



FAU Studien aus dem Maschinenbau 443

## Ann-Kathrin Wiemann

Beitrag zur Messunsicherheitsermittlung für die Messung großer Zahnräder zur Erweiterung des virtuellen Koordinatenmessgerätes der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt



Ann-Kathrin Wiemann

Beitrag zur Messunsicherheitsermittlung für die Messung großer  
Zahnräder zur Erweiterung des virtuellen Koordinatenmessgerätes  
der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt

# **FAU Studien aus dem Maschinenbau**

## **Band 443**

Herausgeber/-innen:

Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke

Prof. Dr.-Ing. Nico Hanenkamp

Prof. Dr.-Ing. habil. Tino Hausotte

Prof. Dr.-Ing. habil. Marion Merklein

Prof. Dr.-Ing. Sebastian Müller

Prof. Dr.-Ing. Michael Schmidt

Prof. Dr.-Ing. Sandro Wartzack

Ann-Kathrin Wiemann

**Beitrag zur Messunsicherheitsermittlung  
für die Messung großer Zahnräder  
zur Erweiterung des virtuellen  
Koordinatenmessgerätes der  
Physikalisch-Technischen  
Bundesanstalt**

Dissertation aus dem Lehrstuhl für Fertigungsmesstechnik  
(FMT) Prof. Dr.-Ing. habil. Tino Hausotte

Erlangen  
FAU University Press  
2024

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:  
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Kontakt: Ann-Kathrin Wiemann, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, ([ROR https://ror.org/oof7hpc57](https://ror.org/oof7hpc57)).

Bitte zitieren als

Wiemann, Ann-Kathrin. 2024. *Beitrag zur Messunsicherheitsermittlung für die Messung großer Zahnräder zur Erweiterung des virtuellen Koordinatenmessgerätes der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt*. FAU Studien aus dem Maschinenbau Band 443. Erlangen: FAU University Press.  
DOI: 10.25593/978-3-96147-748-7

Das Werk, einschließlich seiner Teile, ist urheberrechtlich geschützt.  
Die Rechte an allen Inhalten liegen bei ihren jeweiligen Autoren.  
Sie sind nutzbar unter der Creative-Commons-Lizenz BY-NC.

Der vollständige Inhalt des Buchs ist als PDF über OPEN FAU der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg abrufbar:  
<https://open.fau.de/home>

Verlag und Auslieferung:  
FAU University Press, Universitätsstraße 4, 91054 Erlangen

Druck: docupoint GmbH

ISBN: 978-3-96147-747-0 (Druckausgabe)  
eISBN: 978-3-96147-748-7 (Online-Ausgabe)  
ISSN: 2625-9974  
DOI: 10.25593/978-3-96147-748-7

**Beitrag zur Messunsicherheitsermittlung für die Messung  
großer Zahnräder zur Erweiterung des virtuellen  
Koordinatenmessgerätes der Physikalisch-Technischen  
Bundesanstalt**

Der Technischen Fakultät  
der Friedrich-Alexander-Universität  
Erlangen-Nürnberg

zur  
Erlangung des Doktorgrades Dr.-Ing.

vorgelegt von

Ann-Kathrin Wiemann, M.Sc.

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

Tag der mündlichen  
Prüfung: 07.09.23

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Tino Hausotte  
Prof. Dr.-Ing. habil. Andreas Fischer,  
Universität Bremen

# Inhaltsverzeichnis

Abkürzungs- und Größenverzeichnis . . . . .	vii
Bildverzeichnis . . . . .	xix
Tabellenverzeichnis . . . . .	xxiii
<b>1 Einleitung . . . . .</b>	<b>1</b>
<b>2 Stand der Technik zur Messunsicherheitsermittlung in der taktilen Koordinatenmesstechnik . . . . .</b>	<b>3</b>
2.1 Taktile Koordinatenmessgeräte . . . . .	3
2.1.1 Aufbau und Funktionsweise eines Koordinatenmessgerätes . . . . .	4
2.1.2 Einflussgrößen auf die Messung mit einem Koordinatenmessgerät . . . . .	5
2.1.3 Spezifische Einflüsse bei Messungen mit Groß-Koordinatenmessgeräten . . . . .	9
2.2 Ansätze der Messunsicherheitsermittlung . . . . .	10
2.2.1 Messunsicherheitsbilanz nach dem Guide of the expression of uncertainty in measurement . . . . .	11
2.2.2 Messunsicherheitsbestimmung mittels Substitutionsmethode . . . . .	12
2.2.3 Messunsicherheitsbestimmung mittels Simulation .	13
2.3 Das virtuelle Koordinatenmessgerät der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt . . . . .	16
2.3.1 Modelle und Parameterermittlung . . . . .	18
2.3.2 Herausforderungen bei der Anwendung am Groß-Koordinatenmessgerät . . . . .	25
<b>3 Groß-Koordinatenmessgerät und Großverzahnungsnorm der PTB . . . . .</b>	<b>27</b>
3.1 Groß-Koordinatenmessgerät der PTB . . . . .	27
3.2 Großverzahnungsnorm der PTB . . . . .	29
3.3 Erfassung der Temperatur des Großverzahnungsnormals .	32
3.4 Lagerung des Großverzahnungsnormals . . . . .	33

