Neben den im vorigen Kapitel nach [Rin95] vorgestellten Überlegungen bezüglich der Shewhart- \bar{x} -Karte (siehe Anhang A.1.3), wurden die Auswirkungen von Messfehlern auf das Verhalten einer Lage- oder Streuungskarte nach Shewhart bereits in [Miz61, Abr77, Mit93a und Mit93b] untersucht.

Des Weiteren betrachteten [Mit91, Mit93a Mit93b, Lin01a] das Verhalten von Mittelwert-, Spannweiten- und Standardabweichungskarten bei Variation der Messfehlergröße. [Kan86] und [Mit95] betrachten ebenfalls die Shewhart-Karte, jedoch bei simultaner Überwachung von Prozesslage und Prozessvariabilität.

Während [Mit95] Messfehler betrachtet, die bereits bei Einrichtung der Kontrollkarte vorliegen, wird in [Mit98] auch das Auftreten von Messfehlern während der Führung der Karte untersucht. Es wird eine durch Messfehler verringerte Sensitivität der Shewhart-Karte gegenüber Prozessstörungen bestätigt. Zur Vermeidung dieses Effekts wird empfohlen, eine ausreichend genaue Messung sicherzustellen. In der Mikrofertigung dürfte dies, wie in Kapitel 2.1.2.3 geschildert, in der Regel nur schwer möglich sein. Aktuellere Untersuchungen zur Shewhart-Karte bei Messfehlern sind bei [Lin01a] zu finden. [Lin01b] untersuchte die Auswirkungen von Messfehlern auf multivariate Kontrollkarten.

In [Ste01] wird die Leistung der Shewhart- und der Exponentially-Weighted-Moving-Average-Karte (EWMA) (siehe Anhang A.1.4) mit und ohne Vorliegen von Messfehlern verglichen. Die EWMA-Karte schneidet bei dem

Vergleich in beiden Fällen besser ab. Liegen Messfehler schon bei Einrichtung der QRK vor, so vergrößert sich der Leistungsvorsprung. Treten Messfehler erst später auf, fällt der Vorteil geringer aus.

In [Abr77] wird die Leistungsfähigkeit von KUSUM-Karten (= kumulierte Summe) unter Messfehlereinfluss anhand von *ARL*-Studien (engl.: average run length = durchschnittliche Lauflänge einer QRK, siehe Anhang A.1.5) untersucht. In [Mar04] wurde gezeigt, dass sich die Leistungsfähigkeit der EWMA-Karte im Falle von Messabweichungen eine vorliegende Prozessstörung zu erkennen, verringert. Die *ARL* der EWMA-Karte nimmt im Falle des Vorliegens einer Mittelwertverschiebung des Prozesses zu, falls ein systematischer Messfehler vorliegt. Dies gilt im Besonderen wenn die Messstreuung besonders groß im Verhältnis zur Fertigungsprozessstreuung ist.

Im Gegensatz zu den übrigen Betrachtungen, untersucht [Sho04] nicht die Auswirkungen der Messfehler auf QRK, sondern stellt die Frage, wie eine QRK bei Vorliegen von Messfehlern einzurichten ist. Die Überlegungen beschränken sich wiederum auf die Shewhart- \bar{x}/s -Karte.

Arbeiten, die sich konkret auf die statistische Prozessregelung von Mikrofertigungsprozessen beziehen sind nicht bekannt. Einzig [Scho07a] schlägt die Entwicklung adaptiver Qualitätsregelkreise für Mikrofertigungsprozesse vor, ohne die Details näher zu spezifizieren. Zudem hat [Hor05] eine simulationsunterstützte, prüfungsbasierte Fertigungslenkungsmethodik für fehlertolerante Fertigungsprozessketten entworfen, die ihren Fokus jedoch auf monolithische Mikrosysteme setzt.

Fazit:

Trotz der Praxisrelevanz haben nur wenige Autoren das Thema Prozessregelung unter dem Aspekt Messfehler behandelt. Dabei wurden meistens das Verhalten und die Sensitivität eines bestimmten QRK-Typs (vornehmlich Shewhart-QRK) bei Messfehlern untersucht. Ergebnis der Untersuchungen war jeweils, dass die Leistungsfähigkeit der unterschiedlichen QRK unter Messfehlern sinkt. Es ist jedoch kein Ansatz bekannt, der aktiv die Problemstellung angeht und versucht die Leistungsfähigkeit der QRK auch unter Messfehlereinfluss aufrechtzuerhalten. Des Weiteren sind keine Ansätze zur Trennung der Streuung von Fertigungs- und Messprozess bekannt. Eine solche Trennung ist aber notwendig, um eine klare Entscheidungsgrundlage zu haben, ob eine Prozessstörung im Fertigungs- oder im Messprozess begründet ist.

2.3 Zusammenfassende Defizitbewertung

In den vorhergehenden Kapiteln wurde gezeigt, dass sowohl die Fertigung als auch die Messung der gefertigten mikromechanischen Bauteile von zahlreichen Faktoren beeinflusst werden (Abbildung 2.3). Die Summe dieser Einflüsse bestimmt die erzielbare Qualität. Dies gilt für die Mikrowelt genauso wie für den Makrobereich, allerdings erzeugen die Einflussfaktoren relativ zu den geforderten Toleranzen eine höhere Variabilität der Mikroprozesse [Lan07]. Ein Großteil der Streuungsquellen beruht auf den Größeneffekten sowie den besonderen Herausforderungen an die Mikromesstechnik. Erschwerend kommt hinzu, dass eine gemeinsame Normbasis zur Festlegung von Toleranzen sowie geeignete Methoden der Qualitätssicherung fehlen [Weu01, Hor05]. Mikrofertigungsprozesse sind daher durch eine erhöhte Variabilität der Erzeugnisqualität als in der Makroproduktionstechnik üblich charakterisiert.

Bisher fehlt eine durchgängige Methodik zur **fertigungsnahen Prozessregelung** von Mikrofertigungsprozessen. Die in der Makrowelt traditionell angewendete SPC setzt Bedingungen wie stabile Prozesse und fehlerfrei erhobene Messdaten voraus, welche so derzeit für Mikrofertigungsprozesse nicht gelten. Auch der alleinige Einsatz von Methoden aus der Regelungstechnik ist nur bedingt anwendbar, da die Aufnahme aller Einflussfaktoren, die auf einen Mikrofertigungsprozess wirken, das Reglermodell zu komplex und nicht universell anwendbar machen würde. Es bedarf neben der aktiven und prädiktiven Regelung der wichtigsten Prozessparameter auch einer **kontinuierlichen Überwachung**

1. der Güte des Reglermodells
2. des Messsystems
3. der sonstigen modellexternen Prozesseinflüsse.

Die große Mehrheit der **Qualitätsmerkmale** mikrostrukturierter mechanischer Komponenten sind ähnlich dem Makrobereich durch die Grob- und Feingestalt der Bauteile gegeben. Für die Gestalterfassung steht ein breites Spektrum an **Messverfahren** zur Verfügung, welche verfahrensspezifische Vor- und Nachteile mit sich bringen. Für die Charakterisierung der Grobgestalt eignet sich v.a. die multisensorielle Mikro-KMT aufgrund deren universellen Einsetzbarkeit. Für die Charakterisierung der Feingestalt bieten sich optische Verfahren wie die Weißlichtmikroskopie

aufgrund deren Schnelligkeit und Genauigkeit an. Infolgedessen werden im Rahmen dieser Arbeit ein multisensorielles KMG und ein Weißlichtmikroskop eingesetzt.

Aufgrund der Toleranzspezifikationen im Mikro- und Submikrometerbereich sind höchste Anforderungen an die Genauigkeit und Verlässlichkeit der Messung zu stellen. Die **Messunsicherheit** (MU) liegt im Größenbereich der vorgegebenen Toleranzen und erschwert die Entscheidung über Annahme oder Ablehnung des Messobjektes bezogen auf dessen Funktionstüchtigkeit bzw. erschwert die Regelung des zugrunde liegenden Fertigungsprozesses. Eine signifikante Komponente der experimentellen MU-Bestimmung für KMG und für die MU-Bestimmung bei der Oberflächencharakterisierung ist die Streuung des Messprozesses, welche durch Wiederholmessungen am gleichen Messobjekt quantifiziert werden kann [Wil01, GUM95]. Messdaten unterschiedlicher Bauteile setzen sich daher immer aus einer **Überlagerung von Fertigungsprozessstreuung und Messstreuung** zusammen. Bisher gibt es kein Vorgehen und keine Werkzeuge, wie die Streuung von Fertigungs- und Messprozess getrennt und somit der effektive Einsatz von QRK zur statistischen Prozessregelung genutzt werden kann. Darüber hinaus muss die Bestimmung der statistischen Verteilungsmodelle von geometrischen Mikroqualitätsmerkmalen noch erfolgen.

Diese Punkte zeigen erneut den Handlungsbedarf im beschriebenen Betrachtungsraum auf und begründen die Zielsetzung, praxisnah einsetzbare Methoden für die statistische Prozessregelung von Fertigungs- und Messprozess für das Erreichen einer variabilitätsarmen Produktion mikromechanischer Bauteile zu entwickeln. Dabei wird der Fokus sowohl auf die Entwicklung einer Methodik zur kontinuierlichen Reduzierung der Variabilität von Mikrofertigungsprozessen gelegt als auch auf die Implementierung eines Werkzeugs zur kontinuierlichen Visualisierung, Überwachung und Trennung der Streuung von Fertigungs- und Messprozess.

3 Lösungsansatz

Wie aus Kapitel 2.3 deutlich wurde, fehlt derzeit eine durchgängige Methodik zur fertigungsnahen Prozessregelung von Mikrofertigungsprozessen. In den folgenden Ausarbeitungen wird ein zweigegliedeter Ansatz vorgestellt, der die beiden Hauptherausforderungen einer fertigungsnahen statistischen Prozessregelung zur Herstellung mikro-mechanischer Bauteile angeht:

1. Hohe Variabilität der Fertigungsprozesse.
2. Überlagerung der Streuung von Fertigungs- und Messprozess.

Methodik 1:

Reduzierung der Variabilität von Mikrofertigungsprozessen

Bevor eine Regelung von Prozessen erfolgen kann, müssen die Einflussfaktoren und deren Wechselwirkungen auf die Zielgröße klassifiziert und quantifiziert werden. Ein einfaches und zugleich sehr effizientes Vorgehen besteht in der empirischen Modellierung der Einfluss- und Wechselwirkungsbeziehungen über die Auswertung systematisch durchgeführter Versuchsreihen. Anhand der systematischen Änderung der Einflussfaktoren und der hieraus resultierenden Effekte auf die Zielgröße kann über Varianzanalyse und multiple Regression ein mathematisches Modell über den funktionalen Zusammenhang zwischen Einflussfaktoren und Zielgröße erstellt werden. Die für die jeweilige Zielgröße optimale Kombination und Parametrierung der Einflussfaktoren (auch Faktoren genannt) wird identifiziert und im Folgenden wird der Prozess mit dieser optimalen Faktorkombination und -parametrierung gefahren und kann beispielsweise über Qualitätsregelkarten (QRK) überwacht werden. Nachteilig bei diesem Vorgehen ist die Tatsache, dass im Folgenden erst in den Prozessverlauf eingegriffen wird, wenn eine Eingriffsgrenzen(EG)-Verletzung der QRK auftritt – das Vorgehen also eine kontinuierliche Verbesserung des Prozesses (kurz- und mittelfristig) nicht erlaubt.

Dagegen sieht die vorgeschlagene Methodik eine aktive Regelung des Fertigungsprozesses schon innerhalb der EG der QRK vor (=APC). In der Mikroproduktionstechnik liegen die berechneten EG meist außerhalb der Toleranzgrenzen, was ein Eingreifen schon innerhalb der EG unbedingt erforderlich macht. Über das im Vorstadium durch statistische

Versuchsplanung und –auswertung erstellte mathematische Modell werden neben den Einflussbeziehungen auf die Ergebnisvariable auch die Wechselbeziehungen zwischen

- Hebelfaktoren (= Einflussfaktoren, die mess- und regelbar sind, z.B. Schnittgeschwindigkeit für den Fertigungsprozess Mikrospanen) und
- Kovariablen (= Einflussfaktoren die mess- aber nicht regelbar sind, z.B. Schneidkantenverrundung für den Fertigungsprozess Mikrospanen)

in jedem Schritt neu quantifiziert. So kann den sich ständig ändernden Kovariablen durch eine prädiktive – also vorausschauende - Anpassung der Hebelfaktoren entgegengewirkt werden, damit ein möglichst stabiles - also streuungs- und variabilitätsarmes - Qualitätsergebnis entsteht. Die in dem empirischen Modell nicht enthaltenen Prozessparameter und Umweltbedingungen wie beispielsweise die Homogenität des Werkstoffes oder die Streuung des Messprozesses müssen weiterhin über QRK und SPC überwacht werden. Je nach Prozessstabilität wird also zu kontinuierlichen Zeitpunkten eine Anzahl an Stichproben aus dem Fertigungsprozess überprüft und auf EG-Verletzungen untersucht. Die vorgeschlagene Methodik kombiniert somit APC und SPC auf eine effektive Weise, um aktiv und prädiktiv die Streuung der Mikrofertigungsprozesse zu überwachen und zu reduzieren (Abbildung 3.1).

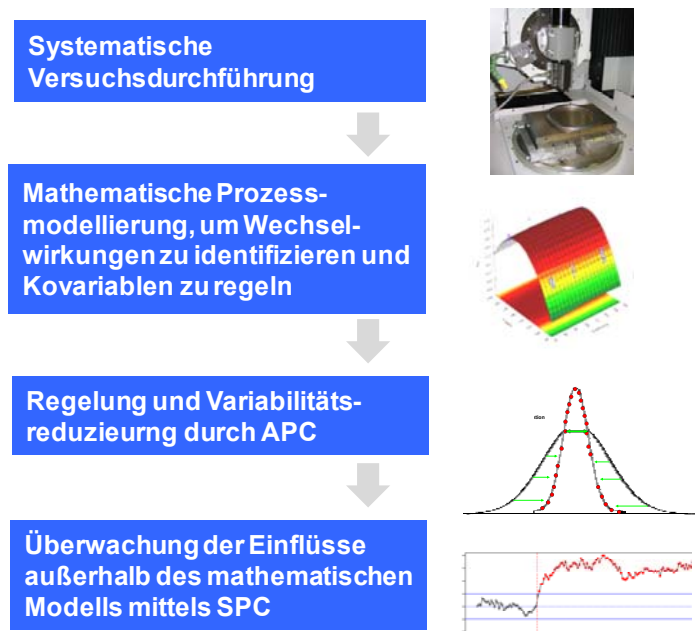


Abbildung 3.1: Vorgehen zur Kombination von statistischer Modellierung, APC und SPC

Methodik 2:

Trennung der Streuung von Fertigungs- und Messprozess

Die SPC und QRK dienen zur Überwachung des Fertigungsprozesses und gehen von einer fehlerfrei erhobenen Datenbasis aus. Messdaten unterliegen aber immer der Überlagerung der Streuung des Messsystems und der Streuung des eigentlich zu überwachenden Fertigungsprozesses. Bei einer im Vergleich zu den geforderten Toleranzen hohen Messstreuung steigt bei bisherigen, dem Stand der Technik entsprechenden QRK die Wahrscheinlichkeit, Fehler bezüglich der Annahme oder Ablehnung von untersuchten Objekten zu treffen, da keine Trennung der Überlagerung von Fertigungs- und Messprozess erfolgt.

Zur Lösung dieser Herausforderungen wird ein neuartiges Design einer multivariaten μ -EWMA-Qualitätsregelkarte vorgestellt, welche die Visualisierung, Überwachung und Trennung von Fertigungs- und Messprozess erlaubt. Dem Vorgehen zugrunde liegt die Aufnahme der Messstreuung durch kontinuierliche Wiederholmessungen einer geringen Anzahl von Objekten ($=s_M$) aus dem Fertigungsprozess und der anschließenden Gewichtung des Messwertes bezogen auf die aktuelle Messstreuung (Abbildung 3.2).

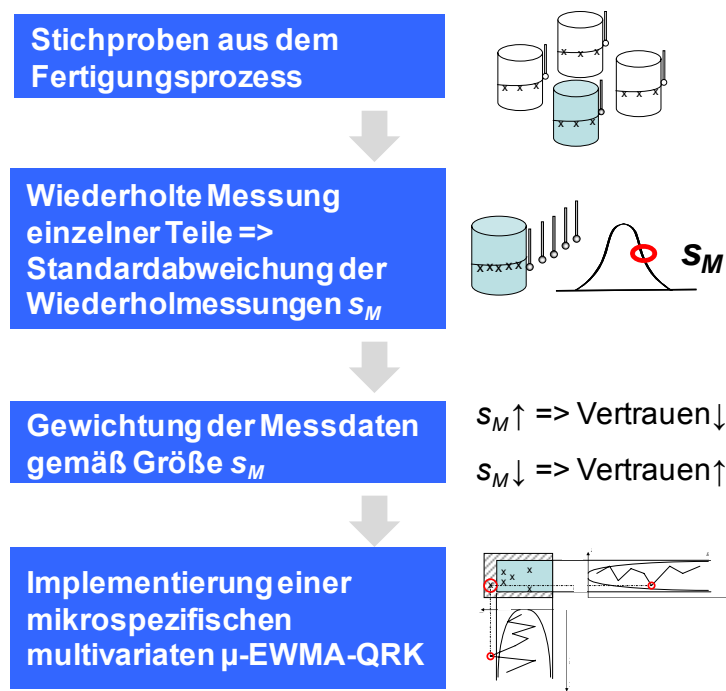


Abbildung 3.2: Vorgehen zur Trennung von Fertigungs- und Messprozessstreuung

Ist beispielsweise die aktuelle Messstreuung gering, so werden die Messwerte der vorliegenden Stichprobe als vertrauenswürdig gewertet und somit hoch gewichtet. Dagegen nimmt die Gewichtung der Stichprobe bei steigender Messstreuung kontinuierlich ab.

Bei Verwendung eines solchen Qualitätsregelkartentyps ist im Falle einer Eingriffsgrenzverletzung eine leicht verständliche und eindeutige Ursachendiagnose, ob der Fehler im Fertigungs- oder im Messprozess zu suchen ist, gegeben.

Ergebnis

Durch diese beiden Lösungsansätze werden folgende Vorteile angestrebt:

- Fokus auf die wesentlichen Einflussfaktoren, die das Qualitätsmerkmal beeinflussen.
- Einfache und kontinuierliche Anpassung der Prozessparameter an sich ändernde Umweltbedingungen.
- Kurzfristige Reduzierung der Variabilität von einem Qualitätsmerkmal durch den in-line agierenden Regelungsansatz (APC).
- Durch QRK-Überwachung werden Störungen entdeckt, die durch den Regelungsansatz nicht zu kompensieren sind.
- Langfristige Reduzierung der Variabilität und Stabilisierung des Fertigungsprozesses durch SPC-Ansatz.
- Kontinuierliche Optimierung des Regelungsansatzes durch Überwachung der Güte des Prozessmodells.
- Vorzeitiges Erkennen von Trends oder Mustern und konsequenter Eingriff in den Prozess bevor Fehlteile produziert werden.
- Überwachung und Regelung des Messprozesses.
- Trennung der Streuung von Fertigungs- und Messprozess und somit eindeutige Ursachendiagnose bei Vorliegen einer Eingriffsgrenzverletzung.

4 Statistische Prozessregelung für Mikrofertigungsprozesse

Im folgenden Kapitel wird eine Methodik zur statistischen Prozessregelung mikrofertigungstechnischer Prozesse hergeleitet (Abbildung 4.1). In Kapitel 4.1 wird die Grundidee der Kombination von automatisierter Prozessregelung (APC) und statistischer Prozessregelung (SPC) vorgestellt. In den Kapiteln 4.2, 4.3 und 4.4 werden die einzelnen Schritte zum Aufbau des APC-Modells aufgezeigt. In den Kapiteln 4.5, 4.6 und 4.7 werden der Aufbau der SPC und die Entwicklung einer mikrospezifischen Qualitätsregelkarte hergeleitet. In Kapitel 4.8 werden die Ergebnisse des APC- und des SPC-Modells in einen Regelkreis für Mikrofertigungsprozesse integriert und abschließend bewertet.

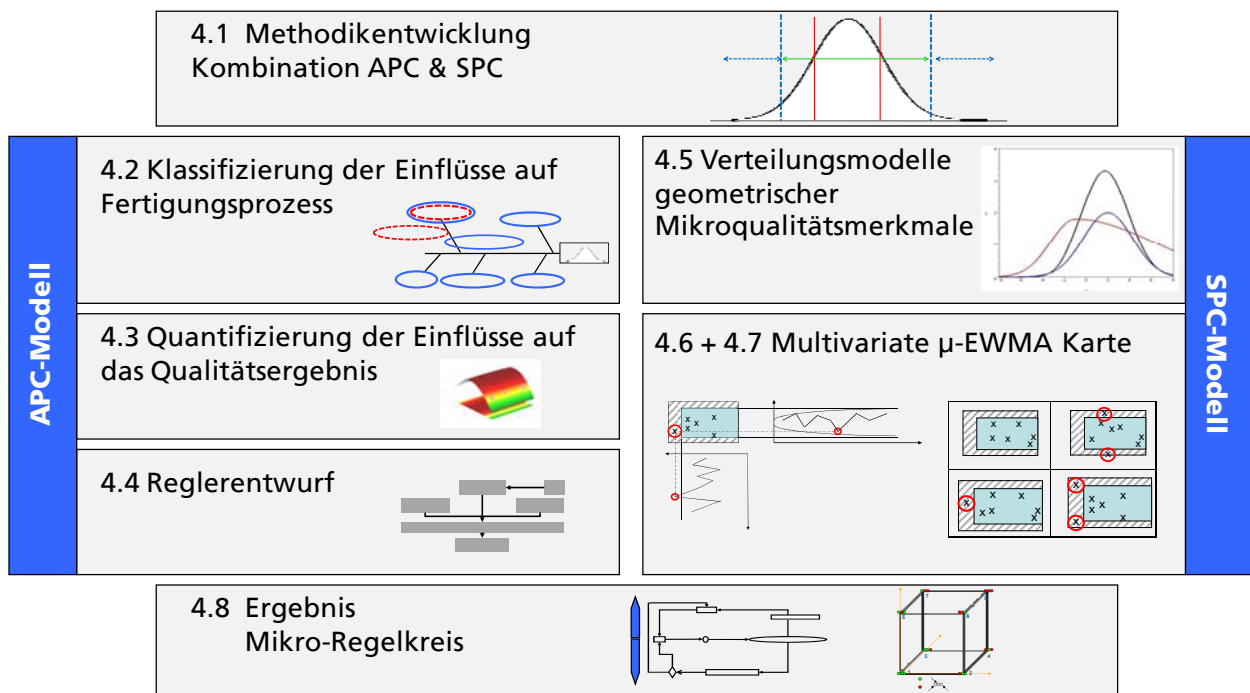


Abbildung 4.1: Strukturierung von Kapitel 4

Die vorgeschlagene neue Vorgehensweise sieht vor, ein den Fertigungsprozess beschreibendes empirisches Modell aus der statistischen Versuchsmethodik mittels multipler Regression aufzustellen. Das aufgestellte empirische Modell soll dazu dienen, den Wert des Qualitätsmerkmals zu prognostizieren. Auf der Basis des aufgestellten empirischen Modells wird anschließend ein Regelungsansatz entwickelt, der unter dem Einfluss von Störgrößen die Prozessparameter automatisch so verändert, dass die

Forderung nach reproduzierbaren Prozessergebnissen so weit wie möglich erfüllt ist. Um diese Vorgehensweise zu vervollständigen wird anschließend ein statistisches Überwachungssystem entwickelt, welches nicht nur die Werte des Qualitätsmerkmals mittels einer QRK kontinuierlich überwacht, sondern auch Aussagen über die Güte des empirischen Modells sowie die Trennung der Streuung von Fertigungs- und Messprozess ermöglicht.

4.1 Kombination von APC und SPC

Wie in Kapitel 2.3 aufgezeigt, gibt es bisher kein praxisnah und einfach anzuwendendes Verfahren zur Regelung von Mikrofertigungsprozessen. Aufgrund der hohen Toleranzanforderungen im (Sub-)Mikrometerbereich und stark streuender Fertigungsprozesse ist eine Beherrschtheit und Stabilität ($c_p > 1$, $c_{pk} > 1$) für mikrofertigungstechnische Prozesse bisher nicht gegeben.

Die aufgrund statistischer Kennwerte (Lage, Streuung und vorgegebenes Konfidenzniveau) ermittelten Eingriffsgrenzen (EG) für Mikrofertigungsprozesse sind zumeist größer oder nur geringfügig kleiner als das geforderte Toleranzband (= obere Toleranz OT – untere Toleranz UT). Der alleinige Einsatz von QRK würde im Falle der Wahl eines kleinen Konfidenzintervalls ($(1-\alpha)$ -Intervall im Bereich des Toleranzbandes) zu einer großen Anzahl von EG-Verletzungen und somit vielen Eingriffen in den Fertigungsprozess führen (Abbildung 4.2 links).

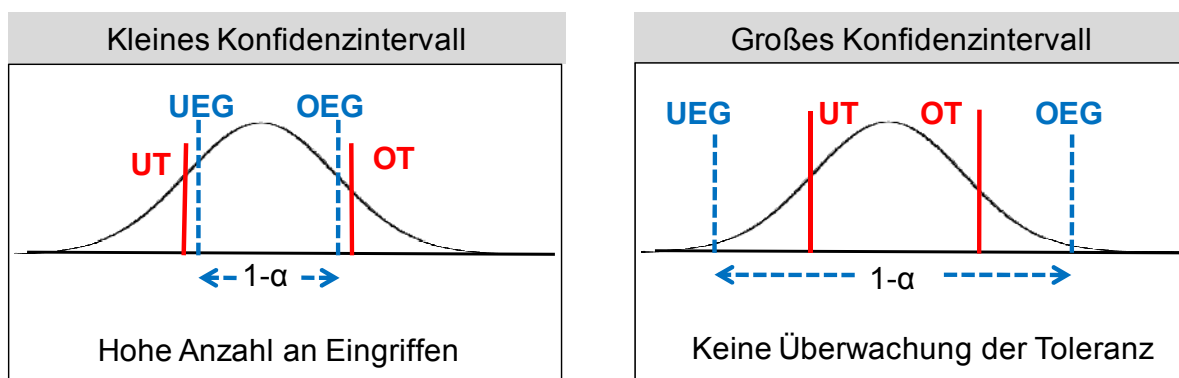


Abbildung 4.2: Vergleich Eingriffsgrenzen und Toleranz im Mikrobereich

Es müssten jedesmal eine Ursachenanalyse und ein Prozessstop erfolgen. Eine Anwendung dieses Vorgehens würde viel Zeit-aufwand erfordern und könnte zur kurz- und mittelfristigen Streuungs-reduzierung keinen Beitrag leisten. Dies liegt in der Tatsache begründet, dass die SPC von Natur aus

keine Empfehlungen zu den Ursachen der EG-Verletzung macht. Wenn man die EG nach den harten Anforderungen der Mikroproduktionstechnik festlegt, liegt in Wahrheit im vorliegenden Fall ja auch kein außergewöhnliches Ereignis vor, sondern im Gegenteil, der Prozess schwankt ja nur in einem kleinen Bereich (= Fall eines kleinen Konfidenzintervalls).

Bei der Wahl eines großen Konfidenzintervalls (z.B. $(1-\alpha) > 95\%$) können dagegen außergewöhnliche Ereignisse überwacht werden (Abbildung 4.2 rechts), es kann jedoch nicht die Funktionstüchtigkeit der Bauteile und des Gesamtsystems garantiert werden, da die Toleranzen nicht berücksichtigt würden.

Um einerseits die Toleranzen einzuhalten und andererseits außergewöhnliche Ereignisse überwachen zu können, muss daher die SPC um eine Methodik erweitert werden, welche aktiv und kontinuierlich eine Streuungsreduzierung auch schon innerhalb der EG angeht, um die hohen Toleranzanforderungen einzuhalten.

Um eine aktive Regelung von Fertigungsprozessen durchzuführen, bieten sich wie in Kapitel 2.2.1 aufgezeigt mehrere Möglichkeiten an. Ein klares und zielorientiertes Vorgehen besteht aufbauend auf statistischer Versuchsmethodik in der mathematischen Modellierung der Einflussfaktoren auf das Qualitätsergebnis anhand von Varianz- und Regressionsanalyse. Als Ergebnis dieser empirischen Modellierung kann ein Reglermodell aufgebaut werden, welches das Qualitätsergebnis bzw. –merkmal als Funktion bestimmter Prozess- und evtl. sogar Umweltbedingungen modelliert. Ein solches APC-Modell dient dazu, die Ergebnisvariable – also den Sollwert des betreffenden Qualitätsmerkmals – durch gezieltes Manipulieren der Einflussfaktoren auf einem (möglichst) stabilen Niveau zu halten. Schaltet man eine solche APC zwischen die über die SPC berechneten EG der Verteilung des Fertigungsprozesses kann eine kontinuierliche Streuungsreduzierung erfolgen. Prozessparameter und Umweltbedingungen, welche nicht im APC-Modell enthalten sind, können dagegen weiterhin über die SPC und QRK überwacht werden. Somit ist sowohl eine fortwährende Variabilitätsreduktion als auch eine Überwachung außergewöhnlicher Ereignisse garantiert. Abbildung 4.3 zeigt die Kombination und die verschiedenen Eingriffsbereiche von APC und SPC auf.

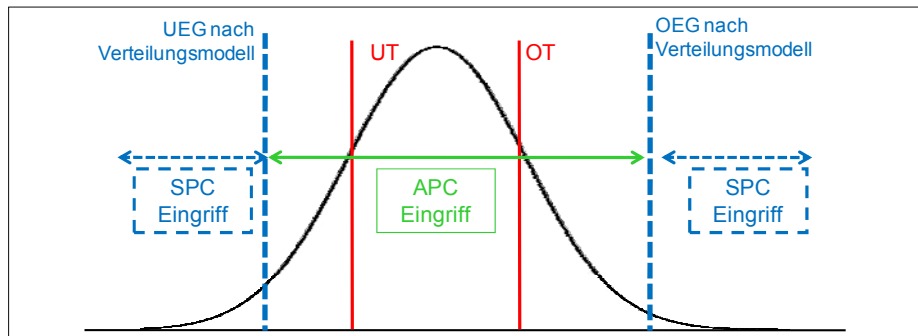


Abbildung 4.3: Eingriffsbereich von APC-Modell und SPC

Am Beispiel der Mikrozerspanung bedeutet dies, dass beispielsweise eine für die Oberflächenrauheit optimale Faktorstufenkombination der Hebel Faktoren Schnittgeschwindigkeit und Vorschub pro Zahn identifiziert wurde, der kontinuierlich „runder“ werdende Schneidkantenradius jedoch nicht direkt manipuliert werden kann. Des Weiteren handelt es sich beim Mikrospanen neben einem trennenden auch um einen umformenden Prozess, da die Schneidkantenverrundung ähnliche Werte wie die Spannungsdicke annimmt. Dadurch erfolgt die Zerspanung bei sequentiellem Abtrag zu großen Anteilen in gegenüber dem Grundwerkstoff verfestigten Randschichten. Es ist also eine Qualitätssicherungsmethode gefordert, die iterativ in jedem Zyklusdurchlauf die Prozessparameter auf die geänderten Kovariablen einstellt.

Daher wird folgendes in Abbildung 4.4 am Beispiel der Mikrozerspanung dargestellte Vorgehen vorgeschlagen. Basierend auf dem empirischen Regressionsmodell zwischen Einflussfaktoren und Qualitätsergebnis (welches über statistische Versuchsmethodik und –auswertung hergeleitet wurde) wird mit der „optimalen“ Faktorstufenkombination der Prozess gestartet. Zu kontinuierlich festgelegten Zeitpunkten wird über die SPC der Wert der Zielgröße und die aktuellen Werte der Einflussgrößen aufgenommen. Das empirische Regressionsmodell wird verwendet, um mit den aktuellen Werten der Kovariablen (z.B. Schneidkantenradius), die Hebel Faktoren (z.B. Schnittgeschwindigkeit und Vorschub pro Zahn) so zu ändern, dass ein bestmöglicher Wert der Zielgröße (z.B. Oberflächenrauheit) erreicht werden kann. Die Änderung der Hebel Faktoren ist natürlich nur in einem Größenbereich möglich, der zuvor in der statistischen Versuchsplanung und -durchführung auch abgedeckt wurde.

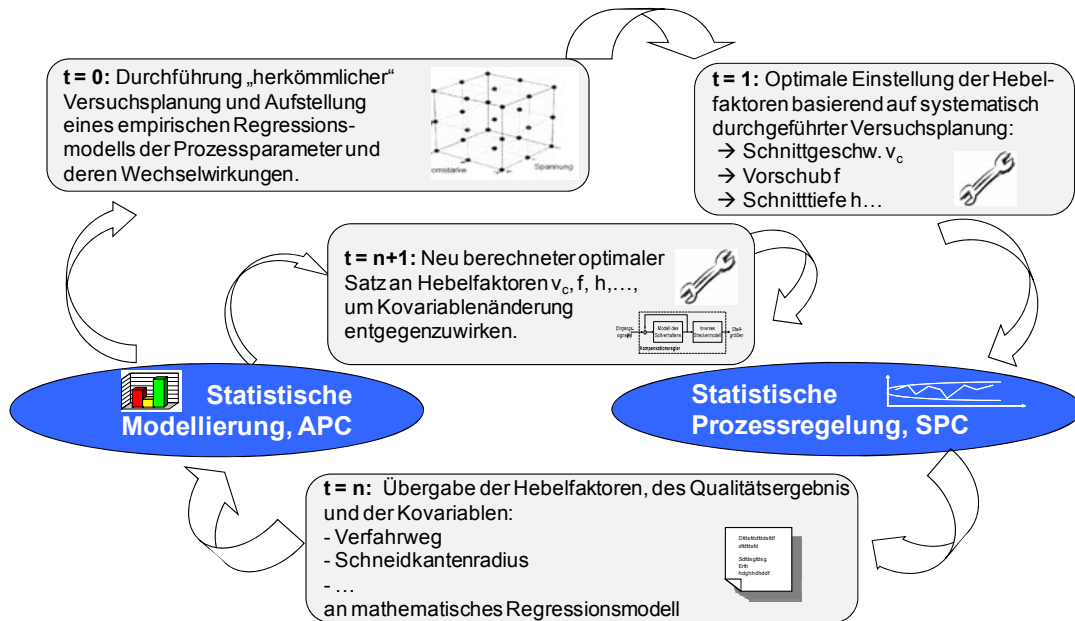


Abbildung 4.4: Grundidee der Kopplung von APC und SPC

Die Kombination von APC und SPC basiert dabei auf einem prädiktiven Vorgehen (siehe Abbildung 4.5). Ausgehend von dem Sollwert des Qualitätsmerkmals wird die Differenz zum aktuellen Ist-Wert ermittelt. Dieser Wert kann in QRK beispielsweise zur Visualisierung des Prozessverlaufs eingesetzt werden (Abbildung 4.5, unterer Regelkreis). Falls Werte zu weit vom Sollmaß ($= \tau$) außerhalb der Eingriffsgrenzen der QRK vorkommen, liegt mit großer Wahrscheinlichkeit eine Störung im Fertigungsprozess außerhalb des APC-Modells vor, welche nach der Identifikation der Ursache beseitigt werden muss.

Für geringere Abweichungen zwischen Soll- und Istwert des Qualitätsmerkmals sieht der vorgeschlagene Ansatz eine Erweiterung der Regelung auch innerhalb der EG vor, damit schon hier die gefertigten Mikrostrukturen möglichst nahe am Sollwert liegen, bzw. die Streuung um letzteren kontinuierlich reduziert wird (Abbildung 4.5, oberer Regelkreis). Zur Umsetzung dieses Vorhabens werden kontinuierlich die Kovariablen gemessen und über das aufgestellte empirische Modell deren Auswirkungen auf den Ist-Wert des Qualitätsmerkmals prognostiziert (\hat{Y}_i). Weicht dieser Prognosewert (\hat{Y}_i) zu stark vom Sollwert (τ_i) ab, so sind entsprechend den quantifizierten Wechselwirkungsbeziehungen die (bisher konstanten) Hebel-faktoren so zu ändern, dass die Effekte der Kovariablen möglichst eliminiert werden.

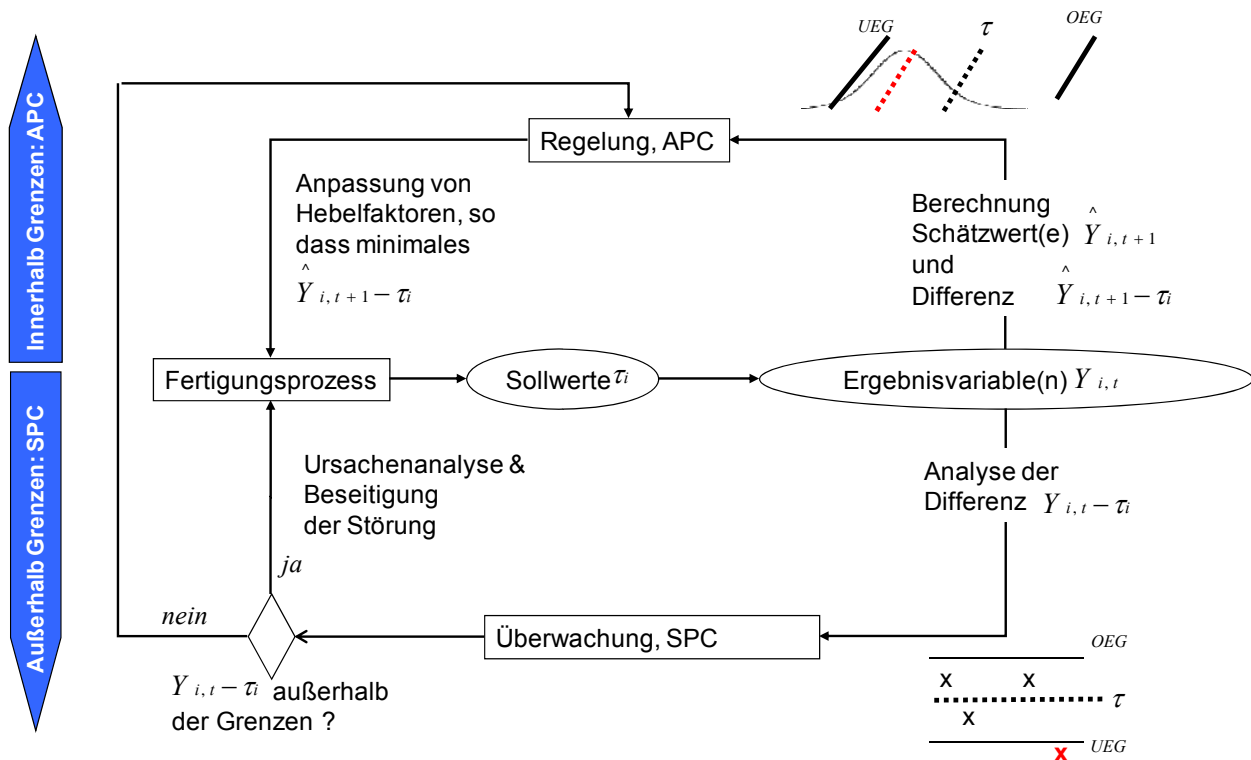


Abbildung 4.5: Prädiktives Modell der APC-SPC-Integration

In einem letzten Schritt ist noch festzulegen, ob der modellbasierte Regler bei jeder betragsmäßigen Abweichung des Zielgrößen-Istwertes vom Sollwert eingreifen soll oder ob ein Eingriff nur ab einer bestimmten Differenz von Ist- und Sollwert zu erfolgen hat. Hintergrund der Überlegung ist die Vermeidung unnötiger Eingriffe in den Prozess, da eine gewisse Zufallsstreuung der Fertigungsprozesse immer vorhanden ist. Eine Verringerung der Anzahl an Reglereingriffen - also jeweils eine Änderung der Hebel Faktoren - kann im jeweiligen Falle mit einer Kosten- und Zeitersparnis einhergehen. Besteht beispielsweise das Ziel in einer Verringerung der aktuellen Prozessvariabilität σ^2 um einen Wert x % auf $\sigma^2 \cdot (1-x)/100$ so ist ein Eingriff des Reglers nur sinnvoll bei Werten die außerhalb des Schnittpunktes der bisherigen mit der neu spezifizierten Prozessverteilung liegen. Abbildung 4.6 zeigt diesen *Graubereich*, in welchem daher keine Regelung stattfinden sollte, sowie den Bereich in welchem die Regelung bzw. die SPC eingreift.

Als Ergebnis liegt ein Modell zur prädiktiven Regelung der statistisch signifikanten Hebel Faktoren und Kovariablen vor, welches durch die Überwachung über QRK für Einflussgrößen außerhalb des mathematischen APC-Reglermodells ergänzt wird.

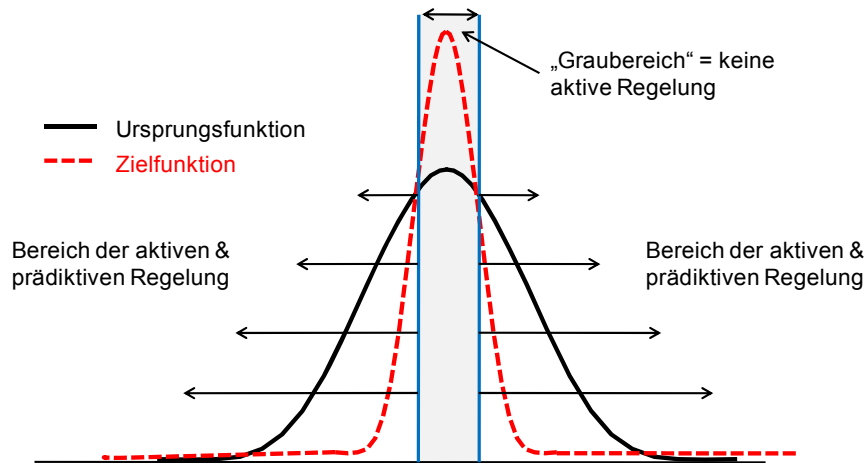


Abbildung 4.6: Eingrenzung des Bereiches des Reglereingriffs

4.2 Klassifizierung der Einflüsse auf den Fertigungsprozess

Bevor ein APC-Modell formuliert werden kann, muss ein fundiertes Wissen über den zu regelnden Prozess und die herrschenden Umweltbedingungen vorliegen. Dies ist zum Einen notwendig, um ein möglichst umfassendes Spektrum der auf den Fertigungsprozess wirkenden Einflüsse identifizieren zu können. Zum Anderen muss hierauf aufbauend der funktionale Zusammenhang zwischen Einflussfaktoren auf den Fertigungsprozess und auf das Qualitätsergebnis erstellt werden.

Um die Einflussvariablen auf den jeweiligen Mikrofertigungsprozess bzw. das interessierende Qualitätsergebnis (= Zielvariable) zu untersuchen und zu strukturieren, bieten sich beispielsweise Ishikawadiagramme an (siehe Abbildung 2.3). Geht man von der in der Literatur genannten 6 M- oder 5 M-Empfehlung aus [u.a. Har00, Mas07, Pfe01], so ergeben sich folgende Strukturierungsüberschriften für Fehlerursachen (ein korrektes Management wird im Rahmen der Arbeit vorausgesetzt und ist daher nicht aufgeführt):

<u>M</u> ethode	<u>M</u> aschine	<u>M</u> ensch
<u>M</u> aterial	<u>M</u> essung	<u>M</u> itwelt

Tabelle 4.1: Fehlerursachen nach den 6 M

Es ist anzumerken, dass gerade die Kriterien Material und Messung aufgrund von Größeneffekten und kleinsten Toleranzen eine übergeordnete Rolle in der Mikrowelt spielen. Zur Identifikation der Einflussfaktoren auf den zu betrachtenden Mikrofertigungsprozess bieten sich Diskussionsrunden mit

Experten und die Anwendung von Kreativitätsmethoden aus dem Qualitätsmanagement wie Brainstorming, Brainwriting, Morphologischer Baukasten, 3-5-2-Methode etc. an [u.a. Mas07, Pfe01].

Im Anschluss sollte eine Untergliederung der Einflussfaktoren nach regelbaren Faktoren (= Hebelfaktoren), mess- aber nicht regelbaren Faktoren (= Kovariablen) und weder regel- noch messbaren Faktoren (= Zufallsgrößen) stattfinden. Hinzu kommen noch Faktoren, die nur im Versuchsumfeld regelbar sind (= Rauschfaktoren) [Uer05]. Letztere sollen im Rahmen dieser Arbeit nur eine untergeordnete Rolle spielen. Unbekannte Faktoren können später bei der Formulierung des mathematischen Modells in Form einer unzureichenden Modellgüte (niedriger Wert für das korrigierte Bestimmtheitsmaß) identifiziert werden. Abbildung 4.7 fasst die Klassifizierung der Einflussfaktoren nach deren Anwendbarkeit für eine Regelung zusammen.

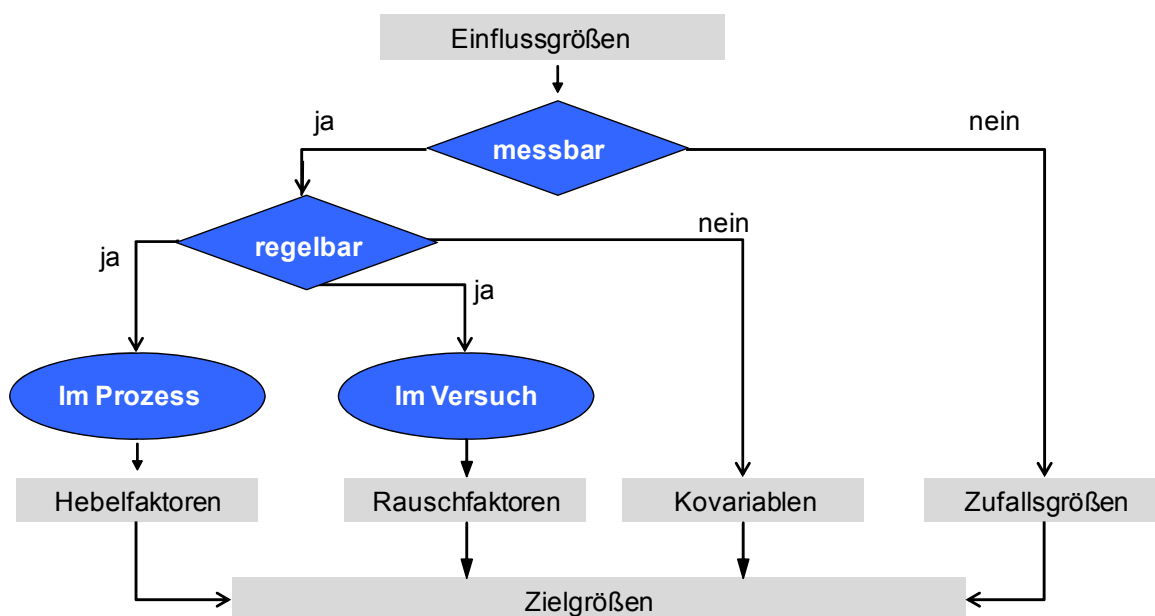


Abbildung 4.7: Strukturierungsmethode der Einflüsse für ein APC-Modell in Anlehnung an [Uer05]

Ansatzpunkt für eine Prozessverbesserung bietet in erster Linie die gezielte Manipulation der Hebelfaktoren. Nur durch die Hebelfaktoren kann einer Änderung der Kovariablen entgegengewirkt und das Prozessergebnis verbessert werden. Zufallsgrößen können dagegen nur anhand der Ergebnisvariable bzw. des Qualitätsergebnisses überwacht werden – eine Beeinflussung von letzteren kann nicht erfolgen.

Ordnet man die in Tabelle 4.1 gelisteten Überschriften und die darunter fallenden Einflüsse dem Strukturierungsbaum aus Abbildung 4.7 für einen Fertigungsprozess zu, so fällt auf, dass nur ein Teil der Prozessparameter den Hebelfaktoren und der Rest den Kovariablen und Zufallsgrößen zugeordnet werden muss. Abbildung 4.8 zeigt das Vorgehen und das Ergebnis am Beispiel des Mikrofräsprozesses am Qualitätsmerkmal Oberflächenrauheit auf (das Kriterium Mensch wurde nicht mit aufgenommen, dafür aber das Kriterium Maschine um das Kriterium Werkzeug ergänzt).

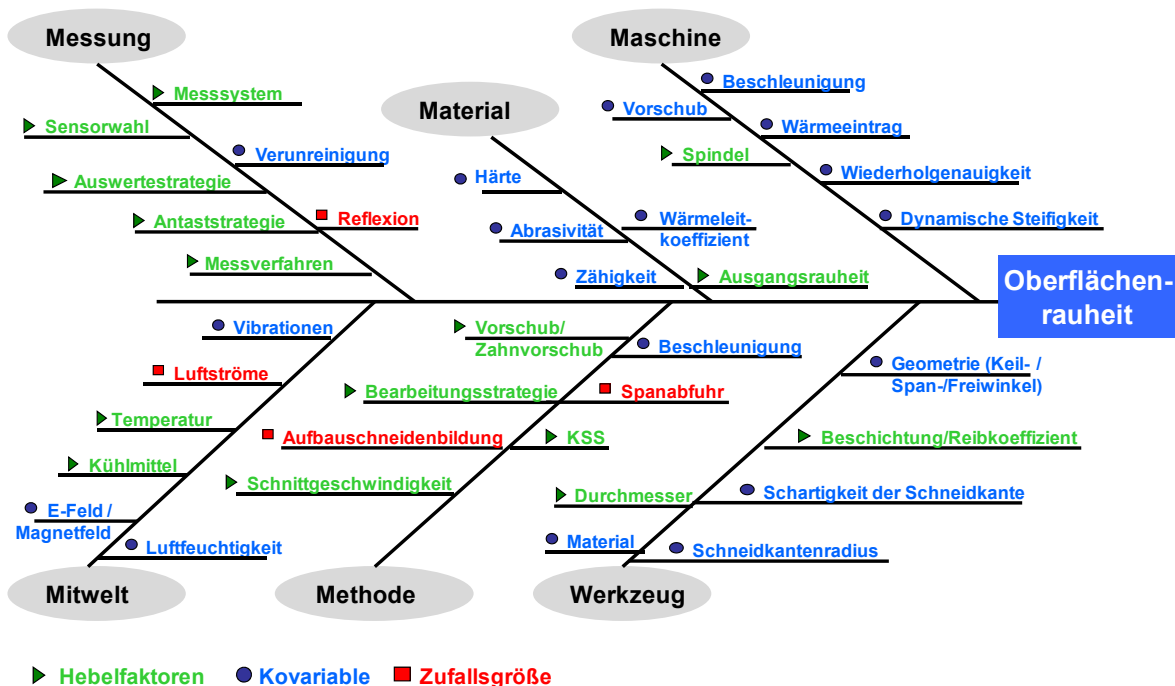


Abbildung 4.8: Strukturierte Einflüsse auf den Prozess Mikrofräsen

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass eine Vielzahl an Prozessparametern, Umwelteinflüssen etc. einen Effekt auf den Fertigungsprozess und somit die Variabilität des Qualitätsergebnisses hat. Nur ein geringer (aber immer noch großer) Teil dieser Einflüsse ist direkt manipulierbar und somit als Regelgröße verwendbar. Um die Variabilität von Mikrofertigungsprozessen zu senken, muss der Zusammenhang zwischen diesen Hebelfaktoren untereinander und deren Wechselwirkung zu den Kovariablen und der Ergebnisvariablen modelliert werden. In ein APC-Modell können nur messbare und über die statistische Versuchsauswertung als statistisch signifikant identifizierte Einflussfaktoren aufgenommen werden. Viele Umweltrandbedingungen oder Prozessparameter, die nicht in die Versuchsplanung aufgenommen wurden

oder die sich als nicht statistisch signifikant während der Versuchsreihe ergaben, sind also nicht in das APC-Modell integriert, haben aber dennoch Einfluss auf den Fertigungsprozess und auf dessen Variabilität. Die Anzahl an Einflussfaktoren, die nicht in dem APC-Modell enthalten sind, müssen daher durch geeignete Methoden und Werkzeuge der SPC wie QRK überwacht werden. Abbildung 4.9 zeigt die Notwendigkeit einer aktiven Regelung einer (begrenzten) Anzahl an Einflussfaktoren sowie den Bedarf nach einer Überwachung der restlichen Einflüsse auf den Mikrofertigungsprozess.

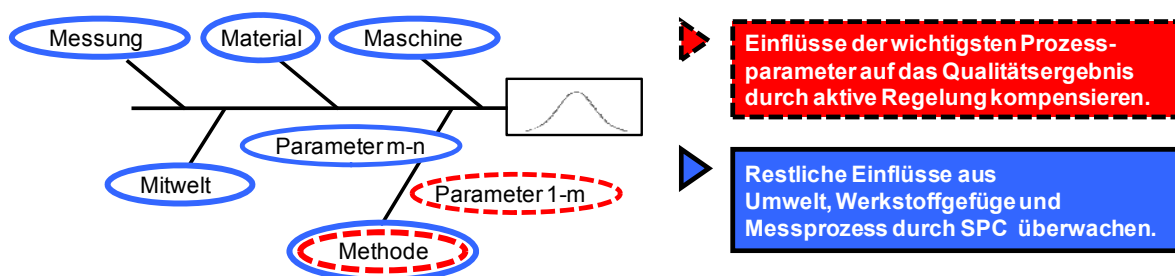


Abbildung 4.9: Unterscheidung der Einflussfaktoren nach APC-Regelung oder SPC-Überwachung

4.3 Quantifizierung der Einflüsse auf das Qualitätsergebnis

Wie im vorangegangenen Kapitel 4.2 aufgezeigt, muss für eine aktive Regelung von Mikrofertigungsprozessen der Zusammenhang zwischen den Hebefaktoren untereinander und deren Wechselwirkung zu den Kovariablen und der Ergebnisvariablen quantifiziert und in eine funktionale Beziehung gesetzt werden. Hierzu müssen empirische Versuchsreihen in systematischer Weise durchgeführt werden, um auf den Ergebnissen aufbauend einen funktionalen Zusammenhang zwischen Einfluss- und Zielvariablen aufzustellen (Abbildung 4.10).

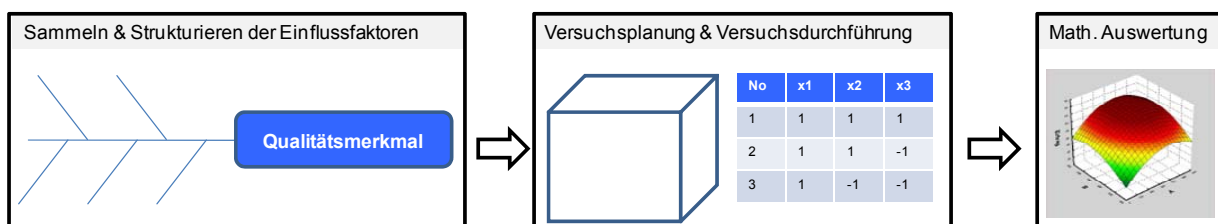


Abbildung 4.10: Von den Prozesseinflüssen zum mathematischen Modell

Wie Abbildung 2.3 und Abbildung 4.8 verdeutlicht, ist bei Fertigungsprozessen im Mikrobereich mit einer großen Anzahl an Einflussfaktoren auf den Fertigungsprozess und damit implizit auch auf das Qualitätsergebnis gegeben. Aufgrund der engen Toleranzanforderung für geometrische Qualitätsmerkmale im Mikrobereich und aufgrund der Größeneffekte (Kapitel 2.1.1), ist im Vergleich zur Makrowelt eine größere Anzahl an Einflussfaktoren (z.B. Gefüge, Temperatur, Staub etc.) bedeutend für das Qualitätsergebnis. Für das genannte Beispiel Mikrofräsen haben etwa die Schneidkantenverrundung und Gefügeeigenschaften des Werkstoffmaterials (Kornverteilung, Korngröße, Lunker, Einschlüsse, Risse etc.) differenzierte und größere Einflüsse auf die erzielbare Oberflächengüte und Werkzeugstandzeiten als im Makrobereich.

Im Mikrobereich gibt es also zum Einen eine Vielzahl an potentiellen Einflussfaktoren auf den Fertigungsprozess. Zum Anderen herrscht ein weniger stark fundiertes Expertenwissen über die Rangfolge oder Priorität der Effekte der Einflussfaktoren auf die Zielgröße. Um in einem **ersten Schritt** die Anzahl der Einflussfaktoren auf ein überschaubares Maß zu reduzieren, können qualitative oder quantitative Methoden verwendet werden. Qualitative Methoden, wie die Nutzwertanalyse oder Punktevergabe durch ein Expertengremium, bieten den Vorteil, in kurzer Zeit eine Rangfolge der wichtigsten Einflussfaktoren zu bestimmen. Nachteilig ist die subjektive Bewertung der einzelnen Einflussfaktoren durch ein Expertenteam. Um ein objektiveres aber unter Umständen kostenintensiveres Ergebnis zur Priorisierung der Einflussfaktoren zu erhalten, bieten sich s.g. Screening Experimente [Wal94, Mon05] aus der statistischen Versuchsmethodik wie (teil-)faktorielle Versuchspläne 1. Ordnung, Gruppensiebpläne, Placket-Burmann Designs etc. an. Über die Durchführung einer möglichst geringen Anzahl an empirischen Versuchen mit wenigen – i.d.R. zwei – Faktorstufen lassen sich die wichtigsten Faktoren bzw. Einflüsse identifizieren. Abbildung 4.11 zeigt die generelle Schrittfolge bei Anwendung der statistischen Versuchsmethodik.

In einem **zweiten Schritt** müssen für die 2 bis 4 wichtigsten Einflussfaktoren [Kle06, Mon05] weitere empirische Versuche gefahren werden, um ein möglichst realitätsnahes und detailliertes mathematisches Modell zur Abbildung des eigentlichen Mikrofertigungsprozesses erstellen zu können. Hierbei sollten (voll-) faktorielle Versuchspläne mit mehr als zwei

Faktorstufen, mit Zentralpunkt und evtl. Sternpunkten zum Einsatz kommen. Zur Identifikation einer Faktorstufenkombination, für welche ein Optimum der Ergebnisvariable erreicht wird bzw. zur detaillierten Analyse dieses Optimalgebiets bieten sich Methoden des steilsten Anstiegs, die Simplex Methode und Evolutionsverfahren an.

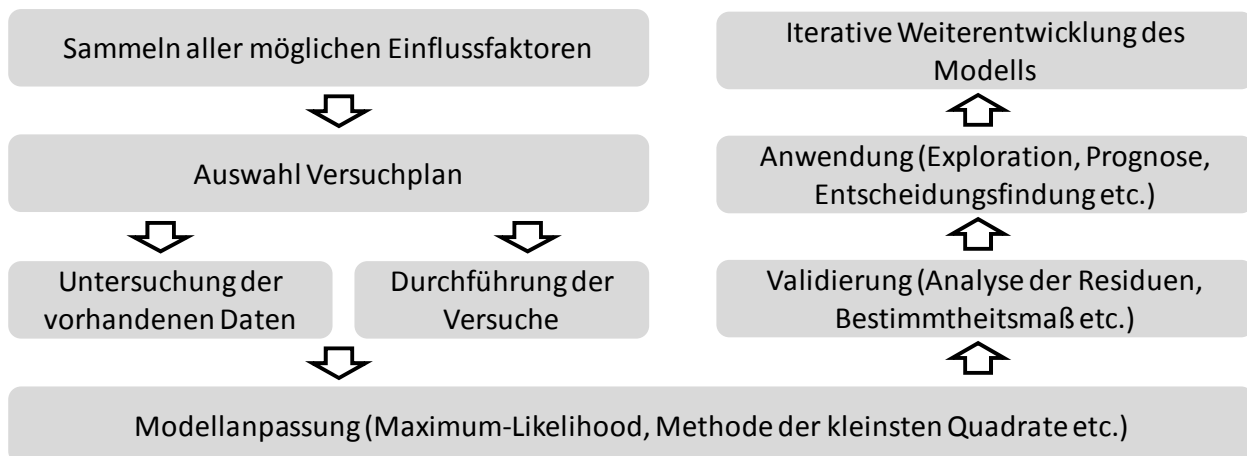


Abbildung 4.11: Ablauf der statistischen Versuchsmethodik

Zur einfachen Anwendbarkeit der Methode wird empfohlen, sich im ersten Schritt auf teil- und im zweiten Schritt auf vollfaktorielle Versuchspläne zu beschränken. Im Anschluss an die Versuche werden die Faktorstufenkombinationen der jeweiligen Ergebnisvariable zugeordnet und über mathematische Methoden wie Varianzanalyse und multiple Regression die statistisch signifikanten Einflussfaktoren zu einem gegebenen Vertrauensbereich identifiziert – d.h. es wird ein empirisches Modell zwischen Einflussfaktoren und Zielgröße mathematisch aufgestellt. Einfach beschrieben wird eine mathematische Funktion (linear, quadratisch etc.) so zwischen die realen empirischen Daten gelegt, dass die Summe der quadrierten Abweichungen der empirischen Werte (Y_i) mit den vorhergesagten Werten durch die mathematische Funktion (\hat{Y}_i) minimiert wird (Methode der Kleinsten Quadrate). Als Gütekriterium für die mathematische Anpassung wird daher in einem **dritten Schritt**, neben der Überprüfung der Residuen (=Abweichung zwischen den realen empirischen Daten und dem Modellergebnis) auf Normalverteilung und auffällige Trends, i.d.R. das korrigierte Bestimmtheitsmaß R_{corr}^2 gewählt.

$$R_{corr}^2 = 1 - (1 - R^2) \cdot \frac{(n-1)}{(n-p-1)} \quad (4-1)$$

n gibt die Anzahl der Datensätze, p die Anzahl der Regressoren (=Einflussfaktor, der im Modell verwendet wird) und R^2 das unbereinigte Bestimmtheitsmaß an:

$$R^2 = \frac{Cov(X,Y)^2}{Var(X) \cdot Var(Y)} \quad (4-2)$$

Als Ergebnis sollte ein mathematisches Modell hoher Güte ($R_{corr}^2 > 0,8$) stehen, welches den Effekt der Faktoren (erklärende Variablen) auf die Zielgröße (Qualitätsmerkmal) darstellt. Grundlage hierfür sind empirisch gewonnene Daten. Dieses mathematische Modell dient in der Folge zur Prognose der Zielgröße für die untersuchten Faktorkombinationen.

4.4 Reglerentwurf

Nachdem in Kapitel 4.2 die Einflussgrößen auf den Mikrofertigungsprozess identifiziert und in Kapitel 4.3 der funktionale Zusammenhang zwischen Einflussgrößen und Qualitätsergebnis aufgestellt wurde, kann mit dem Entwurf des eigentlichen Reglers begonnen werden. Ziel ist der Entwurf eines Regelkreises für die Variabilitätsreduzierung der geometrischen Qualitätsmerkmale von Mikrofertigungsprozessen. Die Regelungsaufgabe besteht darin, bekannte Störeinflüsse auf den Fertigungsprozess - wie z.B. einen zunehmenden Werkzeugverschleiß bei der Mikrozerspanung - durch Anpassung der Stellgrößen zu kompensieren. Dadurch soll die Variabilität der produzierten Werkstücke hinsichtlich des untersuchten Qualitätsmerkmals verringert werden. Das betrachtete Qualitätsmerkmal stellt daher die gesuchte Regelgröße dar.

Für die Messung der Kovariablen gelten für Mikrofertigungsprozesse u.U. erschwerte Messbedingungen (z.B. dynamische Steifigkeit der Werkzeugmaschine, Charakterisierung des Werkzeugzustands beim Mikrospanen aufgrund von Aufbauschneiden, elektrische Leitfähigkeit des Bauteils beim Erodieren, Messung der Wellenlänge und Pulsdauer bei der Laserablation etc.). Je nach Art der Kovariablen ist zu unterscheiden, ob die Messung in-line, d.h. während der Bearbeitung, oder nur off-line, d.h. nach der Bearbeitung erfolgen kann.

Es ergibt sich ein Regelkreis mit den drei Hauptkomponenten Regler, Überwachung und Kovariablenschätzung (Abbildung 4.12). Letztere ist vorgesehen, um der Problematik einer Messung der Kovariablen gerecht zu

werden. Um beispielsweise den Werkzeugzustand zeit- und kosteneffizient zu charakterisieren, muss die Kovariable aus einer anderen, im Prozess zugänglichen Messgröße ermittelt werden.

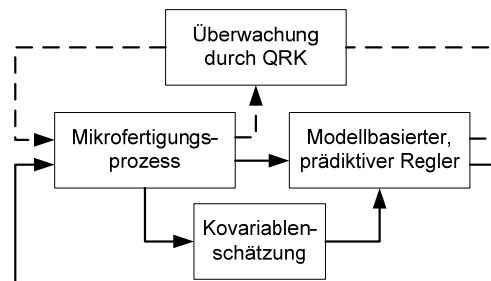


Abbildung 4.12: Hauptkomponenten des Regelkreises

4.4.1 Modellbildung

Es wird zum Einen ein Modell für die Vorhersage des Qualitätsmerkmals unter den aktuellen Prozess- und Umweltbedingungen benötigt. Dazu dient das in Kapitel 4.3 hergeleitete Regressionsmodell, welches die Regelgröße in Abhängigkeit der Hebel- und Kovariablen beschreibt. Zum Anderen muss ein Modell zur Schätzung der Kovariable(n) erstellt werden.

4.4.1.1 Umsetzung des Regelalgorithmus

Der modellbasierte Regler soll ausgehend von einer Vorhersage des zukünftigen Wertes der Regelgröße und einer Schätzung der Kovariablen prädiktiv eine Anpassung der Hebel- und Rauschfaktoren vornehmen, um die Qualitätsanforderungen schon im nächsten Prozessdurchlauf (wieder) einzuhalten. Das Kernstück des Reglers bildet somit das Regressionsmodell aus Kapitel 4.3, welches die Abhängigkeit des Qualitätsmerkmals (als Regelgröße) von den Prozessvariablen und -kovariablen beschreibt.

Sei y eine Zielgröße bzw. ein Qualitätsmerkmal hergestellter Bauteile. Es wird ein Regressionsmodell 2. Ordnung folgender Gestalt ausgewählt:

$$y = \beta_0 + \beta_1^T X + \beta_2^T Z + X^T \mathbf{B}_1 Z + X^T \mathbf{B}_2 X + \varepsilon \quad (4-3)$$

wobei $X, \beta_1 \in R^{m \times 1}$, $Z, \beta_2 \in R^{n \times 1}$, $\mathbf{B}_1 \in R^{m \times n}$ und $\mathbf{B}_2 \in R^{m \times m}$. In Formel (4-3) werden die kontrollierbaren Einflussgrößen (Hebel- und Rauschfaktoren) durch den Vektor X , die Kovariablen jeweils durch den Vektor Z repräsentiert. Die Modellkoeffizienten sind in β_0 (skalar), β_1 , β_2 (über Vektoren), \mathbf{B}_1 , \mathbf{B}_2 (über Matrizen) ausgedrückt. Der Modellfehler wird durch ε dargestellt.

4.4.1.2 Reglerstruktur

Die Regelung erfolgt in den folgenden Schritten:

1. Kontinuierliche Aufnahme der Hebelfaktoren und einer oder mehrerer weiterer Prozessgrößen zur Schätzung der Kovariablen.
2. Vorhersage der Regelgröße auf Basis des Prozessmodells.
3. Abgleich von vorhergesagtem mit dem Sollwert der Regelgröße.
4. Entscheidung, ob Anpassung notwendig ist.
 - JA: Anpassung der Stellgrößen.
 - NEIN: Kein Eingriff durch den Regler.

Abbildung 4.13 zeigt die Struktur des prädiktiven Regelkreises und die Funktionsweise des Reglers für einen beliebigen Mikrofertigungsprozess.

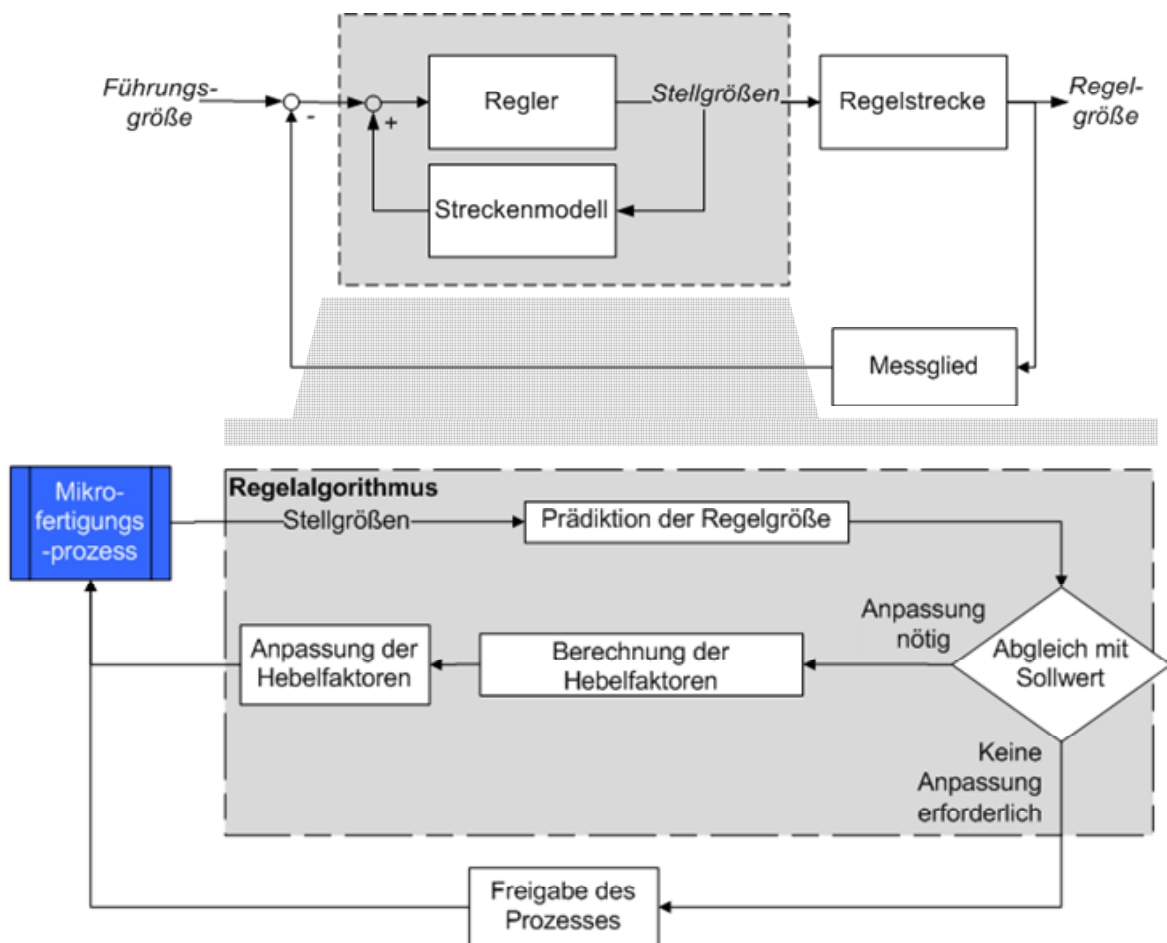


Abbildung 4.13: oben: Struktur des prädiktiven Regelkreises
unten: Funktionsprinzip des Regelalgorithmus

4.4.2 Umsetzung der Kovariablenschätzung

Unter der Annahme, dass die Kovariablen nicht direkt messbar sind, muss eine Schätzfunktion bestimmt werden. Diese kann auf einer oder mehreren weiteren, direkt verfügbaren Messgrößen beruhen und auf theoretischen oder empirischen Überlegungen basieren. Das Ergebnis der Kovariablenschätzung wird als zusätzliche Eingangsgröße an den Regelalgorithmus übertragen (siehe Abbildung 4.14).

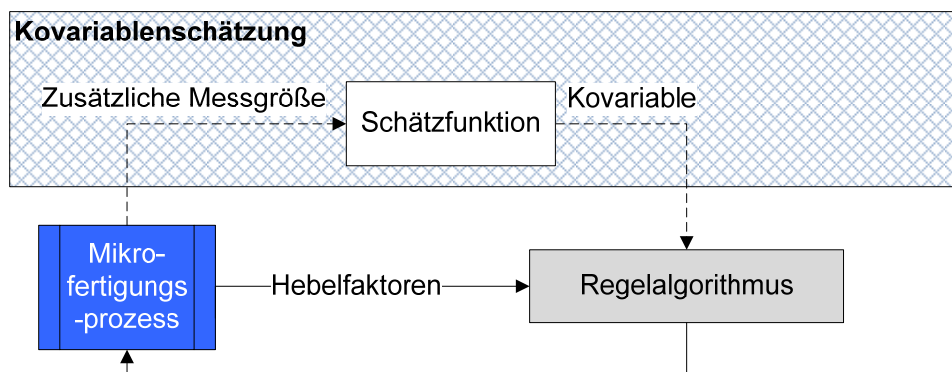


Abbildung 4.14: Integration der Kovariablenschätzung

4.4.3 Regelungs- und Optimierungsalgorithmus

Auf der Basis des Regressionsmodells aus Gleichung (4-3) kann nun ein Regelungsansatz entwickelt werden. Folgende Annahmen werden getroffen.

- Der Fertigungsprozess ist zeitinvariant und demzufolge auch das den Fertigungsprozess repräsentierende Prozessmodell in Gleichung (4-3). Dies bedeutet, dass sich alle geschätzten Modellkoeffizienten (β_0 , β_1 , β_2 , \mathbf{B}_1 und \mathbf{B}_2) über die Zeit nicht verändern. Es existiert keine Dynamik zwischen Input und Output.
- Die Hebelfaktoren X , die Kovariablen Z und die Residuen ε sind voneinander unabhängig. Der Erwartungswert von ε ist gleich Null. Die Modellresiduen ε sind unabhängig und identisch verteilt mit der Varianz σ_ε^2 . Die Unsicherheit der Auswirkung der Messung oder Schätzung der Kovariablen auf die Zielgröße wird durch die Kovarianzmatrix Σ_Z repräsentiert.
- Es gibt eine Möglichkeit, den Wert der Kovariablen Z in-line und frei vom systematischen Fehler zu bestimmen. Das impliziert, $E[\hat{Z} - Z] = 0$ und $\text{cov}[\hat{Z} - Z | \hat{Z}] = \Sigma_Z$

4.4.3.1 Ableitung der Regelungs- bzw. Optimierungsfunktion

Der Wunsch einer Regelung geht einher mit der Forderung nach reproduzierbaren Prozessergebnissen. In anderen Worten soll die Zielgröße bzw. das Qualitätsmerkmal y so nah wie möglich am Sollwert τ gehalten werden. Daher wird in der Regel folgende quadratische Verlustfunktion L verwendet, um die Leistungsfähigkeit der Regelung zu beurteilen (vgl. [Ham00]):

$$L(y, \tau) = (y - \tau)^2 \quad (4-4)$$

Bezogen auf das Prozessmodell in Gleichung (4-3) und unter Berücksichtigung der gemessenen bzw. geschätzten Kovariablen \hat{Z} kann gezeigt werden, dass sich folgende Gütefunktion J für die Regelung formulieren lässt:

$$J(x | \hat{Z}) = E_{Z, \varepsilon}[L(y, \tau)] = E_{Z, \varepsilon}[(y - \tau)^2] = (E_{Z, \varepsilon}(y) - \tau)^2 + \text{Var}_{Z, \varepsilon}(y) \quad (4-5)$$

Die Indizes bei $E(\cdot)$ und $\text{Var}(\cdot)$ weisen jeweils darauf hin, auf welche Zufallsvariablen der Erwartungswert bzw. die Varianz fokussiert. Folgende Beziehungen wurden für den Erwartungswert und Varianz in Gleichung (4-5) hergeleitet (siehe Anhang A.2 für vollständige Herleitung):

$$\begin{aligned} E_{Z, \varepsilon}[(y)] &= E_{Z, \varepsilon}[\beta_0 + \beta_1^T X + \beta_2^T Z + X^T B_1 Z + X^T B_2 X + \varepsilon] \\ &= \beta_0 + \beta_1^T X + E_Z[\beta_2^T Z] + E_Z[X^T B_1 Z] + X^T B_2 X \\ &= \beta_0 + \beta_1^T X + \beta_2^T \hat{Z} + X^T B_1 \hat{Z} + X^T B_2 X \end{aligned} \quad (4-6)$$

$$\text{Var}_{Z, \varepsilon}(y) = (\beta_2 + B_1^T x)^T \sum_z (\beta_2 + B_1^T x) + \sigma_\varepsilon^2 \quad (4-7)$$

Setzt man die Gleichung (4-6) und (4-7) in die Gleichung (4-5) ein, so erhält man folgenden Ausdruck für die zu optimierende Funktion:

$$\begin{aligned} J(x | \hat{Z}) &= (\beta_0 - \tau + \beta_1^T X + \beta_2^T \hat{Z} + X^T B_1 \hat{Z} + X^T B_2 X)^2 + \\ &\quad (\beta_2 + B_1^T x)^T \sum_z (\beta_2 + B_1^T x) + \sigma_\varepsilon^2 \end{aligned} \quad (4-8)$$

Die optimale Regelung ist dann diejenige, welche die kontrollierbaren Einflussgrößen x so auswählt, dass Gleichung (4-8) unter Beachtung der jeweiligen oberen und unteren Grenzen der Hebelfaktoren minimiert wird. Das entspricht der folgenden mathematischen Aufgabe:

$$X^* = \min_{x \in [X_{\min}, X_{\max}]} J(x | \hat{Z}) \quad (4-9)$$

In Gleichung (4-9) stellen X_{\min} und X_{\max} jeweils die oberen und unteren Grenzen der Hebelfaktoren dar, die bei der Versuchsmethodik festgelegt wurden. Sie müssen als Nebenbedingung eingesetzt werden, da das Prozessmodell von Gleichung (4-3) nur in diesem Bereich gültig ist.

Zur Lösungsfindung von Gleichung (4-9) wird vorgeschlagen die „evolutionäre Optimierungsmethode“ (engl. Differential Evolution, DE) zu verwenden. Es handelt sich hierbei um einen im Jahr 1995 von Price und Storn entwickelten einfachen und leistungsfähigen Optimierungsalgorithmus, der in der Lage ist, das globale Minimum einer mehrveränderlichen Funktion unter Beachtung von Restriktionen zu finden (vgl. [Feo06]). Der DE-Algorithmus wird unter anderem verwendet, um die optimale Regelung zu suchen, nachdem die Gütefunktion aufgestellt wurde [Feo06]. Aufgrund seiner Leistungsfähigkeit wurde der DE-Algorithmus in die Statistik-Software R implementiert. In Abbildung 4.15 ist der Regelungsansatz graphisch dargestellt.

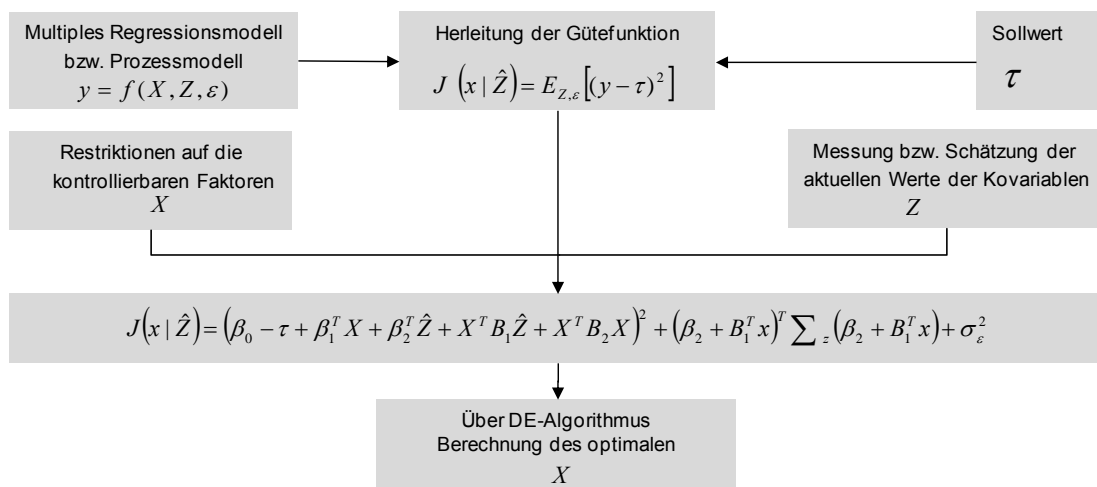


Abbildung 4.15: Entwurf des Regelungsansatzes

4.4.3.2 Erweiterte Reglerstruktur

Um die Effektivität der Regelung zu erhöhen, werden weitere Kontrollschritte eingeführt. Zunächst erfolgt der Abgleich des Vorhersagewertes nicht mit dem Sollwert des Qualitätsmerkmals, sondern mit einem Grenzwert, der zusätzlich zu den Sollwert- und Toleranzvorgaben eingeführt wird. Durch dieses Regelkriterium wird zum Einen verhindert, dass der Regler zu früh und zu häufig in den Prozess eingreift. Zum Anderen soll die Einführung des Grenzwertes zu Verringerung der Streubreite beitragen.

Hintergrund ist die folgende Überlegung: Werte der Regelgröße, die im Bereich zwischen dem Grenzwert und der absoluten Toleranzgrenze liegen, sind allesamt noch zulässig. Allerdings ist die Gefahr die Toleranzgrenze zu überschreiten höher, wenn der vorhergesagte Wert bereits nahe an dieser liegt. In diesem Fall sollte bereits eine Anpassung der Stellgrößen erfolgen. Auf diese Weise wird der Sicherheitsabstand zur Toleranzgrenze vergrößert und die Streuung des Qualitätsmerkmals insgesamt verringert. Unter der Annahme, dass die Streuung um die Hälfte reduziert werden soll, erfolgt die Wahl des Grenzwertes und der oberen Toleranzgrenze für ein einseitig toleriertes Qualitätsmerkmal y im Rahmen dieser Arbeit nach folgender Vorschrift:

$$y_{\text{grenz}} = y_{\text{soll}} + 3 \cdot \frac{\sigma_{\text{Alt}}}{2} = y_{\text{soll}} + 3 \cdot \sigma_{\text{Neu}}^* \quad (4-10)$$

$$y_{\text{max}} = y_{\text{soll}} + 3 \cdot \sigma_{\text{Alt}} \quad (4-11)$$

Anschaulich bedeutet das, dass neue Grenzen eingeführt außerhalb derer die Regelung greift. Diese neue $+/-3\sigma_{\text{Neu}}^*$ -Grenze liegt einer Verteilung zugrunde, die nur noch die Hälfte der ursprünglichen Prozessstreuung σ besitzt. Die Regelung hat zum Ziel, alle Werte, die zwischen den „alten“ ($=y_{\text{max}}$) und den neuen Grenzen ($=y_{\text{grenz}}$) liegen, näher an den Sollwert zu verlagern (Abbildung 4.16).

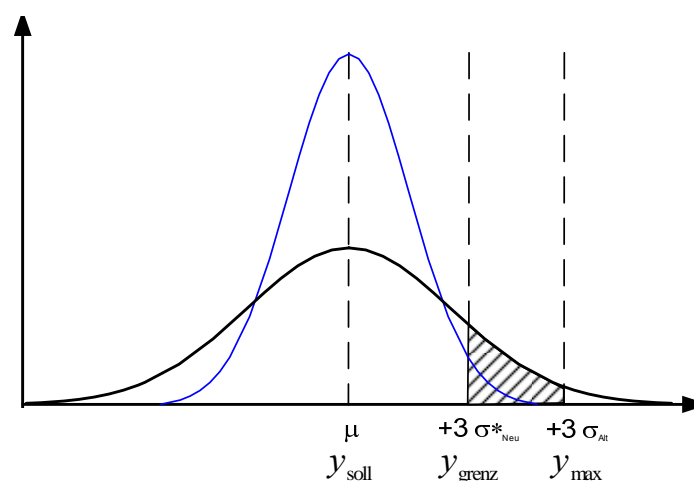


Abbildung 4.16: Veranschaulichung der Rolle des Grenzwertes

Die Werte des schraffierten Bereiches werden durch die zusätzliche Eingriffsgrenze „nach links“ verschoben, so dass sie innerhalb der

schmalere Verteilung zu liegen kommen. Für ein zweiseitig toleriertes Merkmal muss entsprechend zusätzlich eine untere Grenze berechnet werden.

Als zweite Kontrollmöglichkeit erfolgt nach der Berechnung der neuen Stellgrößen erneut eine Vorhersage des zukünftigen Wertes des Qualitätsmerkmals mit den angepassten Werten. Dabei wird verglichen, ob es unter den gegebenen Bedingungen überhaupt möglich ist, innerhalb der Toleranzgrenzen zu fertigen.

4.4.4 Umsetzung der Prozessüberwachung

Als letzte Komponente muss eine geeignete Prozessüberwachung entwickelt werden. Im Reglermodell werden nur die bekannten Störungen und die gemäß der Auswertung der empirischen Versuche identifizierten statistisch signifikanten Prozessparameter (siehe Abbildung 4.9) berücksichtigt. Grundsätzlich muss daher die Qualität der erzeugten Produkte überwacht werden, um solche Störungen und Einflüsse, die im APC-Prozessmodell nicht berücksichtigt sind (Kapitel 4.4.3.1) zeitnah zu erkennen.

Zusätzlich muss über die Zeit sicher gestellt sein, dass der Regler nach wie vor funktionsfähig ist und nicht zusätzliche Einflüsse im Prozess wirken, die die Vorhersagefähigkeit der Modelle beeinträchtigen (Kapitel 4.4.3.2). Es muss also eine ständige Überwachung der Güte des Reglermodells erfolgen.

Drittens muss bei den hohen Genauigkeitsanforderungen der Messprozess überwacht und eine Trennung der Streuung von Fertigungs- und Messprozess erfolgen.

4.4.4.1 Überwachung der Produktqualität

Das überwachte Qualitätsmerkmal stellt ein ein- oder zweiseitig toleriertes Merkmal dar. Aus den Toleranzen ergeben sich unmittelbar die Grenzen, innerhalb derer das Bauteil die Qualitätsanforderungen erfüllt. Die QRK dient also hauptsächlich zur Visualisierung des zeitlichen Verlaufs und zur Überwachung der Prüfgröße.

Hierfür kann bei der ersten Implementierung der Regelung in der Fertigung eine einfache Urwertkarte – mit steigender Prozessstabilität auch eine Shewhart-QRK - mit entsprechenden Eingriffsgrenzen verwendet werden. Sobald der Prozess ausreichend stabil ist, kann die 100%-Prüfung durch eine Stichprobenstrategie ersetzt werden, deren Abstände mit zunehmender

Prozessstabilität vergrößert werden können. Dies entspricht dem gängigen Vorgehen in der statistischen Prozessregelung (vgl. Kapitel 2.2).

4.4.4.2 Überwachung der Reglerfunktion

Die Aufgabe der Reglerüberwachung ist es, zu gewährleisten, dass die verwendeten Modelle den Prozess weiterhin hinreichend genau wiedergeben. Das bedeutet, dass sowohl das zugrunde liegende empirische Modell des Qualitätsmerkmals als auch die Schätzfunktion der Kovariablen realitätsnahe Werte ausgeben müssen. Nur dann sind die Voraussetzungen für eine effiziente Ausregelung der vorhandenen systematischen Störungen gegeben.

Um die Adäquatheit des Merkmalmodells zu bewerten, eignet sich eine normale Shewhart-QRK des Prognosefehlers (Abbildung 4.17). Dieser gibt die Abweichung zwischen dem Vorhersagewert des Modells und dem tatsächlichen Wert des Qualitätsmerkmals an.

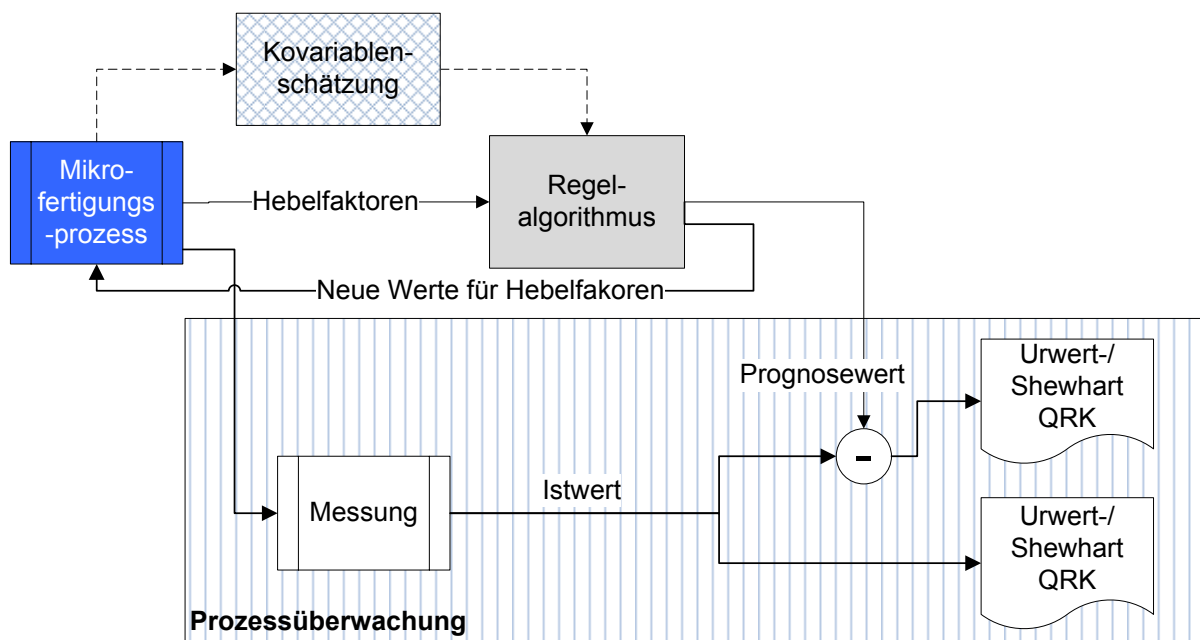


Abbildung 4.17: Integration der Prozessüberwachung

Wie zu Beginn des Abschnittes dargelegt wurde, kann die Urwertkarte durch eine Shewhart-QRK für Stichprobenmittelwerte ersetzt werden, sobald der Prozess hinreichend stabil ist.

Anmerkung zur Korreliertheit

Die in dieser Arbeit behandelte Regelungsaufgabe bezieht sich wie die klassischen Anwendungsbereiche der SPC auf eine Teilefertigung. Das verwendete Modell des Qualitätsmerkmals berücksichtigt nur eine oder mehrere prozessinhärente, das heißt bekannte systematische Einflüsse. Es wird daher angenommen, dass die Messwerte eines Qualitätsmerkmals wie beispielsweise die Geometrie zweier aufeinander folgender Werkstücke weiterhin hinreichend unabhängig voneinander bleiben, wenn nur diese bekannten Einflüsse ausgeregelt werden. Spezielle (unbekannte) Störeinflüsse werden sich nach wie vor in den Messwerten widerspiegeln und durch die Regelung nicht überdeckt werden. Daher wird die Unkorreliertheit der Daten für die Anwendung der SPC als ausreichend erfüllt angesehen, so dass die Standardausführung des QRK-Designs angewendet werden kann.

4.4.4.3 Überwachung des Messprozesses

Da eine Überwachung des Messprozesses und die Trennung der Streuung von Fertigungs- und Messprozess einer detaillierten Untersuchung bedarf, wird diese Problematik separat in den Kapiteln 4.6 und 4.7 behandelt.

4.4.5 Ergebnis

In Abbildung 4.18 ist ein detailliertes Flussdiagramm des entwickelten Regelkreises dargestellt. Es setzt sich aus der Kovariablenschätzung, der übergeordneten Überwachung sowie der erweiterten Reglerstruktur zusammen. Als Eingangsgrößen dienen im laufenden Prozess die aktuellen Werte der Stellgrößen x_n und der geschätzten Kovariablen \hat{z}_i . Das Dach '^' bezeichnet auftretende Schätzgrößen. Ausgehend von dieser Datenlage führt der Regler zum Zeitschritt t folgende Schritte durch:

1. Vorhersage des nächsten Wertes der Regelgröße: $\hat{y}_{t+1} = f(x_{n,t}, \hat{z}_{i,t})$.
2. Abgleich: Schätzwert < Grenzwert?
JA: Es ist keine Anpassung notwendig.
NEIN: Eine Anpassung ist erforderlich. → Schritt 3 und 4
3. Minimieren der Zielfunktion $f = (y_{soll} - \hat{y}_{t+1})^2$ unter Berücksichtigung des aktuellen Wertes der Kovariablen.
4. Übermitteln der neuen Stellgrößen.

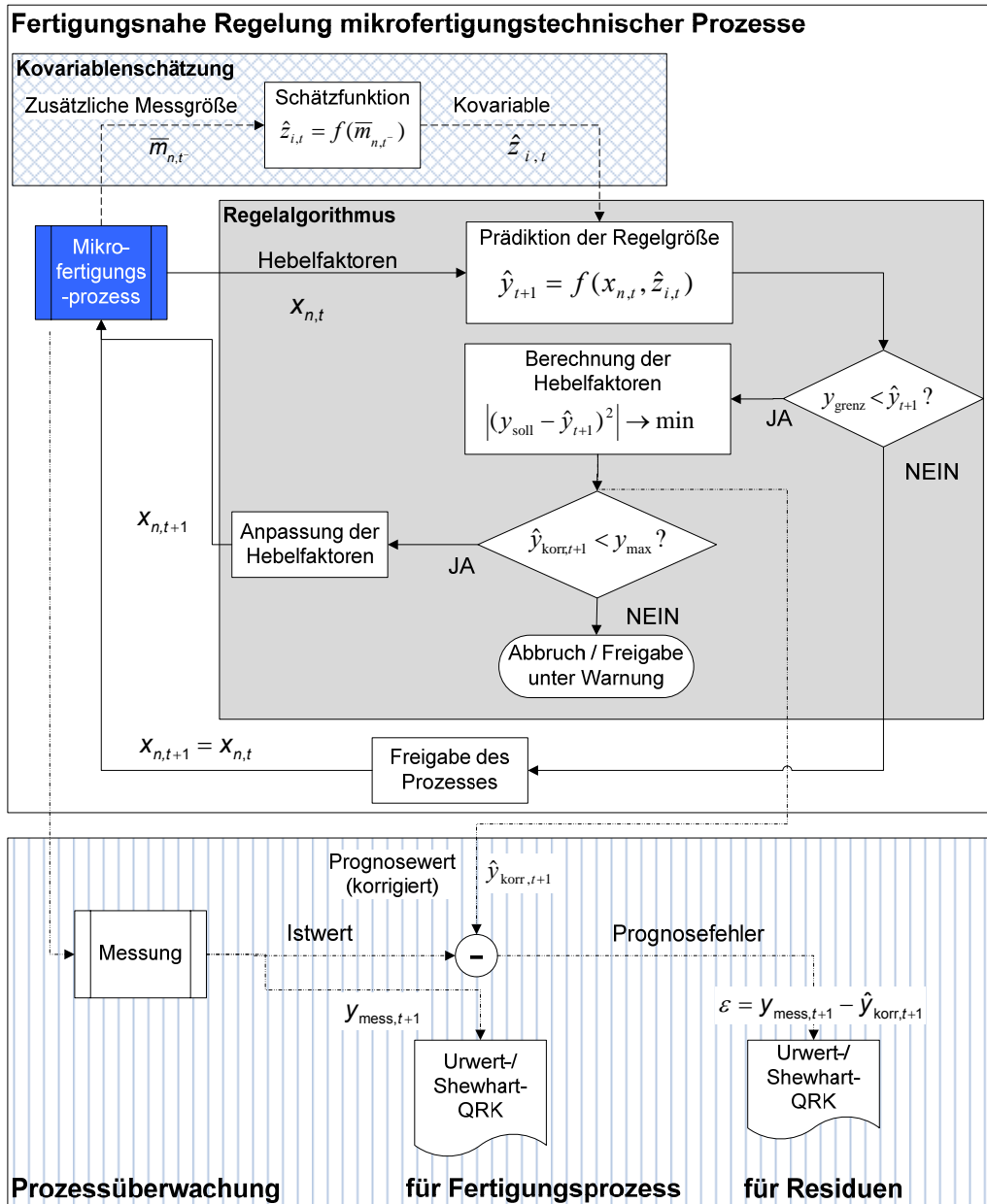


Abbildung 4.18: Struktur des Qualitätsregelkreises mit übergeordneter Überwachung mittels QRK

4.5 Statistische Verteilungsmodelle geometrischer Mikroqualitätsmerkmale

SPC und QRK eignen sich sehr gut um den Prozess und die Güte des APC-Modells zu überwachen. Wie in Kapitel 2.2 erläutert, setzt die Anwendung von SPC-Methoden und QRK die Kenntnis der statistischen Verteilung des zu überwachenden Qualitätsmerkmals voraus. Diese statistische Verteilung ist für die Berechnung der EG einer QRK (Abbildung 4.3), der Berechnung der Fähigkeitsindices (c_p oder c_{pk}) und der Berechnung des Grenzwerts y_{grenz}

der APC-Regelung notwendig. Im produktionstechnischen Umfeld sind ca. 85 % der Qualitätsmerkmale durch die Fein- und Grobgestalt eines Bauteils festgelegt [Wec99]. Aufgrund kleinster Strukturen und Strukturdetails mit höchsten Genauigkeitsanforderungen besteht die Möglichkeit, dass die Grenzen zwischen Fein- und Grobgestalt im Mikrobereich „verschwimmen“ [Hor05, Buc08]. Daher müssen die zugrunde liegenden statistischen Verteilungsmodelle dieser geometrischen Qualitätsmerkmale für Mikrobauteile bestimmt werden, bevor mit einer Regelung der Mikrofertigungsprozesse begonnen werden kann.

4.5.1 Empirische Untersuchungen

Um einen universellen Ansatz zu gewährleisten, erfolgte die Bestimmung der statistischen Verteilungen durch empirische Versuchsreihen an unterschiedlichen Fertigungsverfahren. Über die Verfahren Mikrofunktenerosion, Laserablation und Mikrofräsen wurden einfache Geometrien (siehe Abbildung 4.19) in einer größeren Stückzahl je Verfahren (> 100 Stück) in Stahl X38CrMoV5-1 hergestellt. Die geometrischen Qualitätsmerkmale wurden unter idealen Bedingungen (Prozess eingefahren, kein Chargenwechsel des Materials etc.) ohne Durchführung von Prozessparametervariationen hergestellt.

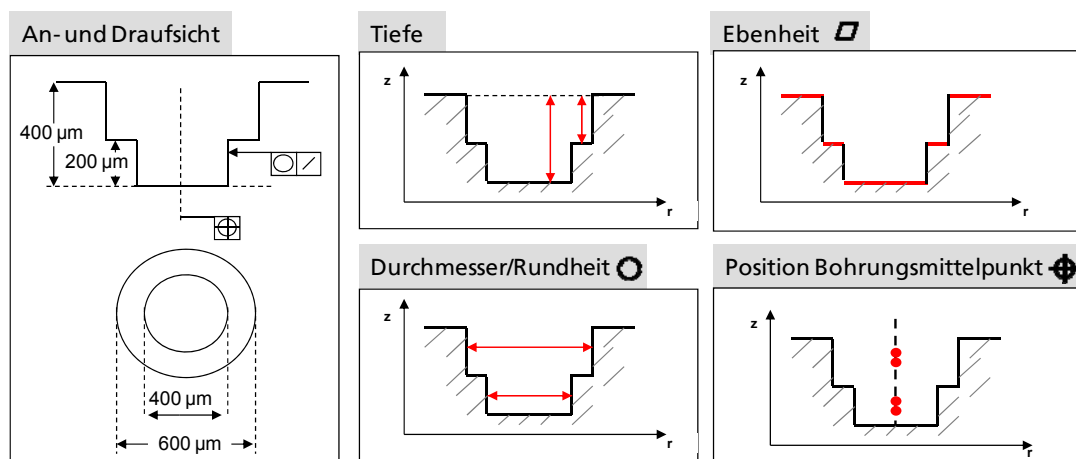


Abbildung 4.19: Skizze der gefertigten Bauteile mit Sollwerten

Die gefertigten Bauteile wurden anschließend mit dem multisensoriellen KMG Werth Videocheck HA® auf die Grobgestalt und mit einem Weißlichtmikroskop Typ Nanofocus µ-surf® [Nan01] auf die Feingestalt charakterisiert. Das Werth-KMG ist mit zwei Strahlengängen von jeweils 10-facher Vergrößerung ausgestattet (Abbildung 4.20). Als Sensoren standen

ein optisch-taktiler Werth-Fasertaster, ein Bildverarbeitungssensor, ein Autofokussensor sowie ein Focault-Laser-Sensor zur Verfügung. Das Weißlichtmikroskop μ surf® der Firma NanoFocus ist mit 4 Objektiven mit 10-, 20-, 50- und 100-facher Vergrößerung ausgestattet (siehe Tabelle 5.6).

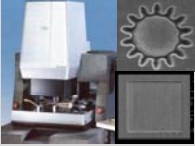
	Spezifikation Werth Videocheck HA
Messbereich	X=400-600 mm, Y=400-650 mm, Z=200 mm
maximale Längenmessabweichung (bei $T=20^{\circ}\text{C} \pm 1\text{K}$, $\Delta T=0,5\text{ K/h}$)	$E_1=(0,5+L/500)\ \mu\text{m}$ $E_2=(0,7+L/400)\ \mu\text{m}$ $E_3=(1,5+L/300)\ \mu\text{m}$
laterale Auflösung der Bildverarbeitung	0,9 μm

Abbildung 4.20: Daten zum eingesetzten Koordinatenmessgerät [Wer07]

Die Messungen erfolgten unter idealen Laborbedingungen. Um die anschließenden statistischen Verteilungsannahmen unabhängig von der gewählten Antaststrategie zu gestalten, wurden die Qualitätsmerkmale in einem ersten Schritt mit einer größeren Anzahl an Messpunkten charakterisiert und anschließend der Einfluss einer abnehmenden Teilmenge der Anzahl von Messpunkten untersucht (Tabelle 4.2). Die Auswertung der Messpunkte erfolgte dabei nach dem Gauß-Kriterium (siehe auch [Wec99]).

Merkmal	Sollwert	# Messpunkte	Messposition
Tiefe	-0,2 mm	{4, 8, 32}	$r = 0,25\text{ mm}$
Tiefe	-0,4 mm	{4, 8, 32}	$r = 0,17\text{ mm}$
Ebenheit	0 mm	{4, 8, 32}	$r = \{0,17; 0,25; 0,4\text{ mm}\}$
Durchmesser	0,4 mm	{4, 8, 32, 64}	$z = \{-0,25; -0,275; -0,3\text{ mm}\}$
Durchmesser	0,6 mm	{4, 8, 32, 64}	$z = \{-0,05; -0,075; -0,1\text{ mm}\}$
Position Bohrungsmittelpunkt	(0;0) mm	{4, 8, 32, 64}	$z = \{-0,05; -0,075; -0,1; -0,25; -0,275; -0,3\text{ mm}\}$

Tabelle 4.2: Untersuchte Merkmale am Beispiel des Mikrofräsprozesses

Bei der Anpassung einer Verteilung wurden zunächst graphische Hilfsmittel wie Histogramme und Quantilplots verwendet. Nach der Annahme eines Verteilungstyps und dessen Verifikation über statistische Verteilungstestverfahren wurden die entsprechenden Verteilungsparameter nach dem Maximum-Likelihood Prinzip geschätzt. Eine detaillierte Beschreibung der Auswertung jedes Qualitätsmerkmals für die unterschiedlichen Mikrofertigungsverfahren würde den Rahmen der schriftlichen Ausarbeitung des vorliegenden Dokuments sprengen. Daher werden im Folgenden nur die Ergebnisse dargestellt. Für eine detaillierte Beschreibung des Vorgehens und der Auswertungen wird auf [Lan07] und [Pet06] verwiesen.

4.5.2 Ergebnis

Anhand graphischer Kontrolle, statistischer Kennwerte und statistischer Tests wurden die statistischen Verteilungen von geometrischen Mikroqualitätsmerkmalen bestimmt. Es zeigte sich, dass für eine Charakterisierung der Grobgestalt der einzelnen Qualitätsmerkmale eine Antastpunktzahl von mindestens 8, besser 32 Messpunkten zu wählen ist [Lan07, Pet07].

Einseitig begrenzte Qualitätsmerkmale wie Ebenheit, Rundheit etc. können am Besten mit der log-Normalverteilung modelliert werden. Qualitätsmerkmale, welche sich aus zwei Werten (= z.B. Position des Bohrungsmittelpunktes - Abweichung in x- und y-Richtung) zusammensetzen, können in der Mikrowelt sehr gut durch die Raileigh-Verteilung angepasst werden. Zweiseitig begrenzte Qualitätsmerkmale wie Tiefe, Durchmesser etc. können am Besten mit der Normalverteilung modelliert werden.

Tabelle 4.3 zeigt zusammengefasst die untersuchten Fein- und Grobgestalt-Qualitätsmerkmale und die jeweiligen statistischen Verteilungen. Es konnte gezeigt werden, dass die in [Die05] gelisteten Verteilungstypen für Makro-Qualitätsmerkmale zum Großteil auch in der Mikrowelt verwendet werden können. Lediglich für die einseitig begrenzten Qualitätsmerkmale (1. Zeile in Tabelle 4.3) empfiehlt [Die05] die Verwendung der Betragsverteilung 1. Art. Es sei hierbei angemerkt, dass die Log-Normalverteilung und die Betragsverteilung 1. Art jedoch in großen Teilen als sehr ähnlich bezeichnet werden können.

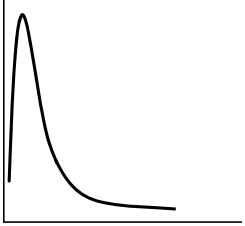
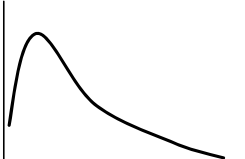
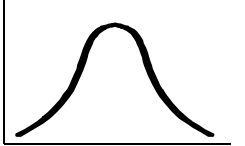
Qualitätsmerkmal	Mathematische Beschreibung der Verteilung	Abbildung
Ebenheit Rundheit Zylindrizität Parallelität Rechtwinkligkeit Rundlauf Symmetrie Rauheit (Sollwert=0)	Log-Normalverteilung $\rightarrow f(x) = \frac{1}{x * \sigma * \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}}$ $0 \leq x < \infty ; \mu > 0; \sigma > 0$	
Position Koaxialität	Raileigh Verteilung $\rightarrow f(x) = \frac{x}{b^2} e^{-x^2/2b^2}$ $0 \leq x < \infty ; b > 0$	
Längenmaße wie Durchmesser, Tiefe und Abstand Rauheit (Sollwert>0)	Normalverteilung $\rightarrow f(x) = \frac{1}{\sigma * \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$ $0 \leq x < \infty ; \mu > 0; \sigma > 0$	

Tabelle 4.3: Analyierte Qualitätsmerkmale und resultierende Verteilungsmodelle

4.6 QRK zur simultanen Visualisierung von Fertigungs- und Messprozess

Messdaten weisen immer eine Überlagerung der Streuung von Fertigungsprozess und Messprozess auf. Im Falle der Mikroproduktionstechnik und den geforderten Genauigkeiten, ist im Gegensatz zur Makrowelt die Messstreuung bei der SPC und der Führung von QRK nicht mehr zu vernachlässigen. In den folgenden Kapiteln wird daher schrittweise eine mikrospezifische QRK entwickelt, welche es erlaubt, Fertigungsprozess und Messprozess zu visualisieren, zu überwachen und zu trennen. In Kapitel 4.7 wird das vorgeschlagene QRK-Design anhand verschiedener Szenarien (Lageveränderung des Fertigungsprozesses, Erhöhung der Messstreuung) verifiziert.

4.6.1 Aufbau der multivariaten EWMA-Karte

4.6.1.1 Überwachung des Messprozesses

Zur Charakterisierung der Feingestalt und somit der Oberflächenrauheit von Mikrobauanteilen bieten sich wie in Kapitel 2.1.2 aufgezeigt optische

Verfahren wie die konfokale Weißlichtmikroskopie an. Zur Charakterisierung der Grobgestalt von Mikrobauteilen werden Multisensor-KMG empfohlen. In beiden Fällen ist die flexible und praxisnahe Ermittlung der Messunsicherheit über einen experimentellen Ansatz gegeben, welcher auf Wiederholmessungen von werkstückähnlichen kalibrierten Artefakten aufbaut.

Die Identifikation eines systematischen Messfehlers E kann über Messungen an einem Normal oder einem hinreichend genau kalibrierten Artefakt, welches dem zu untersuchenden Werkstück „ähnlich“ ist [DIN 32881-3] quantifiziert werden. Anschließend muss der gemessene Wert um den systematischen Messfehler E korrigiert werden oder eine Korrektur der EG der QRK hat zu erfolgen. Um den Fall einer Verschiebung des Messsystems um einen systematischen Messfehlers E_t über die Zeit zu entdecken, werden Wiederholmessungen an einem Normal oder einem kalibrierten „ähnlichen“ Artefakt in kontinuierlichen Zeitabständen empfohlen. Hierdurch kann eine Verschiebung des Mittelwerts der Wiederholmessungen vom richtigen Wert des Referenzartefakts festgestellt werden.

Der Umgang mit dem zufälligen Messfehler ist dagegen schwieriger, da auch dieser sich über die Zeit ändern kann und sich die Herausforderungen einer einfachen Quantifizierung und anschließenden Kompensation stellt.

Darüber hinaus sind Mikrobauteile relativ zu deren Abmessungen und zu den geforderten Toleranzen mit hohen Gestaltabweichungen behaftet. Dies bedeutet, dass abhängig von den einzelnen Fertigungsverfahren Konizitäten, Riefen, Verrundungen etc. an den Mikrobauteilen zu beachten sind. Eine Auflistung solcher fertigungsbedingter Gestaltabweichungen für die Mikroproduktionstechnik findet man in [Fle07c] und [Alb08]. Referenzmessungen an Mikrobauteilen, die über Laserablation, Funkenerosion, Mikrofräsen und Mikro-PIM hergestellt wurden, zeigten eine hohe Antastabweichung im Vergleich zur Messung von Normalen.

So wurden über das Verfahren Laserablation Stege unterschiedlicher Breite in gehärtetem Stahl X38 hergestellt. Anschließend wurde die Breite der Stege auf unterschiedlichen Messhöhen über den opto-taktilen Werth-Fasertaster an 8 Stellen je 25 mal wiederholt gemessen (Abbildung 4.21). Mit der gleichen Messstrategie wurde anschließend ein 500 μm breites Endmaß ebenfalls wiederholt gemessen.

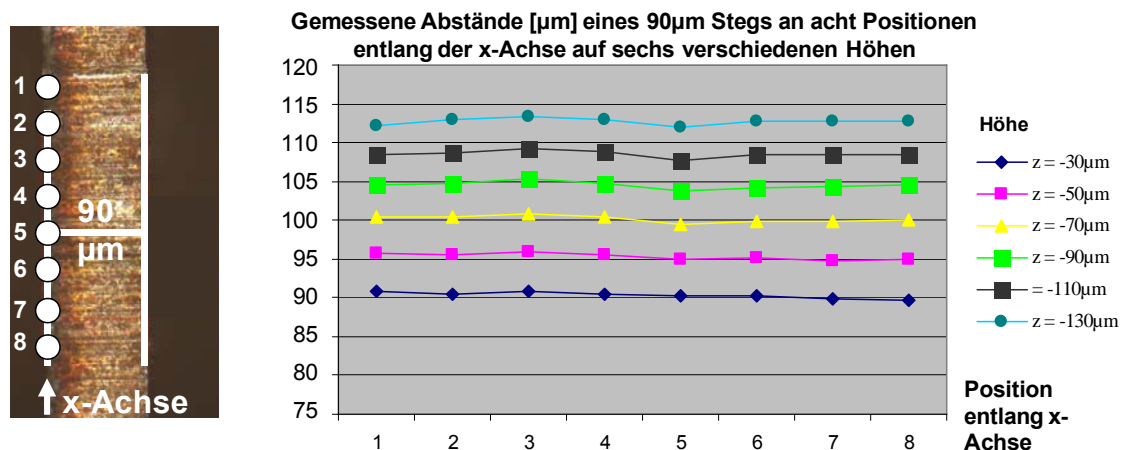


Abbildung 4.21: Charakterisierung der fertigungsbedingten Gestaltabweichung am Beispiel Laserablation [Fle07c]

Aufgrund der stark variierenden Oberflächenrauheit entlang des gelaserten Balkens und der Konizität der Struktur aufgrund der gaußförmigen Strahlintensität der Laserquelle ergibt sich eine große Streuung der Antastwerte im Vergleich zu denen der Endmaßmessung. In Tabelle 4.4 sind links die Antastabweichungen der Einzelmesspunkte und rechts ausgewertet nach der Ebenheit der beiden Mikroartefakte dargestellt. Dabei sind jeweils der Maximal- und der Durchschnittswert über den gesamten Bereich als auch die Standardabweichung aus den Wiederholmessungen angegeben.

Alle Werte in µm	Antastabweichung				Ebenheit/Auflage			
	Bereich		Stand.abw.		Bereich		Stand.abw.	
	Max	Ø	Max	Ø	Max	Ø	Max	Ø
Gelaserte Steg (490 µm)	3,62	2,03	0,77	0,44	2,08	1,56	0,45	0,35
Endmaß (500 µm)	0,59	0,35	0,13	0,08	0,26	0,26	0,07	0,05

Tabelle 4.4: Antastabweichung durch fertigungsbedingte Konizität und Rauheit des SFB 499-Fertigungsverfahrens Laserablation [Fle07c]

Es lässt sich schließen, dass sich einzelne Komponenten eines sich ändernden Messunsicherheits(MU)-Budgets aufgrund äußerer Einflüsse (Temperaturwechsel, Verunreinigungen auf dem Bauteil) zu einem Teil über Wiederholmessungen quantifizieren lassen. Mikrobauteile weisen zum Teil starke Formabweichungen bezogen auf deren Abmessung und den geforderten Toleranzen auf. Für die Prüfung der aktuellen Messgüte bedeutet dies, dass die Wiederholmessungen nicht an kalibrierten Normalen,

sondern direkt an aktuell gefertigten Bauteilen kontinuierlich durchgeführt werden müssen. In der Durchführung von Wiederholmessungen an einem oder mehreren gefertigten Objekten besteht somit eine einfache und effektive Vorgehensweise zur Aufnahme der aktuellen Messstreuung und damit zur Charakterisierung der Güte des aktuellen Messprozesses.