<b>4</b>	<b>Messabweichungen durch das Koordinatenmessgerät . . .</b>	<b>35</b>
4.1	Untersuchung der Erfassung von Geometrieabweichungen mit einem LaserTracer . . . . .	35
4.1.1	Messtechnische Optimierung einer Erfassungsstrategie . . . . .	37
4.1.2	Einfluss von Temperaturgradienten auf die interferometrische Erfassungsstrategie . . . . .	45
4.1.3	Auswirkungen der Erfassung der Geometrieabweichungen auf die Messunsicherheitsermittlung . . . . .	49
4.2	Einfluss der Umgebungstemperatur auf das Groß-KMG . .	59
4.2.1	Anwendung des Modells eines thermischen Ausdehnungskreises . . . . .	59
4.2.2	Anwendung des Temperaturmodells des thermisch bedingten Starrkörpermodells . . . . .	64
4.2.3	Auswirkung der Modellierungen der thermischen Geometrieabweichungen auf die Messunsicherheitsermittlung . . . . .	71
<b>5</b>	<b>Messabweichungen durch das Werkstück . . . . .</b>	<b>75</b>
5.1	Einfluss der Werkstücktemperatur am Beispiel des Großverzahnungsnormals . . . . .	76
5.1.1	Ermittlung der Temperaturverteilung im Werkstück	76
5.1.2	Ermittlung des Einflusses der Werkstücktemperatur auf die Verzahnungsmessgrößen . . . . .	79
5.1.3	Auswirkungen der Werkstücktemperatur auf die Messunsicherheitsermittlung . . . . .	88
5.2	Einfluss der Lagerung am Beispiel eines Großverzahnungsnormals . . . . .	94
5.2.1	Ermittlung des Einflusses verschiedener Lagerungen auf das Werkstück . . . . .	95
5.2.2	Theoretische und experimentelle Untersuchung des Lagerungseinflusses auf die Verzahnungsmessgrößen	102
5.2.3	Auswirkungen des Lagerungseinflusses auf die Messunsicherheitsermittlung . . . . .	105
<b>6</b>	<b>Bedeutung der Ergebnisse für das virtuelle Koordinatenmessgerät der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt . . . . .</b>	<b>109</b>
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick . . . . .</b>	<b>115</b>

<b>Anhang</b> . . . . .	<b>119</b>
A  Matlab-Code zur Berechnung der thermisch beeinflussten Längen bei der Erfassung der Geometrieabweichungen . . .	119
B  Randbedingungen der Simulationen mit der Methode der Finiten Elemente . . . . .	125
C  Parametrisierung des Groß-KMG für das <i>VCmm2Tool</i> . . .	127



# Abkürzungs- und Größenverzeichnis

## *Allgemeine Abkürzungen*

Abkürzung	Beschreibung
PTB	Physikalisch-Technische Bundesanstalt
KMG	Koordinatenmessgerät
GUM	Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement
MCS	Monte-Carlo-Simulation
VCMM	Virtual Coordinate Measuring Machine - virtuelles KMG der PTB (Software)
AVZ	Außenverzahnung
IVZ	Innenverzahnung
L	Linksflanke
l	linkssteigende Verzahnung
R	Rechtsflanke
r	rechtssteigende Verzahnung
LT	LaserTracer
RRB	Reduced Rigid Body - reduziertes Starrkörpermodell
FRB	Full Rigid Body - vollständiges Starrkörpermodell
FEM	Finite Elemente-Methode
EP	Messung im Einzelpunktmodus
Scan	Messung im Scanningmodus
3P	Lagerungsvariante des Großverzahnungsnormal mit drei Auflagern
ACE	Auflager bei den Punkten A, C und E
BDF	Auflager bei den Punkten B, D und F
6P	Lagerungsvariante des Großverzahnungsnormal mit sechs Auflagern

Größen		
Symbol	Einheit	Beschreibung
$a_+$		Obergrenze einer Messgröße
$a_-$		Untergrenze einer Messgröße
$b$	mm	Zahnbreite
$c$		Flankenlinienkoeffizient
$c'$		thermisch beeinflusster Flankenlinienkoeffizient
$c_{\text{act}}$		tatsächlicher Flankenlinienkoeffizient
$d_{\text{Lin}}$	mm	berechneter Durchmesser nach Quellcode von Lin et al. [2020]
$d_{\text{Soll}}$	mm	nomineller Durchmesser
$d_{\text{VCM}}$	mm	berechneter Durchmesser mit dem <i>VCmm2Tool</i>
$e_l$	$\mu\text{m}$	Längeneinfluss aus der Simulation
$\vec{e}_{G_i}$	$\mu\text{m}$	Abweichungsvektor aus der Simulation
$\vec{e}_{GT_i}$	$\mu\text{m}$	Abweichungsvektor der Translationen
$\vec{e}_{T_i}$	$\mu\text{m}$	thermisch bedingter Abweichungsvektor aus der Simulation
$\vec{e}_{TT_i}$	$\mu\text{m}$	thermisch bedingter Abweichungsvektor der Translationen
$\vec{e}_{W\alpha_i}$	$\mu\text{m}$	Abweichungsvektor mit thermischen Einfluss auf das Werkstück
$E_i$	mm	individueller Endpunkt
$E_{\text{GP}_i}$		Rotationsabweichungen abhängig vom Tastelement
$E_{\text{GR}_i}$		Rotationsabweichungen unabhängig vom Tastelement
$E_{\text{TP}_i}$		thermische Rotationsabweichungen abhängig vom Tastelement
$E_{\text{TR}_i}$		thermische Rotationsabweichungen unabhängig vom Tastelement