Aus den Wiederholmessungen lässt sich die Messstreuung über die Berechnung der korrigierten Standardabweichung berechnen:

$$s_{M,t} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (4-12)$$

Die Werte der Standardabweichung können in eine normale Shewhart- s -Karte eingetragen werden. Bei Annahme einer normalverteilten Grundgesamtheit – wie es bei Wiederholmessungen der Fall ist - mit Standardabweichung σ gilt (vgl. [Fah04]):

$$\frac{(n-1)}{\sigma_{M,t}^2} s_{M,t}^2 \sim \chi_{(n-1)}^2 \quad (4-13)$$

Die Eingriffsgrenzen ergeben sich für die Shewhart- s -Karte ($q_{\gamma;(n-1)}$ bezeichne das γ -Quantil der χ^2 -Verteilung mit $n-1$ Freiheitsgraden) zu:

$$UEG = \sqrt{\frac{q_{\alpha/2;(n-1)}}{n-1}} \cdot \sigma_{M,t} \quad OEG = \sqrt{\frac{q_{(1-\alpha/2);(n-1)}}{n-1}} \cdot \sigma_{M,t} \quad (4-14)$$

Da $\sigma_{M,t}$ unbekannt ist, muss ein Referenzwert der Messstreuung ($s_{M,REF}$) unter Idealbedingungen quantifiziert werden. Zur Berechnung der Referenzmessstreuung $s_{M,REF}$ stehen folgende zwei Vorgehen zur Verfügung:

1. Gemäß DIN 32881-3 werden 20 Wiederholmessungen an einem kalibrierten Referenzobjekt, welches den gefertigten Bauteilen möglichst ähnlich ist unter idealen Bedingungen durchgeführt. Die hieraus berechnete Stichprobenstandardabweichung kann als Referenzwert zur Berechnung der Eingriffsgrenzen genommen werden. Nachteilig an diesem Vorgehen ist die Tatsache, dass im Mikrobereich bisher nur wenige werkstückähnliche Normale zur Verfügung stehen, da der derzeitige Stand der Technik der Mikrofertigungsverfahren die Herstellung „optimaler“ Referenzobjekte nicht erlaubt [Buc08]. Wenn aber keine den Werkstücken hinreichend „ähnliche“ Referenzobjekte zur Verfügung stehen, kann

der Referenzwert einer Messstreuung an einem Normal auch nicht als stellvertretend für die Messstreuung an den realen Werkstücken stehen. Das geschilderte Beispiel der Streuung der Messergebnisse der gelaserten Balken im Vergleich zu denen des Endmaßes unterstreicht diesen Eindruck.

2. Besser ist also ein Vorgehen, welches keine kalibrierten Referenzobjekte voraussetzt, sondern der Referenzwert der Messstreuung an den realen gefertigten Werkstücken abgeleitet wird. „Verfahren 3“ zur Bestimmung der Messmittelfähigkeit [Die04] fordert, 20 Werkstücke aus dem Fertigungsprozess zu entnehmen und jedes dieser Werkstücke zweimal unter Idealbedingungen zu messen. Die hieraus berechnete Stichprobenstandardabweichung kann als Referenzwert zur Berechnung der Eingriffsgrenzen verwendet werden.

Um dem Mangel an „idealen“ und den realen Werkstücken hinreichend ähnlichen Referenzobjekten zu begegnen, wird das Verfahren 3 zur Bestimmung der Messmittelfähigkeit gewählt. Durch kontinuierliche Wiederholmessungen einzelner oder einer Stichprobe an gefertigten Mikrobauanteilen kann somit auf einfache Weise die Streuung des Messprozesses visualisiert und überwacht werden (Abbildung 4.22). Als Ergebnis erhält man eine QRK zur Überwachung der Güte des Messprozesses.

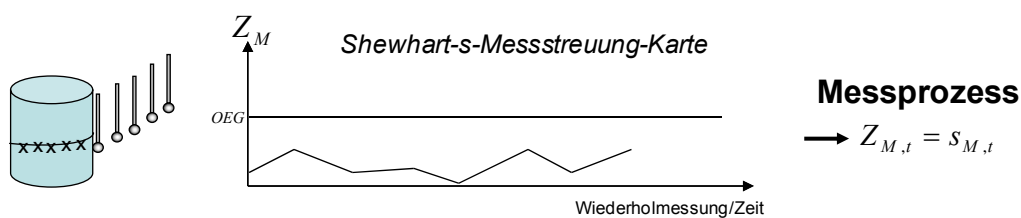


Abbildung 4.22: Shewhart-s-Karte zur Überwachung des Messprozesses

4.6.1.2 Überwachung des Fertigungsprozesses

Zur Überwachung des Fertigungsprozesses wird eine EWMA-QRK (exponentially weighted moving average) verwendet. Die EWMA-Karte wurde aufgrund deren Fähigkeit, kleinste Abweichungen der aktuellen Lage vom Sollwert schnell zu entdecken (s.g. Shift), gewählt (u.a. [Mon91]). Vor dem Hintergrund höchster Genauigkeitsanforderungen und der Forderung auch kleine Abweichungen möglichst rasch kenntlich zu machen, ist diese

EWMA-Fähigkeit prädestiniert für eine Verwendung in der Mikroproduktion.

Die EWMA-Karte gehört zu den QRK mit Gedächtnis. Stichprobenwerte aus der Vergangenheit werden hierbei mit abklingenden Gewichten gemittelt. Für die Berechnung der Prüfgröße $Z_{P,t}$ werden nicht alle bis zu dem Zeitpunkt vorhandenen Stichprobenwerte benötigt, sondern nur der letzte eingetragene Wert sowie der Messwert der aktuellen Stichprobe ($x_{P,t}$). Die Prüfgröße lässt sich also rekursiv beschreiben:

$$Z_{P,t} = \lambda \cdot x_{P,t} + (1 - \lambda) \cdot Z_{P,t-1} \quad \lambda \in (0;1) \quad (4-15)$$

Je größer also der Glättungsparameter λ gewählt wird, desto geringer ist der Einfluss zurückliegender Stichproben. Wählt man $\lambda = 1$ so erhält man eine normale Shewhart- \bar{x} -QRK.

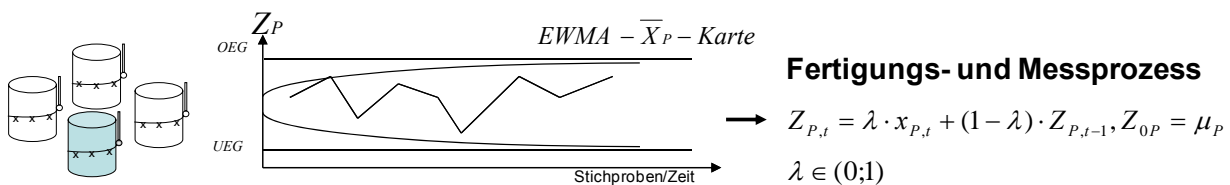


Abbildung 4.23: EWMA-Karte zur Überprüfung des Fertigungsprozesses

Die Berechnung der EG bei der EWMA-Karte erfolgt prinzipiell auf die gleiche Weise wie bei der Shewhart- \bar{x} -Karte. Es wird bei ungestörtem Prozess von unabhängig normalverteilten Einzelwerten mit Erwartungswert $\mu = \mu_0$ und Standardabweichung σ_P ausgegangen. Die Berechnung der EG für die EWMA-Karte hat daher folgende Form:

$$UEG = \mu_0 - k \cdot \sigma_{P,t} \quad (4-16)$$

$$OEG = \mu_0 + k \cdot \sigma_{P,t}$$

Im Unterschied zur Shewhart- \bar{x} -Karte ist die Standardabweichung der Prüfgröße auch bei ungestörtem Prozess nicht konstant. Bei der EWMA-Karte hängt die Varianz der Prüfstatistik und damit auch die Lage der EG vom Zeitpunkt t ab (Abbildung 4.23). Bei obigen Annahmen über die Verteilung der Einzelwerte ist die Varianz der EWMA-Prüfgröße [Mit93a]:

$$\sigma_{P,t}^2 = \frac{\sigma_P^2}{n} \cdot \frac{\lambda}{2 - \lambda} \cdot (1 - (1 - \lambda)^{2t}) \quad (4-17)$$

Durch Einsetzen in die Gleichungen für UEG und OEG lässt sich die Lage der EG berechnen. Für $t \rightarrow \infty$ ergibt sich die asymptotische Varianz der EWMA-Statistik, womit sich asymptotische EG errechnen lassen. Laut [Rin95] wird dieser asymptotische Wert „meist schon rasch in guter Näherung“ erreicht.

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \sigma_{P,t}^2 = \frac{\sigma_p^2}{n} \cdot \frac{\lambda}{2 - \lambda} \quad (4-18)$$

Festlegung der EWMA-Designparameter

Die Designparameter der EWMA- \bar{x} -Karte sind der Stichprobenumfang n , der Glättungsfaktor λ und die Lage der EG als ein Vielfaches k der Standardabweichung der Prüfgröße. Gibt man den Stichprobenumfang n nach betrieblichen Gesichtspunkten vor, müssen noch λ und k festgelegt werden. Zur Bestimmung dieser zwei Parameter wird die mittlere Lauflänge bei ungestörtem Prozess $ARL(0)$ und ein kritischer Shift δ , der zuverlässig entdeckt werden soll, also für den die mittlere Lauflänge $ARL(\delta)$ möglichst klein sein soll, vorgegeben.

Zur mittleren Lauflänge der EWMA-Karte wurden Studien unter anderem in [Cro89] und [Luc90] durchgeführt. In den Veröffentlichungen sind Tabellen und Plots der mittleren Lauflänge für verschiedene Werte für λ und k zu finden. Für die Wahl der Parameter wird das Vorgehen nach [Cro89] angewendet:

1. Schritt: Festlegen von $ARL(0)$ und $|\delta|$

Die mittlere Laufzeit bei ungestörtem Prozess $ARL(0)$ kann zum Beispiel auf Grundlage wirtschaftlicher Überlegungen (Kosten bei Fehlalarm) erfolgen. Bei der Wahl des kritischen Shift δ spielen auch technische Überlegungen, wie zum Beispiel vorgegebene Toleranzen eine Rolle.

2. Schritt: Optimale Wahl der Glättungskonstanten λ

λ wird so gewählt, dass die mittlere Laufzeit $ARL(\delta)$ nach Eintritt des kritischen Shift möglichst kurz ist.

3. Schritt: Bestimmung von k

Aus den Tabellen wird nun mit dem in Schritt 2 bestimmten λ der Parameter k so gewählt, dass die entsprechende EWMA-Karte die in Schritt 1 festgelegte Anforderung an die $ARL(0)$ erfüllt.

Als Ergebnis folgen aus den Kapiteln 4.6.1.1 und 4.6.1.2 zwei parallel zu führende QRK. Die erste QRK (= Shewhart- s -Karte) trägt die korrigierte Standardabweichung resultierend aus den Wiederholmessungen an einem oder mehreren gefertigten Mikrobauteilen ab. Damit ist eine stichprobenhafte Überwachung des Messprozesses möglich.

Die zweite QRK (= EWMA-Karte) trägt die Stichprobenmittelwerte der Messdaten einer Stichprobe an gefertigten Mikrobauteilen über eine EWMA-Transformation auf. Diese EWMA-Karte wird zur stichprobenhaften Überwachung des Fertigungsprozesses verwendet. Es wird jedoch darauf hingewiesen, dass die Daten, die über die EWMA-Karte visualisiert und überwacht werden somit immer noch einer Überlagerung der Streuung des Fertigungsprozesses als auch des Messprozesses unterliegen.

4.6.1.3 Multivariates Design

Um dem Anwender ein einfaches und visuelles Instrument für die Entscheidung, ob Fertigungs- und Messprozess unter Kontrolle sind, zu geben, wird die Darstellung eines multivariaten Designs für die Führung der beiden Qualitätsregelkarten vorgeschlagen (Abbildung 4.24).

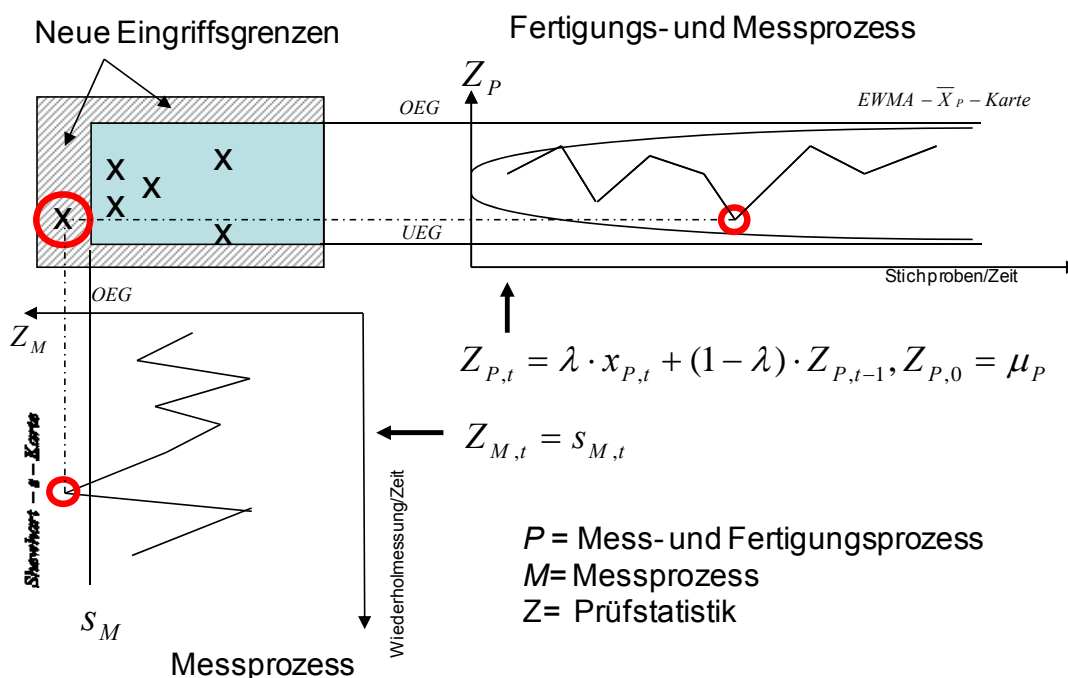


Abbildung 4.24: Multivariate EWMA-Karte zur Überwachung von Fertigungs- und Messprozess

Hierbei werden die EWMA- \bar{x} -Karte auf der Abszisse und die Shewhart- s -Karte als Ordinate angeordnet. Durch die Verlängerung der EG der horizontalen EWMA-Karte nach links und die Verlängerung der EG der vertikalen Shewhart- s -Karte nach oben entsteht so ein orthogonales Entscheidungsfeld mit drei EG zur Beurteilung des aktuellen Fertigungs- und Messprozesses.

4.6.2 Arbeitsweise der multivariaten EWMA-Karte

4.6.2.1 Simultane Visualisierung von Mess- und Fertigungsprozess

Bei der Führung der multivariaten EWMA-Karte werden zu gegebenen Zeitpunkten Stichproben an gefertigten Bauteilen ausgewählt und eines der Qualitätsmerkmale an jedem der Bauteile charakterisiert:

1. Der Mittelwert der Messwerte wird über die EWMA-Transformation horizontal abgetragen.
2. Ein Bauteil der Stichprobe wird zufällig ausgewählt und mehrmals nach gleicher Messstrategie gemessen. Die korrigierte Standardabweichung aus den Wiederholmessungen wird auf der horizontalen s -Karte abgetragen.
3. Anschließend werden die beiden so ermittelten Werte in dem neu gebildeten orthogonalen Feld zusammengeführt (Abbildung 4.24, links oben).
4. Über eine einfache Entscheidungsmatrix (Abbildung 4.25) kann nun entschieden werden, ob Fertigungs- und/oder Messprozess stabil verlaufen.

Über die multivariate EWMA-Karte besteht somit die Möglichkeit, in einem Diagramm simultan Fertigungs- und Messprozess zu überwachen. Der markierte Fall in Abbildung 4.24 zeigt dabei den Fall, dass der Fertigungsprozess unter Kontrolle, die Streuung des Messprozesses jedoch außerhalb der Eingriffsgrenze liegt - also zu groß ist.

4.6.2.2 Ursachendiagnose und Entscheidungsfälle

Bei dem durch die Verlängerung der EG der Shewhart- s -Karte und der EWMA- \bar{x} -Karte gebildeten orthogonalen Entscheidungsfeld, können vier Fälle unterschieden werden. Diese vier Fälle sind in Abbildung 4.25, der s.g. Entscheidungsmatrix abgebildet.

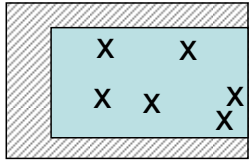
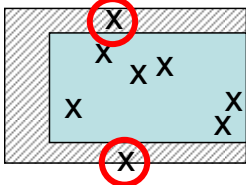
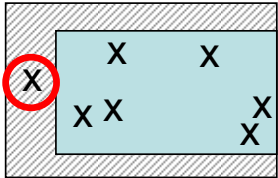
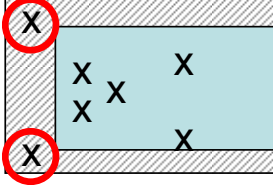
	<i>Fertigungsprozess unter Kontrolle</i>	<i>Horizontale Eingriffsgrenzen unter- oder überschritten</i>
<i>Messprozess unter Kontrolle</i>	<p>Kein Eingriff erforderlich!</p> 	<p>Eingriff in den Fertigungsprozess.</p> 
<i>Vertikale Eingriffsgrenze überschritten</i>	<p>Eingriff in den Messprozess.</p> 	<p>Unkenntnis über Ursache der Grenzverletzung: Mess- und /oder Fertigungsprozess?</p> 

Abbildung 4.25: Entscheidungsmatrix der multivariaten EWMA-Karte

Fall 1 (Abbildung 4.25, oben links):

Sowohl Fertigungs- als auch Messprozess befinden sich innerhalb der EG. Es ist somit kein Eingriff erforderlich.

Fall 2 (Abbildung 4.25, unten links):

Die vertikalen EG sind verletzt, d.h. die aktuelle Messstreuung ist zu groß. Die Ursache der Störung muss somit im Messprozess gesucht werden. Es wird empfohlen, eine Ausreißeruntersuchung beispielsweise durch Boxplot-Analyse, eine Rekalibrierung, eine Reinigung des Bauteils bzw. des Sensors etc. vorzunehmen.

Fall 3 (Abbildung 4.25, oben rechts):

Der Messprozess ist unter Kontrolle. Jedoch ist eine der horizontalen EG unter- oder überschritten, d.h. die Lage des Fertigungsprozesses ist nicht mehr unter Kontrolle. Daher wird ein Nachjustieren bzw. Anpassen der Prozessparameter oder die Untersuchung auf Werkzeugverschleiß etc. empfohlen.

Fall 4 (Abbildung 4.25, unten rechts):

Sowohl die horizontalen als auch die vertikalen EG sind für eine Stichprobe verletzt, d.h. sowohl Fertigungs- als auch Messprozess scheinen außer Kontrolle zu sein. Es gilt zu beachten, dass die Berechnung der EWMA-Werte

auf den Messdaten der Stichprobe aufbaut. Die EWMA-Daten sind also immer noch durch die Überlagerung der Streuung von Mess- und Fertigungsprozess charakterisiert. Daher ist im Fall 4 keine klare Aussage möglich, ob die vorliegende Verletzung der EG am Fertigungsprozess, am Messprozess oder an beiden liegt.

4.6.3 Ergebnis

Zusammenfassend lässt sich schließen, dass die multivariate EWMA-Karte den Vorteil einer getrennten Visualisierung von Fertigungs- und Messprozess bietet. Darüber hinaus vereinfacht die Kombination der EG von Fertigungs- und Messprozess die Datenanalyse. Durch das orthogonale Entscheidungsfeld besteht so die Möglichkeit, eine Korrelationsanalyse durchzuführen, ob eine Abhängigkeit zwischen Fertigungs- und Messprozess besteht. In drei Fällen liefert die Entscheidungsmatrix eine einfache und klare Empfehlung wie in den einzelnen Situationen zu agieren ist.

Die Herausforderung Fertigungs- und Messprozess voneinander zu trennen, um auch für Fall 4 der Entscheidungsmatrix in der Lage zu sein, eine eindeutige Empfehlung abgeben zu können, muss jedoch noch angegangen werden.

4.7 QRK zur Trennung von Fertigungs- und Messprozess in der Mikroproduktion

4.7.1 Aufbau der multivariaten μ -EWMA-Karte

Um die Streuung von Fertigungs- und Messprozess zu trennen, und somit zu gewährleisten, dass auf der horizontalen EWMA-Karte (Abbildung 4.24) nur der Fertigungsprozess und keine Überlagerung von Fertigungs- und Messprozess abgetragen wird, wird die EWMA-Gewichtungskonstante λ ($0 < \lambda < 1$) als ein Gewichtungsfaktor λ_t abhängig von der aktuellen Messstreuung $s_{M,t}$ verwendet. Der variable Gewichtungsfaktor λ_t dient dabei als Hilfsmittel zur Quantifizierung des Vertrauens in den aktuellen Messprozess. Bei Verwendung dieses variablen Gewichtungsfaktors λ_t wird in der Folge die Bezeichnung „ μ “-EWMA-Karte zur Unterscheidung zu Kapitel 4.6 verwendet. Dabei wird folgendes Schema zu Grunde gelegt:

$$\lambda_t = f(s_{M,t}) \text{ mit} \quad \begin{array}{l} \lambda_t \downarrow \text{ falls } s_{M,t} \uparrow \text{ und} \\ \lambda_t \uparrow \text{ falls } s_{M,t} \downarrow \text{ (} 0 < \lambda_t < 1 \text{)} \end{array} \quad (4-19)$$

Wird ein Bauteil beispielsweise mit einer hohen Standardabweichung der Wiederholmessungen charakterisiert – d.h. diesem Messwert sollte bezüglich dessen Korrektheit nicht vertraut werden – so wird der Messwert und damit der Mittelwert der gesamten Stichprobe in der EWMA-Karte nur niedrig gewichtet (Fall $\lambda_t \downarrow$). Falls dagegen die Standardabweichung aus den Wiederholmessungen niedrig ist, so kann den Messwerten vertraut werden. Der Mittelwert der gesamten Stichprobe wird also hoch gewichtet (Fall $\lambda_t \uparrow$). Dieser einfache funktionale Zusammenhang zwischen Messstreuung $s_{M,t}$ und Gewichtungvariable λ_t (4-19) erlaubt die Trennung der Streuung von Fertigungsprozess und Messprozess. Verwendet man diese Funktion in der multivariaten EWMA-Karte (Abbildung 4.24), so erhält man ein optimiertes QRK-Design, in welcher die (horizontale) EWMA-Karte nur noch den Fertigungsprozess und keine Überlagerung von Fertigungs- und Messprozess abbildet. Dieses im Folgenden als **multivariate μ -EWMA-Karte** bezeichnete Werkzeug erlaubt somit die simultane Visualisierung, Überwachung und Trennung von Fertigungs- und Messprozess.

4.7.2 Arbeitsweise der multivariaten μ -EWMA-Karte

Das vorgeschlagene Vorgehen aus Kapitel 4.7.1 wurde innerhalb des SFB 499 „Prozesskette zur urformenden Herstellung keramischer und metallischer Mikrobauteile“ angewendet. Für die beiden Demonstratorsysteme - ein Mikroplanetengetriebe und eine Mikroturbine (Abbildung 4.26) – wurden die Mikrofertigungsprozesse und der Messprozess über die vorgeschlagene multivariate μ -EWMA-Karte überwacht.

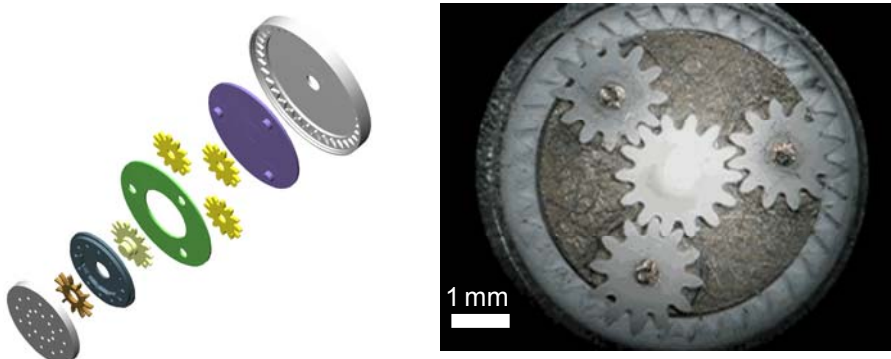


Abbildung 4.26: Explosionszeichnung des SFB Demonstratorsystems (links) und gefertigtes metallisches Mikroplanetengetriebe (rechts) [SFB 499]

Um den funktionalen Zusammenhang zwischen der Standardabweichung aus den Messwiederholungen $s_{M,t}$ und der GewichtungsvARIABLE λ_t (Formel 4-19) zu bestimmen, müssen die folgenden drei Schritte erfolgen.

Erstens muss die Referenzmessstreuung für die gegebene Messaufgabe und den gegebenen Messsensor bestimmt werden. **Zweitens** muss ein Maximalwert für λ_t und optional für $s_{M,t}$ bestimmt werden. Nur dann ist **drittens** die Modellierung einer mathematischen Funktion zwischen λ_t und $s_{M,t}$ möglich. Abbildung 4.27 zeigt eine Übersicht der Schritte, die im Folgenden detailliert erläutert werden.

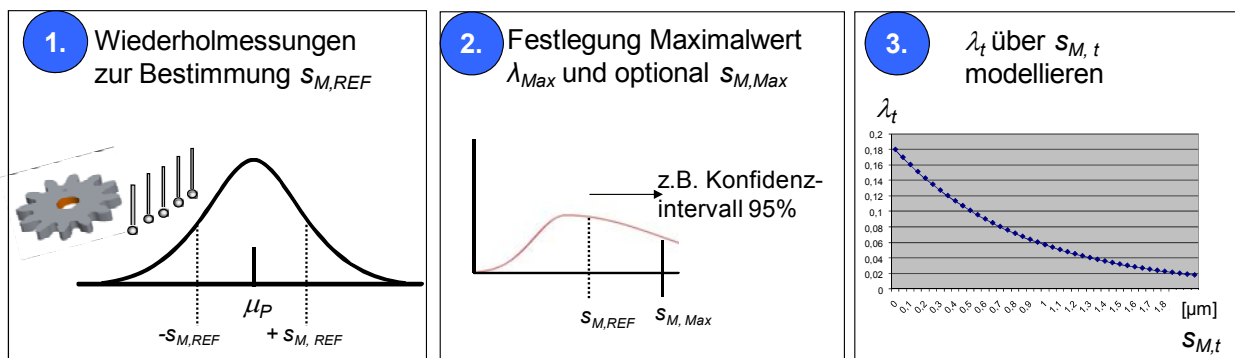


Abbildung 4.27: Bestimmung der Ausgangswerte der μ -EWMA-Karte

4.7.2.1 Festlegung der Referenzmessstreuung $s_{M,REF}$

Um bei einer Anwendung der multivariaten μ -EWMA-QRK eine zu akzeptierende Messstreuung von einer zu hohen Messstreuung nach objektiven Gesichtspunkten zu unterscheiden, muss in einem ersten Schritt die Standardabweichung aus Wiederholmessungen des Messsystems unter idealen Bedingungen quantifiziert werden. Dieser Referenzwert $s_{M,REF}$ kann durch zwei Verfahren ermittelt werden (siehe Kapitel 4.6.1.1). Aufgrund der oft fehlenden hinreichend ähnlichen und genau kalibrierten Mikroartefakte und den im Vergleich zu den geforderten Toleranzen großen fertigungsbedingten Gestaltabweichungen von Mikrobauteilen, wird der Ansatz der Messsystemanalyse nach „Verfahren 3“ [Die04] gewählt. Die zweifache Messung des Innendurchmessers von 20 urgeformten Planeten ergab dabei eine ideale Messstreuung von $0,586 \mu\text{m}$ durch den Werth-Fasertaster. Zur Vereinfachung wird im Folgenden mit einer idealen Referenzmessstreuung von $0,5 \mu\text{m}$ gerechnet.

4.7.2.2 Festlegung der maximal zulässigen Messstreuung $s_{M,Max}$ und eines maximalen λ -Wertes (λ_{Max})

Da die Varianzen normalverteilter Daten χ^2 -verteilt sind, kann auch die Verteilung der Varianzen der Wiederholmessungen aus dem (idealen) Messprozess bestimmt werden. Von der resultierenden χ^2 -Verteilung kann so ein maximal noch akzeptierbarer Wert für die Messstreuung bestimmt werden. Es kann beispielsweise ein Konfidenzintervall zu 95 % oder 99 % ausgewählt werden. Dieser Maximalwert $s_{M,Max}$ kann definiert werden, um den Gewichtungsfaktor λ_t zu dieser aktuellen Messstreuung auf den Wert Null zu setzen. Erreicht oder überschreitet das Messsystem also den Wert $s_{M,Max}$ so wird λ_t auf Null gesetzt, d.h. der aktuelle Messwert wird nicht gewichtet. Der aktuelle Stichprobenmittelwert geht also gar nicht in die horizontale EWMA-Karte ein, sondern es werden nur die Vergangenheitswerte aufgetragen (siehe Abbildung 4.28 links). Bei der Wahl einer asymptotischen Funktion zwischen $s_{M,t}$ und λ_t kann jedoch auf die Bestimmung von $s_{M,Max}$ verzichtet werden (siehe Abbildung 4.28 rechts).

Während die Wahl von $s_{M,Max}$ optional ist, muss ein Maximalwert für λ_t festgelegt werden. Dieser λ_{Max} -Wert stellt die bestmöglichen Messbedingungen ($s_{M,t}=0$) dar. In diesem Fall werden die Parameter der multivariaten μ -EWMA-Karte identisch zu einer normalen EWMA-Qualitätsregelkarte gewählt (keine Gewichtung der Messdaten ist erforderlich). Daher erscheint es auch sinnig sich zu Prozesstart an den Vorgaben von Crowder [Cro89] zu orientieren. Crowder empfiehlt verschiedene λ -Werte für unterschiedliche Prozesszustände und Überwachungssituationen.

4.7.2.3 Modellierung λ_t über $s_{M,t}$

In einem letzten Schritt muss die Funktion zwischen λ_t und $s_{M,t}$ mathematisch modelliert werden. Hierzu muss ein der Referenzmessstreuung $s_{M,REF}$ entsprechender λ -Wert definiert werden ($=\lambda_0$). Neben der Möglichkeit einen einfachen linearen Zusammenhang zu modellieren, wird eine asymptotische Funktion gewählt, um den funktionalen Zusammenhang zwischen λ_t und $s_{M,t}$ zu beschreiben (Abbildung 4.28).

Ein asymptotischer Ansatz hat den Vorteil, keinen $s_{M,Max}$ -Wert festlegen zu müssen, d.h. es gibt nicht den Fall, dass der aktuelle Wert einer Stichprobe überhaupt nicht berücksichtigt wäre ($\lambda_t = 0$) – siehe hierzu auch Anhang A3. Daher wird die folgende asymptotische Funktion verwendet, um den funktionalen Zusammenhang zwischen λ_t und $s_{M,t}$ zu beschreiben.

$$\lambda_t = \lambda_{\max} \cdot 1 / (\lambda_{\max} / \lambda_0)^{s_{M,t} / s_{M,Ref}} \quad (4-20)$$

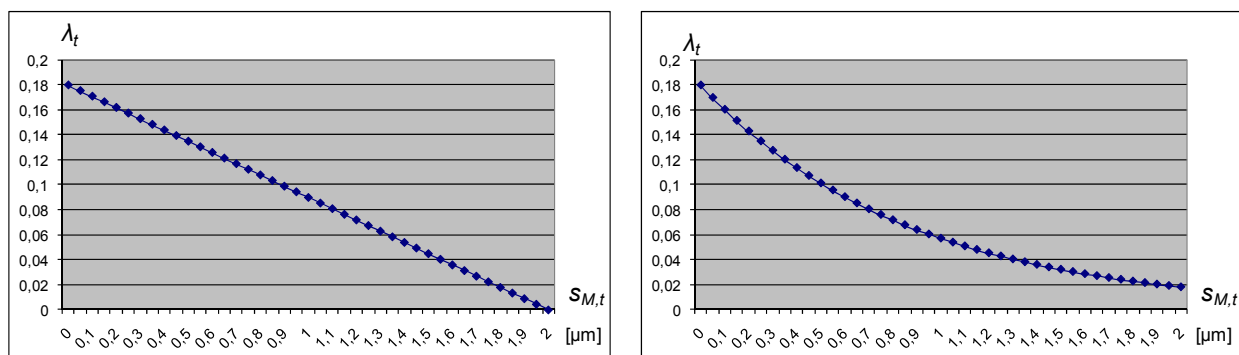


Abbildung 4.28: λ_t über $s_{M,t}$: lineare (links) und asymptotische (rechts) Funktion

4.7.3 Validierung der multivariaten μ -EWMA Karte

Nachdem die Zahlenwerte für $s_{M,REF}$, λ_{Max} , λ_0 und optional $s_{M,Max}$ gemäß Kapitel 4.7.2 ermittelt wurden, konnte die entworfene multivariate μ -EWMA-Karte über Simulationsstudien mit traditionellen QRK wie der Shewhart- \bar{x} -Karte und einer normalen EWMA-Karte verglichen werden.

Die Shewhart- \bar{x} -Karte wurde ausgewählt, da diese die meistverwendete und bekannteste QRK ist [Mon91]. Die normale EWMA-Karte wurde als Benchmarking-Partner ausgewählt, um das Original mit der vorgeschlagenen Version und einem variablen Gewichtungsfaktor λ_t zu vergleichen.

4.7.3.1 Aufbau der Simulationsstudien

Es wird angenommen, dass die Fertigung eines Mikroplanetenrads aus dem SFB 499 anhand des Qualitätsmerkmals Innendurchmesser über die drei QRK-Typen Shewhart- \bar{x} -Karte, normale EWMA-Karte und die multivariate μ -EWMA-Karte überwacht werden soll. Aufbauend auf den durchgeführten Studien in Kapitel 4.5 kann für die Messdaten des Qualitätsmerkmals Innendurchmesser für den Fertigungsprozess und den Messprozess eine

Normalverteilung angenommen werden. Daher wurden in der open-Source Statistik Software R [R05; Sac06] die drei QRK implementiert (Abbildung 4.29, Schritt 1) und normalverteilte Daten mit einer Standardabweichung aus dem Fertigungsprozess von $\sigma_F=1\mu\text{m}$ und einem Referenzwert für die Standardabweichung aus dem Messprozess von $s_{M,REF}=0.5\mu\text{m}$ erzeugt (Abbildung 4.29, Schritt 2). Die beiden sich überlagernden Streuungen des Fertigungsprozesses und des Messprozesses ergeben sich zu:

$$\sigma_{P,t} = \sqrt{(\sigma_{F,t}^2 + s_{M,t}^2)} \quad (4-21)$$

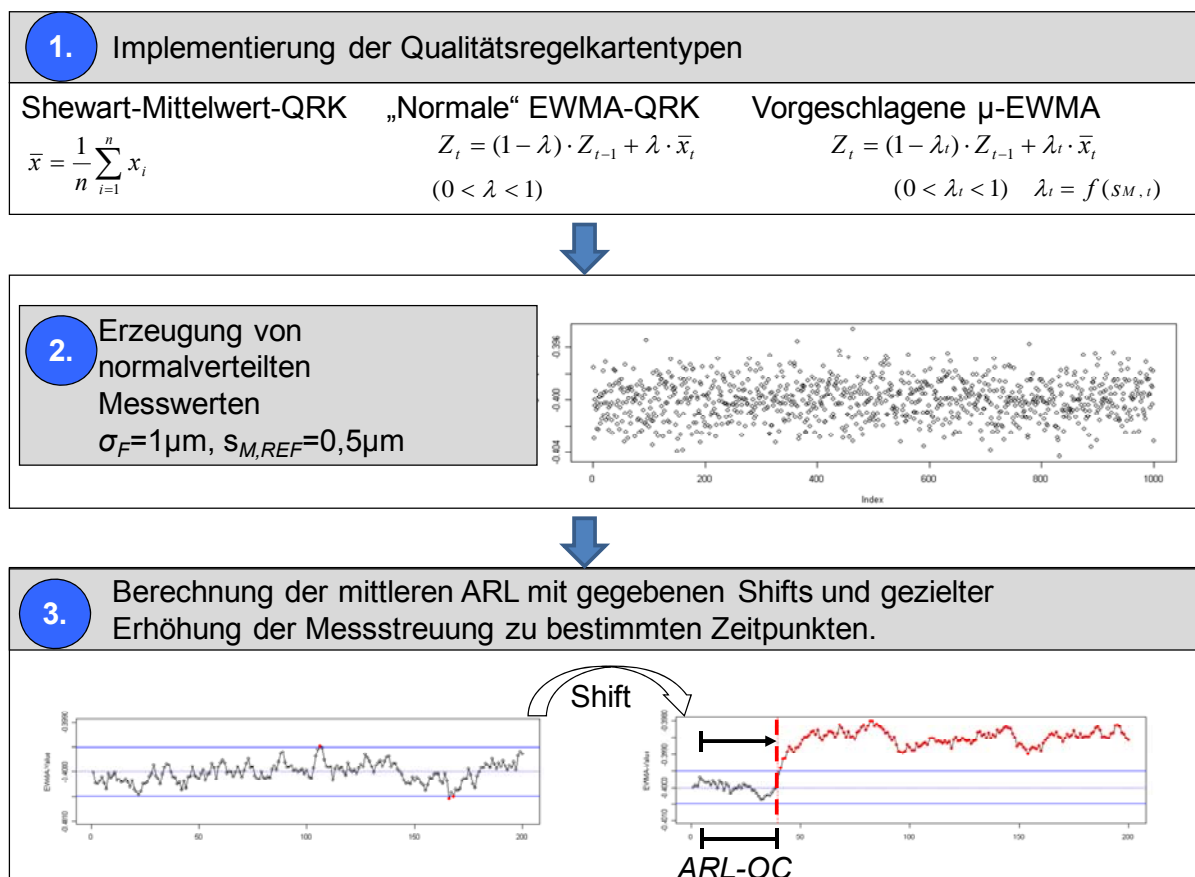


Abbildung 4.29: Vorgehen bei den Simulationsstudien zum Vergleich der QRK

Anschließend wurden die drei QRK mit diesen Daten auf deren Fähigkeit getestet, Änderungen der Lage des Fertigungsprozesses (ein s.g. Shift) und eine Erhöhung der Messstreuung zu entdecken (Abbildung 4.29, Schritt 3). Zu einem festgelegten Zeitpunkt wurden die Daten manipuliert, indem Shifts der Lage des Fertigungsprozesses in verschiedener Größenordnung eingebracht wurden. Die Shifts sind in Anlehnung an die Literatur im

Fachgebiet Statistik immer in Vielfachen der Gesamtstreuung σ_P angegeben [u.a. Cro98, Mit98, Mon91]. Darüber hinaus wurde zu festgelegten Zeitpunkten die Messstreuung $\sigma_{M,t}$ erhöht.

Im Folgenden wurde kontrolliert, wie viele Datensätze bzw. Stichproben die einzelnen QRK ab dem Zeitpunkt der Manipulation der Daten benötigten, bis eine EG-Verletzung auftrat - die Veränderung im Fertigungs- oder Messprozess also detektiert wurde. Die Anzahl an Stichproben, die zwischen Auftritt und Entdeckung der Veränderung liegt, wird als $ARL-OC$ (= average run length - out of control, u.a. [Mon91, Mit93a, Rin95, Ste01]) bezeichnet. Die ARL ist dabei die wichtigste Kennzahl zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit einer QRK, wobei die $ARL-IC$ (= in control) so groß wie möglich und die $ARL-OC$ so klein wie möglich sein sollte.

4.7.3.2 Benchmarking unterschiedlicher Qualitätsregelkartentypen

Um die Vergleichbarkeit der QRK zu gewährleisten, müssen in einem ersten Schritt die Parameter und EG der drei unterschiedlichen QRK-Typen so festgelegt werden, dass ein frei wählbarer $ARL(0)$ -Wert für alle Karten gleich ist. Ein in der Literatur häufig zu findender und realitätsnaher Wert ist die Wahl der $ARL(0)$ zu 100. Das heißt, dass unter stabilen und beherrschten Prozessbedingungen im Schnitt alle 100 Stichproben (fälschlicherweise) eine EG-Verletzung auftritt. Die Fehlerwahrscheinlichkeit 2. Art ist somit $\alpha = 1/ARL(0) = 1\%$.

Es wird angenommen, dass der Soll-Wert und somit die Lage des Fertigungsprozesses dem Innendurchmesser des SFB-Mikro-Planetenrads mit 0,508 mm entspricht. Zur Vereinfachung betrachten wir im Folgenden eine Urwertkarte mit Stichprobengröße 1.

- **Shewhart- \bar{x} -Karte**

Bei einer $ARL(0)$ von 100 und einem α -Wert von 1 % ergeben sich die EG der Shewhart- \bar{x} -Karte somit zu:

$$UEG_{Shewhart} = \mu - \frac{\sigma_P}{\sqrt{n}} \cdot z_{1-\alpha/2} = 0,508 - \sigma_P \cdot z_{0,995} \quad (4-22)$$

$$OEG_{Shewhart} = \mu + \frac{\sigma_P}{\sqrt{n}} \cdot z_{1-\alpha/2} = 0,508 + \sigma_P \cdot z_{0,995}$$

- **Normale EWMA-Karte**

Für die Berechnung der EG der normalen EWMA-Karte wird ein kritischer Shift von $|\delta|=1 \cdot \sigma_p$ festgelegt. Gemäß Crowder [Cro89] wird für eine $ARL(0)=100$ die Glättungskonstante mit $\lambda=0,18$ und somit der Parameter $k=2,33$ für die Berechnung der EG gewählt.

$$UEG_{EWMA} = \mu - k \cdot \sigma_p \cdot \sqrt{\lambda/(2-\lambda)} = 0,508 - 2,33 \cdot \sigma_p \cdot \sqrt{\lambda/(2-\lambda)} \quad (4-23)$$

$$OEG_{EWMA} = \mu + k \cdot \sigma_p \cdot \sqrt{\lambda/(2-\lambda)} = 0,508 + 2,33 \cdot \sigma_p \cdot \sqrt{\lambda/(2-\lambda)}$$

- **μ -EWMA-Karte**

Aufbauend auf der normalen EWMA-Karte wird auch hier $k=2,33$ und $\lambda_{max}=0,18$ (vgl. [Cro89]) gewählt. Um für die gegebenen Parameter eine $ARL(0)$ von 100 zu erhalten, sollte der Wert λ_0 (Referenzmessstreuung $s_{M,REF}=0,5 \mu\text{m}$: Anzahl an Messwiederholungen $m=5$) mit 0,12 gewählt werden (siehe auch Anhang A.3). Die EG werden in Abhängigkeit von λ_0 mit einem variablen Glättungsfaktor λ_t als Funktion von $s_{M,t}$ berechnet.

$$UEG_{\mu-EWMA} = \mu - k \cdot \sigma_p \cdot \sqrt{\lambda_0/(2-\lambda_0)} = 0,508 - 2,33 \cdot \sigma_p \cdot \sqrt{\lambda_0/(2-\lambda_0)}$$

$$OEG_{\mu-EWMA} = \mu + k \cdot \sigma_p \cdot \sqrt{\lambda_0/(2-\lambda_0)} = 0,508 + 2,33 \cdot \sigma_p \cdot \sqrt{\lambda_0/(2-\lambda_0)} \quad (4-24)$$

$$\lambda_t = \lambda_{max} / (\lambda_{max} / \lambda_0)^{s_{M,t} / s_{M,Ref}} = 0,18 / 1,8^{s_{M,t} / 0,5}$$

Tabelle 4.5 zeigt die gemittelten ARL-Werte der drei QRK-Typen von 5.000 Simulationsläufen. Die einzelnen Szenarien sind in der ersten Spalte aufgelistet. Die erste Zeile zeigt die ARL-Werte falls Fertigungs- und Messprozess unter Kontrolle sind (= $ARL(0)$ von 100).

In Szenario B werden Shifts der Größenordnung $0.25 \sigma_p$, $0.5 \sigma_p$, $1.0 \sigma_p$ und $2.0 \sigma_p$ simuliert. Dies entspricht einer Abweichung des Fertigungsprozesses von der Solllage bzw. einem systematischen Fehler im Messprozess und wird durch den Fall 3 in der Entscheidungsmatrix (Abbildung 4.25, rechts oben) abgebildet. Die Leistungen sowohl der normalen, als auch der vorgeschlagenen μ -EWMA-Karte übertreffen die der Shewhart- \bar{x} -Karte für kleine Shifts (Zeile 2-4) und liefern ein ähnliches Ergebnis für größere Shifts (Zeile 5). Dies bedeutet, dass die vorgeschlagene μ -EWMA-Karte kleine Shifts viel schneller und größere Shifts mindestens so schnell wie traditionelle QRK entdeckt.

	Shewhart- QRK	Normale EWMA	Eigene μ - EWMA
Szenario A: unter Kontrolle	100	100	100
Szenario B: Shift Mittellage um $0,25 \sigma_p$	83	47	44
Szenario B: Shift Mittellage um $0,5 \sigma_p$	50	19	19
Szenario B: Shift Mittellage um $1,0 \sigma_p$	17	7	8
Szenario B: Shift Mittellage um $2,0 \sigma_p$	4	3	3
Szenario C: Erhöhung Messstreuung um $1,5 \sigma_M$	48	58	106
Szenario C: Erhöhung Messstreuung um $2,0 \sigma_M$	24	34	108
Szenario C: Erhöhung Messstreuung um $4,0 \sigma_M$	5	10	100

Tabelle 4.5: Vergleich der ARLs von Shewhart-, normaler EWMA- und vorgeschlagener μ -EWMA-Karte

In Szenario C wurde die Varianz bzw. Standardabweichung des Messprozesses (d.h. der Wiederholmessungen) in drei Fällen erhöht (Erhöhung von σ_M um die Faktoren 1.5, 2.0 und 4.0). Der Fertigungsprozess wurde weiterhin ohne Störungen modelliert. Szenario C stellt somit einen zufälligen Messfehler (= Komponenten u_p und/oder u_w für die KMG-Messung; Komponenten s_E und/oder s_M für die optische Oberflächencharakterisierung) dar und ist durch Fall 2 in der Entscheidungsmatrix gegeben (Abbildung 4.25, links unten). Sowohl bei der Shewhart- \bar{x} -Karte, als auch bei der normalen EWMA-Karte treten schnell EG-Verletzungen auf. In der Folge würde hier die Problemursache (fälschlicherweise) im Fertigungsprozess gesucht werden. Einzig die vorgeschlagene μ -EWMA-Karte ignoriert die Änderung im Messprozess, d.h. gibt keine Fehlfunktion des Fertigungsprozesses an. Die in der multivariaten μ -EWMA-Karte noch enthaltene Messstreuung-Shewhart- s -Karte, die rein die Standardabweichung der Wiederholmessungen charakterisiert, schlägt hingegen sogleich Alarm und deckt das Problem im Messprozess auf. Die vorgeschlagene multivariate μ -EWMA-Karte ist daher die einzige Karte, die die Problemursache dem Messprozess und nicht fälschlicherweise dem Fertigungsprozess zuordnet. Somit ist auch für Fall 4 in der Entscheidungsmatrix (Abbildung 4.25, rechts unten) eine sichere

Ursachenzuweisung möglich. Bei Eintritt von Fall 4 sind also tatsächlich sowohl der Fertigungs-, als auch der Messprozess außer Kontrolle.

4.7.4 Ergebnis

Als Ergebnis steht ein multivariates QRK-Design, mit welcher Fertigungs- und Messprozess visualisiert und überwacht werden können (Abbildung 4.30). Durch einfache Berechnungsvorschriften und die Gewichtung der aktuellen Messstreuung über einen variablen Gewichtungsfaktor der EWMA-Prüfstatistik können erstmals Fertigungs- und Messprozess voneinander getrennt werden. Über Simulationsstudien konnte die gesteigerte Leistungsfähigkeit der multivariaten μ -EWMA-Karte nachgewiesen werden.

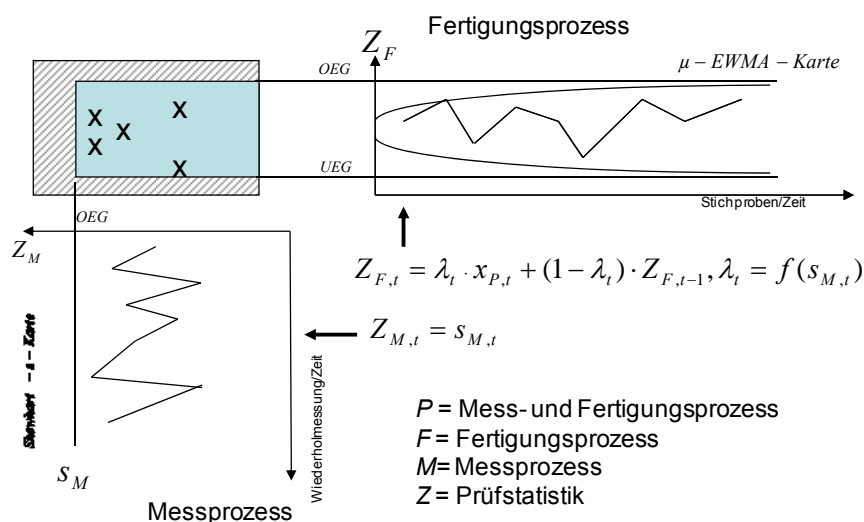


Abbildung 4.30: Multivariate μ -EWMA-Karte

4.8 Zusammenfassung der entwickelten statistischen Prozessregelung für Mikrofertigungsprozesse

In den Kapiteln 4.1 bis 4.4 wurde ein Vorgehen zum Aufbau eines Regelkreises, welcher APC und SPC kombiniert, entwickelt. Ein den Mikrofertigungsprozess beschreibendes empirisches Modell wird aus der statistischen Versuchsmethodik mittels multipler Regression aufgestellt. Das aufgestellte empirische Modell dient dazu, den Wert des Qualitätsmerkmals zu prognostizieren. Auf der Basis des aufgestellten empirischen Modells wird anschließend ein Regelungsansatz entwickelt, der unter dem Einfluss von Störgrößen die statistisch signifikanten Prozessparameter automatisch so verändert, dass die Forderung nach reproduzierbaren Prozessergebnissen so weit wie möglich erfüllt ist.

Um die neue Vorgehensweise zu vervollständigen wurde anschließend ein statistisches Überwachungssystem entwickelt, welches die Werte des Qualitätsmerkmals mittels einer QRK kontinuierlich überwacht. Hierfür wurden in Kapitel 4.5 die statistischen Verteilungsmodelle für geometrische Mikro-Qualitätsmerkmale aufgestellt. Das statistische Überwachungssystem dient in der Folge, um

1. Prozesseinflüsse außerhalb des APC-Modells,
2. das Messsystem selbst und
3. die Güte des APC-Reglermodells zu überwachen.

Aufgrund der hohen Genauigkeitsanforderungen in der Mikroproduktionstechnik muss für alle drei Punkte die Streuung des Fertigungsprozesses von der Streuung des Messprozesses getrennt werden. Daher wurde in den Kapiteln 4.6 und 4.7 eine multivariate μ -EWMA-Karte entwickelt, welche aufbauend auf Wiederholmessungen das Vertrauen in das Messergebnis der aktuellen Stichprobe des Fertigungsprozesses quantifiziert und visualisiert. Abbildung 4.31 fasst das entwickelte statistische Überwachungssystem zusammen.

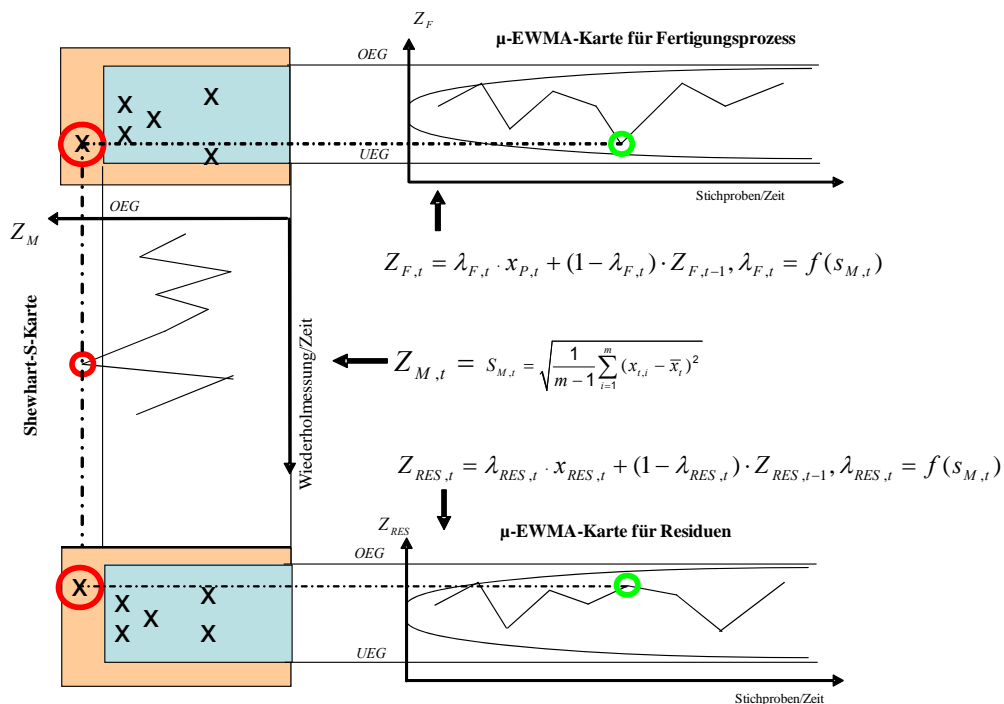


Abbildung 4.31: Statistisches Überwachungssystem für die Mikroproduktionstechnik

Die Prozesseinflüsse außerhalb des APC-Modells werden über eine μ -EWMA-Karte des Fertigungsprozesses überwacht (Abbildung 4.31, rechts oben).

Das Messsystem selbst wird durch eine Shewhart- s -Karte überwacht (Abbildung 4.31, vertikale Karte, links).

Die Güte des empirischen APC-Prozessmodells wird über eine μ -EWMA-Karte der Residuen zwischen prognostiziertem und anschließend gemessenen Wert des zu regelnden Qualitätsmerkmals überwacht (Abbildung 4.31, rechts unten). Ein Residuum ist dabei die Differenz zwischen dem vorhergesagten Wert aus dem empirischen APC-Prozessmodell und dem anschließend gemessenen Wert des Qualitätsmerkmals nach der Regelung. Falls das empirische APC-Modell beispielsweise aufgrund geänderter Umweltrandbedingungen nicht mehr die ursprünglich hohe Güte aufweist, ist eine weitere Regelung basierend auf diesem empirischen Modell nicht mehr sinnvoll. In einem solchen Falle würden die Residuen betragsmäßig ansteigen und somit die EG der μ -EWMA-Karte für die Residuen verletzen – die Hinfälligkeit des aktuellen empirischen APC-Modells wäre entdeckt.

Abbildung 4.32 zeigt den gesamten Regelkreis inklusive des statistischen Überwachungssystems.

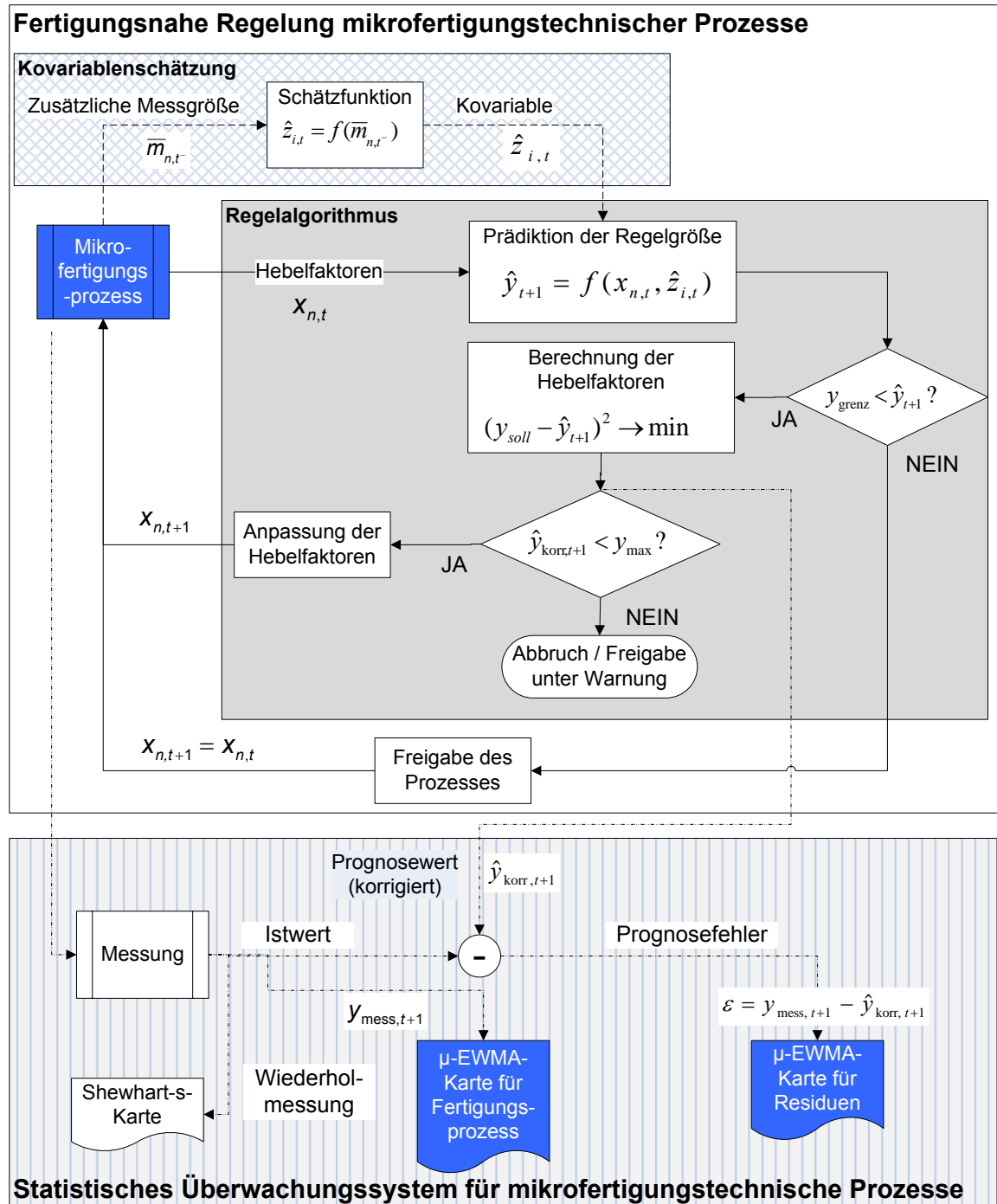


Abbildung 4.32: Struktur des Qualitätsregelkreises und des statistischen Überwachungssystems für mikrofertigungstechnische Prozesse

5 Prototypische Implementierung am Beispiel des Mikroorthogonaleinstechdrehens

Im vorliegenden Kapitel erfolgt die Anwendung und Evaluierung der in Kapitel 4 vorgestellten Methoden und Werkzeuge am Beispiel des Fertigungsverfahrens Mikrodrehen.

5.1 Definition der Regelungsaufgabe

Bei dem betrachteten Fertigungsprozess handelt es sich um die Mikrostrukturierung durch das Orthogonaleinstechdrehen, welches zu der Fertigungsgruppe der spanenden Verfahren mit bestimmter Schneide zählt. Das Orthogonaleinstechdrehen wurde als Anwendungsbeispiel gewählt, da eine hohe Anzahl an Materialien flexibel mit hoher Geometriekomplexität bearbeitbar ist. Der Versuchsaufbau des Orthogonaleinstechdrehens erlaubt eine hochpräzise Fertigung bis in den Bereich weniger Mikrometer Spannungsdicke und ist im Vergleich zum Mikrofräsen durch eine einfachere Prozessführung (definierter Schneidkantenradius, kontinuierlicher Schneideneintritt etc.) charakterisiert. Dennoch lässt sich auch bei diesem Mikrofertigungsverfahren eine im Vergleich zu den geforderten Toleranzspezifikationen hohe Variabilität erkennen, was die Anwendung des entwickelten Mikroqualitätsregelkreises (vgl. Kapitel 4.8) rechtfertigt.

5.1.1 Regelgröße

Aufgrund des mit der Miniaturisierung zunehmenden Verhältnisses von Oberfläche zu Volumen hat die Oberfläche eines Mikrobauteils einen hohen Anteil an der Funktionalität. Im Falle der spanenden Fertigung entsteht eine rillen- oder riefenartige Rauheit der Oberfläche unter der Einwirkung des Vorschubs und der Form der Werkzeugschneide bzw. durch den Spanbildungsvorgang selbst (Reißspan, Aufbauschneiden). Zur Beschreibung der Rauheit technischer Oberflächen steht eine Reihe von Kennwerten zur Verfügung, welche die Abweichung des Ist-Profiles von der ideal glatten Oberfläche unterschiedlich bewerten (siehe Abbildung 5.1 und Tabelle 5.1). Dazu zählen beispielsweise:

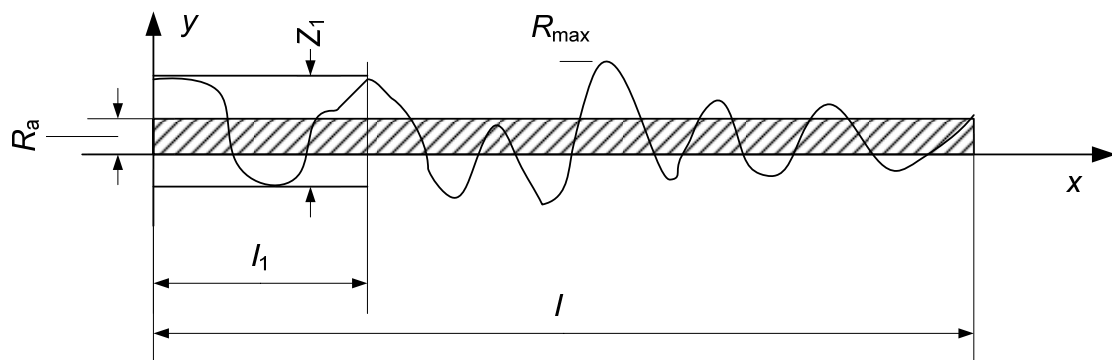


Abbildung 5.1: Rauheitsmesswerte, nach VDI 2601

Mitten- rauhwert R_a	<p>Der arithmetische Mittelwert der Abweichungen der Oberflächenmesspunkte von der Mittellinie innerhalb einer Messstrecke. Er berechnet sich folglich zu:</p> $R_a = \frac{1}{l} \int_0^l y(x) dx$ <p>Anschaulich gibt der Mittenrauhwert die Höhe eines Rechtecks der Länge l an, dessen Flächeninhalt gleich der Summe der zwischen dem Rauheitsprofil und der Mittellinie eingeschlossenen Flächen ist (siehe Abbildung 5.1).</p>
Gemittelte Rauhtiefe R_z	<p>Arithmetisches Mittel aus den Einzelrauhiefen Z_1 bis Z_5 von fünf aufeinander folgenden Einzelmessstrecken l im gefilterten Rauheitsprofil.</p> $R_z = \frac{1}{5} (Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4 + Z_5)$ <p>Eine Einzelrauhiefe gibt dabei die Spannweite zwischen kleinster und höchster Abweichung innerhalb der Einzelmessstrecke an. In Abbildung 5.1 ist dieser Zusammenhang beispielhaft für eine Teilmessstrecke l_1 dargestellt.</p>
Maximale Rauhtiefe R_{max}	<p>Der Wert der größten vorkommenden Abweichung innerhalb der Messstrecke. Es gilt: $R_{max} \geq R_a, R_z$</p>

Tabelle 5.1: Kennwerte zur Charakterisierung der Oberflächenqualität

Das betrachtete Qualitätsmerkmal und damit die Regelgröße sei im Fall des Mikroorthogonaleinstechdrehens die erzeugte Oberflächenrauheit R_a des gedrehten Werkstücks. Das Vorgehen ist dabei jedoch auch auf die Oberflächenkennwerte R_z oder R_{max} übertragbar.

5.1.2 Regelungsaufgabe

Im Zerspanprozess wirken systematische Störeinflüsse, die in ihrer Wirkung bekannt sind, aber nicht eliminiert werden können. Dazu zählt beispielsweise der fortschreitende Verschleiß des Werkzeuges, welcher Auswirkungen auf die Oberflächengüte hat (Kapitel 2.2.1.2).

Folglich soll der Einfluss der systematischen Störungen kompensiert werden, um auch bei einem verschleißenden Werkzeug das bestmögliche Fertigungsergebnis zu erzielen. Insgesamt soll eine Reduktion der Streuung der Rauheitswerte um einen gegebenen Sollwert erzielt werden, um Ausschuss zu vermeiden und das Qualitätsniveau zu erhöhen.

5.1.3 Klassifizierung der Einflüsse auf das Mikrodrehen

Die Zielgröße des Modells ist die Regelgröße Oberflächenrauheit, die mittels des genannten Rauheitskennwerts R_a quantifiziert werden kann. Nun müssen die Einflussgrößen ausgewählt werden, die im APC-Modell zu berücksichtigen sind. In Abbildung 5.2 sind Einflüsse auf die erzielte Oberflächengüte beim Zerspanen aufgelistet.

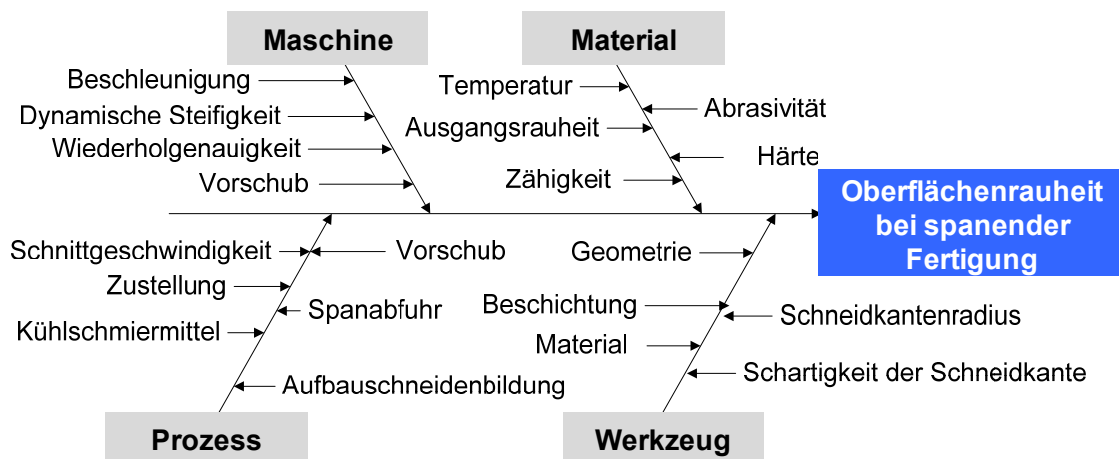


Abbildung 5.2: Ursache-/Wirkungs-Diagramm für die Oberflächenrauheit bei der spanenden Fertigung

Wie bereits dargelegt wurde, ist eine gedrehte Oberfläche von Werkzeugspuren gekennzeichnet. Daher stellen die Werkzeuggeometrie und Schnittgrößen wie Vorschub, Zustellung oder Schnittgeschwindigkeit wichtige Einflussgrößen auf die Oberflächengüte dar. Andere Einflüsse ergeben sich aus Unvollkommenheiten der Maschine, Umgebungseinflüssen oder den Materialeigenschaften des bearbeiteten Werkstücks.

Beim Mikroorthogonaleinstechdrehen sind die wichtigsten Einflussgrößen die Schnittgeschwindigkeit, die Spannungsdicke, der Wärmebehandlungszustand des Werkstückwerkstoffs sowie die Werkzeuggeometrie beziehungsweise der Schneidkantenradius [Kot08].

Die Schnittgeschwindigkeit und die Spannungsdicke sind dabei beeinflussbar, während die Werkzeugschneide zunehmendem Verschleiß ausgesetzt ist. Dies verursacht eine Zunahme des Schneidkantenradius bis das Werkzeug vollständig verschliffen ist.

Daher wird die Schnittgeschwindigkeit als Stellgröße und der Werkzeugverschleiß bzw. der Schneidkantenradius als Kovariable gewählt. Der Einfluss weiterer Störgrößen wie Gefüge oder Kühlschmiermittel soll nicht explizit untersucht werden. Genau hierfür ist aber durch die Überwachungsfunktion der Qualitätsregelkarten ein Mittel gegeben. In Tabelle 5.2 sind die Modellvariablen zusammengefasst.

Variable	Symbol	Art	Einheit
Oberflächenrauheit	R_a	Zielgröße	[μm]
Werkstückmaterial	-	Erklärend (Störgröße)	-
Schnittgeschwindigkeit	v_c	Erklärend (Hebelfaktor)	[m/min]
Schneidkantenradius	r_β	Erklärend (Kovariable)	[μm]
Zustellung/Schnitttiefe	h	Erklärend (Hebelfaktor)	[μm]

Tabelle 5.2: Übersicht über die Modellvariablen

In Bezug auf die Kovariable gilt weiterhin, dass eine Charakterisierung der Schneidkantenradien aus Gründen der Zugänglichkeit während des Bearbeitungsvorgangs nicht möglich ist. Auch eine nachträgliche Messung gestaltet sich schwierig. Gründe hierfür sind Materialanlagerungen, die zu Aufbauschneiden führen, oder Ausbrüche aus der Werkzeugschneide, die eine Messung der Schneidenverrundung verhindern. Es muss daher zunächst ein Modellierungsansatz für den Werkzeugverschleiß erarbeitet werden.

5.1.4 Schätzfunktion für die Kovariable Schneidkantenradius

Mit zunehmendem Verschleiß eines Zerspanwerkzeugs verändern sich relevante Prozessgrößen wie zum Beispiel die Schnittkräfte und die Qualität der Erzeugnisse hinsichtlich Maßhaltigkeit und Oberflächengüte.

Für die vorliegende Prozessregelung soll eine kontinuierliche Bestimmung der verschleißabhängigen Veränderung der Schneidengeometrie realisiert werden. Dazu muss der Schneidkantenradius mit einer Messgröße, die während des Bearbeitungsprozesses zugänglich ist, in eine mathematische Funktion gestellt werden.

5.1.4.1 Werkzeugüberwachung

Signalverläufe der Schnittkraft oder von Körperschallsensoren eignen sich, um eine In-line-Diagnose des Prozesses vorzunehmen [Cha06, Dor06, Jem08, Lee, Zha07a, Zha07b]. Diese Signale weisen typische prozessparameter- und verschleißabhängige Anteile auf. Allerdings müssen die Abhängigkeiten zwischen dem betrachteten Signalverlauf und dem Verschleiß bekannt und eine entsprechende Infrastruktur (=Sensorik) vorhanden sein.

Die Zerspankräfte haben in der Mikrozerspannung einen direkten Einfluss auf die Oberflächenqualität und Formgenauigkeit des Bearbeitungsergebnisses (siehe Kapitel 2.1.1.2). In der Mikrozerspannung hängen die Zerspankräfte neben den üblichen Parametern wie Schnittgrößen oder Werkstoffen stark von der Mikrogeometrie des Werkzeugs in Form der Schneidkantenverrundung ab [Kot08, Bis08]. Daher ist der Zerspankraftverlauf eine geeignete Prozessgröße, um hieraus den Werkzeugzustand zu beurteilen.

5.1.4.2 Zerspankraftmodell für die Mikrozerspannung

Für die Zerspannung in Makrodimensionen existiert eine Reihe von etablierten empirischen Zerspankraftmodellen (siehe. Tabelle 5.3).

Autor	Schnittkraftformel	Formel-Nr.
Taylor [Tay07]	$F_c = k_c \cdot a_p \cdot f^{k_2}$	(5-1)
Kronenberg [Kro27]	$F_c = k_1 \cdot (b \cdot h)^{k_2}$	(5-2)
Victor-Kienzle [Kie52]	$F_c = k_{c_{1,1}} \cdot b \cdot h^{1-m_c}$	(5-3)
Richter [Ric53]	$F_c = b \cdot (k_1 + k_2 \cdot h)$	(5-4)

Tabelle 5.3: Empirische Zerspankraftmodelle für die Makrozerspannung

Dabei bezeichnen k_c , k_1 und k_2 materialbezogene Konstanten. In Formel (5-3) gibt $k_{c_{1,1}}$ den Hauptwert der spezifischen Schnittkraft für eine

Spannungsbreite und –dicke von je einem Millimeter und m_c den Anstiegswert der spezifischen Schnittkraft an.

Für die Victor-Kienzle-Formel (5-3) stehen zahlreiche Korrekturfaktoren zur Verfügung, die Verschleiß, Schnittgeschwindigkeit, Kühlschmiermittel oder weitere Einflüsse berücksichtigen. Aufgrund des bedeutenden Einflusses unterschiedlicher Spannungsdicken wurde zusätzlich die Zerspankraftberechnung per Spannungsdickendekaden eingeführt. Für den Makrobereich mit Spannungsdicken zwischen 0,1 mm und 1 mm wurden zahlreiche Werkstoffkenndaten ermittelt - für die Mikrozerspanung mit Spannungsdicken kleiner 0,1 mm liegen jedoch nur wenige Werte vor.

Für die Victor-Kienzle-Formel nach Gleichung (5-3) ermittelte Kotschenreuther zunächst Materialkennwerte für die Spannungsdickendekaden 0,1 mm und 0,01 mm. Zudem erweiterte er den bestehenden Victor-Kienzle-Ansatz für die Mikrozerspanung [Kot08]:

$$F_c = b \cdot h^{1-m_c} \cdot k_{c1.x} \cdot \left(\frac{r_\beta}{0,008442} \right)^{m_c} \quad (5-5)$$

In dieser Gleichung zeigt sich mit der Berücksichtigung des Schneidkantenradius r_β der besondere Einfluss der Schneidengeometrie im Mikrobereich. Somit ist auch die Schätzung des Schneidkantenradius anhand einer Schnittkraftmessung möglich:

$$r_\beta = \left(\frac{F_c}{b \cdot h^{1-m_c} \cdot k_{c1.x}} \right)^{1/m_c} \cdot 0,008442 \quad (5-6)$$

Es ist demnach möglich, ausgehend von aktuell gemessenen Schnittkräften auf den aktuellen Schneidkantenradius zu schließen. Die Kovariable Schneidkantenradius kann somit auch während des Prozesses aus den gemessenen Schnittkraftwerten abgeleitet werden.

5.2 Versuchsaufbau

5.2.1 Fertigungsprozess

Die Untersuchungen zur Regelung des Mikroorthogonaleinstechdrehens wurden auf einer Fünf-Achs-Mikrofräsmaschine vom Typ Kugler MicroMaster II [Mic08] durchgeführt. Die fünf Achsen setzen sich aus drei linearen und zwei Drehachsen zusammen. Die Umgebung der Maschine

wurde während der Untersuchungen durch eine Klimazelle auf konstanten 20 °C mit einer Regelabweichung von +/- 1 K gehalten. Die Charakterisierung der Maschine wurde bereits durch [Tri06] und [Kot08] durchgeführt.

Die Maschine zeichnet sich durch eine ausreichende Positioniergenauigkeit ($\pm 1 \mu\text{m}$) und ein gutes Beschleunigungsverhalten (0,5 g in X- und Y-Richtung, 0,1 g in Z-Richtung) aus. Sie verfügt außerdem über eine ausreichende Laufruhe und Steifigkeit für die Versuche.

Der Versuchsaufbau zum Mikroorthogonaleinstechdrehen ist links in Abbildung 5.3 dargestellt. Eine Charakterisierung der Versuchsanordnung wurde bereits im Rahmen der Arbeiten von [Kot08] und [Deu08] geleistet.

Die ringförmigen Werkstücke werden mit einem Magnetspannfutter auf dem Drehtisch fixiert. Zur Aufnahme der Passiv- und Schnittkräfte wird ein hochempfindliches 3-Komponenten-Dynamometer der Firma Kistler verwendet (Typ 9256B1) [Kis08], welches am Lochkreis der zweiten Drehachse befestigt wurde. Die Drehmeißelaufnahme befindet sich direkt an der Kraftmessplattform.

In Abbildung 5.3 sind rechts schematisch die Eingriffsverhältnisse beim Orthogonaleinstechdrehen dargestellt. Diese Anordnung erlaubt eine saubere Trennung aller Einflussgrößen [Kot08].

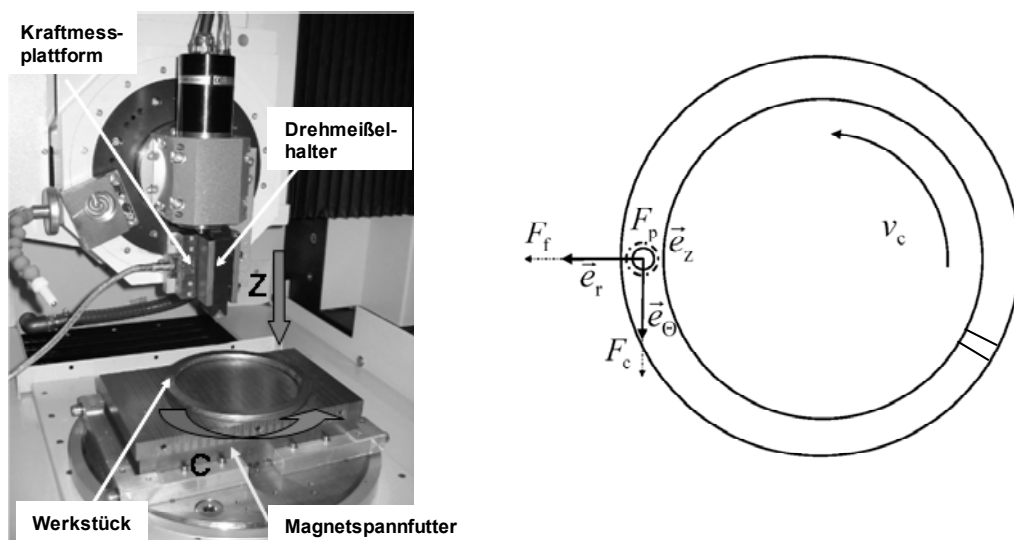


Abbildung 5.3: Versuchsaufbau (links) und Prinzip des Orthogonaleinstechdrehens (rechts).

Die im Rahmen der Versuche untersuchten Einflussgrößen sind die Schnittgeschwindigkeit und der Schneidkantenradius (vgl. Tabelle 5.2).

Die Geometrie der Schneidkanten ist in Abbildung 5.4 links dargestellt. Die Breite des Werkzeuges wird mit b bezeichnet und betrug bei den verwendeten Werkzeugen $b = 1900 \pm 100 \mu\text{m}$. Der Spanwinkel (SF) war 0° und die Freiwinkel (FF) jeweils 7° . Durch Anschliffpräparation wurden verschiedene Radien im Bereich von $10 \mu\text{m}$ bis $60 \mu\text{m}$ hergestellt und nach der Methode von [Hor02] gemessen.

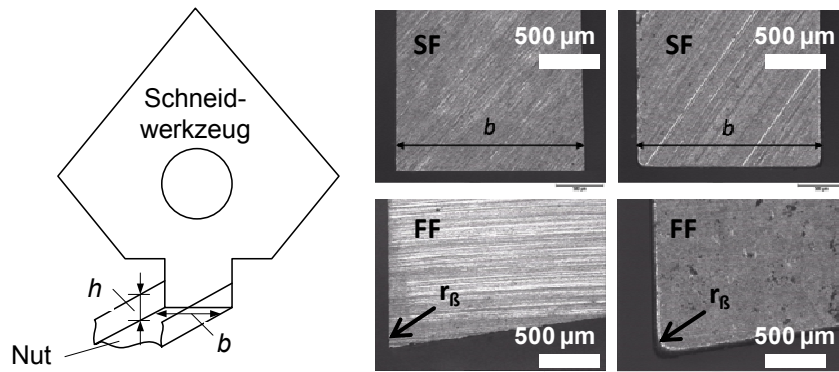


Abbildung 5.4: Werkzeuggeometrie (links) und Aufnahme der Schneidengeometrie bei $r_\beta = 10 \mu\text{m}$ (mitte) bzw. $r_\beta = 60 \mu\text{m}$ (rechts) durch ein konfokales Weißlichtmikroskop

Die verwendete rechteckige Werkzeuggeometrie ermöglicht dabei eine einfache und klare Zuordnung der Zustellung und Schnittbreite zu den Spanungsgrößen h bzw. b (siehe Abbildung 5.4 links). In Abbildung 5.4 sind mittig und rechts Weißlichtmikroskop-Aufnahmen der Schneide für Schneidkantenradien von $10 \mu\text{m}$ beziehungsweise $60 \mu\text{m}$ abgebildet, die am Institut für Werkstoffkunde I der Universität Karlsruhe (TH) erfasst wurden.

Während der Versuchsreihe wurde die Schnittgeschwindigkeit im Bereich von 100 m/min bis 200 m/min variiert. Die Zustellung wurde während der Versuche konstant auf $17 \mu\text{m}$ gesetzt, um den unterschiedlichen Einfluss der relativen Schärfe, also des Verhältnisses von Schneidkantenradius zu Spanungsdicke, zu berücksichtigen. Durch eine überlagerte seitliche Zustellbewegung entsteht eine spiralförmige Nut auf der Stirnfläche der Ringe.

Als Werkstoff wurde C45E im normalisierten Zustand ausgewählt. Die chemische Zusammensetzung wurde mittels Schmelzanalyse am Lehrstuhl Werkstoffe des Maschinenbaus der TU Chemnitz bzw. mittels Emissionsspektralanalyse am Institut für Werkstoffkunde I der Universität Karlsruhe (TH) ermittelt und sind in Tabelle 5.4 aufgeführt.

Chemische Zusammensetzung C45E									
Element	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	V
[Ma.-%]	0,44	0,26	0,6	0,008	0,029	0,07	0,08	0,03	<0,001

Tabelle 5.4: Chemische Zusammensetzung des verwendeten Werkstoffs

Der Vergütungsstahl C45E lag bei Anlieferung im warmgewalzten Zustand vor. Die nachfolgende Normalisierung wurde durch Spannungsarmglühen im Ofen bei einer Temperatur von 900 °C und einer Haltezeit von 2,5 h am Lehrstuhl Werkstoffe des Maschinenbaus realisiert und wies anschließend das Gefüge in Abbildung 5.5 auf (mittlere Korngröße ca. 10 µm).

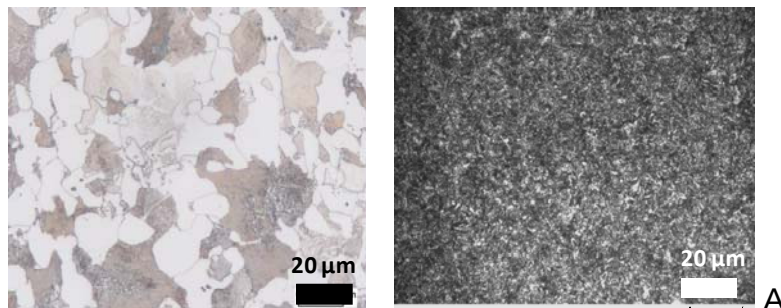


Abbildung 5.5: Gefüge des analysierten C45E in normalisiertem Zustand (links: Querschliff, rechts: Längsschliff)

Aus diesem Werkstoff mit einer Härte von 185 HB wurden ringförmige Proben gefertigt (siehe Abbildung 5.6). Anschließend wurden für die Versuche spiralförmige Nuten auf der geschliffenen Planfläche erzeugt.

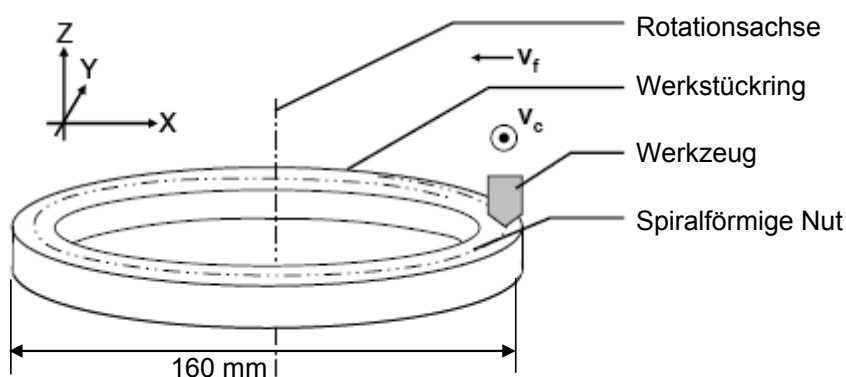


Abbildung 5.6: Werkstückring (in Anlehnung an [Kot08])

Trotz der geschliffenen Oberfläche der Werkstückringe ergaben sich abweichende tatsächliche Schnitttiefen. Die Schnitttiefen wurden mittels des

konfokalen Weißlichtmikroskops $\mu\text{-Surf}^{\text{®}}$ gemessen und den jeweiligen Messwerten der Schnittkräfte zugeordnet. Die gemessenen Schnitttiefen variierten zwischen 5 μm und 40 μm .

5.2.2 Mess- und Analysetechnik

5.2.2.1 Schnittkraftmessung

Die Werkstückringe aus C45E wurden mit einem Magnetspannfutter auf dem Drehtisch fixiert. Die Kräfte, die in X-, Y- und Z-Richtung während der Bearbeitung auftreten, wurden mit einem 3-Komponenten-Dynamometer vom Typ „Kistler MinDyn 9256B1“ der Firma Kistler [Kis08] aufgenommen (Tabelle 5.5). Die Schnittkraftmessplattform wurde dabei am Lochkreis der dritten Drehachse befestigt. Die Signale wurden an einen Messrechner übertragen und dort mit der Software DasyLab 6.0 ausgewertet.

	Abkürzung	Einheit	Wert	Abbildung
Messbereich	F_x, F_y, F_z	kN	± 0.25	
Empfindlichkeit	F_x, F_z	pC/N	~ 26	
	F_y	pC/N	~ 13	
Eigenfrequenz	f_{nx}	kHz	~ 5.1	
	f_{ny}	kHz	~ 5.5	
	f_{nz}	kHz	~ 5.6	
Gewicht		kg	0.75	

Tabelle 5.5: Spezifikation Kistler Kraftmessplattform 9256B1

5.2.2.2 Oberflächenmessung

Die Messung der Oberflächenrauheit, der Nuttiefen und der Schneidkantenradien wurde mit einem konfokalen Weißlichtmikroskop der Bauart Nanofocus $\mu\text{Surf}^{\text{®}}$ durchgeführt. (Abbildung 5.7 links). Das verwendete Weißlichtmikroskop ist mit vier Optiken (10-, 20-, 50- und 100-fache Vergrößerung) ausgestattet und bietet somit eine Auflösung im einstelligen Nanometerbereich (Tabelle 5.6).

Die Messergebnisse der optischen Messverfahren müssen mit denen der taktilen genormten Verfahren konform und vergleichbar sein. Im vorliegenden Fall wurden für die Angabe des Oberflächenkennwerts R_a in

Anlehnung an [DIN EN ISO 12179] Messstrecken im Millimeterbereich verwendet.

Die Verifikation der Messung der Schneidkantenradien wurde bereits von Horsch durchgeführt, indem Messungen der Schneidkantenradien auf dem konfokalen Weißlichtmikroskop mit denen von Schliffbildern unter einem REM verglichen wurden [Hor02].

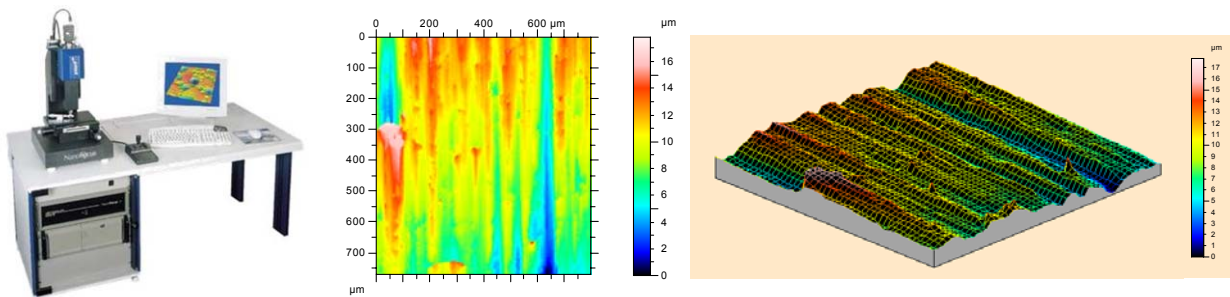


Abbildung 5.7: links: NanoFocus μ surf® Messsystem [Nan08], mitte: 2D-, rechts: 3D-Topografie einer durch μ -Drehen hergestellten Oberfläche

Grundgerät				
Bildaufnahmemodul	High-Speed Progressive-Scan-Digitalkamera mit			
Lichtquelle	Xenonlichtquelle			
x,y-Positioniermodul	x,y-Präzisionsverfahrtisch			
z-Positioniermodul	Präzisionsverstelleinheit			
z-Messmodul	Schnelle Präzisionsverstelleinheit			
Optikmodule				
Vergrößerung	10x	20x	50x	100x
Messfeld (μm)	1600x1510	800x755	320x302	160x151
Auflösung in z-Richtung (nm)	>50	>40	>20	>20
Auflösung in x,y-Richtung (μm)	3,1	1,6	0,7	0,5

Tabelle 5.6: Spezifikation des verwendeten konfokalen Weißlichtmikroskops

5.3 Regelkreisentwurf

5.3.1 Modellbildung: Prognose Oberflächenrauheit

Die Ergebnisse der Schnittkraft- und Rauheitsmessung ergaben 16 gemittelte Datenpunkte, die in Anhang A.4 aufgeführt sind. Je ein Datenpunkt bestand aus dem Mittelwert von fünf 700 μm langen Messstrecken auf einem Ring. Ausgehend von diesen 16 gemittelten Datenpunkten für Schnittkraft und Rauheit, welche mit Variationen in der Schnittgeschwindigkeit, der Schnitttiefe und dem Schneidkantenradius gefahren wurden, erfolgte die statistische Auswertung, um ein Modell zur Prognose der Oberflächenrauheit zu erlangen.

5.3.1.1 Varianzanalyse

Zur Vorbereitung der eigentlichen Modellbildung werden zunächst anhand des ermittelten Datensatzes die Effekte der gewählten Einflussvariablen auf die Zielgröße untersucht. Dazu wird eine Varianzanalyse durchgeführt, mit deren Hilfe diejenigen Einflussgrößen herausgefiltert werden konnten, die bezüglich der Zielgröße eine hohe statistische Signifikanz haben [Wal94]. In Tabelle 5.7 sind die Kodierung und die Wertebereiche der Modellvariablen zusammengefasst.

Variable	Symbol	Art	Faktor	Werte	Einheit
Oberflächenrauheit	R_a	Zielgröße	-	-	[μm]
Werkstückmaterial	-	Erklärend	-	C45E	-
Schnittgeschwindigkeit	v_c	Erklärend	X_1 (Stellgröße)	100, 150, 200	[m/min]
Schneidkantenradius	r_β	Erklärend	X_2 (Kovariable)	10, 20, 40, 60	[μm]
Zustellung	h	Erklärend	-	5...40	[μm]

Tabelle 5.7: Kodierung der Modellvariablen und Werte der Versuchseinstellungen

In den Versuchen zeigte sich, dass die Zustellung keine zuverlässig regelbare Größe ist. Die tatsächliche Schnitttiefe ist im laufenden Prozess nicht erfassbar, wie es für die Prozessregelung erforderlich wäre. Daher wird die Zustellung nicht als Modellvariable für die Beschreibung der Zielgröße berücksichtigt. Es wird jedoch darauf hingewiesen, dass eine in-line-

Regelung der Zustellung beispielsweise durch ein konfokales Weißlichtmikroskop möglich ist [Fle07d].

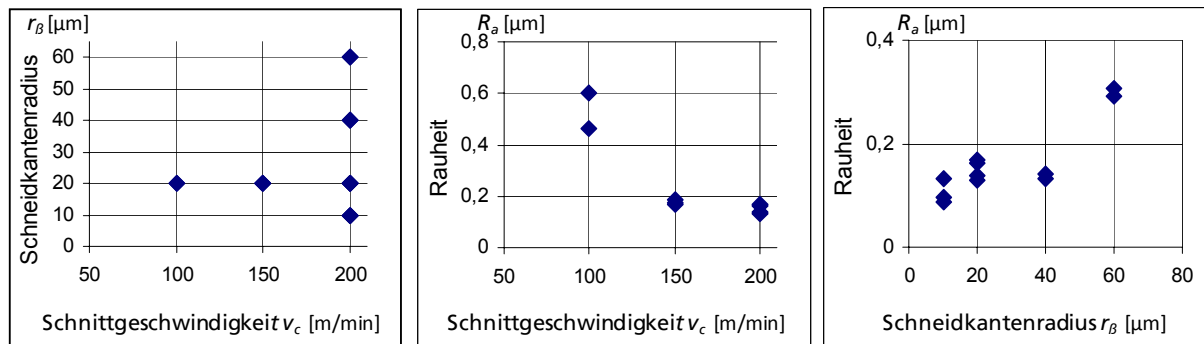


Abbildung 5.8: Untersuchte Parameterkombination (links).

**Erzielte R_a -Werte in Abhängigkeit von v_c bei $r_\beta = 20 \mu\text{m} = \text{konst.}$ (Mitte),
bzw. des Schneidkantenradius bei $v_c = 200 \text{ m/min} = \text{konst.}$ (rechts)**

Das linke Diagramm in Abbildung 5.8 stellt die untersuchten Parameterkombinationen Schnittgeschwindigkeit/Schneidkantenradius grafisch dar.

Das mittlere Diagramm aus Abbildung 5.8 zeigt, dass die erzielten Rauheiten über die verschiedenen Geschwindigkeiten im Bereich von $0,1 \mu\text{m}$ bis $0,6 \mu\text{m}$ für einem konstanten Schneidkantenradius von $r_\beta = 20 \mu\text{m}$ variieren. Allerdings nehmen die Rauheitswerte mit abnehmender Schnittgeschwindigkeit deutlich zu. Mögliche Ursachen dieser Beobachtung sind Rattern, da das filigrane Werkzeug empfindlicher gegen Vibrationen ist, oder Aufbauschneiden aufgrund der niedrigeren Schnittgeschwindigkeiten.

In Abbildung 5.8 sind rechts die Rauheiten in Abhängigkeit des Schneidkantenradius aufgetragen, wobei die Schnittgeschwindigkeit konstant 200 m/min betragen hat.

Die Rauheitswerte steigen mit zunehmendem Schneidkantenradius ausgehend von ca. $0,1 \mu\text{m}$ zunächst leicht an und liegen dann für den größten Schneidkantenradius von $60 \mu\text{m}$ im Bereich von $0,3 \mu\text{m}$. Als Erklärung für diese Beobachtung kann das Verhältnis von Schneidkantenradius zu Spanungsdicke herangezogen werden, das im vorliegenden Versuch für die großen Radien (3-4) um ein Vielfaches höher lag als für die kleineren Radien (0,5-2). Ein hohes Verhältnis begünstigt Ploughing (siehe Kapitel 2.1.1.1) oder Aufbauschneiden, was insgesamt eine

höhere Streuung der Rauheiten für große Radien erwarten lässt. Dies ist im vorliegenden Datensatz nicht der Fall.

Die Varianzanalyse wurde mit der frei verfügbaren Statistiksoftware R durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 5.8 aufgeführt. Gemäß der vorgeschlagenen Einstufung in R werden solche Einflussgrößen als signifikant angesehen, deren p -Wert kleiner als ein Signifikanzniveau von $\alpha = 0,001$ ist. Das Signifikanzniveau beschreibt die maximal zulässige Irrtumswahrscheinlichkeit. Je kleiner der Wert der Irrtumswahrscheinlichkeit ist, desto deutlicher ist der Einfluss des untersuchten Faktors. p -Werte größer als 0,05 beziehungsweise 0,1 gelten als wenig und gar nicht signifikant.

Ausgehend vom p -Wert und der Prüfgröße des F -Tests (=Test ob sich zwei Stichproben aus unterschiedlichen Populationen hinsichtlich ihrer Varianz wesentlich unterscheiden, u.a. [Mon05]) hat der Faktor X_1 (Schnittgeschwindigkeit) sowohl einen signifikanten quadratischen wie linearen Effekt auf die Zielgröße. Für den Faktor X_2 (Schneidkantenradius) sind hingegen nur der quadratische sowie der Wechselwirkungseffekt mit X_1 maßgeblich.

Quelle der Variation	Quadratsumme der Abweichungen	Freiheitsgrade	Mittlere quadr. Abw.	Prüfgröße für F -Test	p -Wert
$X_1 (v_c)$	0,373	1	0,37348	224,6612	< 0,001
$X_2 (r_\beta)$	0,000	1	0,00017	0,1005	0,757
$X_1 X_2 (v_c, r_\beta)$	0,115	1	0,11486	69,0915	< 0,001
$X_1^2 (v_c^2)$	0,456	1	0,45624	274,4389	< 0,001
$X_2^2 (r_\beta^2)$	0,048	1	0,04849	29,1709	< 0,001
Residuen	0,018	11	0,00166		

Tabelle 5.8: Ergebnisse der Varianzanalyse ($n = 16$ Datenpunkte)

Der starke Einfluss der Schnittgeschwindigkeit erscheint bei einem Blick auf die Daten sehr plausibel (siehe auch mittleres Diagramm in Abbildung 5.8). Insgesamt weisen die niedrigen p -Wert (Ausnahme quadratischer Effekt Schneidkantenradius) und der ausgewogene Versuchsplan auf eine ausreichende Datenbasis für eine Modellbildung hin und rechtfertigen die die nachfolgenden Analysen.

5.3.1.2 Regressionsanalyse

Die multiple Regression zur Modellanpassung wurde ebenfalls in der Statistiksoftware R ausgeführt. Unter Berücksichtigung aller linearen und quadratischen Haupteffekte sowie des Wechselwirkungseffekts ergibt sich der folgende formale Zusammenhang (v_c [m/min]; r_β [μm]):

$$R_a = 6,062 \cdot 10^{-5} v_c^2 + 8,505 \cdot 10^{-5} r_\beta^2 - 1,141 \cdot 10^{-2} v_c + 0,106 r_\beta - 5,427 \cdot 10^{-4} r_\beta \cdot v_c \quad (5-7)$$

Das korrigierte Bestimmungsmaß des Regressionsmodells beträgt $R_{corr}^2 = 97,37 \%$. Dieser Wert nahe an 1 bedeutet, dass das Modell fast alle Versuchsdaten sinnvoll abbildet. Der lineare Effekt des Schneidkantenradius wurde trotz seiner geringeren statistischen Signifikanz (Tabelle 5.8) im Modell berücksichtigt, da es das Modell insgesamt genauer macht. Die Berücksichtigung des statistisch weniger signifikanten linearen Effektes des Schneidkantenradius hat also keine negative Auswirkung auf die Modellanpassung.

Zur weiteren Beurteilung werden die Residuen genauer untersucht. Wie aus Abbildung 5.9, links ersichtlich ist, sind die Residuen in guter Näherung normalverteilt. Auch der Shapiro-Wilk-Test [Sha65] weist die Annahme der Normalverteilung nicht zurück (p -Wert=0,9658).

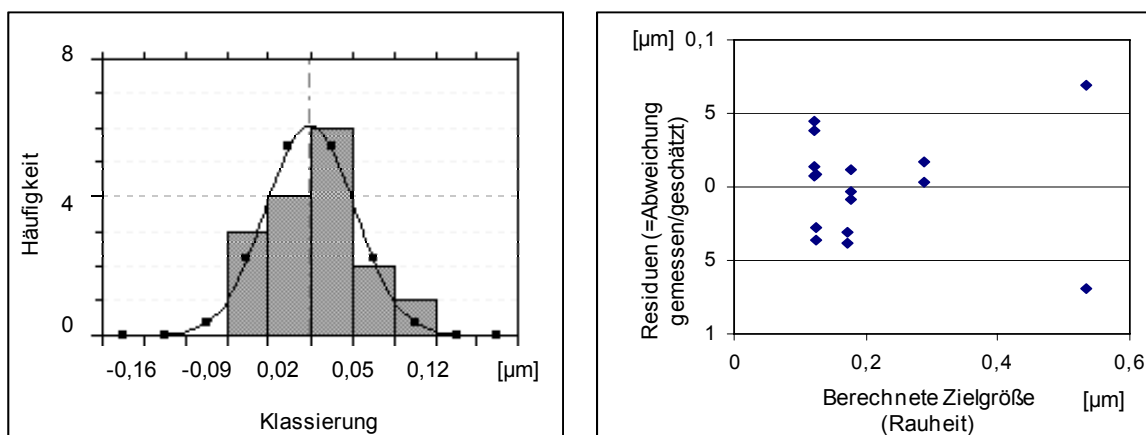


Abbildung 5.9: links: Histogramm der Residuen der Varianzanalyse; rechts: Residuen über den berechneten Werten der Zielgröße nach Gleichung (5-8)

In Abbildung 5.9, rechts sind die Residuen über den berechneten Werten der Zielgröße Rauheit aufgetragen. Es zeigt sich, dass lediglich für die relativ hohen Rauheitswerte (größer als $0,5 \mu\text{m}$) der Fehler höher als $0,05 \mu\text{m}$ ist.

Der mittlere Schätzfehler des Modells liegt bei 3 Prozent und hat eine Varianz von 4 Prozent.

In Abbildung 5.10 ist ein Höhenliniendiagramm des Modells dargestellt. Wie auch an den Versuchsdaten beobachtet wurde, steigt die Rauheit mit dem Schneidkantenradius und mit fallenden Schnittgeschwindigkeiten.

Es fällt auf, dass die Rauheitswerte nach dem Modell (5-8) für einen Schneidkantenradius von $10\ \mu\text{m}$ negativ, sowie bei Schneidkantenradien größer als $50\ \mu\text{m}$ und Schnittgeschwindigkeiten um $100\ \text{m/min}$ sehr hoch werden. Diese extremen Schätzungen sind auf fehlende experimentelle Daten für die entsprechenden Parameterkombinationen zurückzuführen. Dabei gilt es jedoch zu beachten, dass sich die reproduzierbare und gezielte Herstellung und Messung von Schneidkanten kleiner als $10\ \mu\text{m}$ als sehr schwierig gestaltet und Schneidkantenradien größer als $50\ \mu\text{m}$ von untergeordnetem Interesse für die vorliegende Arbeit waren.

In allen anderen Bereichen weist das Modell jedoch eine sehr hohe Güte auf und ermöglicht die Vorhersage der Oberflächenrauheit in Abhängigkeit der Schnittgeschwindigkeit und des Schneidkantenradius.

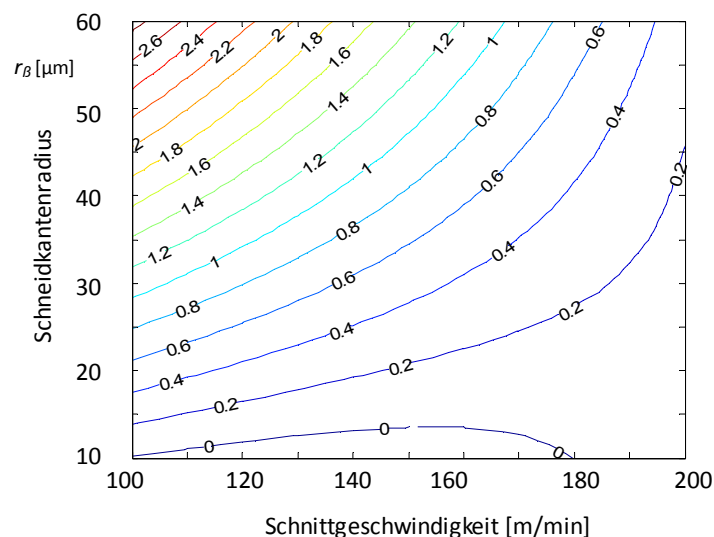


Abbildung 5.10: Höhenliniendiagramm der Oberflächenrauheit in Abhängigkeit des Schneidkantenradius und der Schnittgeschwindigkeit

Es ist daher gezeigt, dass das gefundene Modell für den Nachweis der Funktionalität des Regelkreises angewendet werden kann und eine Untersuchung weiterer Modelle nicht notwendig ist.

5.3.2 Umsetzung der Kovariablenschätzung: Prognose des Schneidkantenradius

5.3.2.1 Schätzfunktion für den Schneidkantenradius

Die für den Mikrobereich adaptierte Schnittkraftformel von Kotschenreuther nach Gleichung (5-5) basiert auf empirischen Untersuchungen. Nach der Identifikation des Schneidkantenradius als Haupteinfluss auf die Schnittkräfte, wurde aufbauend auf den Versuchsreihen ein allgemeiner Zusammenhang zwischen Schneidkantenradius und Schnittkraft mathematisch formuliert. Die Versuchsreihen umfassten dabei drei verschiedene Werkstoffe und zwei Schneidkantenradien (5 μm und 50 μm) [Kot08].

Die vorliegende Versuchsreihe beschränkte sich auf den homogenen Werkstoff C45E. Zudem wurde eine veränderte Schneidengeometrie gewählt (Abbildung 5.4, links), welche eine genaue Charakterisierung des Schneidkantenradius erlaubt und die Berechnung des Spanungsquerschnittes zu $A = b \cdot h$ vereinfacht. Daher konnten experimentell fünf verschiedene Radien ($r_\beta = 10 \mu\text{m}, 20 \mu\text{m}, 30 \mu\text{m}, 40 \mu\text{m}$ und $60 \mu\text{m}$) untersucht werden.

Dennoch muss überprüft werden, ob die Schnittkraftformel (5-5) bzw.(5-6) nach [Kot08] anpassungsfrei zur Schätzung herangezogen werden kann. Für die Validierung der in Gleichung (5-5) bzw. (5-6) gegebenen Beziehung werden die real gemessenen Werte des Schneidkantenradius mit den Prognosewerten aus Formel (5-6) verglichen. Die 62 Validierungs-Datensätze sind im Anhang A.4 aufgelistet. In den Versuchen wurde von einer konstanten Schnitttiefe von ca. 17 μm ausgegangen. [Kot08] ermittelte für den verwendeten Werkstoff auch den Hauptwert und den Anstiegswert der spezifischen Schnittkraft für verschiedene Spannungsdicken (siehe Tabelle 5.9). Der zugrunde liegende Schneidkantenradius betrug 5 μm .

	$h = 1 \text{ mm}$	$h = 0,1 \text{ mm}$	$h = 0,01 \text{ mm}$
$k_{cl,x} \text{ [N/mm}^2 \text{]}$	1450	1500	1600
$m_{cl,x} \text{ [-]}$	0,2	0,21	0,22

Tabelle 5.9: Materialkennwerte C45E (normalisiert) für verschiedene Spannungsdicken - ermittelt für einen Schneidkantenradius 5 μm [Kot08]

Für die gewählte Schnitttiefe von $17 \mu\text{m}$ werden die Hauptwerte der letzten Spalte von Tabelle 5.9 angenommen. Weiterhin wurde ein Werkzeug mit Spanungsbreite $b = 2 \text{ mm}$ verwendet. Damit ergibt sich die Schätzfunktion zu:

$$\hat{r}_\beta = \left(\frac{F_c}{2 \cdot h^{0,78} \cdot 1600} \right)^{4,55} \cdot 0,008442 \quad (5-8)$$

In Abbildung 5.11 sind die Ergebnisse der Schätzung nach Gleichung (5-8) für die Radien $r_\beta = 10 \mu\text{m}$, $20 \mu\text{m}$, $30 \mu\text{m}$, $40 \mu\text{m}$ und $60 \mu\text{m}$ aufgetragen. Wie zu erkennen ist, werden die Radien stark zu niedrig geschätzt. Das bedeutet im Umkehrschluss, dass die Schneidengeometrie geringere Schnittkräfte verursacht, als gemäß der Schätzfunktion zu erwarten wäre.

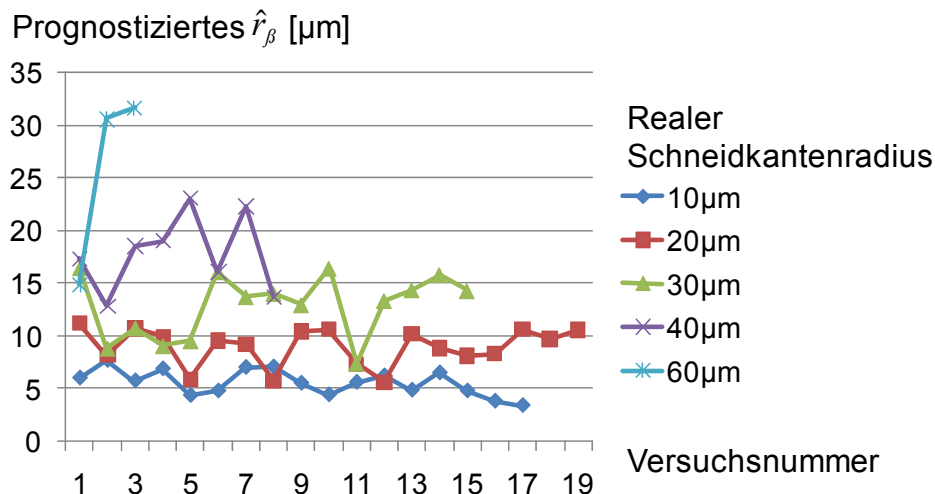


Abbildung 5.11: Geschätzte Schneidkantenverrundungen nach Gleichung (5-8) für Werkzeuge mit $r_\beta = 10 \mu\text{m}$ bis $60 \mu\text{m}$

Bei einem Vergleich des theoretischen mit dem experimentellen Verlauf der Schnittkräfte wird diese Vermutung bestätigt (siehe Abbildung 5.12). Die Abweichung kann - wie bereits erwähnt - auf die veränderten Rahmenbedingungen des Versuches, wie der Beschränkung auf einen Werkstoff und vor allem der Wahl einer veränderten Schneidengeometrie (siehe Abbildung 5.4), zurückgeführt werden.

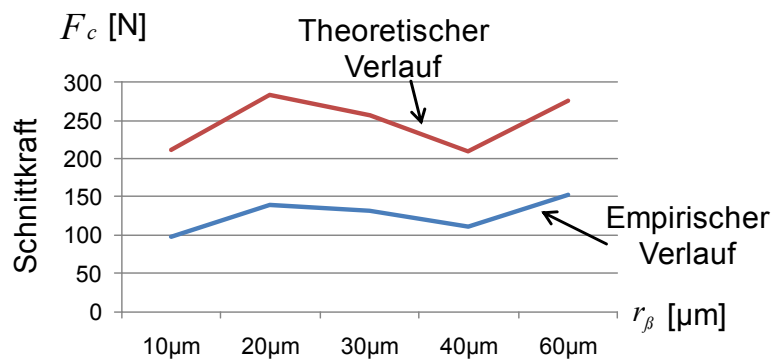


Abbildung 5.12: Vergleich des Schnittkraftverlaufes nach Gleichung (5-8) und des gemessenen Verlaufes (Schnittgeschwindigkeit von 200 m/min)

5.3.2.2 Auswahl der Korrekturfaktoren

Es ist daher erforderlich, eine Anpassung durchzuführen, um eine zuverlässige Schneidkantenschätzung zu gewährleisten. In Tabelle 5.10 sind die Schätzergebnisse nach der ursprünglichen Gleichung (5-8) (K_0) und mit verschiedenen Korrekturfaktoren ($K_1 - K_3$) gegenübergestellt. Wie bereits festgestellt, werden bei der Verwendung von K_0 alle Schneidkantenradien zu niedrig geschätzt.

	K_0	K_1	K_2	K_3
Anpassung	keine	k_c -Wert	Faktor 2	Faktor r_β / h
$\hat{r}_\beta / (r_\beta = 10\mu\text{m})$	0,55	0,65	1,11	0,57
$\hat{r}_\beta / (r_\beta = 20\mu\text{m})$	0,45	0,53	0,90	0,46
$\hat{r}_\beta / (r_\beta = 30\mu\text{m})$	0,43	0,51	0,86	0,88
$\hat{r}_\beta / (r_\beta = 40\mu\text{m})$	0,45	0,53	0,89	1,56
$\hat{r}_\beta / (r_\beta = 60\mu\text{m})$	0,43	0,50	0,86	1,01
Durchschnitt	0,47	0,56	0,94	0,76

Tabelle 5.10: Vergleich der Korrekturfaktoren

Mit dem ersten Ansatz K_1 wird der Einfluss einer veränderten spezifischen Schnittkraft untersucht. Beim Ansatz K_2 wird ein multiplikativer Korrekturfaktor eingeführt, der zunächst gleich zwei sei, da sich aus der Beobachtung ergibt, dass die Werte beim Ansatz K_0 im Mittel um die Hälfte zu niedrig geschätzt werden. Der Ansatz (K_3) untersucht eine Korrektur in

Abhängigkeit des Verhältnisses von Schneidkantenradius r_β zu Spannungsdicke h .

5.3.2.3 Bewertung

Die Ansätze K_0 und K_1 liefern insgesamt zu niedrige Schätzungen. Der Ansatz K_3 bietet eine genauere Schätzung für größere Radien. Da aber aus verschiedenen Gründen der Einsatz schärferer Werkzeuge im Allgemeinen vorgezogen wird (vgl. Kapitel 2.1.1.2), wird an dieser Stelle mehr Wert auf die korrekte Schätzung der niedrigeren Radien gelegt.

Bei der Schätzung der Schneidkantenradien aus gemessenen Schnittkräften, die dem Modelldatensatz für das Regressionsmodell zugeordnet sind, ergeben sich für die verschiedenen Korrekturfaktoren die Schätzfehler aus Tabelle 5.11.