Symbol	Einheit	Beschreibung
$f_{\text{Lin}}$	$\mu\text{m}$	berechnete Ebenheit nach Quellcode von Lin et al. [2020]
$f_{\text{Soll}}$	$\mu\text{m}$	nominelle Ebenheit
$f_{\text{VCMM}}$	$\mu\text{m}$	berechnete Ebenheit mit dem <i>VCmm2Tool</i>
$f_{\text{f}\alpha}$	$\mu\text{m}$	Profil-Formabweichung
$f_{\text{f}\beta}$	$\mu\text{m}$	Flankenlinien-Formabweichung
$f_{\text{H}\alpha}$	$\mu\text{m}$	Profil-Winkelabweichung
$f_{\text{H}\alpha,act}$	$\mu\text{m}$	tatsächliche Profil-Winkelabweichung
$f_{\text{H}\beta}$	$\mu\text{m}$	Flankenlinien-Winkelabweichung
$f_{\text{H}\beta,act}$	$\mu\text{m}$	tatsächliche Flankenlinien-Winkelabweichung
$f'_{\text{H}\alpha}$	$\mu\text{m}$	thermisch beeinflusste Profil-Winkelabweichung
$f'_{\text{H}\beta}$	$\mu\text{m}$	thermisch beeinflusste Flankenlinien-Winkelabweichung
$F_{\alpha}$	$\mu\text{m}$	Profil-Gesamtabweichung
$F_{\beta}$	$\mu\text{m}$	Flankenlinien-Gesamtabweichung
$g$	N/kg	Gravitationsbeschleunigung
$h$	$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$	Wärmeübergangskoeffizienten
$H_1$	mm	Höhe 1 bei der LaserTracer-Position
$H_2$	mm	Höhe 2 bei der LaserTracer-Position
$i$		Anzahl, i
$j$		Anzahl, j
$l$	mm	Länge
$l_i$	mm	Teillänge
$l_m$	mm	gemessene Länge
$l_W$	mm	Länge am Werkstück
$\vec{l}_v$	mm	Tastelementversatz
$\vec{l}_{v,i}$	mm	individueller Tastelementversatz
$l_a$	mm	Länge der jeweiligen Achse mit $a = X, Y, Z$
$l_{\text{temp}}$	mm	thermisch beeinflusster Längenmesswert

Symbol	Einheit	Beschreibung
$L_{AE}$	mm	Messlänge
$L_{AE,P}$	mm	Messlänge des Profils
$m_n$	mm	Normalmodul
$n$		Anzahl, n
$n_{env}$		Brechzahl der Umgebung
$n_{temp}$		thermisch beeinflusste Brechzahl
$p_a$	mm	Komponente der Tasterposition mit $a = X, Y, Z$
$p_{a,temp}$	mm	thermisch beeinflusste Komponente der Tasterposition mit $a = X, Y, Z$
$\vec{p}_i$	mm	Position des Messpunktes
$\vec{p}_{komp,i}$	$\mu\text{m}$	thermisch kompensierter Messpunkt
$\vec{p}_{ref}$	mm	Vektor des definierten Referenzpunktes
$\vec{p}_{KMG,j}$	mm	individuelle Position der Stützstellen
$\vec{p}_l$	mm	Längenanteil
$\vec{p}_{l,temp}$	mm	thermisch beeinflusste Längenanteile
$\vec{p}_{LT,i}$	mm	individuelle LaserTracer-Position
$q_i$		Einzelwerte
$\bar{q}$		Mittelwert der Einzelwerte
$r$	mm	Radius
$r_b$	mm	Grundkreisradius
$r_{b,act}$	mm	tatsächlicher Grundkreisradius
$r'_b$	mm	thermisch beeinflusster Grundkreisradius
$R_V$	$\mu\text{m}$	Spanne über die Messwerte der Lagerung $V = (\text{flächig}, 6P)$
$R_\vartheta$	K	Spanne über die räumliche Temperatur
$R_{\vartheta_{env}}$	K	Spanne über die räumliche Temperatur der Umgebung
$R_{\vartheta_w}$	K	Spanne über die räumliche Werkstück- temperatur
$S_{GM}$	$\mu\text{m}/\text{m}$	Längenanschluss

Symbol	Einheit	Beschreibung
$s_l$	m	zurückgelegter Weg des Strahls
$s_{\theta_{\text{KMG}}}$	K	empirisch ermittelte Standardabweichung der Temperatur des KMG-Sensors
$s^2(q)$		Varianz des Einzelwertes
$s^2(\bar{q})$		Varianz des Mittelwertes
$s^2(x_i)$		Schätzwert für die Varianz
$S_i$	mm	individueller Startpunkt
$t$	h	Zeitpunkt
$t_i$	h	individueller Zeitpunkt
$t_j$	h	individueller Zeitpunkt
$t_{\text{max}}$	h	maximale Wartezeit
$t_{\text{min}}$	h	minimale Wartezeit
$t_{\text{reset}}$	h	zeitlicher Bezugspunkt der Kompensation des KMG
$T_1$		Zeitkonstante
$u$	$\mu\text{m}$	kombinierte Messunsicherheit
$u_b$	$\mu\text{m}$	systematischer Beitrag zur Messunsicherheit
$u_{\text{cal}}$	$\mu\text{m}$	Beitrag des kalibrierten Werkstücks zur Messunsicherheit
$u_C$	$\mu\text{m}$	kombinierte Messunsicherheit bei Untersuchungen der Lagerungen
$u_{C,V}$	$\mu\text{m}$	kombinierte Messunsicherheit der Lagerungen $V = (\text{flächig}, 3P, 6P)$
$u_{C,a}$	$\mu\text{m}$	Beitrag der Messungen der Ebenheit nach Ab- und Wiederaufbau
$u_{C,r}$	$\mu\text{m}$	Beitrag der Reproduzierbarkeit der Lagerungen
$u_{C,\text{sys},V}$	$\mu\text{m}$	systematischer Beitrag der Lagerungsvarianten $V = (\text{flächig}, 3P, 6P)$
$u_{C,t}$	$\mu\text{m}$	Beitrag der Messungen der Ebenheit unter zeitlichem Einfluss
$u_{f_{\text{H}\alpha},\text{komp}}$	$\mu\text{m}$	Beitrag der kompensierten Profil-

Symbol	Einheit	Beschreibung
		Winkelabweichung
$u_{f_{H\alpha,korr}}$	$\mu\text{m}$	Beitrag der korrigierten Profil- Winkelabweichung
$u_{f_{H\beta,komp}}$	$\mu\text{m}$	Beitrag der kompensierten Flankenlinien- Winkelabweichung
$u_{f_{H\beta,korr}}$	$\mu\text{m}$	Beitrag der korrigierten Flankenlinien- Winkelabweichung
$u_i$	$\mu\text{m}$	Beiträge weiterer Einflussfaktoren zur Messunsicherheit
$u_{l_a}$	$\mu\text{m}$	Messunsicherheitsbeitrag der thermisch beeinflussten Längenmessung mit $a = X, Y, Z$
$u_{l_i}$	$\mu\text{m}$	Messunsicherheitsbeitrag der jeweiligen Teillängen
$u_L$	$\mu\text{m}$	Standardmessunsicherheit einer Länge
$u_{L_{AE}}$	$\mu\text{m}$	Standardmessunsicherheit einer Messlänge
$u_{L_{AE,P}}$	$\mu\text{m}$	Standardmessunsicherheit der Profilmesslänge
$u_{L_b}$	$\mu\text{m}$	Standardmessunsicherheit der Zahnbreite
$u_p$	$\mu\text{m}$	Beitrag des Messprozesses zur Messunsicherheit
$u_{\vec{p}_{komp}}$	$\mu\text{m}$	Messunsicherheit des kompensierten Messpunktes
$u_{\vec{p}_i}$	$\mu\text{m}$	Standardunsicherheit eines individuellen Messpunktes
$u(\bar{q})$	$\mu\text{m}$	empirische Varianz des Mittelwertes
$u_{r_b}$	$\mu\text{m}$	Standardunsicherheit des Grundkreisdurchmessers
$u_{sim}$	$\mu\text{m}$	kombinierte Messunsicherheit des virtuellen Messprozesses
$u_w$	$\mu\text{m}$	Beitrag der Werkstückeigenschaften

Symbol	Einheit	Beschreibung
		zur Messunsicherheit
$u_{Wa}$	$\mu\text{m}$	Messunsicherheitsbeitrag des thermisch beeinflussten Werkstückausdehnung mit $a = X, Y, Z$
$u_{\alpha}$	$\text{K}^{-1}$	Messunsicherheitsbeitrag der thermischen Ausdehnung
$u_{\alpha_i}$	$\text{K}^{-1}$	Standardunsicherheit eines thermischen Ausdehnungskoeffizienten
$u_{\alpha_w}$	$\text{K}^{-1}$	Messunsicherheitsbeitrag der thermischen Ausdehnung eines Werkstücks
$u_{\vartheta}$	$\text{K}$	Messunsicherheitsbeitrag der Temperaturerfassung
$u_{\vartheta_i}$	$\text{K}$	Standardunsicherheit einer individuellen Temperaturerfassung
$u_{\vartheta_{\text{KMG}}}$	$\text{K}$	Standardunsicherheit der Temperaturerfassung mit dem KMG-Sensor
$u_{\nabla\vartheta_a}$	$\text{K}$	Standardunsicherheit des Temperaturgradienten mit $a = X, Y, Z$
$x$		Profilverschiebung
$x_i$		Eingangsgröße
$X$	$\text{mm}$	erste Komponente im Koordinatensystem
$X'$	$\text{mm}$	thermisch beeinflusste erste Komponente im Koordinatensystem
$Y$	$\text{mm}$	zweite Komponente im Koordinatensystem
$Y'$	$\text{mm}$	thermisch beeinflusste zweite Komponente im Koordinatensystem
$z_z$		Zähnezahl
$Z$	$\text{mm}$	dritte Komponente im Koordinatensystem
$Z'$	$\text{mm}$	thermisch beeinflusste dritte Komponente im Koordinatensystem
$\alpha$	$^{\circ}$	Winkel der Abwicklung