	$\varepsilon_{r_\beta}^{K_0}$	$\varepsilon_{r_\beta}^{K_1}$	$\varepsilon_{r_\beta}^{K_2}$	$\varepsilon_{r_\beta}^{K_3}$
Mittelwert der Residuen	-13,3 μm	-11,3 μm	-2,3 μm	-2,4 μm
Standardabw. der Residuen	8,0 μm	7,4 μm	6,1 μm	18,6 μm

Tabelle 5.11: Mittelwert und Varianz des Schätzfehlers der Schneidkantenradien mit verschiedenen Korrekturfaktoren

Mit den Ansätzen K_0 und K_1 werden die Schneidkantenradien wie erwartet im Mittel zu niedrig geschätzt. Die Standardabweichung des Schätzfehlers ist dagegen akzeptabel. Mit dem Ansatz K_2 werden die Schneidkantenradien mit einer noch kleineren Standardabweichung und im Mittel nur geringfügig niedriger als der Istwert geschätzt. Auch der Korrekturfaktor K_3 stimmt im Mittel relativ gut mit den realen Werten überein, weist jedoch eine sehr hohe Streuung v.a. für niedrige Schneidkantenradien auf.

Insgesamt bietet die Anpassung mit einem einfachen Skalierungsfaktor 2 (Ansatz K_2) eine ausreichende Güte für die Schneidkantenradienschätzung. Die endgültige Schätzfunktion für die geänderte Schneidengeometrie der vorliegenden Versuchsreihen im Gegensatz zum Ansatz von Kotschenreuther ist demnach:

$$\hat{r}_\beta = 2 \cdot \left(\frac{F_c}{2 \cdot h^{0,78} \cdot 1600} \right)^{4,55} \cdot 0,008442 \quad (5-9)$$

5.3.2.4 Zusammenfassung: Modellbildung und Kovariablenschätzung

Die Eingangsgrößen des Prädiktionsschrittes für den Regler sind zum Einen die Schnittgeschwindigkeit, die auch den Hebelfaktor des Reglers darstellt, und zum Anderen der Schätzwert des Schneidkantenradius. Der Schätzwert des Schneidkantenradius wird nach Gleichung (5-9) aus der im aktuellen Fertigungsschritt (Zeitpunkt t) gemessenen Schnittkraft geschätzt und gibt damit den Werkzeugzustand zu Beginn des nächsten Fertigungsschritts an (Zeitpunkt $t+1$).

Minimal- oder Sollwertregelung

Im Bezug auf das Ziel der Rauheitsregelung sind zwei Szenarien denkbar:

1. Sollwertregelung, d.h.: Fertigen möglichst nah an einem gegebenen R_a -Sollwert $\tau > 0 \mu\text{m}$.
2. Minimalwertregelung, d.h.: Erzielen der minimalen Rauheit (Sollwert $\tau = 0 \mu\text{m}$) unter den gegebenen Fertigungsbedingungen.

Die Umsetzung dieser verschiedenen Zielsetzungen unterscheidet sich lediglich im Regelkriterium und der Berechnung der neuen Schnittgeschwindigkeit. Die Gesamtstruktur bleibt erhalten.

In Abbildung 5.13 ist die Minimalwertregelung dargestellt, bei der immer dann eine Anpassung der Stellgröße erfolgt, wenn der vorhergesagte Rauheitswert über dem gewählten Grenzwert liegt. Die Berechnung des Grenzwertes erfolgt entsprechend dem in Kapitel 4.4.3 beschriebenen Vorgehen mit $R_a^{\text{grenz}} = R_a^{\text{Soll}} + 3 \cdot (\sigma/2) = 0 + 3 \cdot (\sigma/2) = 3 \cdot (\sigma/2)$. Damit soll eine Reduktion der Streuung um die Hälfte der ursprünglichen Prozessstreuung erreicht werden.

Im Falle der Sollwertregelung existiert ein Toleranzbereich für die Oberflächenrauheit, d.h. alle Werte $R_a^{\text{min}} < R_a^{\text{soll}} < R_a^{\text{max}}$ sind zulässig. Entsprechend wird je ein oberer und unterer Grenzwert für das Regelkriterium definiert. Die Regelung greift also dann ein, wenn der Vorhersagewert nicht im Bereich von $R_a^{\text{soll}} \pm R_a^{\text{grenz}}$ liegt. Zur Stellgrößenberechnung wird anschließend die Abweichung $\Delta R_a = (R_a^{\text{soll}} - \hat{R}_a^{\text{prog}})^2$ minimiert. Abbildung 5.13 fasst die Regelung für das Mikroorthogonaleinstechdrehen mit der Kovariablenschätzung zusammen.

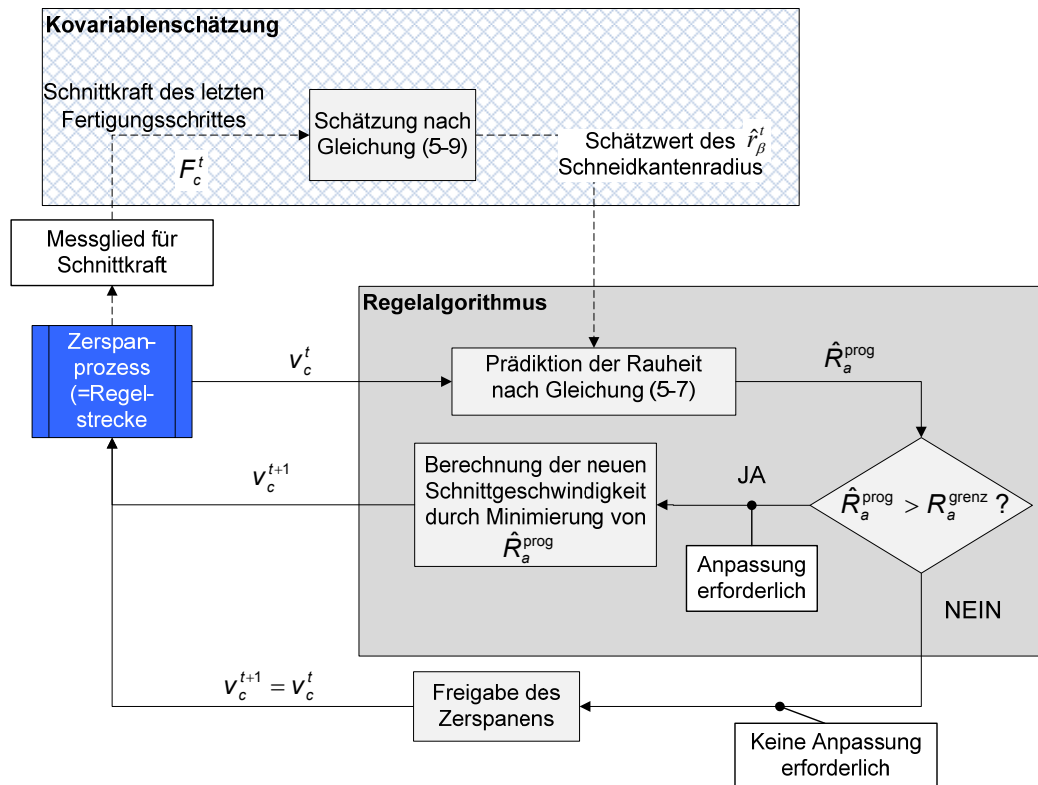


Abbildung 5.13: Struktur des Regelkreises mit Kovariablenschätzung zur Minimalwertregelung der Oberflächenrauheit beim Mikro-Orthogonaleinstechdrehen. Der Grenzwert beträgt $R_a^{\text{grenz}} = 3 \cdot (\sigma / 2)$

5.3.3 Regelungs- und Optimierungsalgorithmus

5.3.3.1 Güte des Regelmodells

Die Aussagekraft des Regressionsmodells nach Gleichung (5-7) soll anhand weiterer Messpunkte validiert werden. In Bezug auf die Modelldaten wies das Regressionsmodell nach Gleichung (5-7) einen Schätzfehler von nur 3 % auf (siehe Kapitel 5.3.1). Bei den Versuchen zur Validierung dieses Regressionsmodells wurden wie zuvor Schnitttiefe, Schnittkräfte sowie die Oberflächenrauheit erfasst. Es handelt sich hierbei um die gleichen 62 Datenpunkte (Anhang A.4) wie in Kapitel 5.3.2.

In Abbildung 5.14 sind die Residuen, das heißt die Abweichung zwischen der gemessenen und den geschätzten Rauheitswerten, über dem Schneidkantenradius aufgetragen. Dabei dienten zum Einen die anfänglich charakterisierten Schneidkantenradien (\hat{R}_a^{mod}) und zum Anderen die mit den Korrekturfaktoren K_2 aus der Schnittkraft geschätzten Radien ($\hat{R}_a^{K_2}$) als Eingangsgrößen.

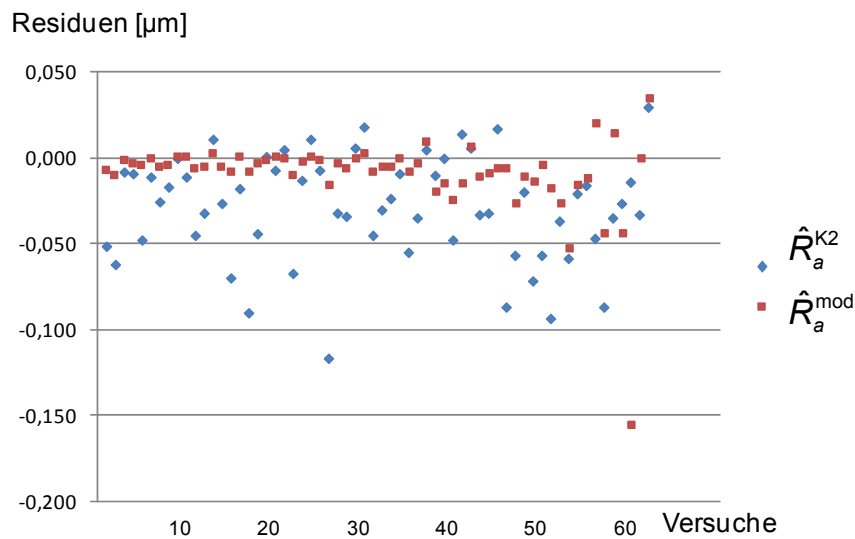


Abbildung 5.14 : Vergleich der Residuen der Rauheitsschätzung

In 8 Fällen tritt eine Verletzung des Definitionsbereichs der Schneidkantenradien des Regressionsmodells (5-7) auf, d.h. es kommt zu Fällen $\hat{r}_\beta < 10 \mu\text{m}$ oder $\hat{r}_\beta > 60 \mu\text{m}$. Zudem kann es gemäß dem Regressionsmodell (5-7) zu negativen Schätzwerten der Rauheit \hat{R}_a^{K2} kommen. Im Hinblick auf die Implementierung des Regelkreises werden daher die folgenden Nebenbedingungen *NB* eingeführt:

$$\hat{r}_{\beta,t}^{\text{NB}} = \begin{cases} \hat{r}_{\beta,t-1} & \hat{r}_{\beta,t} \leq \hat{r}_{\beta,t-1} \\ \hat{r}_{\beta,t} & \hat{r}_{\beta,t-1} < \hat{r}_{\beta,t} \leq 60 \\ 60 & 60 < \hat{r}_{\beta,t} \end{cases} \quad (5-10)$$

$$\hat{R}_a^{\text{NB}} = \begin{cases} 0 & \hat{R}_a \leq 0 \text{ (ideal glatt)} \\ \hat{R}_a & \text{sonst} \end{cases} \quad (5-11)$$

Unter Berücksichtigung dieser Annahmen sind die Schätzfehler für den Oberflächenkennwert R_a bzw. den Schneidkantenradius in Tabelle 5.12 aufgelistet.

	$\mathcal{E}_{R_a}^{\text{mod}}$	$\mathcal{E}_{R_a}^{K2,NB}$	$\mathcal{E}_{r_\beta}^{K2,NB}$
Mittelwert der Residuen	-0,011 μm	-0,028 μm	-2,247 μm
Standardabw. der Residuen	0,023 μm	0,031 μm	6,120 μm

Tabelle 5.12: Mittelwert und Standardabweichung des Schätzfehlers der Oberflächenrauheit und des Schneidkantenradius (mit Nebenbedingungen)

Fazit:

Bei der Validierung des Regressionsmodells wurden zwei Nebenbedingungen erstellt. Diese beschränken einmal den geschätzten Schneidkantenradius als Eingangsgröße des Regressionsmodells auf den zulässigen Bereich zwischen dem zuletzt geschätzten Schneidkantenradius ($=\hat{r}_{\beta,t-1}$) und der oberen Modellgrenze von $60\ \mu\text{m}$ (Gleichung (5-10)). Zum Anderen werden die teilweise negativen und daher unrealistischen Rauheitsschätzwerte des Regressionsmodells zu Null gesetzt (Gleichung (5-11)). Dies entspricht einer ideal glatten Oberfläche.

Bei der Schätzung der Oberflächenrauheit wird die Rauheit im Mittel geringfügig höher als die tatsächliche Rauheit geschätzt. In Verbindung mit den eingeführten Nebenbedingungen sind die Ergebnisse sowohl der Schätzung der Schneidkantenverrundung, als auch der Prognose des Oberflächenkennwerts R_a sehr gut.

5.3.3.2 Ableitung der Optimierungsfunktion für die Regelung

Unter den getroffenen Annahmen kann nun die Optimierungsfunktion für die Regelung abgeleitet werden. Analog zu Gleichung (4-5) wird der Ausgangspunkt für die Ableitung der Optimierungsfunktion folgendermaßen formuliert:

$$\begin{aligned} J(v_c | \hat{r}_\beta) &= E_{r_{\beta,\varepsilon}} [(R_a - \tau)^2 | \hat{r}_\beta] = E_{r_{\beta,\varepsilon}} [(R_a | \hat{r}_\beta) - \tau]^2 \\ &= (E_{r_{\beta,\varepsilon}} [(R_a | \hat{r}_\beta)] - \tau)^2 + \text{Var}_{r_{\beta,\varepsilon}} (R_a | \hat{r}_\beta) \end{aligned} \quad (5-12)$$

mit

$$\begin{aligned} E_{Z,\varepsilon} [(R_a | \hat{Z})] &= \beta_0 + \beta_1^T X + \beta_2^T \hat{Z} + X^T B_1 \hat{Z} + X^T B_2 X \\ E_{r_{\beta,\varepsilon}} [(R_a | \hat{r}_\beta)] &= 6,062 \cdot 10^{-5} \cdot v_c^2 + 8,505 \cdot 10^{-5} \cdot \hat{u} - 1,41 \cdot 10^{-2} \cdot v_c \\ &\quad + 0,106 \cdot \hat{r}_\beta - 5,427 \cdot 10^{-4} \cdot \hat{r}_\beta \cdot v_c \quad \text{wobei } \hat{u} = \hat{r}_\beta^2 \end{aligned} \quad (5-13)$$

und

$$\begin{aligned} \text{Var}_{Z,\varepsilon} (R_a) &= (\beta_2 + \mathbf{B}_1^T X)^T \Sigma_Z (\beta_2 + \mathbf{B}_1^T X) + \sigma_\varepsilon^2 \\ \text{Var}_{r_{\beta,\varepsilon}} (R_a | \hat{r}_\beta) &= \left(\sigma_\varepsilon^2 + (0,106 - 5,427 \cdot 10^{-4} \cdot v_c)^2 \cdot \sigma_{r_\beta}^2 + (8,505 \cdot 10^{-5})^2 \cdot \sigma_u^2 \right. \\ &\quad \left. + 2 \cdot (0,106 - 5,427 \cdot 10^{-4} \cdot v_c) \cdot (8,505 \cdot 10^{-5}) \cdot \text{cov}(\hat{r}_\beta, u) \right) \end{aligned} \quad (5-14)$$

Der Einsatz von Gleichungen (5-13) und (5-14) in (5-12) ergibt die Optimierungsfunktion für die Regelung (für eine ausführliche Herleitung wird auf Anhang A.2.2 verwiesen):

$$J(v_c | \hat{r}_\beta) = \left(\begin{array}{l} \left(6,062 \cdot 10^{-5} \cdot v_c^2 + 8,505 \cdot 10^{-5} \cdot \hat{u} - 1,41 \cdot 10^{-2} \cdot v_c + 0,106 \cdot \hat{r}_\beta - \right)^2 \\ 5,427 \cdot 10^{-4} \cdot \hat{r}_\beta \cdot v_c - \tau \\ + \sigma_\varepsilon^2 + (0,106 - 5,427 \cdot 10^{-4} \cdot v_c)^2 \cdot \sigma_{r_\beta}^2 + (8,505 \cdot 10^{-5})^2 \cdot \sigma_u^2 \\ + 2 \cdot (0,106 - 5,427 \cdot 10^{-4} \cdot v_c) \cdot (8,505 \cdot 10^{-5}) \cdot \text{cov}(\hat{r}_\beta, u) \end{array} \right) \quad (5-15)$$

Die Aufgabe der Regelung ist es, abhängig von dem aktuell geschätzten Zustand des Schneidkantenradius die Hebelfaktoren so auszuwählen, dass die Rauheit möglichst nah am Sollwert liegt. Dies entspricht der Minimierung von Gleichung (4-5) bzw. Gleichung (5-15). Wie in Kapitel 5.3.3.1. aufgezeigt, müssen hierbei die Gültigkeitsgrenzen des Prozessmodells beachtet werden. Auch der Hebelfaktor Schnittgeschwindigkeit darf nur innerhalb der Grenzen des statistischen Versuchsmodells geändert werden. Die vollständige Regler- bzw. Minimierungsaufgabe lautet somit:

$$v_{c,t}^* = \min_{v_{c,t} \in [100,200]} J(v_c | \hat{r}_\beta) \quad (5-16)$$

Die Optimierungsfunktion und der DE-Algorithmus (vgl. Kapitel 4.4.3) wurden in die Statistik-Software R implementiert.

5.3.4 Prozessüberwachung: Implementierung der multivariaten μ -EWMA-Karte

Um neben der prädiktiven Regelung über das APC-Modell die Überwachung der nicht im Regressionsmodell enthaltenen Prozessparameter, der Umwelteinflüsse und des Messprozesses zu gewährleisten, wird die in Kapitel 4.6 und 4.7 entwickelte multivariate μ -EWMA-Karte eingesetzt. Im Folgenden werden die Parameter der multivariaten μ -EWMA-Karten

- für die Überwachung des Messprozesses der Oberflächenrauheit mittels Weißlichtmikroskop und
- für die Überwachung der Residuen zwischen APC-Modellschätzung und den real gemessenen R_a -Werten

am Beispiel des Mikroorthogonaleinstechdrehens hergeleitet.

5.3.4.1 Festlegung Referenzmessstreuung $s_{M,REF}$

Um die Referenzmessstreuung $s_{M,REF}$ (vgl. Kapitel 4.7.2.1) für die Messung des Oberflächenkennwerts R_a der gedrehten Nuten mittels Weißlichtmikroskop zu bestimmen, sind an 10 Messstellen je 5 Wiederholmessungen an zwei der C45E-Ringe durchgeführt worden. Je R_a -Wert wurden dabei 14 parallele Strecken von 700 μm Länge gemessen. In [Din ISO 12179] wird eine Varianzanalyse (ANOVA) vorgeschlagen, um für Tastschnittgeräte die Trennung zwischen der Standardabweichung des Fertigungs-, des Messprozesses und des Messgerätes zu bewerkstelligen. Im Folgenden wird eine Anwendung bzw. Übertragung der ANOVA-Methode auf die Anwendung des verwendeten Weißlichtmikroskops durchgeführt. Es muss darauf hingewiesen werden, dass durch die ANOVA nur eine Trennung der Standardabweichung aus dem Fertigungs- und Messprozess erreicht wird. In der laufenden Fertigung kann die ANOVA nur schwer angewendet werden und es können keine Veränderung in der Lage (=Shift) im Fertigungs- oder Messprozess aufgedeckt werden.

Varianzkomponenten

Die Streuung der Messergebnisse der Oberflächenkenngröße R_a kann auf verschiedene Einflüsse zurückgeführt werden, die in folgende drei Komponenten zusammengefasst werden können (vgl. [Bec03a, Bec03b, DIN 12179]):

- Fertigungsbedingte Kenngrößenstreuung s_F^2 :

Bei der fertigungsbedingten Streuung handelt es sich um die Streuung, die dadurch verursacht wird, dass bedingt durch den Fertigungsprozess die Oberflächenprofilelemente Unterschiede in ihrer Größe und Gestalt aufweisen. Beim Messen überlagert sich die Streuung s_F^2 mit der Streuung des Messprozesses und darf dem Messprozess nicht zugeordnet werden.

- Messgerätbedingte Kenngrößenstreuung s_E^2 :

Wenn bei Messungen unter Wiederholbedingungen stets die gleiche Messstelle getroffen, das gleiche Oberflächenprofil erfasst und ausgewertet wird, dann kann eine Streuung von Messwerten einer Wiederholmessreihe dem Messgerät zugeordnet werden.

- Messprozessbedingte Kenngrößenstreuung s_{MP}^2 :

Sie enthält alle Streuungseinflüsse des Messprozesses, die aus den Veränderungen der äußeren Bedingungen bei der Wiederholung einer Oberflächenprofilmessung resultieren.

Um sowohl den Fertigungsprozess als auch den Messprozess beurteilen zu können, müssen die Streuungsanteile getrennt werden. Unter der Voraussetzung, dass die jeweiligen Varianzkomponenten verursachenden Einflussfaktoren sich in ihrer Wirkung auf die Messergebnisse nicht gegenseitig beeinflussen, kann die ANOVA-Methode zur Trennung der Streuungsanteile verwendet werden [Bec03a]. Im Anhang A.5 sind die Formeln der ANOVA-Methode aufgeführt.

Durchführung der Varianzanalyse

In Tabelle 5.13 sind die einzelnen Messwerte sowie die resultierenden Mittelwerte der Wiederholmessungen (Spalten) und der Messungen an verschiedenen Messstellen (Zeilen) für die Kenngröße R_a aufgeführt.

Messwerte R_a [μm]	Messung					Mittelwert \bar{x}_i
	Nr. 1	Nr. 2	Nr. 3	Nr. 4	Nr. 5	
Messstelle 1	0,1328	0,1400	0,1331	0,1374	0,1360	0,1359
Messstelle 2	0,1648	0,1588	0,1665	0,1679	0,1687	0,1653
Messstelle 3	0,1437	0,1456	0,1443	0,1479	0,1508	0,1465
Messstelle 4	0,1318	0,1257	0,1347	0,1329	0,1319	0,1314
Messstelle 5	0,1144	0,1121	0,1156	0,1181	0,1146	0,1149
Messstelle 6	0,1446	0,1375	0,1402	0,1405	0,1501	0,1462
Messstelle 7	0,1134	0,1150	0,1166	0,1108	0,1132	0,1138
Messstelle 8	0,1865	0,1868	0,1898	0,1785	0,1903	0,1864
Messstelle 9	0,1416	0,1418	0,1474	0,1462	0,1425	0,1439
Messstelle 10	0,1376	0,1377	0,1437	0,1409	0,1393	0,1398
Mittelwert \bar{x}_j	0,1411	0,1401	0,1441	0,1430	0,1437	0,1424

Tabelle 5.13: Messergebnisse R_a zur Bestimmung der Referenzmessstreuung

Abbildung 5.15 veranschaulicht wie die Messwerte der Oberflächenrauheit R_a bei Wiederholmessungen zwischen den Messstellen streuen.

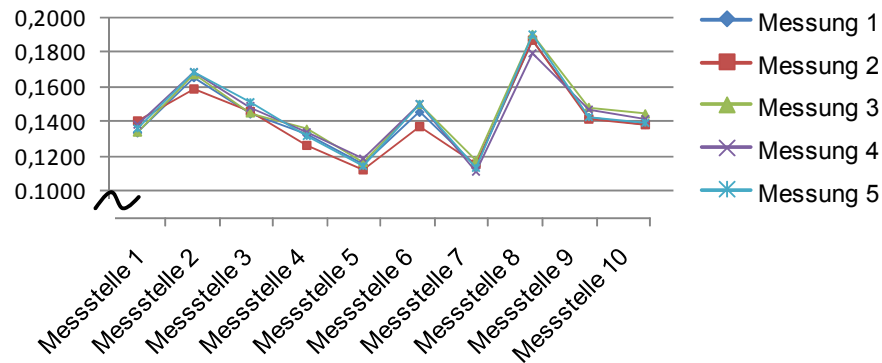


Abbildung 5.15: R_a -Werte der Wiederholmessungen entlang der 10 Messstellen

Tabelle 5.14 zeigt die Ergebnisse der Varianzanalyse für die Varianz des Fertigungs-, des Messprozesses und des Messgerätes.

Mittelwert und Streuungsanteile	Wert
Mittelwert	$R_a = 0,1424 \mu\text{m}$
Fertigungsbedingte Kenngrößenstreuung	$s_F = 0,0153 \mu\text{m}$
Streuung Messprozess	$s_{MP} = 0,0020 \mu\text{m}$
Wiederholpräzision	$s_E = 0,0031 \mu\text{m}$

Tabelle 5.14: Ergebnisse der Varianzanalyse für die Kenngröße R_a

Ergebnisauswertung

Die Ergebnisse der Varianzanalyse zeigen, dass 75 % der beobachteten Gesamtstreuung für den Oberflächenkennwert R_a von der Messung der Oberflächenprofilelemente an verschiedenen Messstellen herrührt. Die Streuung bedingt durch den Messprozess und durch das Messgerät beträgt 10 % bzw. 15 % (Abbildung 5.16). Addiert man die Varianzen der beiden aus der Messung herrührenden Streuungsquellen gemäß

$$s_{M,REF} = \sqrt{s_{MP}^2 + s_E^2} \quad (5-17)$$

erhält man einen Wert für die Referenzmessstreuung $s_{M,REF}$ von $0,0037 \mu\text{m}$.

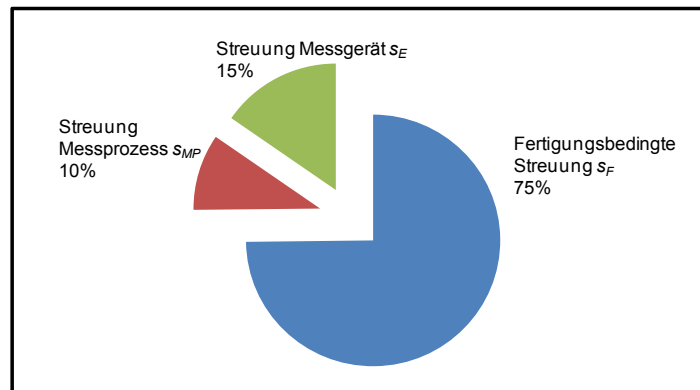


Abbildung 5.16: Streuungsanteile s_{MP} , s_E und s_F

Statistische Verteilung des Oberflächenkennwertes R_a

Bevor ein Qualitätsmerkmal mit einer QRK überwacht wird, muss zunächst seine Verteilung unter normalen Prozessbedingungen untersucht werden. Wie in Kapitel 4.5 aufgezeigt ist bei der Minimalwertregelung eine log-Normalverteilung anzunehmen - bei der Sollwertregelung ist eine Normalverteilung anzunehmen (Abbildung 5.17).

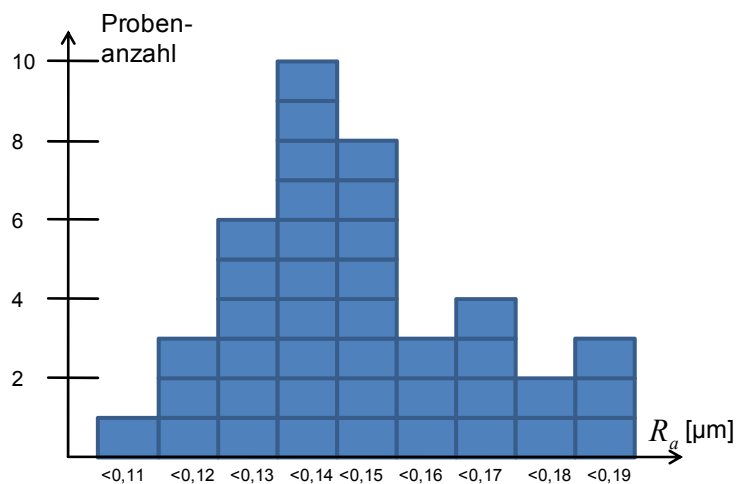


Abbildung 5.17: Histogramm der R_a -Werte

Referenzmessungen an 40 verschiedenen Messstellen an C45E-Ringen mit dem Sollwert $R_a^{Soll} = 0,14 \mu\text{m}$ wurden verwendet, um die Verteilung zu schätzen. In Abbildung 5.17 ist das Histogramm der einzelnen Werte dargestellt. Es deutet auf eine Normalverteilung hin. Der Shapiro-Wilk-Test ($W = 0,9176$, p -Wert = $0,3372$) lehnt die Normalität nicht ab. Im Folgenden wird von einer Normalverteilung der einzelnen Werte des zu überwachenden arithmetischen Mittenrauwerths R_a ausgegangen.

5.3.4.2 Festlegung von λ_{Max}

Da im Folgenden eine asymptotische Funktion zwischen $s_{M,t}$ und λ_t modelliert wird, kann nach Kapitel 4.7.2.2 auf Bestimmung von $s_{M,Max}$ verzichtet werden. Der λ_{Max} -Wert stellt die bestmöglichen Messbedingungen ($s_{M,t}=0$) dar. In diesem Falle werden wie in Kapitel 4.7.2.2 dargestellt, die Empfehlungen von Crowder [Cro89] übernommen. Nach Crowder werden folgende Schritte vorgegeben (vgl. Kapitel 4.6.1.2):

1. Schritt: Festlegen von $ARL(0)$ und $|\delta|$

Die mittlere Lauflänge im ungestörten Prozesszustand wird auf $ARL(0) = 50$ und der kritische Shift auf $\delta = 1$ festgelegt.

2. Schritt: Optimale Wahl der Glättungskonstanten λ

Crowder empfiehlt aus Schritt 1 abgeleitet die Wahl von $\lambda = 0,21$. Dieser empfohlene λ -Wert für die normale EWMA-Karte entspricht für die entwickelte multivariate μ -EWMA-Karte dem λ_{Max} -Wert.

3. Schritt: Festlegung von k

Zur Berechnung der Eingriffsgrenzen der EWMA-Karte wird aus Schritt 1 und Schritt 2 ein $k = 2,06$ empfohlen [Cro89].

5.3.4.3 Modellierung λ_t über $s_{M,t}$

Um die Funktion zwischen λ_t und $s_{M,t}$ in einer asymptotischen Funktion zu modellieren, muss der Referenzmessstreuung $s_{M,REF}$ ein entsprechender λ_0 -Wert zugeordnet werden. Wie in Kapitel 4.8 aufgezeigt, sollen der Fertigungsprozess und die Güte des Prozessmodells (= Verlauf der Residuen) über je eine multivariate μ -EWMA-Karte überwacht werden. Da der Fertigungsprozess eine betragsmäßig geringfügig andere Streuung als der Verlauf der Residuen haben muss, müssen die λ_0 -Werte der beiden Karten unabhängig voneinander gewählt werden.

5.3.4.4 μ -EWMA-Karte für den Fertigungsprozess

Für die Konstruktion der μ -EWMA-QRK für den Fertigungsprozess F wird wie im Kapitel 5.3.4.2 aufgezeigt, eine $ARL(0)=50$ und ein kritischer Shift von $\delta=1 \cdot s_p$ ausgewählt. Mit der Aufnahme der Fertigungsprozessstreuung aus Tabelle 5.14 und der Berechnung der Referenzmessstreuung aus Gleichung 5.17 ergeben sich folgende Kennwerte.

Sollwert Fertigungsprozess	R_a^{Soll}	= 0,14 μm
Streuung Fertigungsprozess	s_F	= 0,0153 μm
Referenzmessstreuung	$s_{M,REF}$	= 0,0037 μm
Gesamtprozessstreuung	s_P	= 0,0157 μm
Maximal-Wert λ_{Max}	λ_{Max}	= 0,21
$\lambda_{0,F}$ entsprechend zu $s_{M,REF}$	$\lambda_{0,F}$	= 0,175
Faktor zur EG-Berechnung	k	= 2,06
Anzahl Messwiederholungen	m	= 5
Eingriffsgrenzen	$OEG = \mu + s_P \cdot k \cdot \sqrt{\lambda_{0,F} / (2 - \lambda_{0,F})}$	
	OEG	= (0,14+0,0157*0,6379) μm
	$UEG = \mu - s_P \cdot k \cdot \sqrt{\lambda_{0,F} / (2 - \lambda_{0,F})}$	
	UEG	= (0,14-0,0157*0,6379) μm

Tabelle 5.15: Berechnung der Eingriffsgrenzen für die μ -EWMA-Karte zur Überwachung des Fertigungsprozesses ($R_a^{Soll}=0,14 \mu\text{m}$)

Zur Ermittlung des zur Referenzmessstreuung zugeordneten $\lambda_{0,F}$ -Werts, wurde die $ARL(0)=50$ über jeweils 5.000 Simulationsläufe für λ_0 -Werte im Bereich von 0,01 bis 0,21 berechnet (Abbildung 5.18).

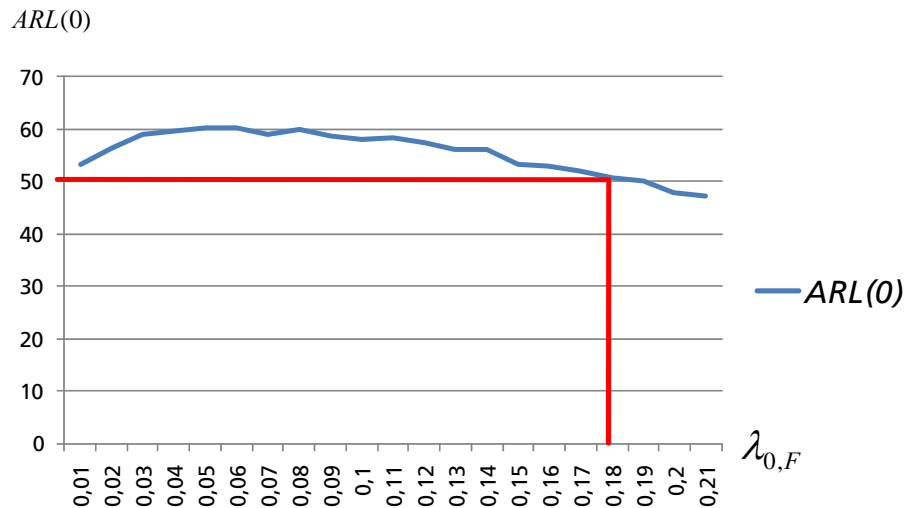


Abbildung 5.18: $ARL(0)$ über $\lambda_{0,F}$ bei 5 Wiederholmessungen

Wie in Anhang A.3 gezeigt, ist vor dem Hintergrund Fertigungs- und Messprozess zu überwachen ein möglichst hoher λ_0 -Wert zu bevorzugen. Für eine $ARL(0)=50$ ergibt sich demnach ein $\lambda_{0,F}$ -Wert von 0,175. Abbildung 5.19 zeigt die resultierende asymptotische Funktion:

$$\lambda_{t,F} = \lambda_{\max} / (\lambda_{\max} / \lambda_{0,F})^{S_{M,t} / S_{M,REF}} = 0,21 / 1,2^{S_{M,t} / 0,0037} \quad (5-18)$$



Abbildung 5.19: Funktion $\lambda_{t,F}$ über $s_{M,t}$ für die μ -EWMA-Karte des Fertigungsprozesses

5.3.4.5 μ -EWMA für die Residuen

Ähnlich wie für die Konstruktion der μ -EWMA-QRK für den Fertigungsprozess (Kapitel 5.3.4.4) wird auch für die μ -EWMA-QRK zur Überwachung der Modellgüte bzw. der Residuen RES (zwischen den prognostizierten Daten aus dem APC-Modell und den real gemessenen Daten) eine $ARL(0)=50$ und ein kritischer Shift von $\delta = 1 \cdot s_{G,RES}$ ausgewählt. Mit der Aufnahme der Referenzmessstreuung aus Gleichung 5.17 und der Streuung der Residuen aus Tabelle 5.12 ergeben sich folgende Kennwerte.

Sollwert Residuen	R_a^{Soll}	= 0
Streuung Residuen	s_{RES}	= 0,031 μm
Referenzmessstreuung	$s_{M,REF}$	= 0,0037 μm
Gesamtstreuung	$s_{P,RES}$	= 0,0312 μm
Maximal-Wert λ_{Max}	λ_{Max}	= 0,21
$\lambda_{0,RES}$ entsprechend zu $s_{M,REF}$	$\lambda_{0,RES}$	= 0,198
Faktor zur EG-Berechnung	k	= 2,06
Anzahl Messwiederholungen	m	= 5
Eingriffsgrenzen	$OEG = \mu + s_{P,RES} \cdot k \cdot \sqrt{\lambda_{0,RES} / (2 - \lambda_{0,RES})}$	
	OEG= (0+0,0312*0,7056) μm	
Eingriffsgrenzen	$UEG = \mu - s_{P,RES} \cdot k \cdot \sqrt{\lambda_{0,RES} / (2 - \lambda_{0,RES})}$	
	UEG= (0-0,0312*0,7056) μm	

Tabelle 5.16: Berechnung der Eingriffsgrenzen für die μ -EWMA-Karte zur Überwachung der Modellgüte

Zur Modellierung der Beziehung zwischen λ_t und $s_{M,t}$ gemäß Gleichung (4-24) wurde die Leistung der Karte für verschiedene $\lambda_{0,RES}$ -Werte bei $m = 5$ Wiederholmessungen getestet. Es ergibt sich ein $\lambda_{0,RES}$ -Wert von 0,198. Die asymptotische Funktion für die Überwachung der Residuen mittels der μ -EWMA-Karte ist in Abbildung 5.20 abgebildet und hat die Form:

$$\lambda_{t,RES} = \lambda_{max} / \left(\lambda_{max} / \lambda_{0,RES} \right)^{s_{M,t} / s_{M,Ref}} = 0,21 / 1,06^{s_{M,t} / 0,0037} \quad (5-19)$$

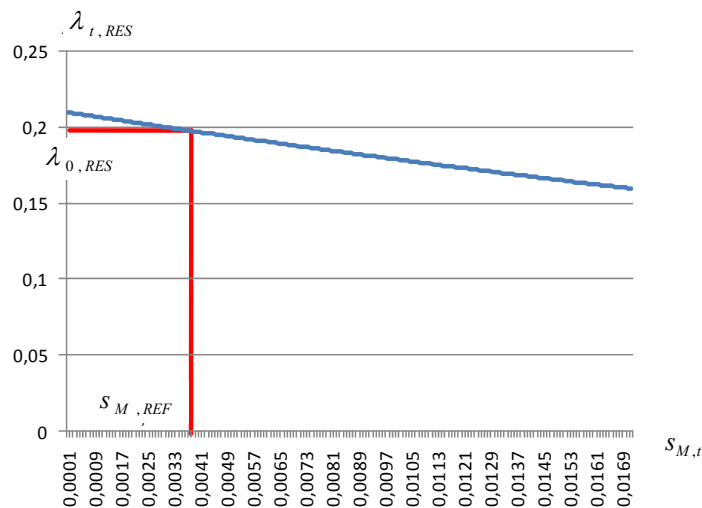


Abbildung 5.20: Funktion $\lambda_{t,RES}$ über $S_{M,t}$ für die μ -EWMA-Karte der Residuen

5.3.4.6 Shewhart-s-Karte für den Messprozess

Als dritte und somit letzte Karte ist die Shewhart-s-Karte zur kontinuierlichen Überwachung des Messprozesses des Weißlichtmikroskops zu erstellen. Hierbei muss die Wahrscheinlichkeit α für einen Fehlalarm (= Verletzung der Eingriffsgrenzen, obwohl der Prozess in Ordnung ist) festgelegt werden. Ziel im vorliegenden Fall ist es, dass im beherrschten Messprozess die $ARL(0)=50$ gilt. Daher wird $\alpha=1/50=0,02$ gewählt. Mit $m=5$ Wiederholmessungen und einer Referenzmessstreuung $S_{M,REF} = 0,0037 \mu\text{m}$ lässt sich die obere Eingriffsgrenze gemäß Gleichung (4-14) berechnen.

$$OEG = S_{M,REF} \cdot \sqrt{\frac{\chi^2_{m-1;1-\alpha}}{m-1}} = S_{M,REF} \cdot \sqrt{\frac{\chi^2_{4;0,98}}{4}} = 0,0037 \cdot \sqrt{\frac{11,67}{4}} = 0,0063 \mu\text{m} \quad (5-20)$$

Die untere Eingriffsgrenze wird gleich null gesetzt, da nur eine Erhöhung der Messstreuung als kritisch betrachtet wird.

5.3.4.7 Prozessüberwachung für das Mikroorthogonaleinstechdrehen

Die drei QRK (Kapitel 5.3.4.4, 5.3.4.5 und 5.3.4.6) ergeben zusammengefasst das statistische Überwachungssystem für die Oberflächenregelung des Mikroorthogonaleinstechdrehens mittels eines Weißlichtmikroskops. Abbildung 5.21 zeigt auf der oberen horizontalen QRK die Überwachung des Fertigungsprozesses, auf der vertikalen QRK die Überwachung des Messprozesses und auf der unteren horizontalen Karte die Überwachung des Modellfehlers bzw. der Güte des APC-Modells.

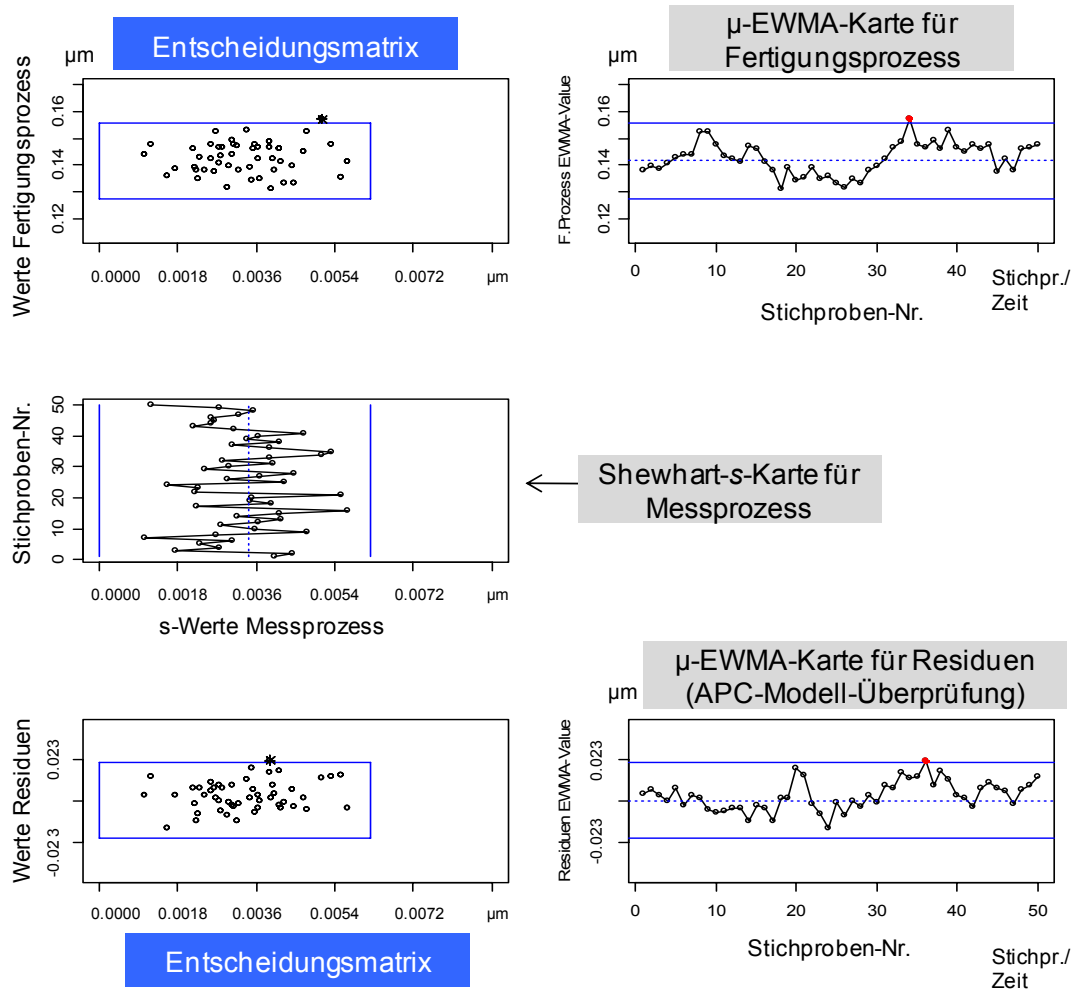


Abbildung 5.21: Überwachungssystem mittels μ -EWMA-Karten für das Mikroorthogonaleinstechdrehen

5.4 Anwendung der statistischen Prozessregelung

In den Kapiteln 5.1 bis 5.3 wurde ein Regelkreis der Oberflächenrauheit für das Mikroorthogonaleinstechdrehen erarbeitet (Abbildung 5.22). Mit Hilfe der statistischen Versuchsmethodik konnte für den Werkstoff C45E (normalisierter Zustand) ein statistisches Modell für die Oberflächenrauheit abhängig von Schnittgeschwindigkeit und Schneidkantenradius mit einem korrigierten Bestimmtheitsmaß von 97 % erstellt werden. Die in-line Messung der Schneidkantenverrundung ist im Prozess aufgrund der Aufbauschneiden nicht durchführbar. Um dennoch eine kontinuierliche und prädiktive Regelung aufzubauen, wurden über ein hochempfindliches 3-Komponenten-Dynamometer vom Typ 9256B1 der Firma Kistler die Zerspankräfte aufgenommen. Über die für Mikrodimensionen und den Werkstoff C45E erweiterte Schnittkraftformel (5-9) kann über die aktuellen Zerspankräfte der aktuelle Schneidkantenradius approximiert werden. Über

die Kenntnis des Schneidkantenradius und dessen Einfluss auf die erreichbare Oberflächengüte kann dann über Formel (5-7) durch eine geeignete Wahl der Schnittgeschwindigkeit die Oberflächengüte innerhalb der Grenzen des Modells geregelt und optimiert werden. Einflussfaktoren außerhalb des APC-Modells, der Messprozess und die Güte des APC-Modells werden durch die vorgeschlagenen QRK überwacht (Abbildung 5.21).

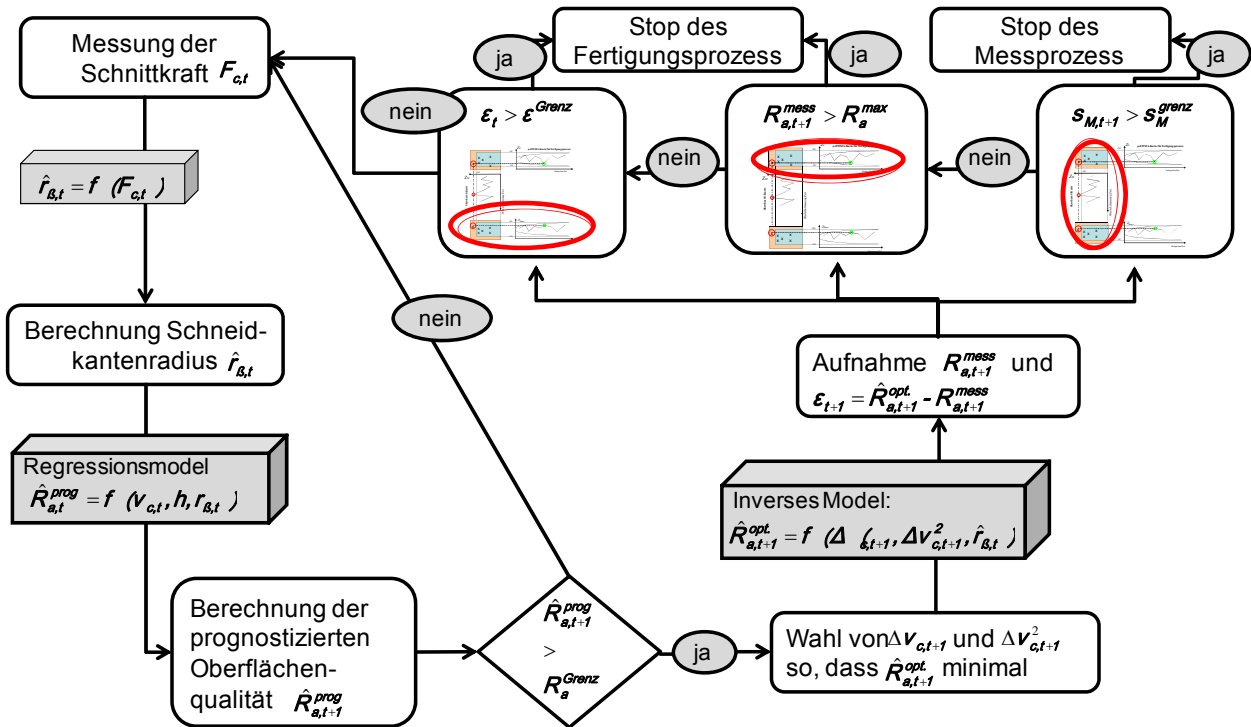


Abbildung 5.22: Regelkreis für die Oberflächengüte des Mikroorthogonaleinstechdrehens

Im Folgenden erfolgt die Anwendung und Validierung der Funktionsfähigkeit des Regelkreises über Simulationen und empirische Versuchsergebnisse.

Simulationen bieten den Vorteil, den Regler über manipulierte Daten (z.B. kontinuierlicher Anstieg der Schnittkraft, Einstellung der Schneidkantenverrundung auf einen bestimmten Wert) in verschiedenen Szenarien testen bzw. verifizieren zu können, ohne dass zusätzliche Einflussparameter aus der Umwelt das Ergebnis verfälschen.

Empirische Versuche haben den Vorteil, die wahre Funktionsfähigkeit von Methoden und Werkzeugen aufzudecken und diese zu validieren. Im vorliegenden Beispiel wäre dies die Verbesserung und Variabilitätsreduzierung der Oberflächengüte der gedrehten Nuten.

Aufgrund der komplementären Vorteile wird der Regelkreis daher sowohl durch Simulationen (Kapitel 5.4.1) als auch durch empirische Versuche (Kapitel 5.4.2) evaluiert.

5.4.1 Simulationsstudie

5.4.1.1 Eingangsgrößen

Die Regelkreisstruktur mit Regelalgorithmus, Kovariablenschätzung und statistischem Überwachungssystem wurde in MATLAB 7 (R14) und in der Statistiksoftware R implementiert. Zu Beginn sind je nach Regelungsziel folgende Vorgaben notwendig:

Minimalwertregelung	Sollwertregelung
Anfangsschnittgeschwindigkeit (v_c)	
Charakterisierter Schneidkantenradius (r_β)	
Fertigungsstreuung (s_F)	
Referenzmessstreuung ($s_{M,REF}$)	
Gewünschte In-Control ARL und kritischer Shift δ	
Maximalwert der zulässigen Rauheit (R_a^{\max})	Sollwert der Rauheit (R_a^{soll})

Tabelle 5.17: Notwendige Vorgaben zur Ausführung des Reglers

Der Regelalgorithmus führt bereits vor dem ersten Zerspanvorgang eine Schätzung der Rauheit und gegebenenfalls eine Anpassung der Stellgröße aus. Die Prognose der Rauheit wird mit dem angegebenen Startwert des Schneidkantenradius durchgeführt.

Die Vorgabe der Prozessstreuung wird zur Berechnung der Toleranzgrenzen und Grenzwerte benötigt. Für die Sollwertregelung werden die Toleranzgrenzen nach Kapitel 4.4.3 zu $R_a^{\max/\min} = R_a^{\text{soll}} \pm 3 \cdot \sigma$ bzw. die für das Regelkriterium benötigten Grenzwerte zu $R_a^{\text{grenz}} = R_a^{\text{soll}} \pm 3 \cdot (\sigma/2)$ berechnet.

Der Regelalgorithmus wird so lange eine Hebelfaktorenanpassung durchführen um das vorgegebene Regelungsziel zu erreichen, bis eines der nachstehenden Ereignisse auftritt:

- Der Vorhersagewert überschreitet auch nach der berechneten Korrektur der Stellgrößen den Wert R_a^{\max} beziehungsweise liegt weiterhin außerhalb des Toleranzbandes um R_a^{soll} .

- Eine der QRK zeigt eine Verletzung der Eingriffsgrenzen an.

In diesen Fällen gibt der Regelalgorithmus eine Fehlermeldung mit Angabe des Abbruchkriteriums aus und beendet den Fertigungsprozess.

5.4.1.2 Aufbau der Simulationsstudien

Um die reine Funktionsfähigkeit und das Verhalten des Regelkreises zu testen, wurden verschiedene Fertigungsszenarien simuliert und analysiert. Es wurden jeweils 50 Fertigungsschritte angenommen. Die Datensätze sind in Anhang 6 aufgeführt.

Da bei den Simulationen kein wahrer R_a -Wert empirisch gemessen werden kann, tritt die Problematik auf, mit was das Reglerergebnis bzw. die Schätzung des Schneidkantenradius und die Prognose der Oberflächenrauheit verglichen werden soll. Daher bauen die Simulationsstudien auf folgender Systematik auf (vgl. Abbildung 5.23):

Ausgehend von einem Startwert der Schnittkraft (Schritt 0) wird der aktuelle Schneidkantenradius gemäß Formel (5-9) berechnet (Schritt 1). Dieser exakt berechnete Wert soll im Folgenden auch den wahren Wert des Schneidkantenradius r_β^{ist} darstellen. Diesem wahren r_β^{ist} -Wert wird eine normalverteilte Zufallszahl mit der Standardabweichung $\sigma_{r_\beta} = 6,1 \mu\text{m}$ überlagert (siehe Tabelle 5.11 und Tabelle 5.12). Dieser durch Schritt 2 erhaltene geschätzte Schneidkantenradius \hat{r}_β stellt im Folgenden den durch die Kovariablenschätzung prognostizierten Wert dar. Somit kann auf objektive Weise ein Vergleich zwischen wahren und gemäß Modell prognostiziertem Schneidkantenradius inklusive der Modellunsicherheit quantifiziert durch σ_{r_β} stattfinden.

Ein ähnliches Vorgehen wird bei der Berechnung und Prognose der Rauheitswerte durchgeführt. Der wahre ungerete $R_a^{\text{ist, unger.}}$ -Wert wird durch die Berechnung über Formel (5-7) unter Verwendung von r_β^{ist} ermittelt (Schritt 3). Der über den prädiktiven Regler ermittelte $\hat{R}_a^{\text{prog.1}}$ -Wert wird über das gleiche Regressionsmodell, diesmal jedoch unter Verwendung von \hat{r}_β ermittelt (Schritt 4). Um die Unsicherheit des Regressionsmodells zu berücksichtigen, wird dem $\hat{R}_a^{\text{prog.1}}$ -Wert eine normalverteilte Zufallszahl mit der Standardabweichung $\sigma_\varepsilon = 0,023 \mu\text{m}$ überlagert (siehe Tabelle 5.11). Der

erhaltene $\hat{R}_a^{\text{prog},2}$ -Wert stellt somit den prognostizierten Wert über das Reglermodell dar (Schritt 5).