Symbol	Einheit	Beschreibung
$\alpha_n$	°	Normaleingriffswinkel
$\alpha_i$	K <sup>-1</sup>	individueller thermischer Ausdehnungskoeffizient
$\alpha_{sa}$	K <sup>-1</sup>	thermischer Ausdehnungskoeffizient je Achse mit $a = X, Y, Z$
$\alpha_o$	K <sup>-1</sup>	Anfangswert des systematischen Anteils des thermischen Ausdehnungskoeffizienten
$\alpha_{oa}$	K <sup>-1</sup>	systematischer Anteil des thermischen Ausdehnungskoeffizienten mit $a = X, Y, Z$
$\alpha_w$	K <sup>-1</sup>	Ausdehnungskoeffizient des Werkstückmaterials
$\alpha_{wo}$	K <sup>-1</sup>	Anfangswert des Ausdehnungskoeffizienten des Werkstückmaterials
$\beta$	°	Schrägungswinkel
$\beta_b$	°	Schrägungswinkel am Grundkreis
$\Delta a_{t,a}$	µm	Positionsabweichung der Achse mit $a = X, Y, Z$
$\Delta a_{t,b}$	µm	Geradheitsabweichung einer Achse mit $a = X, Y, Z$ mit Achse $b = X, Y, Z$
$\Delta d$	µm	Differenz des ermittelten Durchmessers
$\Delta d_{Lin}$	µm	Differenz des Durchmessers berechnet nach Lin et al. [2020]
$\Delta d_{VCM}$	µm	Differenz des Durchmessers berechnet mit dem <i>VcmzTool</i>
$\Delta f_{H\alpha}$	µm	Differenz der Profil-Winkelabweichung
$\Delta f_{H\beta}$	µm	Differenz der Flankenlinien- Winkelabweichung
$\Delta f_{H\beta,V}$	µm	Differenz der Flankenlinien- Winkelabweichung mit $V = (3P, 6P)$
$\Delta l_a$	mm	ermittelter Positionsabweichung der Achse $a = X, Y, Z$

Symbol	Einheit	Beschreibung
$\Delta l_{\text{hom}}$	mm	Längenabweichung bei homogener Temperaturverteilung
$\Delta l_{\text{inhom}}$	mm	Längenabweichung bei inhomogener Temperaturverteilung
$\Delta l_{Wa}$	mm	Differenz des thermisch beeinflussten Längenanteils einer Achse $a = X, Y, Z$
$\Delta l_{\Delta\vartheta_{\text{Stab}}}$	mm	thermisch beeinflusster Längenanteil
$\Delta n_{\text{temp}}$		Einfluss der thermisch beeinflussten Brechzahl
$\Delta t$	h	Differenz zwischen zwei Zeitpunkten der Achse $a$ mit $a = X, Y, Z$
$\Delta\alpha_{sa}$	$K^{-1}$	Unsicherheit als Differenz des thermischen Ausdehnungskoeffizienten mit $a = X, Y, Z$
$\Delta\varphi_{a,r,b}$	$\mu\text{rad}$	Rotationsabweichung der Achsen $a$ mit $a = X, Y, Z$ und $b$ mit $b = X, Y, Z$
$\Delta\varphi_{a,b}$	$\mu\text{rad}$	Rechtwinkligkeitsabweichung zwischen den Achsen $a$ mit $a = X, Y, Z$ und $b$ mit $b = X, Y, Z$
$\Delta\vartheta$	K	Differenz der Temperatur zur Referenztemperatur
$\Delta\vartheta_i$	K	Differenz einer einzelnen Temperatur zur Referenztemperatur
$\Delta\vartheta_{sa}$	K	Unsicherheit als Differenz der Temperatur mit $a = X, Y, Z$
$\Delta\vartheta_{\text{env}}$	K	Differenz zur Umgebungstemperatur
$\Delta\vec{\vartheta}_{\text{MW}}$	K	Abweichungsvektor der mittleren Materialtemperatur
$\Delta\vartheta_{\text{Stab}}$	K	Stabilität der Temperatur
$\Delta\vartheta_V$	K	Temperaturdifferenz einer Temperaturvariante $V = (1, 2)$
$\Delta\vartheta_W$	K	Differenz der Werkstücktemperatur
$\delta\alpha$	$K^{-1}$	zufälliger Anteil des Ausdehnungskoeffizienten

Symbol	Einheit	Beschreibung
$\delta\alpha_a$	$K^{-1}$	zufälliger Anteil des Ausdehnungs- koeffizienten einer Achse mit $a = X, Y, Z$
$\delta\alpha_W$	$K^{-1}$	zufälliger Anteil des Ausdehnungs- koeffizienten des Werkstücks
$\delta\vartheta_{env}$	K	zufälliger Anteil der Umgebungstemperatur
$\delta\vartheta_{TM}$	K	zufälliger Anteil der inneren Materialtemperatur
$\lambda_{env}$	m	Wellenlänge in der Umgebung
$\lambda_{vac}$	m	Wellenlänge im Vakuum
$\lambda_{\vartheta}$		isotroper Skalierungsfaktor
$\nabla\vartheta_a$	K/m	Temperaturgradient einer Achse mit $a = (X, Y, Z)$
$\nabla\vartheta_V$	K/m	Temperaturgradient einer Temperatur- variante $V = (3, 4, 5, 6)$
$\nabla\vartheta_{env}$	K/m	Temperaturgradient der Umgebungs- temperatur
$\nabla\vec{\vartheta}$	K/m	Vektor der Temperaturgradienten
$\varphi_b$	°	Position der Flanke
$\vartheta_o$	°C	Starttemperatur
$\vartheta_{env}$	°C	Umgebungstemperatur
$\vartheta_{env,o}$	°C	Startwert der Umgebungstemperatur
$\vartheta_{FEM,W}$	°C	Temperatur der Knotenpunkte des CAD-Modells bei der Simulation mit FEM
$\vartheta_{KMG}$	°C	Temperatur des im KMG integrierten Sensors
$\vartheta_{M,I}$	°C	Materialtemperatur im Innern des Werkstücks
$\vartheta_{M,O}$	°C	Materialtemperatur an der Oberfläche des Werkstücks
$\vartheta_{ref}$	°C	Referenztemperatur
$\vartheta_{sa}$	°C	simulierte Temperatur mit $a = X, Y, Z$

Symbol	Einheit	Beschreibung
$\vartheta_{Start}, \vartheta_{End}$	°C	Temperatur am Start/Ende der Achse
$\vartheta_{TM}$	°C	Temperatur im Innern des Werkstücks
$\vartheta_{TM,o}$	°C	Anfangswert der mittleren Temperatur ohne zeitlichen Einfluss
$\vartheta_W$	°C	Temperatur des Werkstücks
$\vartheta_{W,Sensor}$	°C	Werkstücktemperatur erfasst mit KMG-Sensor
$\bar{\vartheta}_{env}$	°C	Mittelwert der Umgebungstemperaturen
$\bar{\vartheta}_{FEM,W,i}$	°C	Mittelwert der Temperaturen der Knotenpunkte des CAD-Modells bei der Simulation mit FEM
$\bar{\vartheta}_{M,O}$	°C	Mittelwert der Temperaturen der Sensoren an der Materialoberfläche
$\bar{\vartheta}_{M,I}$	°C	Mittelwert der Temperaturen der Sensoren im Innern des Werkstücks
$\bar{\vartheta}_{ref,temp}$	°C	Mittelwert der Temperaturen der Referenzmessung
$\bar{\vartheta}_{ref,komp}$	°C	Mittelwert der kompensierten Temperaturen der Referenzmessung
$\bar{\vartheta}_{W,i}$	°C	Mittelwert der Werkstücktemperaturen
$\partial\vartheta_{env}/\partial t$	K/h	zeitliche Änderung der Umgebungstemperatur
$\partial\vartheta_{TM}/\partial t$	K/h	zeitliche Änderung der Temperatur



# Bildverzeichnis

1	Skizze zum Aufbau eines KMG in Brückenbauweise . . . . .	4
2	Ishikawa-Diagramm der Einflussfaktoren des Messprozesses beim KMG (nach Weckenmann [2012]) . . . . .	5
3	Prinzipiskizze zum Ablauf der Entwicklung eines virtuellen Messgerätes . . . . .	14
4	Prinzipiskizze zur Funktion des VCMM der PTB [AG5.32, 2020] . . . . .	18
5	Ishikawa-Diagramm als Übersicht der Einflussfaktoren des VCMM (nach Kistner et al. [2016]) . . . . .	19
6	Groß-KMG der PTB . . . . .	28
7	Großverzahnungsnormale als Beispiel eines großen Werkstücks . . . . .	29
8	Beschreibung von Profil und Flankenlinie sowie der Verzäh- nungsmessgrößen Winkel- ( $f_H$ ), Form- ( $f_f$ ) und Gesamtab- weichung ( $F$ ) . . . . .	31
9	Prüfbunde am Großverzahnungsnormale zur Bildung des werk- stückspezifischen Koordinatensystems (Beispiel: ‚AVZ 1‘) . . . . .	32
10	Positionen der Temperaturmesssensoren an der Oberfläche (Kreuze) und im Innern (Kreise) des Werkstücks . . . . .	33
11	Lagerungsvariante mit drei Auflagern . . . . .	34
12	Anbringungsmöglichkeiten der Lagerungspunkte . . . . .	34
13	‚LaserTRACER-NG‘ - ein nachführendes interfero- metrisches Längenmesssystem . . . . .	36
14	Skizze zur Lage der LT-Positionen und Stützstellen für das reduzierte (Variante 6, links) und zusätzliche LT-Positionen und Stützstellen für das komplette Starrkörpermodell (Vari- ante 18, rechts) am Groß-KMG . . . . .	40
15	Angepasste Strategie zur interferometrischen Erfassung der Parameter des reduzierten Modells in Doppelkreuzform . . . . .	43
16	Diagramm der Geometrieabweichungen bei verschiedenen Temperaturgradienten je einer Achse und deren Regressions- geraden . . . . .	51
17	Diagramm der Geometrieabweichungen bei kombinierten Temperaturgradienten und deren Regressionsgeraden . . . . .	52
18	Diagramm der resultierenden Längenmessabweichungen bei $\nabla\vartheta_x = 1,3 \text{ K/m}$ mit dem <i>VCmm2Tool</i> und die dazugehörigen Standardabweichungen als Abweichungsbalken . . . . .	56
19	Diagramm der resultierenden Längenmessabweichungen bei $\nabla\vartheta_x = 1,3 \text{ K/m}$ mit der Software nach Lin et al. [2020] . . . . .	57