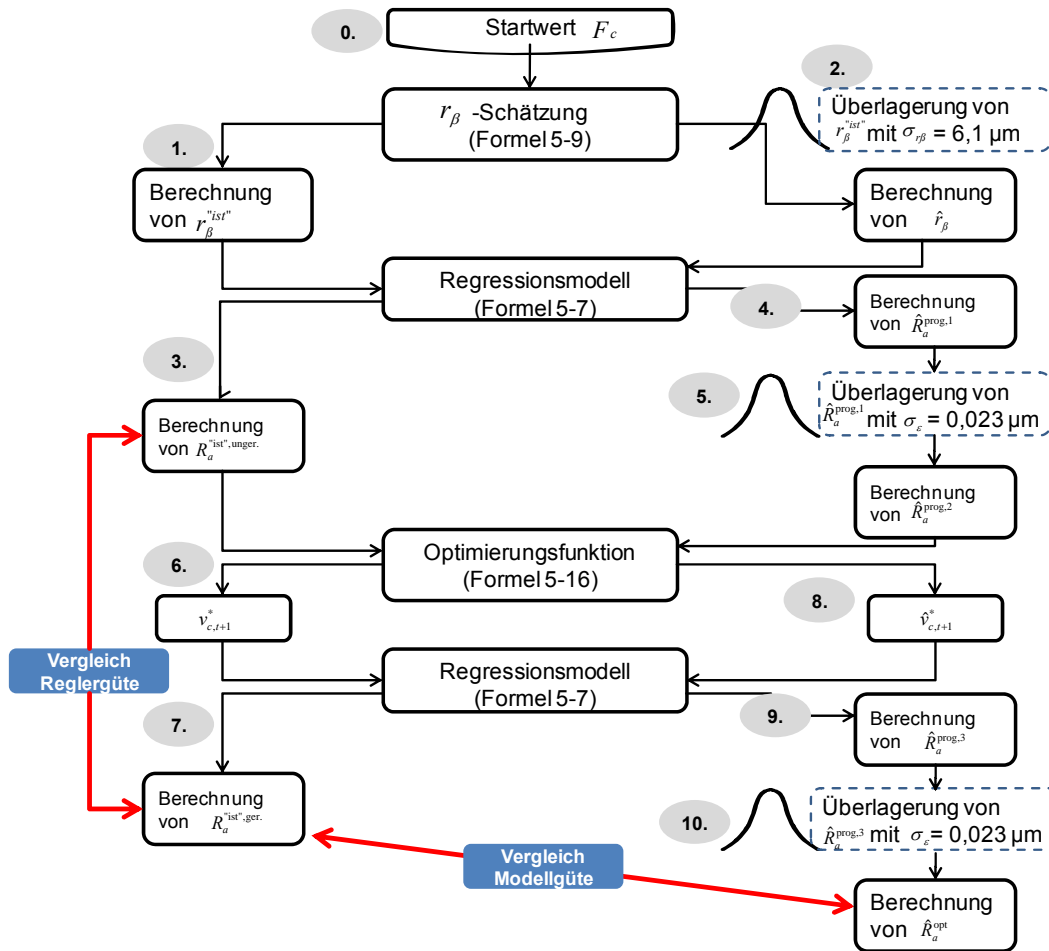


Abbildung 5.23: Ablaufdiagramm der Simulation zur Verifizierung des Reglers

Anschließend findet die eigentliche Regelung statt. Für den wahren $R_a^{\text{ist}, \text{unger.}}$ -Wert wird gemäß dem aktuellen r_β^{ist} basierend auf Formel (5-16) ein $v_{c,t+1}^*$ so gewählt (Schritt 6), dass eine gemäß dem Werte R_a^{soll} möglichst genau entsprechende Oberfläche $R_a^{\text{ist}, \text{ger.}}$ gedreht wird (Schritt 7). Um diesen „wahren“ geregelten Wert $R_a^{\text{ist}, \text{ger.}}$ mit dem des Prognosemodells zu vergleichen, wird in Schritt 8 ein $\hat{v}_{c,t+1}^*$ so gewählt, dass trotz der aktuellen Schneidkantenprognose \hat{r}_β eine dem R_a^{soll} -Wert möglichst genau entsprechende Oberfläche gedreht wird (Schritt 8). Dieser neue $\hat{v}_{c,t+1}^*$ -Wert dient zusammen mit \hat{r}_β zur Berechnung der Rauheit nach der Regelung $\hat{R}_a^{\text{prog},3}$ (Schritt 9). $\hat{R}_a^{\text{prog},3}$ wird ähnlich wie in Schritt 5 mit der Unsicherheit des

Regressionsmodells überlagert (Schritt 10). Der resultierende Wert \hat{R}_a^{opt} stellt somit den optimierten prognostizierten \hat{R}_a -Wert nach der Regelung dar.

Anhand dieser Vorgehensweise kann über die Simulation beispielsweise durch den Vergleich von $R_a^{\text{ist,ger}}$ mit $R_a^{\text{ist,unger.}}$ die Güte des Reglers oder durch den Vergleich von $R_a^{\text{ist,ger}}$ und \hat{R}_a^{opt} die Güte des Modells evaluiert werden. In der Folge werden die Simulationen zur Validierung des Reglers und des statistischen Überwachungssystems vorgestellt.

5.4.1.3 Minimalwertregelung: kontinuierlicher Schnittkraftanstieg

Die in Kapitel 5.4.1.2 geschilderte Vorgehensweise wurde für das Szenario einer Minimalwertregelung ($R_a^{\text{soll}}=0$) mit linearem Schnittkraftanstieg um 0,5 Prozent mit der Anfangsschnittkraft $F_{c,t=0}=80$ N je Arbeitsschritt zugrunde gelegt. Die Anfangswerte betragen $v_{c,t=0}=100$ m/min, $r_\beta^{\text{ist}}=10$ μm , $R_a^{\text{max}}=0,5$ μm und $s_F=0,015$ μm . Der berechnete Grenzwert zur Senkung der Streuung um den Faktor 2 ist daher $R_a^{\text{grenz}}=3*(0,015 \mu\text{m} / 2)=0,045$ μm (vgl. Kapitel 4.4.3).

In Abbildung 5.24 ist der Verlauf der Schnittkraft F_c , des Schneidkantenradius „real“ r_β^{ist} bzw. prognostiziert \hat{r}_β , der geregelten Schnittgeschwindigkeit $\hat{v}_{c,t+1}^*$, der prognostizierten Rauheiten mit (\hat{R}_a^{opt}) und ohne Regler ($\hat{R}_a^{\text{prog,2}}$) sowie der „wahren“ Werte der Rauheit nach der Regelung $R_a^{\text{ist,ger}}$ visualisiert. Die gemittelte Rauheit ohne Regler $R_a^{\text{ist,unger.}}$ zeigt den Fall auf, dass der Drehprozess trotz kontinuierlicher Veränderung der Kovariable Schneidkantenradius weiterhin mit einer konstanten Schnittgeschwindigkeit von $v_c=100$ m/min gefahren wird.

Nach dem Überschreiten des Grenzwerts im 5. Fertigungsschritt erfolgt eine Anpassung der Schnittgeschwindigkeit auf 143 m/min. Die unregelte Rauheit überschreitet bereits im 27. Fertigungsschritt die Toleranzgrenze. Die Regelung der Schnittgeschwindigkeit erfolgt insgesamt fünf Mal, wobei die Schnittgeschwindigkeit mit zunehmendem Radius stetig auf die Endgeschwindigkeit 200 m/min erhöht wurde. Die Endgeschwindigkeit stellt auch gleichzeitig die Modellgrenze dar.

Die geregelten Werte blieben damit 20 Prozent unter dem vorgegebenen Maximalwert. Der Mittelwert der geregelten Rauheitswerte beträgt im

aufgezeichneten Bereich $0,392 \mu\text{m}$ bei einer Standardabweichung von $0,010 \mu\text{m}$. Im Vergleich zu der Entwicklung der unregulierten Rauheitswerte konnte somit der Prozess unterhalb der Eingriffsgrenze gehalten und die Variabilität gesenkt werden. In diesem Test ermöglichte die Rauheitsregelung also eine Fertigung entsprechend der Zielvorgaben.

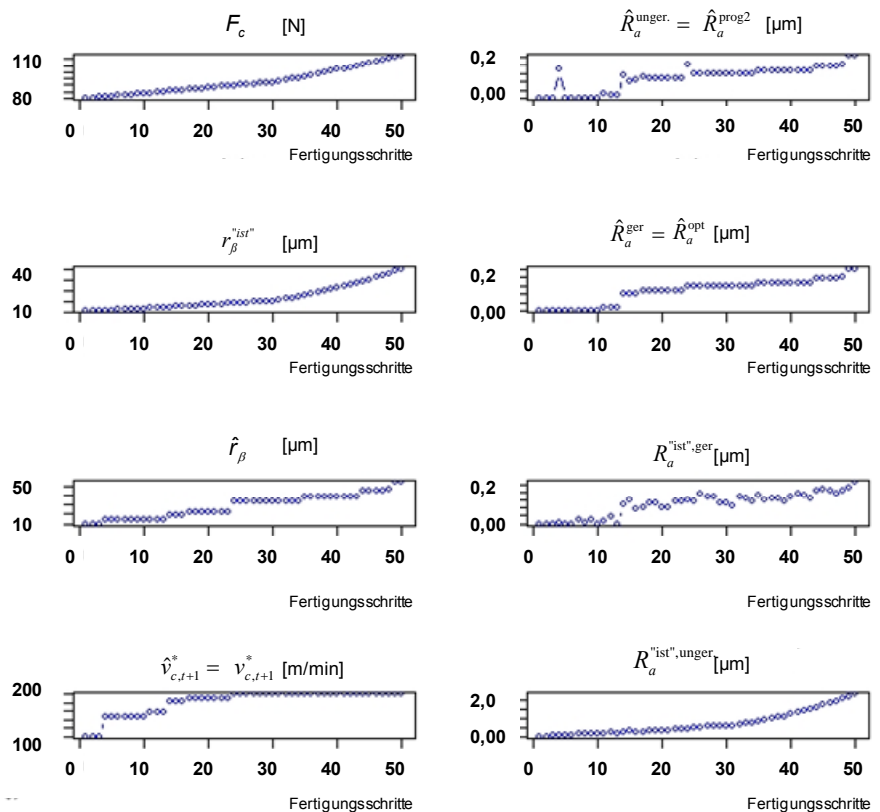


Abbildung 5.24: Simulation der Rauheitsregelung mit $R_a^{\text{soll}} = 0 \mu\text{m}$

5.4.1.4 Sollwertregelung: kontinuierlicher Schnittkraftanstieg

Die Sollwertregelung wurde unter ähnlichen Bedingungen wie die in Kapitel 5.4.1.3 vorgestellte Minimalwertregelung getestet. Dazu wurde die Regelung auf einen Rauheitssollwert $R_a^{\text{soll}} = 0,4 \mu\text{m}$ mit einer Streuung von $s_F = 0,015 \mu\text{m}$ angenommen. Die Anfangsparameter wurden auf $v_{c,t=0} = 100 \text{ m/min}$, $r_{\beta,t=0}^{\text{ist}} = 10 \mu\text{m}$ und $F_{c,t=0} = 80 \text{ N}$ gesetzt. Der Schnittkraftanstieg erfolgte mit 1 Prozent. Die Ergebnisse der Verläufe von Schnittkraft, Schneidkantenradius (wahrer und prognostizierter Wert) und Schnittgeschwindigkeit (geregelt und unregelt) sind in Abbildung 5.25 (oben) dargestellt.

Abbildung 5.25 (unten, links) zeigt die Verläufe der „wahren“ und prognostizierten Rauheitswerte mit und ohne Regelung. Zur klaren Darstellung der Ergebnisse der Regelung sind in Abbildung 5.25 unten, rechts nur die geregelten Rauheitsverläufe in einem Intervall bis $0,7 \mu\text{m}$ visualisiert.

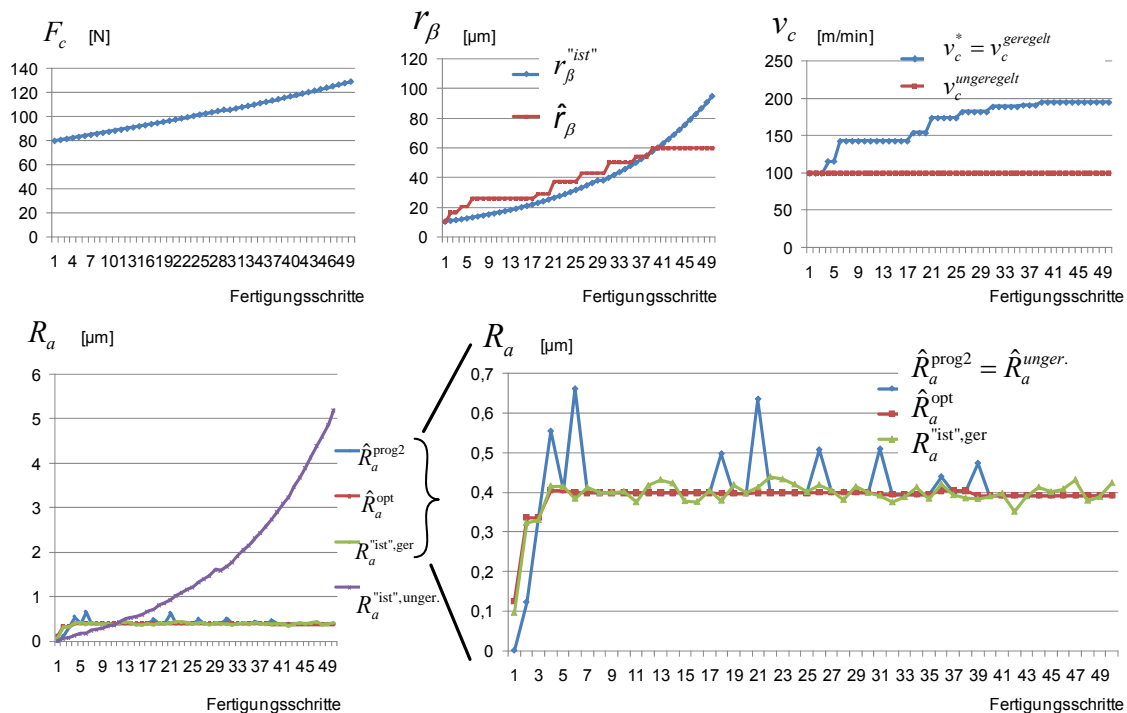


Abbildung 5.25: Simulation der Rauheitsregelung mit $R_a^{\text{soll}} = 0,4 \mu\text{m}$

Der Anstieg der Schnittkraft führte sofort zu einem Anstieg des Schneidkantenradius und der Rauheiten. Der erste Eingriff durch den Regler erfolgte in Fertigungsschritt 4 mit einer Anpassung der Schnittgeschwindigkeit auf 116 m/min. Die Schnittgeschwindigkeit wurde im weiteren Verlauf in acht Schritten auf bis 195 m/min erhöht. Die ungerelten Werte überschritten die Eingriffsgrenze ($R_a^{\text{grenz}} = 0,4225 \mu\text{m}$) nach 12 Fertigungsschritten. Mit der Regelung der Schnittgeschwindigkeit blieben die geregelten Rauheitswerte hingegen wie gewünscht innerhalb der Eingriffsgrenzen und damit weit unter der maximalen Rauheitsgrenze.

Der Mittelwert der geregelten Rauheitswerte beträgt im aufgezeichneten Bereich $0,392 \mu\text{m}$ bei einer Standardabweichung von $0,048 \mu\text{m}$. Im Vergleich zu der Entwicklung der ungerelten Rauheitswerte konnte somit auch bei der Sollwertregelung der Prozess innerhalb der Eingriffsgrenze gehalten und die Variabilität gesenkt werden. Die Simulation zeigt somit, dass auch die Funktionalität der Sollwertregelung gegeben ist.

5.4.1.5 Sollwertregelung: Plötzliche Schneidkantenverrundung

In diesem Fall soll die Leistungsfähigkeit des Reglers nicht für einen kontinuierlichen Parameteranstieg, sondern für eine „plötzliche“ Schneidkantenänderung überprüft werden. Dies ist beispielsweise der Fall, wenn aufgrund von Materialinhomogenitäten an bestimmten Werkstückstellen ein stärkerer Verschleiß als an anderen Stellen auftritt. Dazu wurde die Regelung wie in Kapitel 5.4.1.4 auf einen Rauheitssollwert $R_a^{\text{soll}} = 0,4 \mu\text{m}$ mit einer Streuung von $s_F = 0,015 \mu\text{m}$ angenommen. Als Anfangsparameter wurde $v_{c,t=0} = 100 \text{ m/min}$, $r_{\beta,t=0}^{\text{ist}} = 10 \mu\text{m}$ und $F_{c,t=0} = 80 \text{ N}$ gesetzt. Ab dem 10. Fertigungsschritt erfolgte eine Erhöhung der Schneidkantenverrundung auf $r_{\beta,t=10}^{\text{ist}} = 23 \mu\text{m}$ bzw. eine Schnittkrafterhöhung auf $F_{c,t=10} = 15 \text{ N}$. Die Ergebnisse sind in Abbildung 5.26 dargestellt.

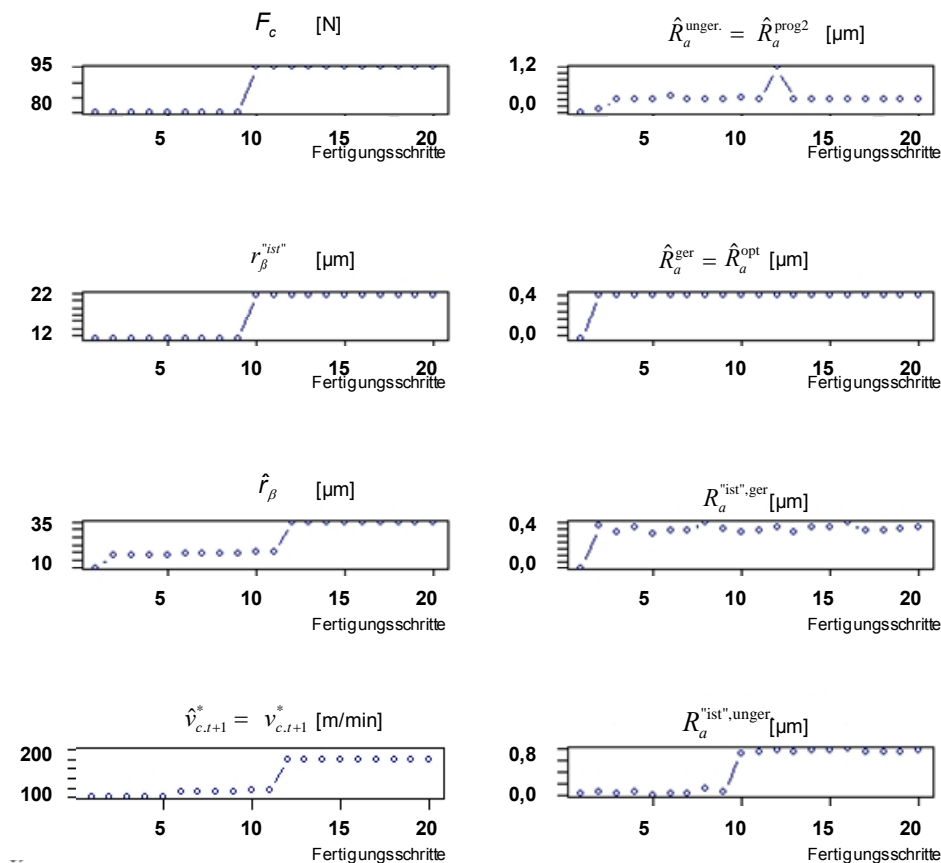


Abbildung 5.26: Simulation der Rauheitsregelung mit Schneidkantenerhöhung

Der Regler erhöht die Schnittgeschwindigkeit im 11. Fertigungsschritt auf 115 m/min und kann somit den Drehprozess innerhalb der Eingriffsgrenzen

halten. Ohne Regelung verschlechtert sich die Oberflächenqualität ab dem 11. Fertigungsschritt auf über $0,7 \mu\text{m}$.

Der Mittelwert der geregelten Rauheitswerte beträgt im aufgezeichneten Bereich $0,3885 \mu\text{m}$ bei einer Standardabweichung von $0,024 \mu\text{m}$. Gegenüber den unregulierten Rauheitswerten konnte die Variabilität um 93 % gesenkt werden. Auch in diesem Beispiel ermöglicht die Rauheitsregelung eine Fertigung entsprechend den Zielvorgaben.

5.4.1.6 Verifikation des statistischen Überwachungssystems durch Simulation

Nach der Verifikation der Leistungsfähigkeit des APC-Reglermodells, soll nun das statistische Überwachungssystem (Abbildung 4.31) bestehend aus der Shewhart- s -Karte und den beiden μ -EWMA-Karten für Fertigungs- und Residuenprozess anhand von Simulationen evaluiert werden. Die Eingangsgrößen zur Erstellung der QRK sind aus Kapitel 5.3.4 übernommen. Um die multivariaten μ -EWMA Karten unter realen Prozessbedingungen zu simulieren, müssen zunächst Daten erzeugt werden, mit denen sich die jeweiligen Prüfgrößen berechnen lassen. In Abbildung 5.27 ist der Ablauf zur Erzeugung von Daten für einen Stichprobenumfang $n=1$ und einer Anzahl an Messwiederholungen von $m=5$ dargestellt.

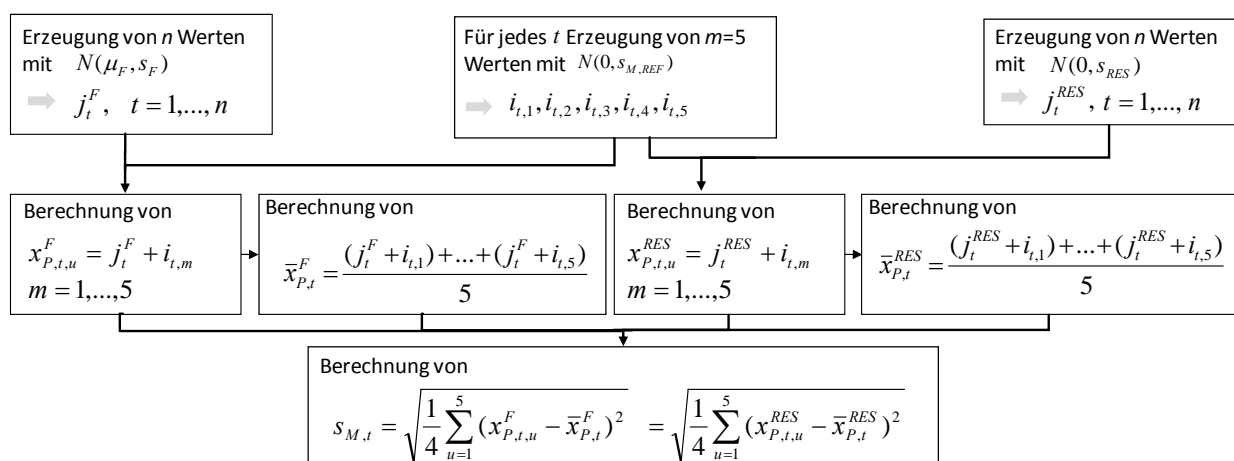


Abbildung 5.27: Ablauf zur Erzeugung der Simulationsdaten von Fertigungs- (links) und Residuenprozess (rechts)

Der Ablauf wird iterativ zu jedem Zeitpunkt t wiederholt. Aus einer normalverteilten Grundgesamtheit des Fertigungsprozesses $N(\mu_F, s_F)$ bzw. des Residuenprozesses $N(0, s_{RES})$ wird ein Wert ($n=1$) gezogen. Gleichzeitig werden $m=5$ Werte aus einer normalverteilten Grundgesamtheit des

Messprozesses $N(0, s_{M,REF})$ gezogen. Um Wiederholmessungen zu konstruieren werden diese $m=5$ Werte jeweils mit dem aus der Menge der $N(\mu_F, s_F)$ - bzw. $N(0, s_{RES})$ -Daten gezogenen Wert addiert. Daraus können der aktuell „gemessene“ Wert $\bar{x}_{P,t}^F$ bzw. $\bar{x}_{P,t}^{RES}$ und die aktuelle Messstreuung $s_{M,t}$ berechnet werden. $s_{M,t}$ wird zum Einen in die Shewhart- s -Karte aufgetragen und zum Anderen zur Berechnung des variablen Gewichtungsfaktors $\lambda_{F,t}$ für den Fertigungsprozess (Tabelle 5.15) sowie zur Berechnung des variablen Gewichtungsfaktors $\lambda_{RES,t}$ für den Prozess der Residuen (Tabelle 5.16) verwendet.

Im Folgenden werden anhand von 4 Szenarien die Leistungsfähigkeit des Qualitätsregelkartensystems und die Funktionsfähigkeit der Implementierung in der Statistiksoftware R demonstriert.

Szenario_1: Messprozess „In Control“, Fertigungsprozess „In Control“, Residuen „In Control“

In diesem Beispiellauf wurde der Fall simuliert, in welchem der Fertigungs-, der Messprozess und die Residuen des Prozessmodells in Ordnung sind (siehe Abbildung 5.28). Oben und unten rechts sind die μ -EWMA-Karten jeweils für den Fertigungsprozess und für die Residuen zu sehen. Oben und unten links sind jeweils die Entscheidungsfelder für Mess-/Fertigungsprozess und Messprozess/Residuen visualisiert. In der Mitte links ist die Shewhart- s -Karte für die Überwachung der aktuellen Messstreuung dargestellt. Die Verletzung der Eingriffsgrenzen der μ -EWMA-Karte für den Fertigungsprozess und Residuen jeweils bei der Stichprobe 34 und 36 können in dem gezeigten Beispiellauf als Fehler 1. Art interpretiert werden. Bei der Shewhart- s -Karte tritt keine Verletzung der Eingriffsgrenzen ein.

Szenario_2: Messprozess „In Control“, Fertigungsprozess „Shift = $\delta = 0,75 \cdot \sigma_P$ “, Residuen „In Control“

In diesem Beispiellauf wurde der Fall simuliert, dass ein Shift der Lage des Fertigungsprozesses in der 15. Stichprobe eintritt (siehe Abbildung 5.29). Der Messprozess und die Residuen bleiben weiterhin in Ordnung. Die μ -EWMA Karte für den Fertigungsprozess oben links zeigt erstmalig bei der Stichprobe 19, dass der Fertigungsprozess gestört ist. Ein Blick auf das Entscheidungsfeld (oben links) macht die Störung im Fertigungsprozess deutlich sichtbar.

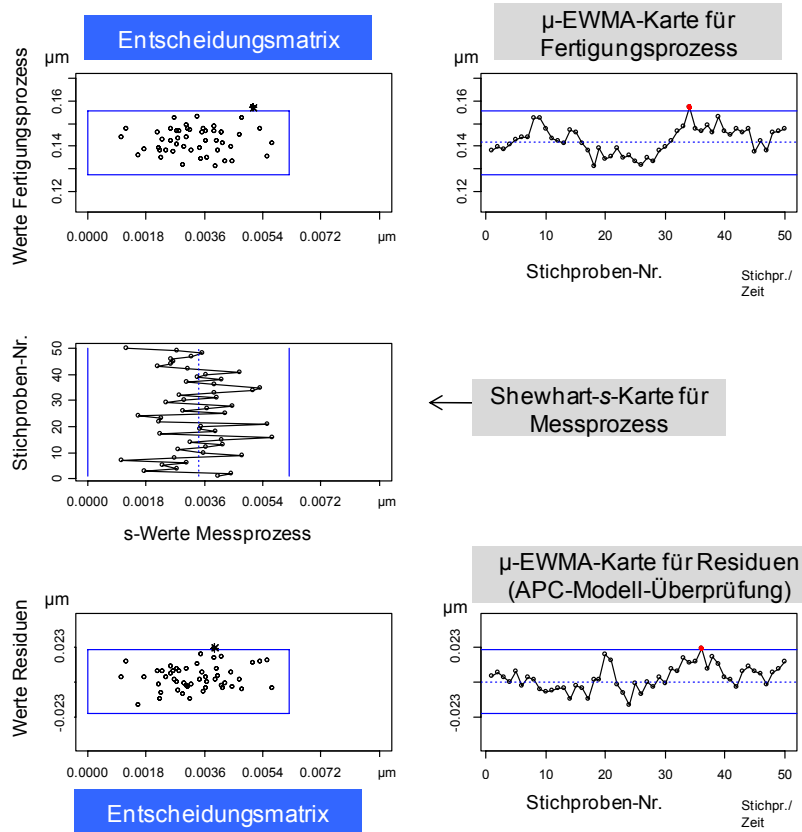


Abbildung 5.28: Multivariate μ -EWMA-Karte: Szenario_1

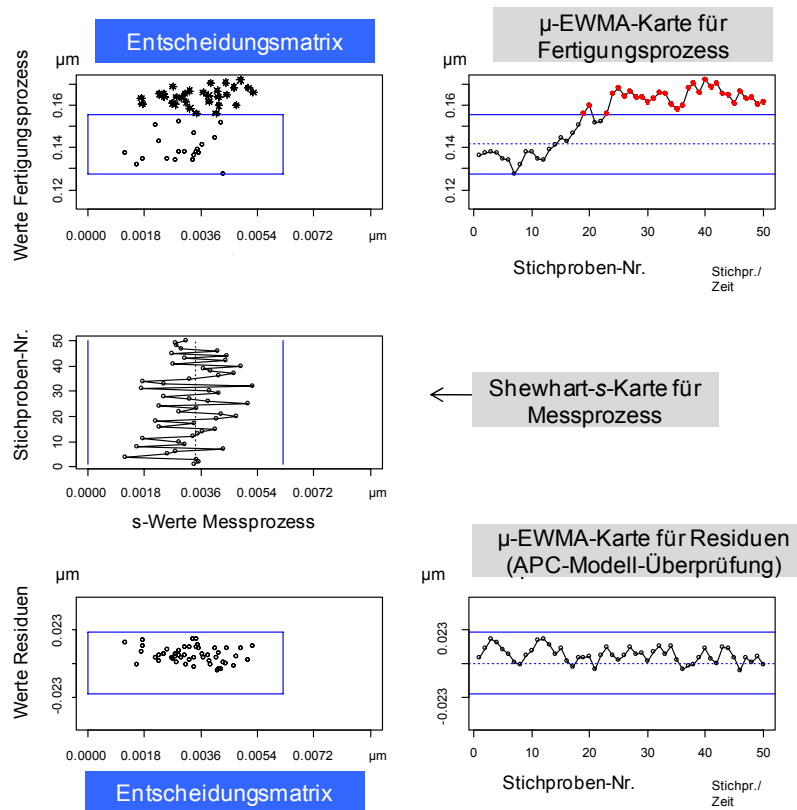


Abbildung 5.29: Multivariate μ -EWMA-Karte: Szenario_2

Szenario_3: Erhöhung „Messstreuung auf $4 \cdot s_{M,REF}$ “, Fertigungsprozess „Shift $\delta = 0,25 \cdot \sigma_P$ “, Residuen „In Control“

In diesem Beispiellauf wurde der Fall simuliert, dass ein sehr kleiner Shift der Lage des Fertigungsprozesses eintritt und gleichzeitig eine Erhöhung der Messstreuung auf $4 \cdot s_{M,REF}$ stattfindet (siehe Abbildung 5.30). Als gemeinsamer Zeitpunkt für beide Manipulationen wurde die Stichprobe 20 gewählt. Es ist festzustellen, dass die Shewhart-s-Karte den Shift sofort anzeigt. Die μ -EWMA Karte für den Fertigungsprozess zeigt den kleinen Shift aufgrund der hohen Messstreuung erst spät an. Im vorliegenden Fall würde der Prozess gestoppt und das Messsystem auf Fehler untersucht werden. Sobald der Messprozess wieder in Ordnung ist, wird der Prozess wieder freigegeben und die μ -EWMA Karte würde bei den darauf folgenden Stichproben den Shift in der Lage des Fertigungsprozesses entdecken.

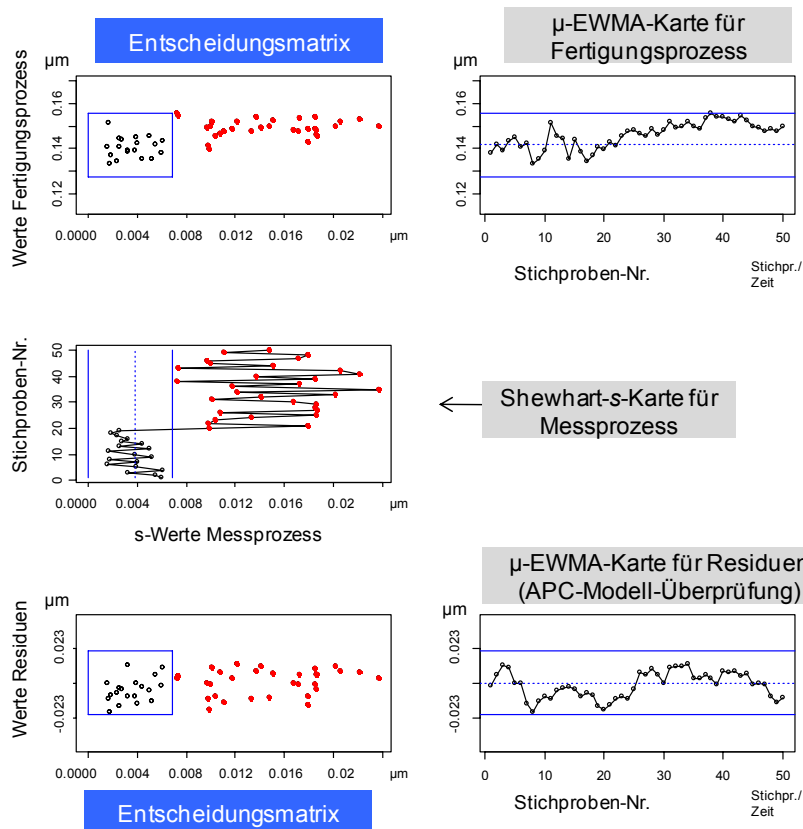


Abbildung 5.30: Multivariate μ -EWMA-Karte: Szenario_3

Szenario_4: Erhöhung „Messstreuung auf $2 \cdot s_{M,REF}$ “, Fertigungsprozess „Shift $\delta = 1 \cdot \sigma_P$ “, Residuen „In Control“

In diesem Beispiellauf wurde der Fall simuliert, dass ein Shift $\delta = 1 \cdot \sigma_P$ der Lage des Fertigungsprozesses und eine Erhöhung der Messstreuung auf $2 \cdot s_{M,REF}$ ab der Stichprobe 20 auftritt (siehe Abbildung 5.31). Trotz erhöhter Messstreuung ist die μ -EWMA-Karte des Fertigungsprozesses in der Lage den Shift $\delta = 1 \cdot \sigma_P$ drei Stichproben nach dessen Eintritt anzuzeigen. Die Störung im Messprozess wird zudem detektiert.

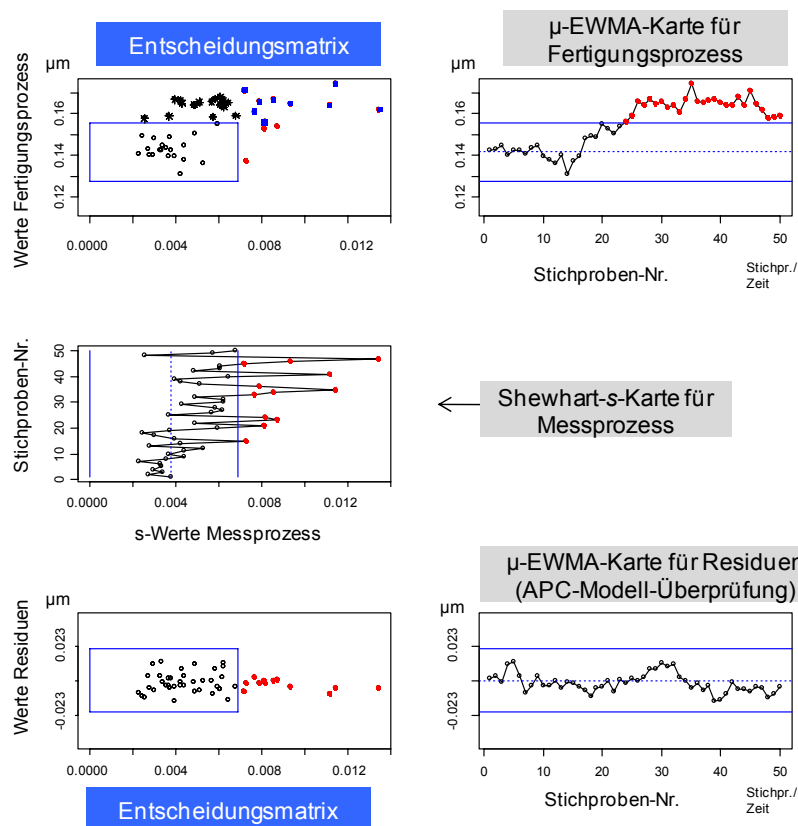


Abbildung 5.31: Multivariate μ -EWMA-Karte: Szenario_4

Über die unterschiedlichen Simulationstudien konnte die Leistungsfähigkeit des implementierten statistischen Überwachungssystems anhand der Eingangsgrößen für den Mikroorthogonaleinstechdrehprozess gezeigt werden. Das resultierende Softwarewerkzeug mit der Visualisierung der verschiedenen Prozessverläufe hilft dem Anwender, einen schnellen und klaren Überblick über die unterschiedlichen Prozesszustände zu erhalten.

5.4.2 Empirische Versuche

Um den Regler auch unter realen Prozessbedingungen auf seine Funktionstüchtigkeit zu untersuchen, sind 20 C45E-Ringe über den Mikroorthogonaleinstechdrehprozess jeweils etwa zur Hälfte mit verschiedenen Parametereinstellungen von Schneidkantenradius, Schnitttiefe und Schnittgeschwindigkeit bearbeitet worden (je Ring eine Prozessparameterkombination). Anschließend wurde die restliche Nut des Werkstücks mit über den Regler berechneten Prozessparameteränderungen gefahren. Im Folgenden wurde überprüft, ob sich gemäß Regressionsmodell (5-7) und in Realität die Oberflächenqualität verbessert hat. Abbildung 5.32 visualisiert das Vorgehen.

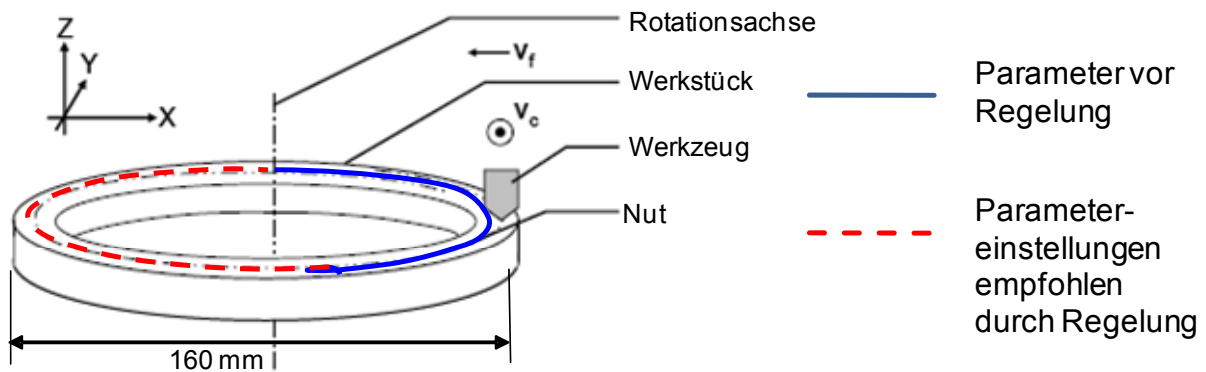


Abbildung 5.32: Bearbeitung des Werkstücks ohne und mit Regelung

Es wurden zu Beginn jeweils die realen Schnittkräfte aufgenommen und die erzielten R_a -Oberflächenqualitäten gemessen ($R_{a,t}^{\text{ist,unger.}}$). Gleichzeitig wurde gemäß dem Regressionsmodell (5-7) die prognostizierte Oberflächenrauheit $\hat{R}_{a,t}^{\text{unger.}}$ berechnet. Anschließend sind die realen Schnittparameter in das Reglermodell nach Formel (5-16) eingegeben worden mit dem Ziel einer Minimalwertregelung ($R_a^{\text{soll}}=0 \mu\text{m}$) oder Sollwertregelung ($R_a^{\text{soll}}=0,4 \mu\text{m}$). Nach der Ausgabe einer den aktuellen Drehprozess verbessernden Schnittgeschwindigkeit $v_{c,t+1}^*$ wurde die erzielbare Rauheit nach der v_c -Anpassung prognostiziert ($\hat{R}_{a,t+1}^{\text{opt}}$). Gleichzeitig wurde auch der reale Prozess mit der geänderten Schnittgeschwindigkeit $v_{c,t+1}^*$ und dem zuvor verwendeten Werkstückring gefahren. Wiederum wurde anschließend die Rauheit des geregelten Prozesses $R_{a,t+1}^{\text{ist,ger.}}$ gemessen. Je ein Rauheitsdatenpunkt bestand aus dem Mittelwert von fünf 700 μm langen Messstrecken auf

einem Ring (vgl. Kapitel 5.3.1) Abbildung 5.33 zeigt das Vorgehen zur empirischen Validierung des Reglers in einem Flussdiagramm auf.

Diese Versuchsstrategie erlaubt es sowohl die Reglergüte (Abweichung zwischen $R_{a,t+1}^{\text{ist,ger.}}$ und $R_{a,t}^{\text{ist,unger.}}$) als auch die Modellgüte (Abweichung zwischen $\hat{R}_{a,t}^{\text{unger.}}$ und $R_{a,t}^{\text{ist,unger.}}$ sowie Abweichung zwischen $\hat{R}_{a,t+1}^{\text{opt.}}$ und $R_{a,t+1}^{\text{ist,ger.}}$) zu evaluieren. Anhang A.7 zeigt die unterschiedlichen Versuchsszenarien, welche wie in Kapitel 5.4.1 in die Minimal- und Sollwertregelung eingeteilt sind.

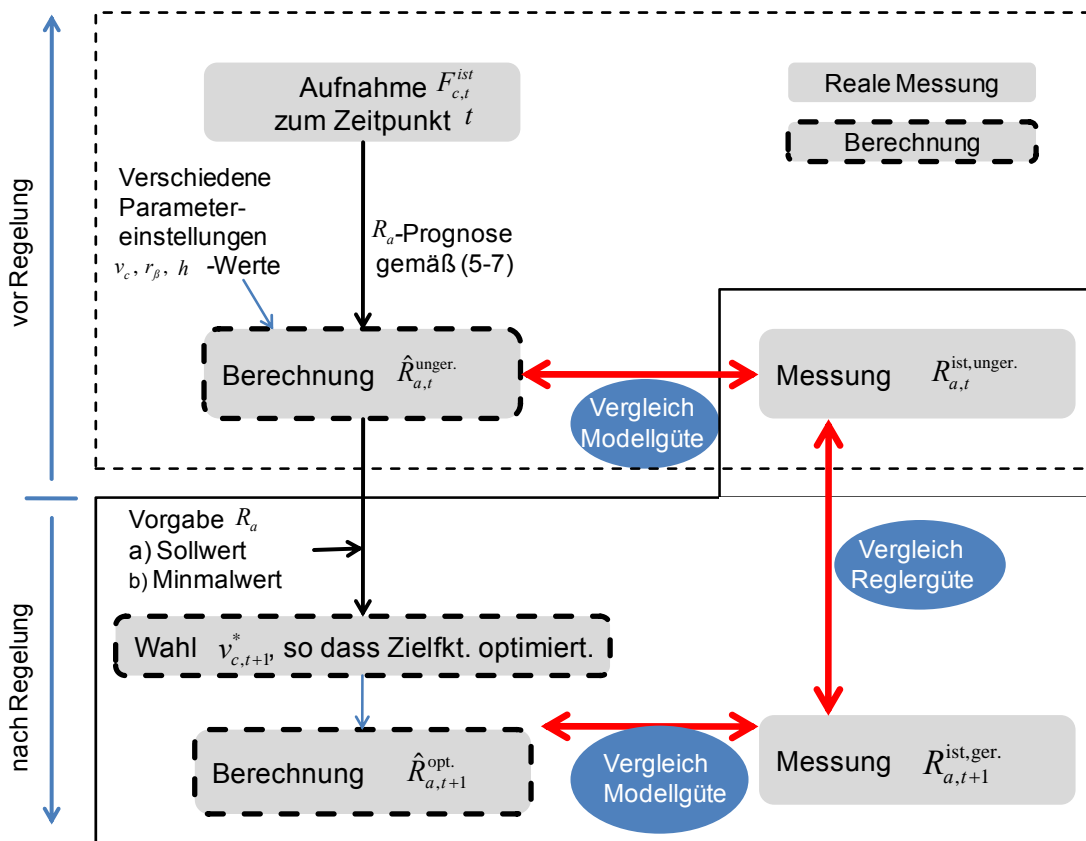


Abbildung 5.33: Flussdiagramm des Vorgehens zur empirischen Validierung

Wie auch schon das Regressionsmodell (korrigiertes Bestimmtheitsmaß von 0,97), so zeigen auch die empirischen Daten zur Überprüfung der Modellgüte eine sehr hohe Güte mit einer Standardabweichung von 0,055 μm . Auch die reale Anwendung des Reglers bestätigt die Ergebnisse aus den Simulationsstudien. In allen Fällen tritt eine Verbesserung der Oberflächenrauheit durch die Anpassung der Schnittgeschwindigkeit gemäß dem Reglermodell auf. Abbildung 5.34 zeigt die Verläufe der prognostizierten und realen R_a -Verläufe vor und nach der Regelung für die untersuchten C45E-Ringe auf.

Im Mittel lässt sich durch die Anwendung der Regelung die Rauheit

- für die Minimalwertregelung um den Absolutbetrag von 0,04 μm und
- für die Sollwertregelung um den Absolutbetrag von 0,22 μm senken.

Die Streuung wird

- bei der Minimalwertregelung um 43 % und
- bei der Sollwertregelung um 28 % gesenkt (siehe Tabelle 5.18).

Der Regler trägt somit sowohl zur Verbesserung der Absolutwerte der Rauheiten, also auch zur Senkung der Variabilität bei.

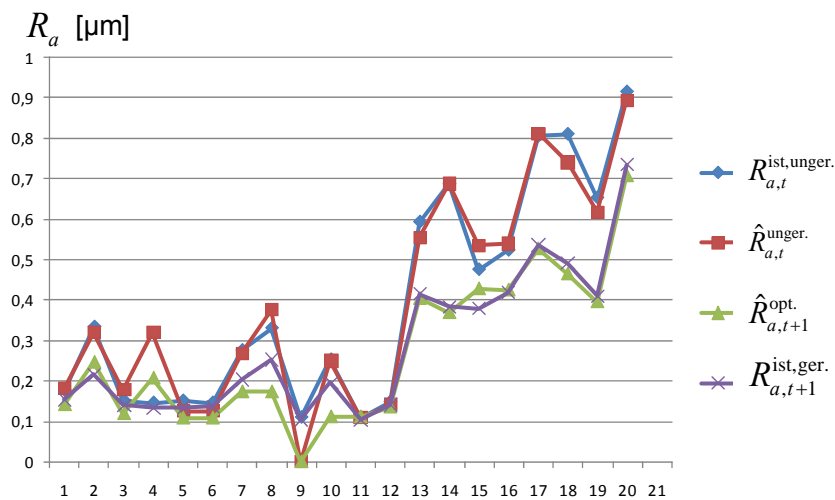


Abbildung 5.34: Prognostizierte und gemessene Rauheitswerte vor und nach der Regelung

	Minimalwertregelung [μm]		Sollwertregelung [μm]	
	$R_{a,t}^{\text{ist,unger.}}$	$R_{a,t+1}^{\text{ist,ger.}}$	$R_{a,t}^{\text{ist,unger.}} - 0,4 \mu\text{m}$	$R_{a,t+1}^{\text{ist,ger.}} - 0,4 \mu\text{m}$
Mittelwert	0,194	0,159	0,284	0,065
Standardabw.	0,082	0,047	0,152	0,109

Tabelle 5.18: Aggregierte Ergebnisse zur empirischen Versuchsdurchführung.

Bei jedem der untersuchten C45E-Ringe wurden 5 Wiederholmessungen durchgeführt. Da keine der Wiederholmessungen signifikant von der Referenzmessstreuung $s_{M,REF} = 0,0037 \mu\text{m}$ (Kapitel 5.3.4.1) abwich, ist bei den vorliegenden Versuchen auf eine Modellierung über die μ -EWMA-Transformation verzichtet worden.

5.5 Bewertung des Ansatzes

In Kapitel 4 wurde eine Methodik zur fertigungsnahen statistischen Prozessregelung von Fertigungs- und Messprozess basierend auf einer Kombination von APC und SPC für die Mikroproduktion hergeleitet. In Kapitel 5 wurde die vorgeschlagene Methodik auf das Beispiel des Mikroorthogonaleinstechdrehens für das Qualitätsmerkmal Oberflächenrauheit angewendet.

Die Anwendung dieser Methodik sieht vor, dass die APC die Aufgabe übernimmt, durch die Ausregelung eines bekannten systematischen Prozesseinflusses die Prozessstreuung kurzfristig zu verringern. Zur Regelung ist ein prädiktiver Regler vorgesehen, dessen Kernstück ein empirisches Regressionsmodell ist. Das Erstellen des Regressionsmodells aus empirischen Daten ist ein breit und stringent anwendbares Vorgehen. Der Modellierungsvorgang liefert außerdem einen Beitrag zum Aufbau des Prozesswissens. Durch die Modellierung der Zielgröße in Abhängigkeit von Kovariablen und Hebel Faktoren sowie die Datenerfassung durch die Qualitätsregelkarten bleibt darüber hinaus der Regelungsvorgang transparent. Da die prädiktive Regelung bereits bei der Vorhersage einer zukünftigen Abweichung einschreitet, ist eine schnelle und effektive Ausregelung der systematischen Störung gewährleistet.

Darüber hinaus ermöglicht die Überwachung des Prozesses durch die SPC die sichere Erkennung zusätzlicher spezieller Störeinflüsse, die nicht im APC-Reglermodell berücksichtigt sind. Durch die Verifizierung eines neuartigen EWMA-Qualitätsregelkarten-Designs mit variablem Gewichtungsfaktor λ_i wird erstmals die Trennung der Streuung von Fertigungs- und Messprozess ermöglicht. Dieser Qualitätsregelkarten-Typ gewährleistet zudem die Überwachung der Güte des APC-Modells durch eine Überwachung der Residuen. So konnte die Lücke im Stand der Forschung und Technik zur Trennung von Fertigungs- und Messprozess geschlossen werden.

Die Leistungsfähigkeit dieser vorgeschlagenen Prozessregelung konnte für das Mikroorthogonaleinstechdrehen gezeigt werden. Über Simulationen konnte sowohl die Eignung des Reglermodells als auch die Funktionsfähigkeit des statistischen Überwachungssystems verifiziert werden. Hierbei wurden der Regler und das statistische Überwachungssystem durch verschiedene Szenarien wie

- kontinuierlicher Schnittkraftanstieg
- Schneidkantenänderung
- Shift in der Fertigungslage
- Erhöhung der Messstreuung

überprüft. Die Prozessstörungen konnten identifiziert werden und der Regler bewies somit seine Funktionstüchtigkeit.

Darüberhinaus konnte über empirische Untersuchungen erneut die Modellgüte der Oberflächenprognose sowie die hohe Reglergüte gezeigt werden. Sowohl für die Minimal- als auch die Sollwertregelung konnte in allen Fällen eine Verbesserung der Absolutwerte der Rauheiten und eine Senkung der Variabilität erreicht werden.

Dem Anwender in der Mikroproduktionstechnik steht somit ein handhabbares und durch die Visualisierung des statistischen Überwachungssystems leicht verständliches Werkzeug zur statistischen Prozessregelung zur Verfügung. Zusammenfassend erfüllt die vorgestellte Mikroprozessregelung in nahezu allen Bereichen die in Kapitel 2.2.1.2 aufgestellten Kriterien, wie die Bewertungsmatrix in Abbildung 5.35 zeigt.

Regelaufgabe		Einrichtung / Flexibilität						
Ausregeln von systematischen Störungen		Schnelligkeit	Überwachung kann ergänzt werden (i)	Geringes Vor- und Expertenwissen (i)	Aufwand für Vor- und Validierung	Universelle Anwendbarkeit		
Prädiktiver Mikroregelkreis aus Kombination von statistischer Modellierung, APC und SPC		++	++	i	++	++	+	
Mess&APC-Überwachung durch multivariate μ-EWMA-Karte		+	+	++	++	++	++	++
Einrichtung / Flexibilität		Überwachung						
Geringes Vor- und Expertenwissen		Aufwand für Einstellung und Validierung		Sicheres Detektieren von Prozessstörungen		Allgemeine Auswertestrategie		Automatisierbare Auswertung
Aufwand für Einstellung und Validierung		Sicheres Detektieren von Prozessstörungen		Allgemeine Auswertestrategie		Überwachung Messprozess		Trennung des Fertigungs- vom Messprozess

Abbildung 5.35: Bewertung der entwickelten und implementierten Mikro-Prozessregelung

Im Hinblick auf die industrielle Anwendbarkeit der entwickelten Mikro-Prozessregelung soll das Vorgehen im Folgenden auf dessen konkreten Aufwand und Nutzen untersucht werden. Zur Strukturierung werden hierbei der Aufwand und der Nutzen in der Vorbereitungsphase und der anschließenden Serienfertigung gemäß Abbildung 5.36 betrachtet.

		Aufwand	Nutzen
Serienfertigung	Vorbereitungsphase	<ul style="list-style-type: none"> • Aufstellung des statistischen Versuchsplans • Ausführung der Versuche • Modellbildung für den Regelungskreis • (Off-line) Messtechnik zur Erfassung der Kovariablen 	<ul style="list-style-type: none"> • Aufbau von Prozessverständnis • Prognose der erreichbaren Qualität basierend auf mathematischem Prozessmodell • Optimale Einstellung der Hebelfaktoren
	einmalig	<ul style="list-style-type: none"> • (On-line) Messtechnik zur Erfassung der Kovariablen • Implementierung des empirischen Prozessmodells und Regelkreises in die CNC-Steuerung 	<ul style="list-style-type: none"> • Do-it-right-the-first-time
	laufend	<ul style="list-style-type: none"> • Kosten für Software zur Visualisierung und Überwachung mittels Qualitätsregelkarten • Mehrfachmessung der Zielgröße für μ-EWMA Ansatz 	<ul style="list-style-type: none"> • Variabilitätsreduzierung <ul style="list-style-type: none"> ○ Steigerung der Produktivität (Ausschussteile ↓, Gutteile ↑) ○ Möglichkeit, Toleranzen enger zu wählen ○ Designänderungen möglich • Durch Prozessstabilität Senkung der Anzahl der Stichproben und des Stichprobenumfangs an zu messenden Teilen • Trennung Fertigungs- und Messprozess <ul style="list-style-type: none"> ○ Steigerung der Produktivität, da sofortige Fehlerzuordnung möglich

Abbildung 5.36: Gegenüberstellung von Aufwand und Nutzen der entwickelten Methodik

Es ist anzumerken, dass in Abbildung 5.36 nur der Mehraufwand und Mehrnutzen gegenüber dem Status quo aufgeführt ist. Beispielsweise wird ein Messsystem zum Erfassen der Zielgröße - im vorliegenden Kapitel also ein konfokales Weißlichtmikroskop zur Charakterisierung der Oberflächenrauheit - nicht als Aufwand gezählt, da dieses Messsystem auch bei jeder anderen Art der Regelung oder Überwachung vorhanden sein müsste. Die Messplattform zur Aufnahme der Schnittkräfte um die Kovariable Schneidkantenradius zu schätzen, stellt dagegen einen Mehraufwand im Vergleich zu traditionellen Ansätzen dar und ist daher aufgeführt.

Für die Aufstellung des statistischen Versuchsplans bzw. die Modellbildung bieten sich diverse günstig verfügbare Software-Programme an. Die eigentliche Durchführung der Versuche sollte bei einer späteren Serienfertigung kaum ins Gewicht fallen und für die Messung der Kovariablen reicht in der Implementierungsphase eine off-line Datenerfassung aus. In der späteren Serienfertigung dagegen muss in ein Messsystem zur on-line Messung bzw. Schätzung der Kovariablen investiert werden, was einen unter Umständen größeren finanziellen Mehraufwand bedeutet. Im vorliegenden Fall ist die Schnitkraftmessplattform mit ca. 20.000 € zu bemessen. Je nach Komplexität des Reglers darf für eine industrielle Anwendung in der Serienfertigung die Implementierung der automatischen Anpassung der Hebelfaktoren in die CNC-Steuerung nicht vernachlässigt werden. Die Software zur Berechnung und Visualisierung des statistischen Überwachungssystems mittels der μ -EWMA-Karten ist mit der vorliegenden Dissertation verfügbar und wird derzeit in Zusammenarbeit mit der Firma *Q-DAS GmbH* im Rahmen des Transferprojekts „Fertigungsnahe Mikro-Qualitätssicherung“ (Fördernummer SFB499 T02) in eine professionelle Softwareumgebung implementiert. Der Mehraufwand für die Wiederholmessungen ist allgemein abhängig von der Komplexität der Messaufgabe und speziell für die Koordinatenmesstechnik stark abhängig von der gewählten Anzahl an Messpunkten. Für die herkömmliche Messung von Standardformelementen kann der Mehraufwand allerdings als gering eingestuft werden, da die Aufspannung und Ausrichtung eines Mikrobauteils weit mehr Zeit erfordert als die anschließenden Wiederholmessungen. Eine Aufstellung ab welchem Verhältnis von Prüfkosten für die erste Messung im Gegensatz zu den Prüfkosten der (günstigeren) Wiederholmessungen sich welche Anzahl an Wiederholmessungen lohnt, wurde von [Lin01a] ausgearbeitet.

Der Nutzen der Durchführung einer statistischen Versuchsplanung bzw. der anschließenden Prozessmodellierung zur Erstellung des Reglers, liegt im Aufbau von Prozessverständnis, der Möglichkeit nachvollziehbare und quantifizierbare Aussagen und Prognosen über das Ergebnis unterschiedlicher Prozessparameter machen zu können sowie der Bestimmung einer für das Qualitätsergebnis optimalen Einstellung der Hebelfaktoren. Im Gegensatz zum oft in der Praxis durchgeführten Trial-and-Error-Prinzip gewährleistet ein Prozessmodell mit entsprechend hoher

Güte (siehe Kapitel 4.3) eine hohe Fertigungsqualität von Anfang an (\equiv do-it-right-the-first-time).