20	Skizze des thermischen Ausdehnungskreises für die Y-Achse bei zwei unterschiedlichen Antastpunkten . . . . .	60
21	Stark vereinfachtes Modell des Groß-KMG als Grundlage der Simulationen mit FEM zur thermischen Verformung . . . . .	67
22	Deformation des KMG bei einem Temperaturgradienten in X-Richtung . . . . .	68
23	Deformation des KMG bei einem Temperaturgradienten in Y-Richtung . . . . .	69
24	Deformation des KMG bei einem Temperaturgradienten in Z-Richtung . . . . .	70
25	Temperaturverlauf der Simulation mit FEM und der Verifikationsmessung beim Abkühlprozess des Großverzahnungsnormalen mit Regressionskurven nach Gleichung (37) . . . . .	77
26	Temperaturverteilung bei dem ersten Durchlauf der Verifikationsmessung des Großverzahnungsnormalen . . . . .	78
27	Differenzen der Winkelabweichungen von diskreten Temperaturen zur Referenzmessung der Außenverzahnung ohne thermische Kompensation des Groß-KMG . . . . .	84
28	Differenzen der Winkelabweichungen bei diskreten Temperaturen zur Referenzmessung der Innenverzahnung ohne thermische Kompensation des Groß-KMG . . . . .	85
29	Differenzen der Winkelabweichungen der Außenverzahnung mit automatischer Temperaturkompensation des Groß-KMG . . . . .	87
30	Differenzen der Winkelabweichungen der Innenverzahnung mit automatischer Temperaturkompensation des Groß-KMG . . . . .	87
31	Restabweichung der Profil- und Flankenlinien-Winkelabweichung für die Außenverzahnung nach mathematischer Korrektur . . . . .	91
32	Restabweichung der Profil- und Flankenlinien-Winkelabweichung für die Innenverzahnung nach mathematischer Korrektur . . . . .	91
33	Lagerungsvariante ohne Auflager (links) und die Positionen der verschiedenen verwendeten Lagerungspunkte (rechts) . . . . .	96
34	Verschiebung der Z-Koordinate der simulierten Deformation des Prüfbundes bei der 3P-Lagerung und 6P-Lagerung . . . . .	97
35	Residuen zur Ausgleichsebene der Prüfbundmessung bei verschiedenen Lagerungsvarianten der EP-Messungen . . . . .	99
36	Residuen der Ausgleichsebenen der flächigen und 6P-Lagerung mit Summen- und Differenzbildungen im EP-Messmodus . . . . .	100

37	Residuen der Ausgleichsebenen der flächigen und einer 3P-Lagerung (ACE) mit Summen- und Differenzbildungen im <i>EP</i> -Messmodus . . . . .	100
38	Residuen der Ausgleichsebenen der 3P-Lagerungen (ACE und BDF) sowie Summen- und Differenzbildung im <i>EP</i> -Messmodus . . . . .	101
39	Differenzen der Residuen zwischen wiederholten <i>EP</i> -Messungen der flächigen und 6P-Lagerung . . . . .	101
40	Differenzen der Residuen mit verschiedenen Wartezeiten zweier Messungen im Scanningmodus ( <i>Scan 2-Scan 1</i> ) . . . . .	102
41	Differenzen der Flankenlinien-Winkelabweichungen der Lagervarianten ohne ( $t_{\min}$ ) und mit Wartezeiten ( $t_{\max}$ ) zur Messung ohne Auflager . . . . .	105



# Tabellenverzeichnis

1	Verzahnungsparameter des Großverzahnungsnormal	31
2	Übersicht der Simulationsvarianten des RRB mit den maximalen Messunsicherheiten der Geometrieabweichungen	41
3	Übersicht der Simulationsvarianten verschiedener Versätze für das FRB mit den maximalen Messunsicherheiten der Geometrieabweichungen	42
4	Übersicht der in <i>TracCal</i> simulierten Messunsicherheiten aller Parameter der geplanten und durchgeführten Messstrategie	45
5	Übersicht der Simulationsvarianten des Einflusses eines Temperaturgradienten und die größten Abweichungen mit den maximalen Werten	49
6	Übersicht der Simulationsvarianten des Einflusses kombinierter Temperaturgradienten und die größten Abweichungen mit den maximalen Werten	50
7	Differenzen der simulativ ermittelten Messunsicherheiten der Geometrieabweichungen unter Berücksichtigung der Genauigkeit der Temperaturerfassung bei einem Korrekturprozess	55
8	Einfluss der Geometrieabweichungen bei einem Temperaturgradienten von $\nabla\vartheta_x = 1,3 \text{ K/m}$ bei der virtuellen Beispielmessungen eines Kreises	57
9	Maximale Werte der Winkelabweichungen (Linksflanken, AVZ 1) als Betrag bei thermisch beeinflusster Erfassung der Geometrieabweichungen mit $\nabla\vartheta_x = 1,3 \text{ K/m}$	58
10	Nach dem Prinzip des thermischen Ausdehnungskreises ermittelte Positionsabweichungen hervorgerufen durch verschiedene Temperaturszenarien bei der interferometrischen Erfassung der Geometrieabweichungen	63
11	Nach dem Prinzip des thermischen Ausdehnungskreises ermittelte Positionsabweichungen hervorgerufen durch verschiedene Temperaturszenarien bei Längenmessungen am Großverzahnungsnormal	64
12	Nach dem Prinzip des Starrkörpermodells ermittelte Positionsabweichungen hervorgerufen durch verschiedene Temperaturszenarien bei der interferometrischen Erfassung der Geometrieabweichungen und bei Längenmessungen am Großverzahnungsnormal	65