Der größte Nutzen der vorgeschlagenen Methodik bietet sich nach der Implementierungsphase in der Serienfertigung. Die Möglichkeit, die Variabilität (d.h. die Standardabweichung) des Fertigungsprozesses z.B. im Validierungsbeispiel Mikroorthogonaleinstechdrehen um bis zu 43 % zu senken (siehe Kapitel 5.4.2), bietet sowohl die Möglichkeit durch mehr Gutteile die Produktivität zu steigern als auch Toleranzanforderungen noch enger zu spezifizieren und hierdurch zu neuen kostengünstigeren Designs überzugehen. Durch eine Senkung der Prozessvariabilität und somit einer Erhöhung der Prozessstabilität kann über die Serienfertigung hinweg die Anzahl der Stichproben und der Stichprobenumfang der zu untersuchenden Teile gesenkt werden, was den gesteigerten Aufwand durch die Mehrfachmessungen ausgleichen kann. Abschließend betrachtet, bietet die Überwachung über die entworfenen μ -EWMA-Karten die Möglichkeit auftretende Fehler schnell und eindeutig dem Fertigungs-, dem Messprozess oder der Modellbildung zuzuordnen, was die Fehlersuche und somit die Stillstandszeiten stark verkürzt.

Um die Bewertung der entwickelten Methoden zu quantifizieren, werden im Folgenden der Mehraufwand und der Zusatznutzen am Beispiel des Mikroorthogonaleinstechdrehens an einem Zahlbeispiel diskutiert. Der Mehraufwand durch das Messsystem für die Kovariable wird dabei über die zu produzierende Stückzahl bzw. die durch den Regler verminderte Anzahl an Ausschussteilen hinweg amortisiert. Nimmt man eine Reduzierung der Standardabweichung s_{ALT} eines normalverteilten Fertigungsprozesses um 43 % (Kapitel 5.4.2) bei gleichbleibenden Toleranzgrenzen an, so verbessert sich der neue c_p -Index um den Faktor 1,75:

$$c_{p,ALT} = \frac{OT - UT}{6 \cdot s_{ALT}} \quad (5-21)$$

$$c_{p,NEU} = \frac{OT - UT}{6 \cdot s_{NEU}} = \frac{OT - UT}{6 \cdot (1 - 0,43) \cdot s_{ALT}} \quad (5-22)$$

Formel (5-21) in Formel (5-22) ergibt:

$$c_{p,NEU} = \frac{c_{p,ALT}}{(1 - 0,43)} = 1,75 \cdot c_{p,ALT} \quad (5-23)$$

Nimmt man eine gewünschte Amortisationszeit von einem Jahr für die gegebene Kosten der Schnittkraftmessplattform (=20.000 €), Produktionskosten von 25 € pro Werkstück und einen normalverteilten beherrschten Fertigungsprozess mit $c_{p,ALT}$ -Wert von 0,775 (dies entspricht einem Ausschussanteil von 2 % bzw. 20.000 ppm) an, so würde sich durch die Reduzierung der Standardabweichung um 43 % bei gleichbleibenden Toleranzgrenzen ein neuer $c_{p,NEU}$ -Wert von 1,35 (dies entspricht einem Ausschussanteil von 0,0045 % bzw. 45 ppm) ergeben. Der vorgeschlagene Regler bzw. die Investition in das Messsystem würde sich also ab einer Stückzahl x von ca. 40.000 rechnen:

$$x \cdot 25\text{€} \cdot 2\% \geq x \cdot 25\text{€} \cdot 0,0045\% + 20.000\text{€} \equiv x \geq 40.090 \quad (5-24)$$

Abbildung 5.37 zeigt die erforderliche Jahresstückzahl zur Amortisation der Schnittkraftmessplattform innerhalb eines Jahres in Abhängigkeit von Produktionskosten pro Stück und dem Ausschussanteil, falls Prüfkosten für die Oberflächenrauheit und die Folgekosten für den Ausschuss unberücksichtigt bleiben. Es ist zu erkennen, dass die erforderliche Stückzahl mit steigenden Stückkosten und/oder steigendem Ausschussanteil sinkt.

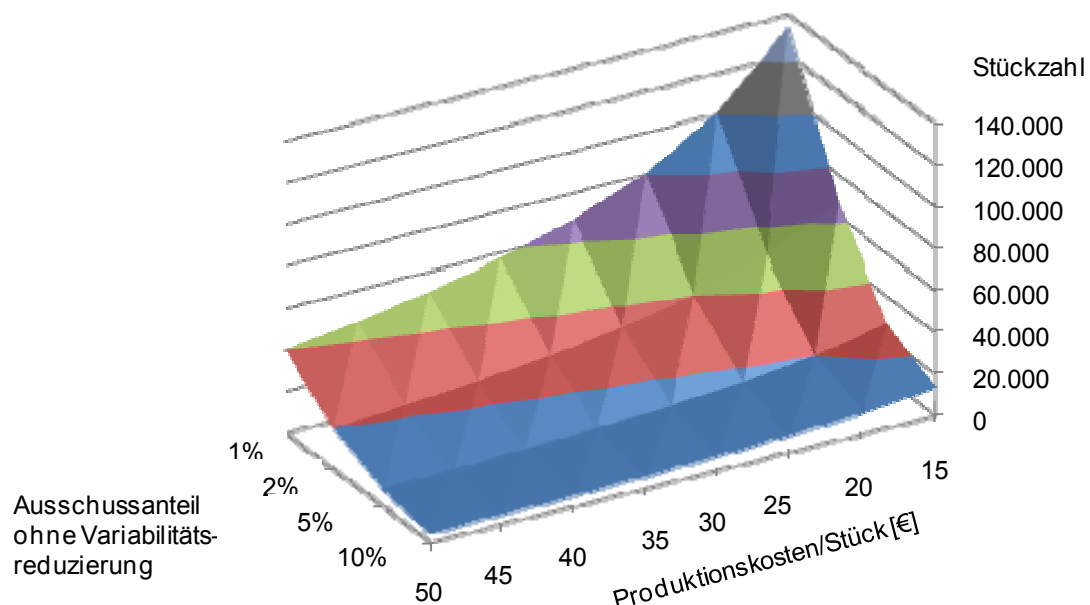


Abbildung 5.37: Erforderliche Stückzahl zur Amortisation der Schnittkraftmessplattform in Abhängigkeit von Produktionskosten und Ausschussanteil (Prüf- und Ausschussfolgekosten unberücksichtigt)

Es gilt zu beachten, dass Formel (5-24) bzw. Abbildung 5.37 nur eine grobe Abschätzung der absoluten Höchststückzahl darstellt, da zum Einen die Produktivitätssteigerung durch die μ -EWMA-Karte unberücksichtigt bleibt und zum Anderen die Folgekosten für einen erhöhten Ausschussanteil v.a. im Hinblick auf die Kundenzufriedenheit nicht quantifiziert sind. Letztere Punkte würden die Amortisationsstückzahl für eine reale industrielle Anwendung weiter reduzieren.

Abschließend ist anzumerken, dass eine Übertragbarkeit des vorgestellten Ansatzes über die Mikrozerspannung hinaus sehr gut durchführbar ist. Sowohl die Aufstellung eines prädiktiven Reglers basierend auf einem durch statistische Versuchsplanung aufgestellten empirischen Regressionsmodell als auch die Anwendung der μ -EWMA-Karten ist für andere abtragende, ur- oder umformende mikrofertigungstechnische Prozesse möglich. Insofern höchste Genauigkeitsanforderungen an die zu untersuchenden geometrischen Qualitätsmerkmale gestellt werden, ist eine Anwendung des entwickelten Regelkreises auch über mikromechanische Bauteile hinaus bis hin zu einer Realisierung in der Makrowelt denkbar.

6 Zusammenfassung und Ausblick

6.1 Zusammenfassung

Unter den zahlreichen Herausforderungen bei der Qualitätssicherung und der Prozessregelung von Mikrofertigungsprozessen waren die beiden Fragestellungen nach einer Reduzierung der Variabilität von Mikrofertigungsprozessen und nach einer Trennung der Streuung von Fertigungs- und Messprozess Ansatzpunkt für die vorliegende Arbeit. Für den Betrachtungsumfang der geometrischen Qualitätsmerkmale, d.h. die Grob- und Feingestalt der Mikrobauteile wurde ein fertigungsnaher Qualitätsregelkreis für Prozesse der Mikroproduktionstechnik und ein statistisches Überwachungssystem für Messprozess sowie Umwelteinflüsse entwickelt. Als Anwendungsbeispiel wurde repräsentativ für das Spektrum der Mikrofertigungsprozesse die Mikrozerspanung bzw. das Mikroorthogonaleinstechdrehen gewählt.

Aufgrund der Größeneffekte, einer hohen Anzahl von Einflussfaktoren und höchsten Genauigkeitsanforderungen weisen Mikrofertigungsprozesse eine hohe Variabilität in Bezug auf die erzielbaren geometrischen Qualitätsergebnisse auf. Ziel einer fertigungsnahen Qualitätssicherung ist es, diese Prozessvariabilität kurz- und langfristig zu verringern. Damit können die Prozesssicherheit und die erzeugte Produktqualität dauerhaft erhöht werden. Die klassischen Ansätze der Qualitätsregelung, die entweder eine Prozessregelung oder eine Prozessüberwachung vorsehen, sind hierfür nicht geeignet. Daher wurde ein Ansatz entwickelt, welcher statistische Modellierung, Regelungstechnik und statistische Prozessregelung kombiniert.

Die aktive und prädiktive Regelung über ein empirisches APC-Modell erreicht eine kurzfristige Verringerung der Prozessstreuung, indem bekannte Prozessstöreinflüsse ausgeregelt werden. Das Kernstück des prädiktiven Reglers ist ein multiples Regressionsmodell der Ziel- bzw. Regelgröße in Abhängigkeit der Einflussgrößen. Als Einflussgrößen werden hierbei Hebelfaktoren und Kovariablen gezählt. Kovariablen sind messbar, im Gegensatz zu den Hebelfaktoren jedoch nicht regelbar. Durch die Regelung wird die Auswirkung dieser Kovariablen auf die Zielgröße kompensiert und somit eine kurzfristige Streuungsreduktion erreicht.

Um einen umfassenden Ansatz zu gewährleisten, wurde ein statistisches Überwachungssystem für die Güte des Messprozesses und des verwendeten Reglermodells entwickelt. Das statistische Überwachungssystem dient dabei zum Einen zur Aufdeckung weiterer, im Prozessmodell des Reglers nicht berücksichtigter Störeinflüsse und erreicht somit eine mittel- bis langfristige Verringerung der Prozessstreuung. Zum Anderen garantiert das statistische Überwachungssystem eine Aufnahme der Güte des Messprozesses.

Messdaten setzen sich immer aus einer Überlagerung von Fertigungs- und Messprozess zusammen. Falls wie in Mikrodimensionen gegeben die Streuung des Messprozesses in der Größenordnung der Streuung des zu überwachenden Fertigungsprozesses liegt, können traditionelle Qualitätsregelkarten zu einer falschen Empfehlung bezüglich der Entscheidung, ob der Fertigungsprozess in oder außer Kontrolle ist, führen. Um daher kontinuierlich sowohl den Fertigungsprozess als auch den Messprozess zu überwachen, wurde ein neuer Qualitätsregelkarten-Typ mit einem variablen Gewichtungsfaktor, welcher von der aktuellen Messstreuung abhängig ist, erarbeitet. Die gesteigerte Leistungsfähigkeit dieser multivariaten μ -EWMA-Karte wurde über ARL-Studien nachgewiesen. Dabei erlaubt die multivariate μ -EWMA-Karte eine Trennung von Fertigungs- und Messprozess und bietet somit eine einfache Ursachendiagnose im Falle einer Eingriffsgrenzenverletzung.

Das vorgeschlagene Vorgehen wurde am Beispiel des Mikro-orthogonaleinstechdrehens zur Regelung der Oberflächenrauheit evaluiert. Die Schnittgeschwindigkeit stellt hierbei den Hebelfaktor des Reglers dar, während der Schneidkantenradius die betrachtete Kovariable des Prozesses ist. Die Erstellung und Validierung des Regressionsmodells sowie die Validierung der Schneidkantenradienschätzung anhand einer auf den Mikrobereich adaptierten Schnittkraftformel wurden erfolgreich durchgeführt. Der gesamte Regelkreis mit prädiktivem Regler, Kovariablenschätzung und statistischem Überwachungssystem wurde unter MATLAB 7 (R14) und in der Statistiksoftware R implementiert. Die Funktionalität dieser mikrospezifischen statistischen Prozessregelung konnte simulativ und empirisch nachgewiesen werden. In allen Fällen konnte eine Verbesserung der Absolutwerte der Rauheiten und eine Senkung der Variabilität erreicht werden.

6.2 Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Struktur einer fertigungsnahen statistischen Prozessregelung für Mikrofertigungsprozesse entworfen und deren Funktionalität - die genannten Herausforderungen überwindend - nachgewiesen. Der zukünftige Fokus sollte auf die praktische Implementierung der Methode in eine reale Serienfertigung von Mikrobauteilen gelegt werden. Weitere Arbeiten könnten sich der Verbesserung einzelner Komponenten der Reglereigenschaften, der Übertragung der Prozessregelung auf andere Mikrofertigungsprozesse sowie der Erweiterung der Regelung über Einzelprozesse hinaus hin zu Mikroprozessketten widmen.

In Bezug auf die Untersuchung einzelner Reglereigenschaften ist ein Vergleich der Leistungsfähigkeit des Reglers in Verbindung mit verschiedenen Prozessmodellen zu nennen. Es ist z.B. der Fall denkbar, dass die Prozessdaten kein Regressionsmodell mit hoher Güte ergeben. Daher ist eine mögliche Fragestellung, wie sehr die Regelgüte und die Modellgüte voneinander abhängen. Eine andere Fragestellung ist, inwiefern die Hinzunahme von mehr Hebelfaktoren und Kovariablen einen messbaren Vorteil gegenüber der Berücksichtigung weniger Einflussfaktoren bringt (Pareto-Prinzip).

Eine weitere Fortführung dieser Arbeit kann die Übertragung der Prozessregelung auf einen anderen Mikrofertigungsprozess betreffen. Die Struktur der „Mikro-Prozessregelung“ wurde bewusst allgemein gehalten. Die prozessspezifischen Komponenten sind das empirische Prozessmodell des zu regelnden Qualitätsmerkmals sowie die Schätzfunktion der Kovariablen. Daher ist eine Übertragung auf Prozesse möglich, bei denen das Qualitätsmerkmal durch den Effekt einer Kovariablen beeinflusst ist.

Als weitere zukünftige Forschungsarbeit muss die Regelung von ganzen Mikroprozessketten erwähnt werden. Die Regelung und kontinuierliche Verbesserung einzelner Mikrofertigungsprozesse konnte am Beispiel des Mikrodrehens nachgewiesen werden. Die Regelung bzw. Gewährleistung der Robustheit einer gesamten Prozesskette ist dagegen noch offen und muss für eine industriell erfolgreiche Mikroproduktion angegangen werden. Die Entwicklung von prozesskettenübergreifenden Fähigkeitsindices, die es erlauben, die gesamte Prozesskette, d.h. alle Produktions-, Materialfluss-, Qualitätssicherungs- und arbeitsvorbereitenden Prozesse gesamt einheitlich zu bewerten, könnte dabei einen ersten Ansatzpunkt darstellen.

Literaturverzeichnis

- [Abr77] Abraham, B.: QCCs and Measurement Error. In: Annual Technical Conference of the American Society for Quality Control 31, 1977, S. 370-374
- [Adu98] Adunka, F.: Messunsicherheiten - Theorie und Praxis. Vulkan Verlag, 1998
- [Alb60] Albrecht, P.: New developments in the theory of the metal cutting process: the ploughing process in metal cutting. In: ASME Journal of Engineering for Industry 81, 1960, S. 348-358
- [Alb08] Albers, A.; Fleischer, J.; Lanza, G.; Deigendesch, T.; Enkler, H.-G.; Leslabay, P.; Oerding, J.; Viering, B.; Schlipf, M.: Prediction of Functionality and Long-term Performance of Microgears. In: Conference Proceedings of the 10th international conference of the European Society for Precision Engineering and Nanotechnology (euspen), Zürich, 2008, S. 270-274
- [Ale04] Alexopoulos, C.; Goldsman, D.; Tsui, K.-L.; Jiang, W.: SPC Monitoring and Variance Estimation. In: Lenz, H.J.; Wilrich, P.-Th. (Hrsg.): Frontiers in Statistical Quality Control, Band 7. Physica-Verlag, Heidelberg, 2004, S.194-210
- [Bal99] Balsamo, A.; Di Ciommo, M.; Mugno, R.; Rebaglia, B.I.; Ricci, E.; Grella, R.: Evaluation of CMM Uncertainty through Monte Carlo Simulations. In: Annals of the CIRP 48, 1999, 1, S. 425-428
- [Bar03] Barriere, T.; Liu, B.; Gelin, J.C.: Determination of the optimal process parameters in metal injection molding from experiments and numerical modelling. In: Journal of Materials Processing Technology, 2003, Vol. 143, S. 636-644.
- [Bau02] Bauer, W.; Knitter, R.; Piotter, V.; Ruprecht, R.: Pulverspritzgießen keramischer Mikroteile – Entwicklung von Prototypen- und Massenfertigungsverfahren. In: Nachrichten – Forschungszentrum Karlsruhe, Jahrgang 34 2002, Online verfügbar: http://hikwww9.fzk.de/imf3/publikationen/Bauer/PIM-FZKA-2002_217.pdf, Besucht am 01.12.06

- [Bec03a] Beck, C.; Pleul, R.: Streuung im Profil – Messunsicherheit bei Rauheitsmessungen ermitteln. In: Qualität und Zuverlässigkeit 12, 2003, S. 1196-1201
- [Bec03b] Beck, C.; Pleul, R.: Messunsicherheit und Prüfprozesseignung bei der Rauheitsmessung mit Tastschnittgeräten. (Langfassung des Artikels: Streuung im Profil in Qualität und Zuverlässigkeit 12/2003, S. 1196) www.qm-infocenter.de/C565, Besucht am 03.03.2008
- [Bec04] Beck, T.; Schneider, J.; Schulze, V.: Characterisation and testing of micro specimen. In: Microsystem Technologies 10, 2004, S. 227-232
- [Bec07] Beck, M.; Piötter, V.; Ruprecht, R.; Haußelt, J.: Effects of moulding conditions on the tolerances of precision parts in ceramic injection moulding. In: 10th European Congress on Advanced Materials and Processes (Euromat 2007), Nürnberg, 2007
- [Bec08] Beck, M.B.; Piötter, V.; Ritzhaupt-Kleissl, H.J.; Haußelt, J.: Statistical Analysis on the quality of precision parts in ceramic moulding. In: Conference Proceedings of the 10th international conference of the European Society for Precision Engineering and Nanotechnology (euspen), Zürich, 2008, S. 179-183
- [Ben54] Bennet, C.A.: Effect of Measurement Error on Chemical Process Control. In: Industrial Quality Control 10, 1954, S. 17-20
- [Ber68] Berndt, G.; Hultsch, E.; Weinhold, H.: Fertigungstoleranz und Messunsicherheit. In: Wissenschaftliche Zeitschrift der Universität Dresden 17, 1968, Nr. 2, S.465-471
- [Ber04] Bergmann, J.: Taktile Messung kleinster Formteile – den Mikrokosmos berühren. In: Quality Engineering 5, 2004, S. 20-22
- [Bie08] Biermann, D.; Kahnis, P.: Influence of a Downscaling of the Tool Diameter on the Dynamic Behaviour of Micromilling Processes. In: Proceedings of the 3rd CIRP International Conference High Performance Cutting (HPC), Dublin, 2008, Irland, Edts.: G. Byrne und G. O'Donnell, S. 169-178

- [Bis08] Bissacco, G.; Hansen, H.N.; Slunsky, J.: Modelling the cutting edge radius size effect for force prediction in micro milling. In: CIRP Annals - Manufacturing Technology 57/1, 2008, S. 113-116
- [Bis04] Bissacco, G.: Surface Generation and Optimization in Micromilling. Ph.D.-Thesis, Department of Manufacturing Engineering and Management, Technical University of Denmark, 2004
- [Bla89] Bläsing, J.P.: Statistische Qualitätskontrolle. Handbuch der Western Electric Company. gfmt, Sankt Gallen, 1989
- [Bol05] Bol, G.: Qualitätssicherung I. LSOE, Universität Karlsruhe (TH), 2005
- [Bos98] Bosch, K.: Statistik-Taschenbuch. Oldenbourg Verlag , 1998
- [Box92] Box, G.P.; Kramer, T.: Statistical Process Monitoring and Feedback Adjustment: A discussion. In: Technometrics Nr. 34/3, 1992, S.251-267
- [Bra02] Brand, U.; Büttgenbach, S.: Taktile dimensionelle Messtechnik für Komponenten der Mikrosystemtechnik. In: Technisches Messen 69, 2002, Nr. 12, S. 542- 549
- [Bru07a] Brudek, G.; Wulfsberg, J. P.: Monitoring of Micro Machining Operations. In: Proceedings of the 7th international conference of the European Society for Precision Engineering and Nanotechnology (euspen), Bremen 2007, S. 437-440
- [Bru07b] Brudek, G.: Beiträge zur Prozessanalyse in der Mikrozerspannung - insbesondere für das Mikrofräsen. Dissertation, Laboratorium Fertigungstechnik, Helmut Schmidt Universität Hamburg, 2007
- [Buc05] Buchholz, C.: Systematische Konzeption und Aufbau einer automatisierten Produktionszelle für pulverspritzgegossene Mikrobauerteile. Dissertation, Institut für Produktionstechnik (wbk), Universität Karlsruhe (TH), 2005
- [Buc08] Buchholz, I.: Strategien zur Qualitätssicherung mikromechanischer Bauteile mittels Koordinatentechnik, Dissertation, Institut für Produktionstechnik (wbk), Universität Karlsruhe (TH), 2008

- [Caw03] Cawsey, A.: Künstliche Intelligenz im Klartext. Pearson Studium, München, 2003
- [Cha06] Chae, J.; Park, S.S.: High Frequency Bandwith Measurements of Micro Cutting Forces. In: Conference Proceedings of 2nd CIRP international conference on High Performance Cutting, Vancouver, 2006, S. 456-464
- [Cha07] Chang, C.W.; Kuo, C.P.: An investigation of laser-assisted machining of Al₂O₃ ceramics. In: International Journal of Machine Tools and Manufacture 47, 2007, S. 452-461
- [Chr03] Christoph, R.; Neumann, H.-J.: Zweierlei Maß? - Messunsicherheit und Fertigungsprozess. In: QZ Qualität und Zuverlässigkeit 6, 2003, S. 35-42
- [Cro89] Crowder, S.V.: Design of Exponentially Weighted Moving Average Schemes. In: Journal of Quality Technology 21, No.3, 1989, S.155-162
- [Dan06] De Chiffre, L.; Lonardo, P.; Trumpold, H.; Lucca, D.A.; Goch, G.; Brown, C.A.; Hansen, H.N.: Quantitative Characterisation of Surface Texture. In: Annals of the CIRP 49/2, 2000, S. 635-652
- [DeP05] De Campos Porath, M.; Seitz, K.: Koordinatenmesstechnik für mikromechanische Bauteile: Herausforderungen und Lösungen. Fachtagung Koordinatenmesstechnik Braunschweig, 17./18. November 2005, VDI-Bericht 1914
- [DeP06a] De Campos Porath, M.; Seitz, K.: Untersuchungen zum Genauigkeitsnachweis an einem Koordinatenmessgerät für mikromechanische Bauteile. Fachtagung Messtechnik für Mikro- und Nanoengineering, Erlangen 2006, VDI-Bericht 1950
- [DeP06b] De Campos Porath, M.; Seitz, K.; Schmitt, R.; Napierala, A.: Hochgenaue Formprüfung kleiner Geometrien durch taktile Koordinatenmessung. Fachtagung Form- und Konturmessung, VDI-Bericht 1945, 2006
- [Deu08] Deuchert, M.; Weber, M.; Autenrieth, H.; Fleischer, J.; Schulz, V.; Lohe, D.: Influence of process parameters on the specific reaction forces and surface characteristics in orthogonal micro-cutting. In:

- Conference proceedings of the 3rd CIRP International Conference on High Performance Cutting, Dublin, 2008, S.575-584
- [Die04] Dietrich, E.; Schulze, A.: Eignungsnachweis von Prüfprozessen. 2. Überarbeitete Auflage, Carl Hanser Verlag, 2004
- [Die05] Dietrich, E.; Schulze, A.: Statistische Verfahren zur Maschinen- und Prozessqualifikation. 5. Überarbeitete Auflage, Carl Hanser Verlag, 2005
- [Dit04] Dittmar, R.; Pfeiffer, B.-M.: Modellbasierte prädiktive Regelung. Oldenbourg Verlag, München, 2004
- [Dor06] Dornfeld, D.; Min, S.; Takeuchi, Y.: Recent Advances in Mechanical Micro Machining. In: Annals of the CIRP 55/2, 2006, S.745-768
- [Dra81] Draper, N.R.; Smith, H.: Applied Regression Analysis. John Wiley & Sons, New York, 1981
- [Dut64] Dutschke, W.: Qualitätsregelung in der Fertigung. Springer Verlag, Berlin, 1964
- [Dut05] Dutschke, W.; Keferstein, C.P.: Fertigungsmesstechnik. 5. Auflage, Teubner Verlag, Wiesbaden, 2005
- [Els03] Elsner, J.: Informationsmanagement für mehrstufige Mikro-Fertigungsprozesse – Prozessdaten- und Produktionsdatenstrukturierung mittels Microfeatures am Beispiel des Mikro-Pulverspritzgießprozesses, Dissertation, Institut für Produktionstechnik (wbk), Universität Karlsruhe (TH), 2003
- [Fah04] Fahrmeir, L.; Künstler, R.; Pigeot, I.; Tutz, G.: Statistik - Der Weg zur Datenanalyse. Springer, München, 2004
- [Fal93] Faltin, F. W.; Tucker, W. T.; Hahn, G. J.; Vander Weil, S. A.: Algorithmic Statistical Process Control: Some Practical Observations. In: International Statistic Review, 61, 1993, S. 67-80
- [Fel92] Feller, A.: Kalkulation in der Angebotsphase mit dem selbsttätig abgeleiteten Erfahrungswissen der Arbeitsplanung. Dissertation, Institut für Produktionstechnik (wbk), Universität Karlsruhe (TH), 1992

- [Feo06] Feokistov, V.: Differential evolution – In search of resolutions. Springer, New York, 2006
- [Fhg06] Fraunhofer-Gesellschaft: Die Fraunhofer Initiative. High-Tech Strategie für Deutschland. München, 2006
- [Fla95] Flaton, K.A.; Gehlen, S.; Hormel, M.; Konen, W.; Kopecz, B.: Neuronale Netze: Grundlagen und Anwendungen. In: Zimmermann, H.-J. (Hrsg.): Neuro+Fuzzy. Technologien – Anwendungen. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1995, S.26-58
- [Fle05] Fleischer, J.; Schmidt, J.; Haupt, S.; Halvadjiysky, G.; Kotschenreuther, J.: Mikroformeinsätze in gehärteten Stählen. In: wt Werkstatttechnik Nr.11/12, Jg. 95, 2005, S.887-891
- [Fle06] Fleischer, J.; Lanza, G.; Schlipf, M.; Kotschenreuther, J.; Peters, J.: Process parameter analysis on surface roughness and process forces in micro cutting. In: Conference proceedings of the 4th International Conference on Multi-Material Micro Manufacture (4M), Grenoble, 2006, S. 289-292
- [Fle07a] Fleischer, J.; Schlipf, M.; Deuchert, M.; Dieckmann, A.-M.: Process Chain for the Manufacturing of Micro Parts and Molds. In: Conference Proceedings 7th International Conference of the European Society for Precision Engineering and Nanotechnology (EUSPEN), Bremen 2007, S. 177-180
- [Fle07b] Fleischer, J.; Löhe, D.; Kotschenreuther, J.; Schulze, V.; Deuchert, M.; Halvadjiysky, G.; Haupt, S.; Kienzler, A.: Fertigungsverfahren in der Mikrotechnik. In: wt Werkstatttechnik Nr.11/12, Jg. 97, 2007, S.847-851
- [Fle07c] Fleischer, J.; Schlipf, M., Behrens, I.; Peters, J.: Aspects of estimating CMM measurement uncertainty for micro parts with respect to similarity requirements and influences of manufacturing processes. In: Conference Proceedings 7th International Conference of the European Society for Precision Engineering and Nanotechnology (EUSPEN), Bremen, 2007, S.349-352
- [Fle07d] Fleischer, J.; Haupt, S.; Halvadjiysky: Formeinsatzherstellung durch Integration der abtragenden Verfahren Laserablation und

- Funkenerosion. In: Kolloquium Mikroproduktion Fortschritte, Verfahren, Anwendungen, Hrsg.: Kraft, O.; Emmerich, B., Karlsruhe, 2007, S.109-114
- [Fle08a] Fleischer, J.; Lanza, G.; Schlipf, M.: Statistical quality control in micro manufacturing through multivariate μ -EWMA Chart. In: CIRP Annals - Manufacturing Technology 57/1, 2008, S. 521–524
- [Fle08b] Fleischer, J.; Lanza, G.; Kotschenreuther, J., Deuchert, M.; Schlipf, M.; Smiljkovic, S.: Model based Control of Surface Quality with regard to Micro Cutting Processes. In: Conference proceedings of the 3rd CIRP International Conference on High Performance Cutting, Dublin, 2008, S.775-784
- [Fhg06] Fraunhofer-Gesellschaft: Die Fraunhofer Initiative. High-Tech Strategie für Deutschland. München, 2006
- [Fro95] Froese, T.: Übergeordnete Regelung chemischer Verfahren mit Fuzzy Control und Künstlichen Neuronalen Netzen. In: Zimmermann, H.-J. (Hrsg.): Neuro+Fuzzy. Technologien – Anwendungen. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1995, S.102-118
- [Fur95] Furomoto, H.: Einsatz von Fuzzy Control und neuronalen Netzen bei der Automatisierung in der Zellstoff- und Papierindustrie. In: Zimmermann, H.-J. (Hrsg.): Neuro+Fuzzy. Technologien – Anwendungen. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1995, S.119-145
- [Ger06] Gerlach, G.; Dötzel, W.: Einführung in die Mikrosystemtechnik. Carl Hanser Verlag, München, 2006
- [Gra92] Grauel, A.: Neuronale Netze: Grundlagen und mathematische Modellierung. BI-Wiss.-Verlag, Mannheim, 1992
- [Gre07] Greene, C. D.; Heaney, D. F.: The PVT effect on the final sintered dimensions of powder injection molded components. In: Materials & Design 28/1, 2007, S. 95-100
- [Hai01] Haitjema, H.; Pril, W.; Schellekens, P. H. J.: A Silicon-Etched Probe for 3-D Coodrinate Measurements with an Uncertainty Below 0.1 μm . In: IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement 50, 2001, Nr. 6, S. 1519-1523
- [Ham06] Hamada, M.; Jeff Wu, C. F.: Experiments: planning, analysis and parameter design optimization. Wiley, New York, 2006

- [Han06] Hansen, H.N.; Carneiro, K.; Haitjema, H.; De Chiffre, L.: Dimensional Micro and Nano Metrology. In: Annals of the CIRP 55/1, 2006, S. 1-23
- [Har00] Harry, M.; Schroeder, R.: Six Sigma. Campus Verlag, Frankfurt, 2000
- [Her93] Hering, E.; Triemel, J.; Blank, H.-P.: Qualitätssicherung für Ingenieure. VDI Verlag, 1993
- [Hes02] Hesselbach, J.; Raatz, A.: mikroPRO – Untersuchung zum internationalen Stand der Mikroproduktionstechnik, Vulkan Verlag, Essen, 2002
- [Hes03] Hesselbach, J.; Raatz, A.; Wrege, J.; Herrmann, H.; Weule, H.; Buchholz, C.; Tritschler, H.; Knoll, M.; Elsner, J.; Klocke, F.; Weck, M.; von Bodenhausen, J.; von Klitzing, A.: mikroPro. In: wt Werkstatttechnik Nr.3, Jg. 93, 2003, S.119-128
- [Hor02] Horsch, C.; Schulze, V.; Löhe, D.: Konfokale Schneidkantenvermessung. In: wt Werkstatttechnik Nr.11/12, Jg. 92, 2002, S.609 - 611
- [Hor05] Hornfeck, R.: Simulationsunterstützte, prüfungsbasierte Fertigungslenkungsmethodik für fehlertolerante Fertigungsprozessketten zur Herstellung monolithischer Mikrosysteme. Dissertation, Universität Erlangen, 2005
- [Hsu01] Hsu, H.-M.; Chen, Y.-K.: A fuzzy reasoning based diagnosis system for control charts. In: Journal of Intelligent Manufacturing 12/1, 2001, S.57-64
- [Jem08] Jemielniak, K.; Bombinski, S.; Aristimuno, P.X.: Tool condition monitoring in micromilling based on hierarchical integration of signal measures, In: CIRP Annals 57/1, 2008, S. 121–124
- [Kah06] Kahnis, P.; Surmann, T.; Weinert, K.: Analyse und Simulation des Mikrofräsprozesses. In: wt Werkstatttechnik Nr.11/12, Jg. 96, 2006, S.836 - 843
- [Kan86] Kanazuka, T.: The Effect of Measurement Error on the Power of X-R Charts. In: Journal of Quality Technology, Vol. 18, No. 2, 1986, S. 91-95

- [Kie52] Kienzle O., Victor H.: Die Bestimmung von Kräften und Leistungen an spanenden Werkzeugmaschinen. In: VDI-Z Nr. 11/12, Jg. 94 (1952), S.299-305
- [Kis08] http://www.kistler.com/do.productfinder.ch.de-ch?content=131_Productfinder_ForceSensors¶m=corp.9256C1.5, besucht am 22.06.2008
- [Kle06] Kleppmann, W.: Taschenbuch Versuchsplanung - Produkte und Prozesse optimieren. 4. Überarbeitet Auflage, Carl Hanser Verlag, München, 2007
- [Klo05a] Klocke, F.; v. Bodenhausen, J.: Zukunftsmarkt Mikrosystemtechnik. In Industrie Management 21/6, 2005, S.25-28
- [Klo05b] Klocke, F.; von Bodenhausen, J.; Arntz, K.: Prozesssicherheit bei der Mikrofräsbearbeitung. In: wt Werkstatttechnik Nr.11/12, 2005, Jg. 95, S.882 - 886
- [Klo07] Klocke, F.; Bergs, T.; Veselovac, D.; Arntz, K.; Quito, F. J.; Kratz, S.: Von der Makro- zur Mikrowelt. Herausforderungen für den Mikroformenbau. In: wt Werkstatttechnik Nr.11/12, 2007, Nr. 97, S.842 - 846
- [Klo08] Klocke, F.; Kratz, S.; Veselovac, D.: Position-oriented process monitoring in freeform milling. In: Conference proceedings of the 3rd CIRP International Conference on High Performance Cutting, Dublin, 2008, S. 251-259
- [Koc98] Koczy, A.: Statistische Prozessregelung für die flexible Kleinserienfertigung, Aachen: Shaker, Dissertation Ruhr-Universität Bochum, 1998
- [Kot08] Kotschenreuther, J.: Empirische Erweiterung von Modellen der Makrozerspanung auf den Bereich der Mikrobearbeitung. Dissertation, Institut für Produktionstechnik (wbk) Universität Karlsruhe (TH), 2008
- [Kro27] Kronenberg, M.: Grundzüge der Zerspanungslehre – Eine Einführung in die Theorie der spanabhebenden Formung und Anwendung in der Praxis. Springer Verlag, Berlin, 1927

- [Kua06] Kuar, A.S.; Doloi, B.; Bhattacharyya, B.: Modeling and analysis of pulsed Nd:YAG laser machining of Zirconia (ZrO₂). In: International Journal of Machine Tools & Manufacture 46/12-13, 2006, S. 1301-1310
- [Kuh04] Kuhlentötter, B.; Gayk, K.: Mikrotechnik. Fertigung und Handhabung von Geometrien im Mikrometerbereich. In: wt Werkstatttechnik Nr.11/12, 2004, Nr. 94, S.581-585
- [Lan07] Lanza, G.; Fleischer, J.; Schlipf, M.: Qualitätssicherung für Mikrofertigungsprozesse und urgeformte Mikrobauteile. In: Kolloquium Mikroproduktion Fortschritte, Verfahren, Anwendungen, Hrsg.: Kraft, O.; Emmerich, B., Karlsruhe, 2007, S.121-127
- [Lan08a] Lanza, G.; Fleischer, J.; Schlipf, M.: Quality Assurance for Micro Manufacturing Processes and Primary-Shaped Micro Components. In: Microsystem Technologies, Nr. 14, 2008, S.1823-1830
- [Lan08b] Lanza, G.; Fleischer, J.; Schlipf, M.; Kotschenreuther, J.; Peters, J.: Statistical modelling of process parameters in micro cutting. In: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture 2, 2008, S. 15-22
- [Lee06] Lee, D.E.; Hwand, I.; Valente, C.M.O.; Oliveira, J.F.G.; Dornfeld, D.A.: Precision Manufacturing Process Monitoring with Acoustic Emission. In: Journal of Machine Tool Manufacture 46, 2006, S. 176-188
- [Lei01] Lei, S.; Shin, Y.C.; Incropera, F.P.: Experimental investigations of thermo-mechanical characteristics in laser-assisted machining of silicon nitride ceramics. In: ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering 123, 2001, S. 639-646
- [Li07] Li, S.G., Fu, G., Reading, I., Tor, S.B., Chaturvedi, P.; Yoon, S.F., Youcef-Toumi, K.: Dimensional variation in production of high-aspect-ratio micro-pillars array by micro powder injection molding. In: Applied Physics, A 89, 2007, S. 721-728

- [Lin01a] Linna, K.W.; Woodall, W.H.: Effect of Measurement Error On Shewhart Control Charts. In: Journal of Quality Technology, Vol. 33/2, 2001, S. 213-222
- [Lin01b] Linna, K.W.; Woodall, W.H.; Busby, K.L.: The performance of multivariate control charts in the presence of measurement error. In: Journal of Quality Technology, Vol.33, No.3, 2001, S.349-255
- [Lon02] Lonardo, P. M.; Lucca, D. A.; De Chiffre, L.: Emerging Trends in Surface Metrology. In: Annals of the CIRP 51/2, 2002, S. 701-723
- [Löh05] Löhe, D.; Haußelt, J.: Microengineering of Metals and Ceramics – Part I: Design, Tooling, and Injection Molding. Wiley-VCH Verlag, Weinheim, 2005
- [Luc90] Lucas, J.M.; Saccucci, M.S.: Exponentially Weighted Moving Average Control Schemes. In: Properties and Enhancements, Technometrics, Vol.32, No.1, 1990, S.1-12
- [Man05] Mann, H.; Schiffelgen, H.; Froriep, R.: Einführung in die Regelungstechnik, 10. Auflage. München, Carl Hanser Verlag, 2005
- [Mar04] Maravelakis, P.E.; Panaretos, J.; Psarakis, S.: EWMA Chart and Measurement Error. In: Journal of Applied Statistics, Vol.21, No.4, 2004, S.445-455
- [Mas97] Masuzawa, T.; Tönshoff, H.K.: Three dimensional micromachining by Machine Tools. In: Annals of the CIRP, Vol. 62/5, 1997
- [Mas07] Masing, W.; Pfeifer, T.; Schmitt, R.: Handbuch Qualitätsmanagement. Carl Hanser Verlag, München, 2007
- [Mel03] Meli, F.; Fracheboud, M.; Bottinelli, S.; Bieri, M.; Thalmann, R.; Breguet, J.-M.; Clavel, R.: High Precision Low Force 3D Touch Probe for Measurements on Small Objects. In: Conference Proceedings of the 3rd international conference of the European Society for Precision Engineering and Nanotechnology (euspen), Aachen, 2003, S. 411-414
- [Mel04] Meli, F.; Küng, A.: Performance of a low force 3D touch probe on an ultra precision CMM for small parts. In: Conference Proceedings of the 4th international conference of the European

- Society for Precision Engineering and Nanotechnology (euspen), Glasgow, 2004, S. 270-271
- [Men05] Menz, W.; Mohr, J.; Paul, O.: Mikrosystemtechnik für Ingenieure. 3. Auflage. Wiley-VCH Verlag, Weinheim, 2005
- [Mic08] <http://www.kugler-precision.com/index.php?page=50&modaction=detail&modid=80>, besucht am 22.06.2008
- [Mit91] Mittag, H.-J.: Auswirkungen von Messfehlern auf die Eingriffskennlinie von Mittelwertkarten des Shewhart-Typs. Diskussionsbeitrag Nr. 167, Fernuniversität Hagen, 1991, S. 8-20
- [Mit93a] Mittag, H.J.: Qualitätsregelkarten. Carl Hanser Verlag, München, Wien, 1993
- [Mit93b] Mittag, H.J.; Stemann, D.: Effekte stochastischer Meßfehler bei der Anwendung von Shewhart-Regelkarten zur Streuungsüberwachung. Allgemeines Statistisches Archiv 77, 1993, S.240-259
- [Mit95] Mittag, H.J.: Measurement Error Effect on Control Chart Performance. In: ASQC Annual Proceedings, Vol.49, 1995, S.66-73
- [Mit98] Mittag, H.J.; Stemann, D.: Gauge imprecision effect on the performance of the X-S control chart. In: Journal of Applied Statistics, Vol.25, No.3, 1998, S.307-317
- [Mit04] Mitutoyo: UMAP Vision System. Mitutoyo Corporation. http://www.mitutoyo.co.jp/eng/news/newsfile/02data/02_13.html, besucht am 27.05.2004
- [Miz61] Mizuno, S.: Problems of measurement errors in process control. In: Bulletin of the International Statistical Institute 38, 1961, S. 405–415
- [Mon91] Montgomery, D.C.: Introduction to Statistical Quality Control. John Wiley & Sons, New York, 1991
- [Mon05] Montgomery, D.C.: Design and Analysis of Experiments. John Wiley & Sons, New York, 2005
- [Mor95] Moriwaki, T.: Experimental Analysis of Ultraprecision Machining. In: International Journal of the Japan Society of Precision Engineering, Vol. 29, No. 4, 1995, S. 287 – 290

- [Nan01] Nanofocus AG: Bedienungsanleitung μ -Surf 5.1. Duisburg, 2001
- [Nan08] NanoFocus AG <http://www.nanofocus.info/index.php>, besucht am 02.04.08
- [Nel84] Nelson, L.S.: Technical Aids. The Shewart Control Chart – Test for Special Causes; in: Journal of quality technology 16/4, 1984, S.237-239
- [Neu05] Neuschäfer-Rube, U.: Sensoren und Geräteprinzipien für kleine Merkmale. In: VDI-Berichte Nr. 1914, VDI-Verlag, Düsseldorf, 2005, S. 225-238
- [Owe89] Owen, M.: SPC and continuous improvement. Springer Verlag, 1989
- [Pet06] Peters, J. C.: Statistische Prozesskontrolle in der spanenden Mikrofertigung; Diplomarbeit, Institut für Produktionstechnik, Universität Karlsruhe (TH), 2006
- [Peg99] Peggs, G. N.; Lewis, A. J.; Oldfield, S.: Design for a Compact High-Accuracy CMM. In: Annals of the CIRP 48/1, 1999, S. 417-420
- [Pfe01] Pfeifer, T.: Qualitätsmanagement Strategien Methoden Techniken. München, Wien: Carl Hanser Verlag 2001
- [Pfe05] Pfeifer, T.; Schmitt, R., Driessen, S.; Engelmann, B.: Offline-Verfahren. In: Dilthey, Ulrich: Montage hybrider Mikrosysteme. Springer, Verlag, Berlin, 2005, S.175-186
- [Phi97] Phillips, S.D., et al.: The Calculation of CMM Measurement Uncertainty via the Method of Simulation by Constraints. In: American Society for Precision Engineering 16, 1997, S. 443-446
- [Pio08] Piotter, V.; Beck, M.; Ritzhaupt-Kleissl, H.J.; Haußelt, J.: Micro Powder Injection Moulding – Recent Developments. In: Conference Proceedings of the 10th international conference of the European Society for Precision Engineering and Nanotechnology (euspen), Zürich, 2008, S. 415-419
- [Reu04] Reuter, M.; Zacher, S.: Regelungstechnik für Ingenieure, 11. Auflage. Vieweg Verlag, Wiesbaden, 2004

- [Ric-53] Richter, A.: Die Zerspankräfte beim Drehen im Bereich des Fließspans. In: Wissenschaftliche Zeitung der TH Dresden Nr. 2/4, 1953
- [Rin95] Rinne, H.; Mittag, H.-J.: Statistische Methoden der Qualitätssicherung. Carl Hanser Verlag, München, 1995
- [R05] R 2005: R: A language and environment for statistical computing. <http://www.R-project.org>, Besucht am 06.04.2008
- [Sac95] Sachs, E.; Hu, A.; Ingolfsson, A.: Run by Run Process Control: Combining SPC and Feedback Control. In: IEEE Transactions, 8(1), 1995, S. 26-43
- [Sac06] Sachs, L.; Hedderich, J.: Angewandte Statistik - Angewandte: Methodensammlung mit R. 12. Überarbeitete Auflage, München, 2006
- [Schl06] Schlipf, M.: Herausforderungen und Potentiale in der Mikrometrologie. 7. Fachtagung mikro-Produktionstechnik Karlsruhe, 2006
- [Schm99] Schmidt, J.; Hüntrup, V.; Tritschler, H.: Mikrozerspannte Formeinsätze aus Stahl. In: wt Werkstatttechnik 11, 1999, Nr. 89, S.495-498
- [Schm01] Schmidt, J.; Simon, M.; Tritschler, H., Ebner, R.: μ -Fräsen und μ -Erodieren für den Formenbau. In: wt Werkstatttechnik 12, 2001, Nr. 91, S.743-746
- [Scho95] Schoder, D.; Nücke, H.: Neuronale Netze und Fuzzy Logic in der Automatisierungstechnik. In: Zimmermann, H.-J. (Hrsg.): Neuro+Fuzzy. Technologien – Anwendungen. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1995, S.59-73
- [Scho05] Scholz-Reiter, B.; Höhns, H.: Planung und Betrieb von Produktionssystemen in der Mikroproduktion. In: Industrie Management 21/6, 2005, S. 9-12
- [Scho06] Scholz-Reiter, B.; Lütjen, M.; Höhns, H.: Die Bedeutung des Produktionscontrolling in der Mikrofertigung. In: Industrie Management 22/4, 2006, S. 9-14

- [Scho07a] Scholz-Reiter, B.; Lütjen, M.; Kirchheim, A.: Micro Factory - Ein Konzept für den Einsatz von Miniatur-Maschinen in der Mikroproduktion. In: *Industrie Management* 23/3, 2007, S. 15-18
- [Scho07b] Scholz-Reiter, B.; Lütjen, M.; Heger, J.: Integrierte Simulationsmethodik zur Investitionsbewertung von Mikroproduktionssystemen. In: *Kolloquium Mikroproduktion Fortschritte, Verfahren, Anwendungen*, Hrsg.: Kraft, O.; Emmerich, B., Karlsruhe, 2007, S. 237-243
- [Scho08] Scholz-Reiter, B.; Haman, T.: The behaviour of learning production control. In: *Annals of the CIRP*, Vol 57/1, 2008, S. 459-462
- [Schw01] Schwenke, H.; Wäldele, F.; Weiskirch, C.; Kunzmann, H.: Opto-Tactile Sensor for the 2D and 3D Measurement of small structures on coordinate measuring machines. In: *Annals of the CIRP*, Vol 50/1/2001, 2001, S. 361-364
- [Schw02] Schwenke, H.; Neuschaefer-Rube, U.; Pfeifer, T.; Kunzmann, H.: Optical Methods for Dimensional Metrology in Production Engineering. In: *Annals of the CIRP* 51, 2002, S. 685-699
- [Sha65] Shapiro, S.S.; Wilk, M.B.: An analysis of variance test for normality (complete samples). In: *Biometrika*, 52, 3 and 4, 1965, S. 591-611
- [Sha05] Sha, B.; Dimov, S.S.; Pham, D.T.; Griffith, C.A: Study of Factors Affecting Aspect Ratios Achievable In: *Conference proceedings of the 1st International Conference on Multi-Material Micro Manufacture (4M)*, 2005, S.154-163
- [Sha06] Sha, B.; Dimov, S.S.; Griffith, C.A; Packianather, M.S.: Micro-injection moulding: factors affecting the replication quality of micro-features. In: *Conference proceedings of the 2nd International Conference on Multi-Material Micro Manufacture (4M)*, Amsterdam, 2006, S. 287-296
- [Sho04] Shore, H.: Determining measurement error requirements to satisfy statistical process control performance requirements. In: *IIE Transactions*, Vol.36, 2004, S.881-890

- [Ste97] Stemann, D.: Qualitätsregelkarten des Shewhart- und EWMA-Typs - ein Leistungsvergleich bei meßfehlerfreien und -behafteten Daten, Dissertation, Universität Dortmund, 1997
- [Ste01] Stemann, D.; Weihs, C.: The EWMA-X-S-control chart and its performance in the case of precise and imprecise data. In: Statistical Papers, Vol.42, 2001, S.207-223
- [Tam92] Tam, S.C.; Lim, L.E.N.; Quek, K.Y.: Application of Taguchi method in the optimization of the laser-cutting process. In: Journal of Materials Processing Technology 29, 1992, S. 63-74
- [Tak99a] Takamasu, K. et al.: Development of a pneumatic Ball Probe (1st Report) – Basic Construction -. In: International Japanese Society for Precision Engineering (JSPE) 33, 1999, Nr. 3, S. 233-238
- [Tay07] Taylor, F.W.: On the art of cutting metals. In: Transactions of the ASME, Nr. 28, 1907, S. 31-350
- [The08] Thelen, R.; Schulz, J.; Meyer, P.; Saile, V.: Approaching a sub-micron capability index using a Werth Fibre Probe System WFP. In: Conference proceedings of the 4M 2008 Conference Multi-Material Micro Manufacture, Cardiff, 2008, S. 147-150
- [Tri06] Tritschler, H.: Werkzeug- und Zerspanprozessoptimierung beim Hartfräsen von Mikrostruktur in Stahl, Dissertation, Institut für Produktionstechnik, Universität Karlsruhe (TH), 2006
- [Tuc93] Tucker, W.T.; Faltin, F.W.; Vander Wiel, S.A.: Algorithmic Statistical Process Control: An elaboration. In: Technometrics 35/4, 1993, S.363-375
- [Uer05] Uerkvitz, R: Einführung in die Versuchsplanung und Prozessoptimierung. Lehrgangsunterlagen DIF Seminar: Statistische Methoden zur Auswertung technischer Versuchsreihen, Mettmann, 2005
- [Unb07] Unbehauen, H.: Regelungstechnik 1, 14. Auflage. Vieweg Verlag, Wiesbaden, 2007
- [Van92] Vander Wiel, S.A.; Tucker, W.T.; Faltin, F.W.; Doganaksoy, N.: Algorithmic Statistical Process Control: Concepts and an application. In: Technometrics, 34/3, 1992, S.286-297.

- [Voll04] Vollertsen, F.; Hu, Z.; Schulze Niehoff, H.; Theiler, C.: State of the art in microforming and investigations in micro deep drawing. In: Journal of Materials Processing Technology 151, 2004, 70-79
- [Voll07] Vollertsen, F.; Walther, R.: Chancen und Grenzen der Mikroumformtechnik – der Sonderforschungsbereich 747, In: Kolloquium Mikroproduktion Fortschritte, Verfahren, Anwendungen, Hrsg.: Kraft, O.; Emmerich, B., Karlsruhe 2007, S.19-23
- [Wal94] Wallacher, J.: Einsatz von Methoden der statistischen Versuchsplanung zur Bestimmung von robusten Faktorkombinationen in der präventiven Qualitätssicherung. Dissertation, Universität Karlsruhe (TH), 1994
- [Wal99] Walther, T.; Schinköthe, W.; Ehrfeld, W.; Schaumburg, C.; Weber, L.: Mikrospritzgießen mit induktiver Werkzeugheizung. In: Tagungsunterlagen zum 16. Stuttgarter Kunststoff-Kolloquium, Stuttgart, 1999
- [Wan98] Wang, J.; Kochhar, A.K.; Hannam, R.G.: Pattern Recognition for statistical process control charts. In: International Journal of Advanced Manufacturing Technology 14/2, 1998, S.99-109
- [Wan02] Wang, Y.; Yang, L.J.; Wang, N.J.: An investigation of laser-assisted machining of Al₂O₃ particle reinforced aluminium matrix composites. In: Journal of Materials Processing Technology 129, 2002, S. 268-272
- [Wan05] Wang, W.; Kweon, S.H.; Yang, S.H.: A study on roughness of the micro-end-milled surface produced by a miniaturized machine tool. In: Journal of Materials Processing Technology, Vol. 162–163, 2005, S.702–708
- [Wäl02] Wäldele, F.; Schwenke, H.: Automatische Bestimmung der Messunsicherheiten auf KMGs auf dem Weg in die industrielle Praxis. In: Technisches Messen 69/12, 2002, S. 550-557
- [Wec99] Weckenmann, A.; Gawande, B.: Koordinatenmesstechnik – Flexible Messstrategien für Maß, Form und Lage. Carl Hanser Verlag, 1999

- [Wec04] Weckenmann, A.; Estler, T.; Peggs, G.; McMurtry, D.: Probing Systems in Dimensional Metrology. In: Annals of the CIRP 53/2, 2004, S. 657-684
- [Wer07] Werth Messtechnik GmbH: Produktinformationen, Giessen, 2007
- [Weu01] Weule, H.; Spath, D.; Schmidt, J.; Elsner, J.; Buchholz, C.; Tritschler, H.: Prozesskette der Fertigung mikromechanischer Bauteile. In: wt Werkstatttechnik 12, 2001, Nr. 91, S.726-732
- [Wie95] Wiede, T.: Anwendung empirischer Bayes-Verfahren in der Statistischen Prozessregelung. Peter Lang Verlag, 1995
- [Wil01] Wilhelm, R.G., Hocken, R., Schwenke, H.: Task Specific Uncertainty in Coordinate Measurement. In: Annals of the CIRP 50/2, 2001, S. 553-563
- [Woo00] Woodall, W.H.: Controversies and Contradictions in Statistical Process Control. In: Journal of Quality Technology 32/ 4, 2000, S.341-378.
- [Zha07a] Zhang, J.Z.; Chen, J.C.: The development of an in-process surface roughness adaptive control system in end milling operations. In: International Journal of Advanced Manufacturing Technology Nr. 9/10, Vol. 31 (2007), S.877-887
- [Zha07b] Zhang, J.Z.; Chen, J.C.: Tool condition monitoring in an end-milling operation based on the vibration signal collected through a microcontroller-based data acquisition system. In: International Journal of Advanced Manufacturing Technology, SpringerLink DOI 10.1007/s00170-007-1186-6, (<http://dx.doi.org>), Datum 06.09.2007
- [Zhe07] Zheng, H.Y.; Huang, H.: Ultrasonic vibration-assisted femtosecond laser machining of microholes. In: Journal of Micromechanical Microengineering 17, 2007, Nr. 8, S. 58-61
- [Zor98] Zorriassatine, F.; Tannock, J.D.T.: A review of neural networks for statistical process control. In: Journal of Intelligent Manufacturing 9/3, S.209 – 224

Normen und Richtlinien

- DIN 1319-1: DIN Deutsches Institut für Normung: DIN 1319-1 Grundlagen der Meßtechnik - Teil 1: Grundbegriffe, Beuth Verlag, Berlin, 1995
- DIN-32881-3 DIN Deutsches Institut für Normung: DIN 32881-3 E Verfahren zur Bestimmung der Messunsicherheit von Koordinatenmessgeräten (KMG) - Teil 3: Unsicherheitsermittlung mit kalibrierten Werkstücken. Beuth Verlag, Berlin, 2000
- DIN 4288 DIN Deutsches Institut für Normung: DIN 4288 Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren. Beuth Verlag, Berlin 1998
- DIN 4760 DIN Deutsches Institut für Normung: DIN 4760 Gestaltabweichungen – Begriffe, Ordnungssystem. Beuth Verlag, Berlin, 1982
- DIN 55319 DIN Deutsches Institut für Normung: DIN 55319 Qualitätsfähigkeitskenngrößen. Beuth Verlag, Berlin, 2002
- DIN 55350-11 DIN Deutsches Institut für Normung: DIN 55350-11: Begriffe der Qualitätssicherung und Statistik; Begriffe des Qualitätsmanagements. Beuth Verlag, Berlin, 1995
- DIN 55350-13 DIN Deutsches Institut für Normung: DIN 55350-13 Begriffe der Qualitätssicherung und Statistik; Begriffe zur Genauigkeit von Ermittlungsverfahren und Ermittlungsergebnissen. Beuth Verlag, Berlin, 1987
- DIN ISO 12179 DIN Deutsches Institut für Normung: DIN ISO 12179 Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren - Kalibrierung von Tastschnittgeräten. Beuth Verlag, Berlin 2000
- DIN ISO 21747 Deutsches Institut für Normung: DIN ISO 21747 Statistische Verfahren – Prozessleistungs- und Prozessfähigkeitskenngrößen für kontinuierliche Qualitätsmerkmale. Beuth Verlag, Berlin, 2006
- GUM95 International Organization for Standardization: Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement. Genf 1995

- ISO 14253-1 International Organization for Standardization: ISO 14253-1 - Geometrical Product Specification (GPS) – Inspection by measurement of workpieces and measuring instruments – Part 1: Decision Rules for proving conformance or non-conformance with specification. Genf, 1998
- VDA Band 4 Verband der Automobilindustrie: VDA Band 4: Sicherung der Qualität vor Serieneinsatz. 3. Aufl. VDA, Frankfurt 1996
- VDI/VDE2655 VDI/VDE Verein deutscher Ingenieure/ Verein deutscher Elektrotechniker: Richtlinie 2655 - Blatt 1.1: „Optische Messtechnik an Mikrotopografien – Kalibrieren von Interferenzmikroskopen und Tiefeneinstellnormalen für die Rauheitsmessung. Beuth Verlag, Berlin, 2008
- VDI 2601 VDI/VDE Verein deutscher Ingenieure/ Verein deutscher Elektrotechniker: Richtlinie 2601: Anforderungen an die Oberflächengestalt zur Sicherung der Funktionstauglichkeit spanend hergestellter Flächen. Zusammenstellung der Kenngrößen. Beuth Verlag, Berlin, 1991.

Beitragende Studien- und Diplomarbeiten

Ambrosi, C.: Beitrag zur Prozessoptimierung des Mikropulverspritzgusses keramischer und metallischer Werkstoffe mittels statistischer Methoden. Diplomarbeit, Institut für Produktionstechnik, Universität Karlsruhe (TH), 2007

Lorenz, J. S.: Statistische Modellierung von Merkmalsverteilungen und Entwicklung von Qualitätsregelkarten für die Mikrozerspanung. Diplomarbeit, Institut für Produktionstechnik, Universität Karlsruhe (TH), 2007

Peters, J. C.: Statistische Prozesskontrolle in der spanenden Mikrofertigung. Diplomarbeit, Institut für Produktionstechnik, Universität Karlsruhe (TH), 2006

Renger, U.: Statistische Modellierung von Merkmalsverteilungen und Entwicklung von Qualitätsregelkarten anhand der Fertigungsverfahren Mikrofunktenerosion und Laserablation. Diplomarbeit, Institut für Produktionstechnik, Universität Karlsruhe (TH), 2006

Smiljkovic, S.: Aufbau eines Qualitätsregelkreises für Mikroproduktionsprozesse durch die Kombination von automatisierter und statistischer Prozessregelung. Diplomarbeit, Institut für Produktionstechnik, Universität Karlsruhe (TH), 2008

Yefouo Fotio, P. R.: Aufbau eines Qualitätsregelkreises für Mikroproduktionsprozesse durch die Kombination von statistischer Versuchsmethodik, automatisierter und statistischer Prozessregelung. Diplomarbeit, Institut für Produktionstechnik, Universität Karlsruhe (TH), 2008

Anhang

A.1 Statistische Prozessregelung und Qualitätsregelkarten

A.1.1 Gegenüberstellung SPC und APC

	SPC	APC
Gemeinsame Ziele	<ul style="list-style-type: none"> - Entfernung bzw. Reduzierung von Variabilität - Verbesserung der Prozesse und deren Transparenz 	
Voraussetzungen	<ul style="list-style-type: none"> - in beiden Fällen ein adäquates Messsystem 	
Philosophie	<ul style="list-style-type: none"> - Reduzierung von Variabilität durch Aufdecken von Störungen und Entfernen derer Ursachen. 	<ul style="list-style-type: none"> - Reduzierung von Variabilität durch direktes Entgegenwirken der Störungen mittels Stellgrößen
Ursprung	<ul style="list-style-type: none"> - in der teilefertigenden Industrie 	<ul style="list-style-type: none"> - in der Prozessindustrie
Vorgehensweise	<ul style="list-style-type: none"> - Prozessüberwachung mittels QPK - Störungen/Änderung im Prozess feststellen - Ursachen der Störungen eliminieren 	<ul style="list-style-type: none"> - Abweichungen der Regelgröße vom Sollwert aufnehmen - durch Reglermodell die Stellgrößen so anpassen, dass Regeldifferenz minimal wird
Korrekturobjekte	<ul style="list-style-type: none"> - Maschine, Material, Mensch, Messung, Methode, Mitwelt, etc. 	<ul style="list-style-type: none"> - v.a. Maschine, Mitwelt
Voraussetzungen und Eignung	<ul style="list-style-type: none"> - Qualitätsmerkmale sind unabhängig und identisch verteilt - geeignet für diskrete Prozesse 	<ul style="list-style-type: none"> - Prozesseinflüsse sind messbar und können durch Stellgrößen entgegen gewirkt werden - geeignet für kontinuierlich (wandernde) Prozesse
Rolle	<ul style="list-style-type: none"> - strategische Rolle, langfristig 	<ul style="list-style-type: none"> - taktische Rolle, kurzfristig
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> - unterstützt die Idee der kontinuierlichen Verbesserung (Ursachenbekämpfung) - starker Fokus auf diskrete Qualitätsmerkmale 	<ul style="list-style-type: none"> - kann automatisiert werden - kann zu schneller Reduzierung von Variabilität führen
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> - eine SPC macht keine konkreten Vorschläge, wie der Prozess zu korrigieren ist 	<ul style="list-style-type: none"> - ist nur so gut wie die Güte des Reglermodells - eliminiert nicht die Ursachen der Störungen

Tabelle A.1.1: Gegenüberstellung von SPC und APC

A.1.2 Testtheoretischer Hintergrund von Qualitätsregelkarten

Aus statistischer Sicht betrachtet sind Qualitätsregelkarten Hilfsmittel zur graphischen Darstellung eines wiederholten statistischen Tests im laufenden Produktionsprozess [u.a. Wie95].

Wie bei allen statistischen Testverfahren, muss man sich vor Einsatz des jeweiligen Test-Verfahrens Gedanken machen, welche Art von Entscheidungen auf Grundlage des Ergebnisses getroffen werden sollen, und welche Art von Fehlentscheidungen zu vermeiden sind. Aufgrund dieser Überlegungen stellt man die zu überprüfende Hypothese H_0 (Nullhypothese) und die entsprechende Gegenhypothese H_1 auf. In diesem Fall sind dies:

H_0 : Der Fertigungsprozess befindet sich unter statistischer Kontrolle.

→ Mit der Entscheidung, dass **nicht** in die Produktion eingegriffen wird.

H_1 : Der Fertigungsprozess ist gestört.

→ Mit der Entscheidung, dass in die Produktion **eingegriffen** wird.

Nach der Aufstellung der Testhypothesen gibt es nun die Fehlermöglichkeiten 1. und 2. Art. Bei Auftreten des Fehlers 1. Art wird die Nullhypothese H_0 verworfen, obwohl sie richtig ist. Das heißt also, es wird in die Produktion eingegriffen, obwohl keine Störung vorliegt (Fehlalarm). Beim Fehler 2. Art wird die Gegenhypothese H_1 fälschlicherweise verworfen, also in den gestörten Prozess nicht eingegriffen (unterlassener Eingriff). Tabelle A.1.1 zeigt eine Gegenüberstellung der Fehler 1. und 2. Art [Die05].

		WIRKLICHKEIT	
		H_0 trifft zu	H_1 trifft zu
TEST-ERGEBNIS	H_0	Richtige Entscheidung: Der Fertigungsprozess befindet sich unter Kontrolle und es wird richtigerweise nicht in den Prozess eingegriffen.	Fehler 2. Art (unterlassener Eingriff) mit Fehlerwahrscheinlichkeit β : Der Fertigungsprozess wird nicht gestoppt, obwohl letzterer außer Kontrolle ist.
	H_1	Fehler 1. Art (Fehlalarm) mit Fehlerwahrscheinlichkeit α : Es wird in den Fertigungsprozess eingegriffen und letzterer wird gestoppt, obwohl der Prozess unter Kontrolle ist.	Richtige Entscheidung: Der Fertigungsprozess befindet sich außer Kontrolle und es wird richtigerweise in den Prozess eingegriffen.

Tabelle A.1.1: Gegenüberstellung der Fehler 1. und 2. Art bei der Anwendung von Qualitätsregelkarten nach [Die05]

A.1.3 Shewhart-Qualitätsregelkarte

Die Shewhart-Karte wurde in den 20er Jahren von Walter A. Shewhart entwickelt und ist die bekannteste Qualitätsregelkarte.

Es wird angenommen, dass das Qualitätsmerkmal X $N(\mu; \sigma_0^2)$ -verteilt mit variablem Erwartungswert $E(X) = \mu$ und konstanter Varianz $V(X) = \sigma_0^2$ ist. Die Prüfstatistik der Shewhart- \bar{X} -Karte ist der Mittelwert der Stichprobe, welcher über der Zeit t abgetragen wird.

$$\bar{x}_t = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{ti} \quad (\text{A1-1})$$

Für die Berechnung der Eingriffsgrenzen (EG) wird auf die Standardnormalverteilung zurückgegriffen. $z_{1-\alpha/2}$ bezeichne das $(1-\alpha/2)$ -Quantil der Standardnormalverteilung. Die obere und untere EG berechnet sich bei einer gewählten Fehlalarmwahrscheinlichkeit α zu:

$$UEG = \mu - \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \cdot z_{1-\alpha/2} \quad OEG = \mu + \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \cdot z_{1-\alpha/2} \quad (\text{A1-2})$$

A.1.4 EWMA-Qualitätsregelkarte

Die Berücksichtigung nicht nur der letzten, sondern auch zeitlich zurückliegender Stichprobenergebnisse ist ein wesentliches Unterscheidungsmerkmal von Qualitätsregelkarten (QRK). QRK, welche zurückliegende Stichprobenergebnisse berücksichtigen – s.g. „QRK mit Gedächtnis“ – sind der Shewhart-Karten bei der Entdeckung kleiner Prozessstörungen überlegen. Eine der bekanntesten Vertreter von QRK mit Gedächtnis ist die EWMA-Karte (engl.: exponentially weighted moving average). Bei der EWMA-Karte werden die zurückliegenden Stichprobenstatistiken nach dem Prinzip der exponentiellen Glättung immer weniger stark berücksichtigt. Die Gewichtung der Vergangenheitsdaten wird dabei durch eine Glättungskonstante λ ($0 < \lambda \leq 1$) festgelegt.

Für die EWMA- \bar{x} -Karte sei eine unabhängig identisch $N(\mu, \sigma^2)$ -verteilte Zufallsvariable $X_i(t)$ gegeben. $X_i(t)$ repräsentiert das zu überwachende Qualitätsmerkmal der i -ten Stichprobe aus einem Produktionsprozess. Zur Überwachung der Prozesslage wird bei der EWMA- \bar{X} -Karte folgende Prüfvariable verwendet.

$$Z_t = (1 - \lambda)Z_{t-1} + \lambda\bar{X}_i(t) \quad 0 < \lambda \leq 1 \quad (\text{A1-3})$$

Für eine Wahl $\lambda = 1$ liegt beispielsweise die klassische Shewhart-Karte vor. Für die Berechnung der Eingriffsgrenzen wird auf Kapitel 4.6.1 verwiesen.

A.1.5 Mittlere Lauflänge (ARL)

Als Lauflänge (RL) (engl.: run length) einer QRK wird die Anzahl der Stichproben von Beginn der Führung bis zum ersten Eingriff bzw. die Anzahl der Stichproben von einem Eingriff bis zum Nächsten bezeichnet. Die Lauflänge ist eine Zufallsgröße. Die mittlere Lauflänge (=ARL, engl.: average run length) ist der Erwartungswert der Lauflänge [Rin95].

Bei der Betrachtung der mittleren Lauflänge muss der Zustand des überwachten Prozesses berücksichtigt werden. Die mittlere Lauflänge einer QRK sollte bei ungestörtem Prozess möglichst groß sein, da eine Verletzung der Eingriffsgrenzen hier zu einem Fehlalarm führt. Wird die mittlere Lauflänge bei gestörtem Prozess betrachtet, sollte sie möglichst kurz sein, da die Prozessstörung natürlich so früh wie möglich entdeckt werden soll. Daher wird die mittlere Lauflänge häufig in Abhängigkeit der zugrunde liegenden Verschiebung der Prozesslage angegeben: $ARL(0)$ bezeichnet die mittlere Lauflänge bei ungestörtem Prozess, $ARL(\delta)$ die mittlere Lauflänge bei Vorliegen einer Verschiebung der Prozesslage um den Wert δ .

Ist die Fehlalarmwahrscheinlichkeit α konstant und bekannt, lässt sich die mittlere Lauflänge analytisch bestimmen. Im Folgenden wird der Fall eines ungestörten Prozesses betrachtet. Unter der Voraussetzung unabhängiger Stichproben, ist die Wahrscheinlichkeit, dass eine Verletzung der Eingriffsgrenzen bei der k -ten Stichprobe auftritt (Lauflänge $L = k$):

$$P(L = k) = \underbrace{(1 - \alpha) \cdot \dots \cdot (1 - \alpha)}_{(k-1)\text{-mal}} \cdot \alpha = (1 - \alpha)^{k-1} \cdot \alpha \quad (\text{A1-4})$$

Die Lauflänge L ist damit geometrisch verteilt. Ihr Erwartungswert und damit die mittlere Lauflänge bei ungestörter Produktion ist (vgl. /Bos-98/, S.178):

$$E(L) = ARL(0) = \frac{1}{\alpha} \quad (\text{A1-5})$$

Werden die Eingriffsgrenzen z.B. zum Niveau $\alpha = 0,01$ festgelegt, so ist alle 100 Stichproben mit einem Fehlalarm zu rechnen.

A.2 Herleitung Reglermodell

A.2.1 Allgemeines Vorgehen zur Herleitung der Reglerfunktion

a) Erwartungswert

$$\begin{aligned} E_{Z,\varepsilon}[(y)] &= E_{Z,\varepsilon}[\beta_0 + \beta_1^T X + \beta_2^T Z + X^T \mathbf{B}_1 Z + X^T \mathbf{B}_2 X + \varepsilon] \\ &= \beta_0 + \beta_1^T x + E_Z[\beta_2^T Z] + E_Z[X^T \mathbf{B}_1 Z] + X^T \mathbf{B}_2 X \\ &= \beta_0 + \beta_1^T X + \beta_2^T \hat{Z} + X^T \mathbf{B}_1 \hat{Z} + X^T \mathbf{B}_2 X \end{aligned}$$

b) Varianz

$$\begin{aligned} \text{Var}_{Z,\varepsilon}(y) &= \\ &= E_Z\{\text{Var}_\varepsilon(y)\} + \text{Var}_Z\{E_\varepsilon(y)\} \\ &= E_Z\{\text{Var}_\varepsilon(\beta_0 + \beta_1^T X + \beta_2^T Z + X^T \mathbf{B}_1 Z + X^T \mathbf{B}_2 X + \varepsilon)\} + \text{Var}_Z\{E_\varepsilon(y)\} \\ &= E_Z\{\text{Var}_\varepsilon(\varepsilon)\} + \text{Var}_Z\{E_\varepsilon(\beta_0 + \beta_1^T X + \beta_2^T Z + X^T \mathbf{B}_1 Z + X^T \mathbf{B}_2 X + \varepsilon)\} \\ &= E_Z\{\sigma_\varepsilon^2\} + \text{Var}_Z\{E_\varepsilon(\beta_0 + \beta_1^T X + \beta_2^T Z + X^T \mathbf{B}_1 Z + X^T \mathbf{B}_2 X + \varepsilon)\} \\ &= E_Z\{\sigma_\varepsilon^2\} + \text{Var}_Z\{\beta_0 + \beta_1^T X + \beta_2^T Z + X^T \mathbf{B}_1 Z + X^T \mathbf{B}_2 X\} \\ &= E_Z\{\sigma_\varepsilon^2\} + \text{Var}_Z\{\beta_2^T Z + X^T \mathbf{B}_1 Z\} \\ &= \sigma_\varepsilon^2 + \text{Var}_Z\{(\beta_2^T + X^T \mathbf{B}_1)Z\} \\ &= \sigma_\varepsilon^2 + (\beta_2 + \mathbf{B}_1^T x)^T \Sigma_Z (\beta_2 + \mathbf{B}_1^T x) \end{aligned}$$

A.2.2 Herleitung der Reglerfunktion für das Regressionsmodell zum Mikroorthogonaleinstechdrehen

$$J(x | \hat{Z}) = E_{Z,\varepsilon}[L(y, \tau)] = E_{Z,\varepsilon}[(y - \tau)^2] = (E_{Z,\varepsilon}(y) - \tau)^2 + \text{Var}_{Z,\varepsilon}(y)$$

$$E_{Z,\varepsilon}[(y)] = \beta_0 + \beta_1^T X + \beta_2^T \hat{Z} + X^T \mathbf{B}_1 \hat{Z} + X^T \mathbf{B}_2 X$$

$$\text{Var}_{Z,\varepsilon}(y) = (\beta_2 + \mathbf{B}_1^T X)^T \Sigma_Z (\beta_2 + \mathbf{B}_1^T X) + \sigma_\varepsilon^2$$

$$\hat{R}_a = 6,062 \cdot 10^{-5} \cdot v_c^2 + 8,505 \cdot 10^{-5} \cdot r_\beta^2 - 1,41 \cdot 10^{-2} \cdot v_c + 0,106 \cdot r_\beta - 5,427 \cdot 10^{-4} \cdot r_\beta \cdot v_c$$

Variablen-Transformation:

$$u = r_\beta^2$$

$$\rightarrow \hat{R}_a = 6,062 \cdot 10^{-5} \cdot v_c^2 + 8,505 \cdot 10^{-5} \cdot u - 1,41 \cdot 10^{-2} \cdot v_c + 0,106 \cdot r_\beta - 5,427 \cdot 10^{-4} \cdot r_\beta \cdot v_c$$

Matrix und Vektoren

$$\boldsymbol{\beta}_2 = \begin{pmatrix} 0,106 \\ 8,505 \cdot 10^{-5} \end{pmatrix}; \quad Z = \begin{pmatrix} r_\beta \\ u \end{pmatrix}; \quad \mathbf{B}_1 = \begin{pmatrix} -5,427 \cdot 10^{-4} & 0 \end{pmatrix}; \quad \mathbf{B}_2 = 6,062 \cdot 10^{-5}; \quad X = v_c;$$

$$\Sigma_Z = \begin{pmatrix} \sigma_{r_\beta}^2 & \text{cov}(r_\beta, u) \\ \text{cov}(r_\beta, u) & \sigma_u^2 \end{pmatrix}$$

Berechnung der Varianz

$$\text{Var}_{Z,\varepsilon}(R_a) = (\boldsymbol{\beta}_2 + \mathbf{B}_1^T X)^T \Sigma_Z (\boldsymbol{\beta}_2 + \mathbf{B}_1^T X) + \sigma_\varepsilon^2$$

$$\text{Var}_{r_\beta,\varepsilon}(R_a | \hat{r}_\beta) = \begin{pmatrix} \sigma_\varepsilon^2 + (0,106 - 5,427 \cdot 10^{-4} \cdot v_c)^2 \cdot \sigma_{r_\beta}^2 + (8,505 \cdot 10^{-5})^2 \cdot \sigma_u^2 \\ + 2 \cdot (0,106 - 5,427 \cdot 10^{-4} \cdot v_c) \cdot (8,505 \cdot 10^{-5}) \cdot \text{cov}(\hat{r}_\beta, u) \end{pmatrix}$$

Berechnung der Erwartungswert

$$E_{Z,\varepsilon}[(R_a)] = \beta_0 + \boldsymbol{\beta}_1^T X + \boldsymbol{\beta}_2^T \hat{Z} + X^T \mathbf{B}_1 \hat{Z} + X^T \mathbf{B}_2 X$$

$$E_{Z,\varepsilon}[(R_a)] = 6,062 \cdot 10^{-5} \cdot v_c^2 + 8,505 \cdot 10^{-5} \cdot \hat{u} - 1,41 \cdot 10^{-2} \cdot v_c + 0,106 \cdot \hat{r}_\beta - 5,427 \cdot 10^{-4} \cdot \hat{r}_\beta \cdot v_c$$

$$E_{Z,\varepsilon}[(R_a)] = 6,062 \cdot 10^{-5} \cdot v_c^2 + 8,505 \cdot 10^{-5} \cdot \hat{u} - 1,41 \cdot 10^{-2} \cdot v_c + 0,106 \cdot \hat{r}_\beta - 5,427 \cdot 10^{-4} \cdot \hat{r}_\beta \cdot v_c$$

→ Gütefunktion

$$J(v_c | \hat{r}_\beta) = \begin{pmatrix} \left(\begin{aligned} &6,062 \cdot 10^{-5} \cdot v_c^2 + 8,505 \cdot 10^{-5} \cdot \hat{u} - 1,41 \cdot 10^{-2} \cdot v_c + 0,106 \cdot \hat{r}_\beta - \\ &5,427 \cdot 10^{-4} \cdot \hat{r}_\beta \cdot v_c - \tau \end{aligned} \right)^2 \\ + \sigma_\varepsilon^2 + (0,106 - 5,427 \cdot 10^{-4} \cdot v_c)^2 \cdot \sigma_{r_\beta}^2 + (8,505 \cdot 10^{-5})^2 \cdot \sigma_u^2 \\ + 2 \cdot (0,106 - 5,427 \cdot 10^{-4} \cdot v_c) \cdot (8,505 \cdot 10^{-5}) \cdot \text{cov}(\hat{r}_\beta, u) \end{pmatrix}$$

A.3 Bestimmung von λ_0 für die asymptotische Funktion zwischen λ_t und $s_{M,t}$

Untersuchung der Eindeutigkeit von λ_0

Für die gegebene asymptotische Funktion (4-20) bzw. Formel (4-24) wurde der Parameter λ_0 über den Bereich [0.001; 0.18] in 0,1 %-Schritten variiert und die jeweils erzielbare ARL über 5000 Simulationsläufe gemittelt. Es wurde dabei nur das Szenario A aus Tabelle 4.5 in Betracht gezogen (=Fertigungs- und Messprozess sind unter Kontrolle). Es zeigt sich, dass die $ARL(0)$ -Funktion über λ_0 eine stetige Funktion ist. Die gewünschte $ARL(0)=100$ wird dabei zweimal im Bereich um 0,045 und im Bereich 0,11 erzielt (Abbildung A.3.1).

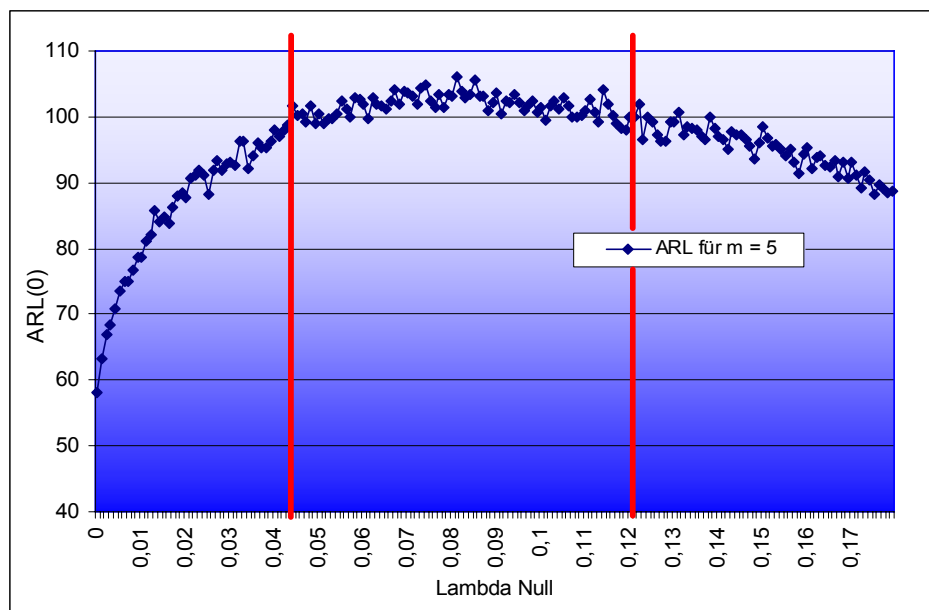


Abbildung A.3.1: Einfluss von λ_0 auf die $ARL(0)$ bei 5 Wiederholmessungen

Trägt man die asymptotische Funktion (4-24) zwischen λ_t und $s_{M,t}$ für λ_0 -Werte von 0.045, 0.10 und 0.12 ab so ergibt sich Abbildung A.3.2. Für $\lambda_0=0,045$ (untere Kurve) geht die Funktion schneller gegen Null. Dies hat zur Konsequenz, dass die aktuelle Beobachtung bzw. die aktuelle Stichprobe je höher die aktuelle Messstreuung ist, umso schneller mit einem Gewicht nahe Null in die Berechnung der Prüfstatistik eingeht.

Falls also gleichzeitig eine Erhöhung der Messstreuung und ein Shift in der Fertigungslage vorliegen, wird der Shift im Fertigungsprozess für einen

kleinen λ_0 -Wert später entdeckt als für einen großen λ_0 -Wert. Bei kleineren λ_0 -Werten ist die Gewichtung der aktuellen Stichprobe (also gerade die Stichproben, in welcher der Fertigungsprozess gestört ist) niedrig, und somit steigt die Fehlerwahrscheinlichkeit 2. Art für den Fertigungsprozess.

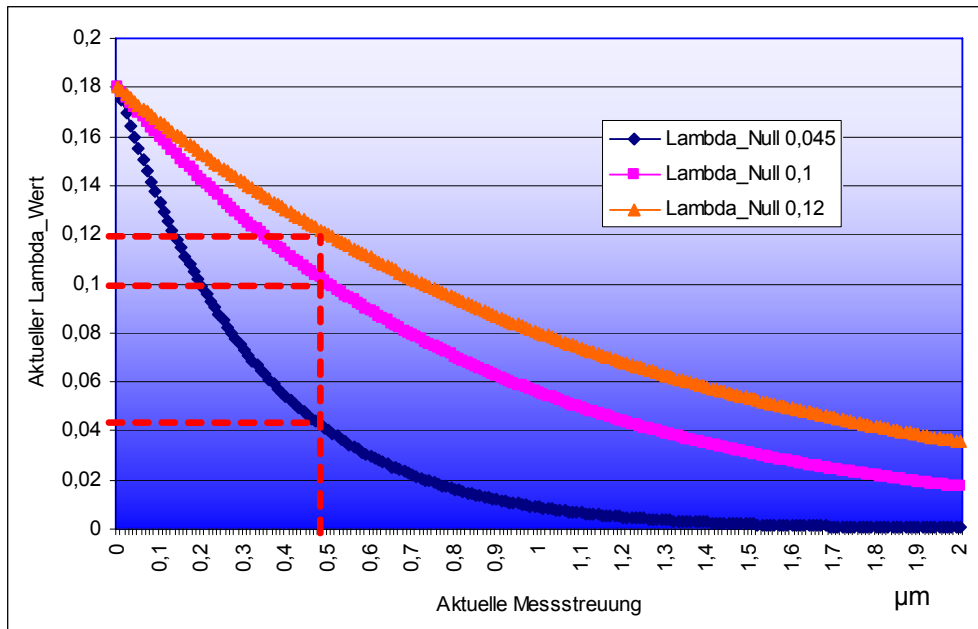


Abbildung A.3.2: λ_t über $s_{M,t}$ für verschiedene λ_0 -Werte

Je größer λ_0 dagegen gewählt wird, desto größer wird die Wahrscheinlichkeit, einen Shift des Fertigungsprozesses trotz eines gestörten Messprozesses anzuzeigen. Mit höherem λ_0 -Wert steigt also auch die Gewichtung der einzelnen Messwerte.

Zur Bestätigung dieses (subjektiven) Eindrucks wurden Simulationsstudien durchgeführt und diesmal gleichzeitig die Messstreuung erhöht und ein Shift der Fertigungslage manipuliert. Anschließend wurde die Leistungsfähigkeit der μ -EWMA-Karte für verschiedene λ_0 -Werte untersucht ($\lambda_0=0,045$, $0,1$ und $0,12$). Tabelle A.3.1 zeigt die Ergebnisse der Simulationsstudien. Dabei ist in der ersten Spalte der jeweilige Shift der Mittellage aufgezeigt und Spalte 2 zeigt den ARL-Wert ohne eine Erhöhung der Messstreuung. Dieser ARL-Wert aus der 2. Spalte ist dabei als Referenzwert zu verstehen anhand welchem die weiteren ARL-Werte der unterschiedlichen Szenarien C bzw. der Variation der λ_0 -Werte zeilenweise zu vergleichen sind.

Hierbei zeigt sich - wie vermutet -, dass die μ -EWMA-Karte bei der Wahl eines kleinen λ_0 -Werts (hier $\lambda_0=0,045$) Schwächen hat, einen Shift in der

Fertigungslage bei gleichzeitiger Erhöhung der Messstreuung zu detektieren. Je höher die Messstreuung ist, umso schwerer wiegt diese Schwäche. Größere λ_0 -Werte dagegen entdecken einen Shift in der Fertigungslage egal ob mit oder ohne Erhöhung der Messstreuung nahezu mit der gleichen Leistungsfähigkeit.

Szenario B: Shift Mittellage	σ_M i.O.	$\lambda_0 = 0,045$		$\lambda_0 = 0,1$		$\lambda_0 = 0,12$	
		Szenario C: Erhöhung σ_M um		Szenario C: Erhöhung σ_M um		Szenario C: Erhöhung σ_M um	
		1,5	2,0	1,5	2,0	1,5	2,0
Shift Mittel- lage 0,25 σ_P	44	77	118	54	61	47	48
Shift Mittel- lage 0,5 σ_P	19	33	52	23	29	21	24
Shift Mittel- lage 1,0 σ_P	8	14	22	9	11	8	9
Shift Mittel- lage 2,0 σ_P	4	6	9	4	5	4	4

Tabelle A.3.1: Vergleich der ARL-Leistungsfähigkeit der μ -EWMA-Karte für verschiedene λ_0 -Werte

Für einen möglichen Fall 4 in der Entscheidungsmatrix (Fertigungs- und Messprozess gestört, Abbildung 4.25) kann daher sowohl die Störung im Fertigungsprozess also auch im Messprozess detektiert werden.

Als Folgerung ist daher die Wahl eines möglichst hohen λ_0 -Wertes zur gewünschten $ARL(0)$ zu empfehlen.

A.4 Empirische Daten zur Aufstellung und Validierung des Regressionmodells

Nr.	v_c	r_β	b	h	F_c^{mess}	$\hat{r}_\beta^{\text{K2}}$	R_a^{mess}	\hat{R}_a^{mod}	\hat{R}_a^{K2}
	m/min	μm	mm	mm	N	μm	μm	μm	μm
1	200	10	2,01	0,0184	125	9,28	0,088	0,124	0,125
2	200	10	2,03	0,0143	110	12,1	0,096	0,124	0,123
3	200	10	2,02	0,0159	113	9,71	0,132	0,124	0,125
4	200	20	2,01	0,0384	265	20,87	0,130	0,124	0,124
5	200	20	1,99	0,0166	135	19,73	0,137	0,124	0,123
6	200	20	2,00	0,0220	170	20,40	0,161	0,124	0,124
7	200	20	1,97	0,0093	86	21,33	0,167	0,124	0,125
8	150	20	2,01	0,0246	185	19,75	0,168	0,177	0,170
9	150	20	2,00	0,0177	146	22,01	0,173	0,177	0,233
10	150	20	2,01	0,0210	163	19,41	0,188	0,177	0,160
11	100	20	2,01	0,0293	211	19,29	0,464	0,533	0,494
12	100	20	2,00	0,0309	219	19,11	0,602	0,533	0,484
13	200	40	1,95	0,0147	141	40,81	0,133	0,173	0,176
14	200	40	1,96	0,0132	131	42,36	0,141	0,173	0,183
15	200	60	1,84	0,0156	152	60,43	0,292	0,290	0,293
16	200	60	1,85	0,0180	170	59,31	0,306	0,290	0,285

Tabelle A.4.1: Daten zur Aufstellung des Regressionmodells

r_β	v_c	h	b	F_c^{mess}	$\hat{r}_\beta^{\text{K0}}$	$\hat{r}_\beta^{\text{K1}}$	$\hat{r}_\beta^{\text{K2}}$	$\hat{r}_\beta^{\text{K3}}$	R_a^{mess}	\hat{R}_a^{mod}	\hat{R}_a^{K2}
μm	m/min	mm	mm	N	μm	μm	μm	μm	μm	μm	μm
10	200	0,010	2,00	79,1	5,99	7,064	12,0	6,2	0,124	0,124	0,123
10	200	0,027	2,04	192,3	7,65	9,028	15,3	2,8	0,121	0,124	0,122
10	200	0,018	2,00	128,8	5,73	6,756	11,5	3,1	0,127	0,124	0,123
10	200	0,020	1,99	141,8	6,86	8,088	13,7	3,5	0,129	0,124	0,122
10	200	0,013	2,00	93,5	4,34	5,127	8,7	3,3	0,126	0,124	0,124
10	200	0,009	2,00	74,4	4,77	5,630	9,5	5,0	0,128	0,124	0,124
10	200	0,007	2,00	61,9	6,99	8,240	14,0	10,4	0,124	0,124	0,122
10	200	0,011	1,02	47,9	7,03	8,291	14,1	6,2	0,128	0,124	0,122

r_β	v_c	h	b	F_c^{mess}	$\hat{r}_\beta^{\text{K0}}$	$\hat{r}_\beta^{\text{K1}}$	$\hat{r}_\beta^{\text{K2}}$	$\hat{r}_\beta^{\text{K3}}$	R_a^{mess}	\hat{R}_a^{mod}	\hat{R}_a^{K2}
10	200	0,019	1,03	67,9	5,50	6,492	11,0	2,9	0,120	0,124	0,124
10	200	0,016	1,02	55,1	4,41	5,201	8,8	2,8	0,123	0,124	0,124
10	200	0,018	1,03	65,4	5,58	6,588	11,2	3,1	0,133	0,124	0,123
10	200	0,017	1,03	63,3	6,19	7,304	12,4	3,7	0,126	0,124	0,123
10	200	0,016	3,02	168,5	4,85	5,720	9,7	3,1	0,132	0,124	0,124
10	200	0,011	1,99	86,9	6,47	7,635	12,9	12,2	0,119	0,124	0,122
10	200	0,011	1,91	78,1	4,78	5,637	9,6	8,9	0,130	0,124	0,124
10	200	0,035	2,00	195,6	3,80	4,487	7,6	2,2	0,127	0,124	0,124
10	200	0,012	1,79	74,5	3,40	4,014	6,8	17,0	0,134	0,124	0,124
20	200	0,011	2,00	98,2	11,22	13,224	22,4	10,6	0,126	0,124	0,126
20	200	0,027	2,02	194,2	8,15	9,610	16,3	3,0	0,127	0,124	0,122
20	200	0,037	2,02	262,9	10,72	12,642	21,4	2,9	0,132	0,124	0,125
20	200	0,036	2,00	249,8	9,98	11,764	20,0	2,8	0,124	0,124	0,123
20	200	0,033	2,00	208,3	5,92	6,981	11,8	1,8	0,120	0,124	0,123
20	200	0,026	2,01	189,1	9,58	11,292	19,2	3,7	0,134	0,124	0,123
20	200	0,029	2,00	203,8	9,24	10,899	18,5	3,2	0,124	0,124	0,123
20	200	0,015	1,02	57,4	5,68	6,702	11,4	3,7	0,128	0,124	0,123
20	200	0,017	1,02	71,9	10,43	12,301	20,9	6,1	0,132	0,124	0,124
20	200	0,018	1,01	75,9	10,69	12,604	21,4	5,8	0,129	0,124	0,125
20	200	0,017	3,02	197,6	7,33	8,641	14,7	4,2	0,129	0,124	0,122
20	200	0,015	3,02	164,1	5,60	6,606	11,2	3,8	0,128	0,124	0,123
20	200	0,009	1,94	81,9	10,23	12,060	20,5	22,8	0,128	0,124	0,124
20	200	0,012	1,98	102,1	8,85	10,432	17,7	14,7	0,130	0,124	0,122
20	200	0,012	1,96	101,3	8,10	9,558	16,2	13,1	0,124	0,124	0,122
20	200	0,013	1,96	104,3	8,31	9,800	16,6	13,0	0,128	0,124	0,122
20	200	0,009	1,97	86,0	10,67	12,583	21,3	23,1	0,122	0,124	0,125
20	200	0,010	1,94	85,6	9,73	11,471	19,5	20,2	0,128	0,124	0,123
20	200	0,013	1,99	114,8	10,59	12,481	21,2	16,0	0,136	0,124	0,125
30	200	0,008	1,97	80,9	16,47	19,410	32,9	21,7	0,138	0,140	0,148

r_β	v_c	h	b	F_c^{mess}	$\hat{r}_\beta^{\text{K0}}$	$\hat{r}_\beta^{\text{K1}}$	$\hat{r}_\beta^{\text{K2}}$	$\hat{r}_\beta^{\text{K3}}$	R_a^{mess}	\hat{R}_a^{mod}	\hat{R}_a^{K2}
30	200	0,023	1,99	167,0	8,80	10,375	17,6	3,9	0,135	0,140	0,122
30	200	0,028	2,01	211,1	10,74	12,667	21,5	3,8	0,148	0,140	0,125
30	200	0,017	1,02	68,7	9,03	10,650	18,1	5,3	0,150	0,140	0,122
30	200	0,017	1,02	68,5	9,50	11,200	19,0	5,7	0,151	0,140	0,123
30	200	0,029	2,00	234,5	16,09	18,957	32,2	11,0	0,139	0,140	0,145
30	200	0,009	1,95	87,2	13,71	16,155	27,4	30,8	0,142	0,140	0,134
30	200	0,034	2,00	254,3	14,01	16,515	28,0	8,3	0,149	0,140	0,135
30	200	0,017	1,96	140,7	12,93	15,242	25,90	15,5	0,140	0,140	0,131
30	200	0,014	1,85	125,6	16,42	19,353	32,8	45,4	0,147	0,140	0,147
30	200	0,013	1,67	85,3	7,36	8,680	14,7	23,4	0,150	0,140	0,122
30	200	0,014	1,90	118,6	13,34	15,726	26,7	38,9	0,149	0,140	0,132
30	200	0,010	1,60	79,4	14,37	16,938	28,7	57,5	0,144	0,140	0,137
30	200	0,015	1,89	128,0	15,82	18,642	31,6	65,3	0,150	0,140	0,144
30	200	0,014	1,88	124,1	14,28	16,835	28,6	59,2	0,143	0,140	0,136
40	200	0,011	2,00	111,7	17,30	20,390	34,6	31,3	0,181	0,173	0,153
40	200	0,020	2,00	167,6	12,84	15,136	25,7	12,6	0,182	0,173	0,131
40	200	0,014	1,85	124,2	18,50	21,799	37,0	53,9	0,172	0,173	0,161
40	200	0,009	1,59	77,4	18,96	22,337	37,9	83,9	0,181	0,173	0,164
40	200	0,010	1,75	95,5	23,00	27,094	46,0	92,4	0,176	0,173	0,201
40	200	0,010	1,79	88,4	16,07	18,938	32,1	66,3	0,177	0,173	0,145
40	200	0,016	1,91	149,7	22,24	26,198	44,5	55,8	0,177	0,173	0,193
40	200	0,008	1,79	74,5	13,72	16,171	27,4	101,6	0,179	0,173	0,134
60	200	0,013	1,76	110,3	14,85	17,505	29,7	60,0	0,294	0,290	0,139
60	200	0,01652	1,87	161,7	30,57	36,001	61,1	61,6	0,277	0,290	0,290
60	200	0,01780	2,01	185,7	31,63	37,250	63,3	62,0	0,289	0,290	0,290

Tabelle A.4.2: Validierungsdaten für r_β -Prognose und Berechnung der R_a -Werte

A.5 Varianzzerlegung für die R_a -Messwerte zur Bestimmung der Referenzmessstreuung nach DIN EN ISO 12179

Bezeichnung	Formel	Freiheitsgrad (FG) und Quadratischer Mittelwert (M)
Mittelwert über alle Messstellen	$\bar{x}_i = \frac{1}{N_\alpha} \cdot \sum_{j=1}^{N_\alpha} x_{i,j}$	
Mittelwert über die Messungen an jeder Messstelle	$\bar{x}_j = \frac{1}{N_\beta} \cdot \sum_{i=1}^{N_\beta} x_{i,j}$	
Gesamtmittelwert über alle Messungen	$\bar{x} = \frac{1}{N_\beta \cdot N_\alpha} \cdot \sum_{j=1}^{N_\alpha} \sum_{i=1}^{N_\beta} x_{i,j}$	
Zerlegung der Summe der Abweichungsquadrate	$S_G = S_2 + S_3 + S_4$	
Summe der Abweichungsquadrate	$S_G = \sum_{j=1}^{N_\alpha} \sum_{i=1}^{N_\beta} (x_{i,j} - \bar{x})^2$	
Mittelwert	$S_1 = N_\alpha \cdot N_\beta \cdot \bar{x}^2$	$FG_1 = 1$ $M_1 = S_1 / FG_1$
Abweichungsquadratsumme über das Normal	$S_2 = N_\alpha \cdot \sum_{i=1}^{N_\beta} (\bar{x}_i - \bar{x})^2$	$FG_2 = N_\beta - 1$ $M_2 = S_2 / FG_2$
Abweichungsquadratsumme über die Messungen	$S_3 = N_\beta \cdot \sum_{j=1}^{N_\alpha} (\bar{x}_j - \bar{x})^2$	$FG_3 = N_\alpha - 1$ $M_3 = S_3 / FG_3$
Abweichungsquadratsumme aus der Apparatur	$S_4 = \sum_{j=1}^{N_\alpha} \sum_{i=1}^{N_\beta} (x_{ij} - \bar{x}_i - \bar{x}_j + \bar{x})^2$	$FG = (N_\alpha - 1) \cdot (N_\beta - 1)$ $M_4 = S_4 / FG_4$

Tabelle A.5.1: Formeln zur Berechnung der Varianzanteile [DIN ISO12179]

Streuungsanteil	Formel
Geschätzte Varianz, fertigungsbedingte Kenngrößenstreuung	$S_F^2 = \frac{M_2 - M_4}{N_\beta}$
Geschätzte Varianz des Messprozesseinflusses	$S_E^2 = \frac{M_3 - M_4}{N_\alpha}$
Geschätzte Wiederholpräzision des NanoFocus®	$S_{MP}^2 = M_4$

Tabelle A.5.2: Formeln zur Berechnung der Varianzanteile nach der ANOVA-Methode(2) [DIN ISO12179]

Komponenten	Quadratsumme	Anzahl der Freiheitsgrade	Quadratischer Mittelwert
Mittelwert	$S_1 = 1,014105$	1	$M_1 = 1,014105$
Variation über die Referenzoberfläche	$S_2 = 0,021186$	9	$M_2 = 0,002354$
Variation über die Messungen	$S_3 = 0,000120$	4	$M_3 = 3,00 \cdot 10^{-5}$
Wiederholbarkeit über das Messgerät	$S_4 = 0,000356$	36	$M_4 = 0,98 \cdot 10^{-5}$

Tabelle A.5.3: Varianzzerlegung für R_a -Messwerte

A.6 Simulationsdaten

Nr.	F_c	$r_\beta^{\text{"ist"}}$	\hat{r}_β	$\hat{R}_a^{\text{unger.}}$	v_c^*	\hat{R}_a^{opt}	$R_a^{\text{"ist",ger}}$	$R_a^{\text{"ist",unger.}}$
1	80	10,872	10	0	100	0	0	0.021
2	80,4	11,121	10	0	100	0	0	0.007
3	80,802	11,376	10	0	100	0	0	0.04
4	81,20601	11,637	13,442	0,176	147	0	0,01	0.08
5	81,61204	11,904	13,442	0	147	0	0	0.089
6	82,0201	12,176	13,442	0	147	0	0	0.097
7	82,430201	12,456	13,422	0	147	0	0,026	0.149
8	82,842352	12,741	13,442	0	147	0	0,001	0.139
9	83,256564	13,033	13,442	0	147	0	0,027	0.181
10	83,672846	13,332	13,442	0	147	0	0	0.158
11	84,091211	13,638	14,298	0,024	158	0,017	0,017	0.186
12	84,511667	13,951	14,298	0,017	158	0,017	0,046	0.233
13	84,934225	14,271	14,298	0,017	158	0,017	0	0.166
14	85,358896	14,598	19,671	0,141	182	0,105	0,122	0.256
15	85,785691	14,933	19,671	0,105	182	0,105	0,148	0.3
16	86,214619	15,275	19,749	0,106	183	0,106	0,095	0.264
17	86,645692	15,625	21,679	0,125	191	0,121	0,101	0.275
18	87,078921	15,983	21,679	0,121	191	0,121	0,131	0.324
19	87,514315	16,35	21,679	0,121	191	0,121	0,127	0.34
20	87,951887	16,725	21,679	0,121	191	0,121	0,1	0.334
21	88,391646	17,108	21,679	0,121	191	0,121	0,105	0.36
22	88,833604	17,501	21,679	0,121	191	0,121	0,139	0.414
23	89,277772	17,902	21,679	0,121	191	0,121	0,142	0.44
24	89,724161	18,312	33,723	0,205	200	0,15	0,152	0.443
25	90,172782	18,732	33,723	0,15	200	0,15	0,14	0.454
26	90,623646	19,162	33,723	0,15	200	0,15	0,193	0.531
27	91,076764	19,601	33,723	0,15	200	0,15	0,172	0.534
28	91,532148	20,051	33,723	0,15	200	0,15	0,168	0.554

Nr.	F_c	$r_\beta^{\text{"ist"}}$	\hat{r}_β	$\hat{R}_a^{\text{unger.}}$	v_c^*	\hat{R}_a^{opt}	$R_a^{\text{"ist",ger}}$	$R_a^{\text{"ist",unger.}}$
29	91,989809	20,51	33,723	0,15	200	0,15	0,132	0.543
30	91,989809	20,51	33,723	0,15	200	0,15	0,132	0.543
31	92,909707	21,459	33,723	0,15	200	0,15	0,109	0.573
32	93,838804	22,452	33,723	0,15	200	0,15	0,174	0.693
33	94,777192	23,491	33,723	0,15	200	0,15	0,157	0.733
34	95,724964	24,578	33,723	0,15	200	0,15	0,136	0.773
35	96,682214	25,715	39,04	0,169	200	0,169	0,175	0.857
36	97,649036	26,905	39,04	0,169	200	0,169	0,151	0.9
37	98,625526	28,15	39,04	0,169	200	0,169	0,162	0.982
38	99,611781	29,452	39,04	0,169	200	0,169	0,162	1.055
39	100,607899	30,815	39,04	0,169	200	0,169	0,14	1.11
40	101,613978	32,24	39,04	0,169	200	0,169	0,167	1.219
41	102,630118	33,732	39,04	0,169	200	0,169	0,186	1.323
42	103,656419	35,293	39,04	0,169	200	0,169	0,178	1.405
43	104,692983	36,926	39,04	0,169	200	0,169	0,161	1.483
44	105,739913	38,634	44,047	0,192	200	0,192	0,204	1.603
45	106,797312	40,422	44,047	0,192	200	0,192	0,214	1.717
46	107,865285	42,292	44,047	0,192	200	0,192	0,207	1.821
47	108,943938	44,248	44,047	0,192	200	0,192	0,193	1.922
48	110,033378	46,296	46,406	0,203	200	0,203	0,208	2.047
49	111,133711	48,438	54,699	0,253	200	0,253	0,225	2.143
50	112,245048	50,679	54,699	0,253	200	0,253	0,268	2.32

Tabelle A.6.1: 1. Simulation: kontinuierlicher Schnittkraftanstieg (0,5 % pro Fertigungsschritt) bei Minimalwertregelung $R_a^{\text{Soll}} = 0 \mu\text{m}$

Nr.	F_c	$r_{\beta}^{\text{"ist"}}$	\hat{r}_{β}	$\hat{R}_a^{\text{unger.}}$	v_c^*	\hat{R}_a^{opt}	$R_a^{\text{"ist",ger}}$	$R_a^{\text{"ist",unger.}}$	$v_c^{\text{unger.}}$
1	80	11	10	0,000	100	0,125	0,095	0,007	100
2	81	11	16	0,122	100	0,335	0,323	0,053	100
3	82	12	16	0,335	100	0,335	0,330	0,088	100
4	82	12	20	0,554	116	0,404	0,416	0,135	100
5	83	13	20	0,404	116	0,404	0,414	0,164	100
6	84	14	26	0,661	143	0,398	0,384	0,173	100
7	85	14	26	0,398	143	0,398	0,412	0,234	100
8	86	15	26	0,398	143	0,398	0,399	0,257	100
9	87	16	26	0,398	143	0,398	0,400	0,296	100
10	87	16	26	0,398	143	0,398	0,402	0,337	100
11	88	17	26	0,398	143	0,398	0,375	0,351	100
12	89	18	26	0,398	143	0,398	0,417	0,437	100
13	90	19	26	0,398	143	0,398	0,432	0,497	100
14	91	20	26	0,398	143	0,398	0,423	0,536	100
15	92	20	26	0,398	143	0,398	0,378	0,541	100
16	93	21	26	0,398	143	0,398	0,376	0,591	100
17	94	22	26	0,398	143	0,398	0,404	0,674	100
18	95	23	29	0,497	154	0,397	0,379	0,707	100
19	96	25	29	0,397	154	0,397	0,419	0,807	100
20	97	26	29	0,397	154	0,397	0,398	0,850	100
21	98	27	37	0,635	174	0,398	0,413	0,931	100
22	99	28	37	0,398	174	0,398	0,439	1,027	100
23	100	29	37	0,398	174	0,398	0,433	1,095	100
24	101	31	37	0,398	174	0,398	0,420	1,159	100
25	102	32	37	0,398	174	0,398	0,401	1,221	100
26	103	34	43	0,507	182	0,400	0,419	1,323	100
27	104	35	43	0,400	182	0,400	0,405	1,399	100
28	105	37	43	0,400	182	0,400	0,381	1,469	100
29	106	39	43	0,400	182	0,400	0,414	1,601	100

Nr.	F_c	$r_\beta^{\text{"ist"}}$	\hat{r}_β	$\hat{R}_a^{\text{unger.}}$	v_c^*	\hat{R}_a^{opt}	$R_a^{\text{"ist",ger}}$	$R_a^{\text{"ist",unger.}}$	$v_c^{\text{unger.}}$
30	106	39	43	0,400	182	0,400	0,399	1,587	100
31	107	40	50	0,509	189	0,394	0,392	1,689	100
32	108	42	50	0,394	189	0,394	0,375	1,782	100
33	109	44	50	0,394	189	0,394	0,388	1,911	100
34	110	46	50	0,394	189	0,394	0,413	2,057	100
35	111	48	50	0,394	189	0,394	0,384	2,155	100
36	112	51	54	0,439	191	0,403	0,421	2,318	100
37	113	53	54	0,403	191	0,403	0,393	2,432	100
38	114	55	54	0,403	191	0,403	0,385	2,574	100
39	116	58	60	0,473	195	0,391	0,383	2,741	100
40	117	61	60	0,391	195	0,391	0,390	2,914	100
41	118	63	60	0,391	195	0,391	0,397	3,095	100
42	119	66	60	0,391	195	0,391	0,351	3,233	100
43	120	69	60	0,391	195	0,391	0,390	3,466	100
44	122	73	60	0,391	195	0,391	0,413	3,695	100
45	123	76	60	0,391	195	0,391	0,401	3,899	100
46	124	80	60	0,391	195	0,391	0,408	4,135	100
47	125	83	60	0,391	195	0,391	0,432	4,400	100
48	126	87	60	0,391	195	0,391	0,379	4,602	100
49	128	91	60	0,391	195	0,391	0,388	4,881	100
50	129	95	60	0,391	195	0,391	0,424	5,201	100

Tabelle A.6.2. Simulation: kontinuierlicher Schnittkraftanstieg (1 % pro Fertigungsschritt) und Sollwertregelung $R_a^{\text{Soll}} = 0,4 \mu\text{m}$

Nr.	F_c	$r_\beta^{\text{"ist"}}$	\hat{r}_β	$\hat{R}_a^{\text{unger.}}$	v_c^*	\hat{R}_a^{opt}	$R_a^{\text{"ist", ger}}$	$R_a^{\text{"ist", unger.}}$
1	80	10,872	10	0	100	0,125	0,106	0,018
2	80	10,872	17,92	0,123	102	0,402	0,422	0,058
3	80	10,872	17,92	0,402	102	0,402	0,383	0,019
4	80	10,872	17,92	0,402	102	0,402	0,419	0,055
5	80	10,872	17,92	0,402	102	0,402	0,359	-0,005
6	80	10,872	19,593	0,492	112	0,401	0,392	0,029
7	80	10,872	19,593	0,401	112	0,401	0,388	0,025
8	80	10,872	19,593	0,401	112	0,401	0,455	0,092
9	80	10,872	19,593	0,401	112	0,401	0,404	0,041
10	95	23,743	20,163	0,429	115	0,403	0,378	0,717
11	95	23,743	20,163	0,423	115	0,403	0,393	0,731
12	95	23,743	40,045	1,371	178	0,399	0,415	0,757
13	95	23,743	40,045	0,399	178	0,399	0,383	0,725
14	95	23,743	40,045	0,399	178	0,399	0,415	0,757
15	95	23,743	40,045	0,399	178	0,399	0,416	0,758
16	95	23,743	40,045	0,399	178	0,399	0,453	0,795
17	95	23,743	40,045	0,399	178	0,399	0,384	0,726
18	95	23,743	40,045	0,399	178	0,399	0,393	0,735
19	95	23,743	40,045	0,399	178	0,399	0,402	0,744
20	95	23,743	40,045	0,399	178	0,399	0,417	0,759

Tabelle A.6.3: 3. Simulation: Schneidkantenverrundung um 13 μm (=15N) bei Fertigungsschritt 10 (bei Sollwertregelung $R_a^{\text{soll}} = 0,4 \mu\text{m}$)

A.7 Empirische Versuche und Szenarien

	Nr.	F_c [N]	r_β [μm]	h [μm]	$v_{c,t}$ [m/min]	$R_{a,t}^{\text{ist,unger.}}$ [μm]	$\hat{R}_{a,t}^{\text{unger.}}$ [μm]	$v_{c,t+1}^*$ [m/min]	$\hat{R}_{a,t+1}^{\text{opt}}$ [μm]	$R_{a,t+1}^{\text{ist,ger.}}$ [μm]
Minimalwertregelung ($R_a^{\text{solL}}=0 \mu\text{m}$)	1	138	20	0,017	150	0,176	0,182	162	0,141	0,154
	2	147	25	0,017	150	0,334	,319	162	0,246	0,215
	3	140	20	0,017	150	0,151	0,177	170	0,119	0,139
	4	142	25	0,017	150	0,146	0,319	170	0,207	0,132
	5	138	20	0,017	200	0,151	0,124	183	0,108	0,135
	6	131	20	0,017	200	0,146	0,124	183	0,108	0,137
	7	131	40	0,013	190	0,276	0,268	200	0,173	0,204
	8	163	40	0,017	180	0,331	0,375	200	0,173	0,253
	9	123	10	0,017	100	0,11	0	138	0	0,105
	10	140	20	0,017	138	0,253	0,249	185	0,111	0,196
	11	143	20	0,017	187	0,109	0,108	191	0,111	0,104
	12	144	25	0,017	191	0,148	0,141	195	0,135	0,141
Sollwertregel. ($R_a^{\text{solL}}=0,4 \mu\text{m}$)	13	92	20	0,01	100	0,594	0,554	116	0,404	0,416
	14	94	25	0,01	110	0,688	0,688	143	0,369	0,384
	15	95	30	0,01	143	0,476	0,535	154	0,428	0,379
	16	103	45	0,01	174	0,524	0,539	182	0,425	0,419
	17	143	25	0,017	100	0,806	0,811	125	0,527	0,536
	18	150	30	0,017	125	0,811	0,741	150	0,465	0,492
	19	158	35	0,017	150	0,654	0,618	170	0,396	0,410
	20	170	50	0,017	160	0,916	0,894	170	0,708	0,735

Tabelle A.7.1: Empirische Versuchsreihen zur Validierung des Reglers

Lebenslauf

Persönliches

Name: Matthias Schlipf
Geburtsdatum: 28.01.1979
Geburtsort: Aalen
Familienstand: verheiratet
Staatsangehörigkeit: deutsch

Ausbildung

08/1985-06/1998 Theoder-Heuss-Gymnasium Aalen
10/1999-09/2004 Studium Wirtschaftsingenieurwesen und deutsch-franz.
Doppeldiplom an der Universität Karlsruhe (TH) und dem
Institute Nationale Polytechnique de Grenoble (INPG)
10/2003-01/2005 Erwerb des Master of Science (M.Sc.) am INPG

Wehrdienst

07/1998-04/1999 Gefahrgutkraftfahrer 6. Transportbataillon 10, Ellwangen

Berufstätigkeit

05/1999-01/2005 Studienbegleitende Praktika
04/2000-08/2004 Studentische Hilfskraft an der Universität Karlsruhe (TH)
und an der University of Waterloo (Kanada)
02/2005-01/2007 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für
Produktionstechnik (wbk), Universität Karlsruhe (TH)
01/2007-01/2008 Leiter des Forschungsschwerpunktes
Mikroproduktionstechnik am Institut für
Produktionstechnik (wbk), Universität Karlsruhe (TH)
seit 01/2008 Kommissarischer Bereichsleiter und Oberingenieur des
Bereichs Produktionssysteme am Institut für
Produktionstechnik (wbk), Universität Karlsruhe (TH)