13	Messunsicherheitsbeiträge der nach dem Prinzip des thermischen Ausdehnungskreises ermittelten Positionsabweichungen hervorgerufen durch verschiedene Temperaturszenarien bei der interferometrischen Erfassung der Geometrieabweichungen . . . . .	72
14	Messunsicherheitsbeiträge der nach dem Prinzip des thermischen Ausdehnungskreises ermittelten Positionsabweichungen hervorgerufen durch verschiedene Temperaturszenarien bei Längenmessungen am Großverzahnungsnormal . . . . .	73
15	Messunsicherheitsbeiträge der nach dem Prinzip des Starrkörpermodells ermittelte Positionsabweichungen hervorgerufen durch verschiedene Temperaturszenarien bei der interferometrischen Erfassung der Geometrieabweichungen und bei Längenmessungen am Großverzahnungsnormal . . . . .	74
16	Betrag der thermisch beeinflussten Werte der Profil- und Flankenlinien-Winkelabweichungen bei mathematisch und simulativ ermittelten Koordinaten . . . . .	82
17	Betrag der interpolierten Differenzen der Winkelabweichungen zur Referenzmessung bei einer Temperatur von 25,0 °C	86
18	Temperaturmesswerte eines am Groß-KMG integrierten Sensors und mittlere Werte der externen Sensoren an der Werkstückoberfläche bei der Messung mit automatischer Temperaturkompensation . . . . .	92
19	Differenz der Flankenlinien-Winkelabweichungen der Simulation mit FEM und der Verifikationsmessung bei verschiedenen Lagerungsvarianten im Vergleich zur Lagerung ohne Auflager . . . . .	104
20	Randbedingungen bei den Simulationen mit FEM für das Groß-KMG . . . . .	125
21	Randbedingungen bei den Simulationen mit FEM für das Großverzahnungsnormal . . . . .	126
22	Zusammenfassung der Parametrisierung des Groß-KMG für das <i>VCmm2Tool</i> . . . . .	127

# 1 Einleitung

Große Getriebebauteile sind in der Industrie für den Flugzeug-, Schiffs- und Windenergieanlagenbau im Einsatz. Besonders die Windenergiebranche hat in den letzten Jahren an großer Bedeutung gewonnen, da die Steigerung der Energiegewinnung aus regenerativen Quellen im Erneuerbare-Energien-Gesetz [BMW, 2020b] vorgeschrieben ist. Der Anteil der erneuerbaren Energien an der Bruttostromerzeugung in Deutschland beträgt bereits 33,3 %, wovon die Windenergie einen Anteil von 49 % ausmacht [BMW, 2020a]. Zur Optimierung der Effizienz ist u. a. ein störungsfreier Betrieb notwendig. Da mehr als 30 % der Ausfallzeiten von Windenergieanlagen auf Getriebeschäden [Durstewitz et al., 2006] zurückzuführen sind, ist eine zuverlässigere Qualitätssicherung im Fertigungsprozess der großen Getriebebauteile notwendig. Diese kann erreicht werden, indem eine geschlossene metrologische Rückführungskette [Brinkmann, 2007] aufgestellt wird. Dabei werden die Messgeräte und Messprozesse, die in der Fertigung zur Qualitätssicherung eingesetzt werden, mit spezifischen Referenzobjekten überprüft. Die Referenzobjekte, welche als Normale bezeichnet werden, sind direkt oder über mehrere Stufen an die SI-Einheit Meter angeschlossen. Eine hochgenaue Bestimmung der Messgrößen erfolgt über die Kalibrierung eines Normals und liefert Messwerte der gesuchten Messgrößen sowie die dazugehörige Messunsicherheiten. Sie spiegeln als Qualitätsmaß die Güte der Messung wider. Die Darstellung und Weitergabe der SI-Einheiten ist die Aufgabe der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB), dem nationalen Metrologieinstitut in Deutschland. Bei der PTB werden Normale für gängige Messgrößen entwickelt und kalibriert. Mit jedem Schritt der Weitergabe von der PTB bis in die Industrie erhöht sich die Messunsicherheit, da die Unsicherheitsbeiträge der vorherigen Schritte berücksichtigt werden muss. Wenn ein Messergebnis durch eine dokumentierte, ununterbrochene Kette von Kalibrierungen auf eine Referenz bezogen werden kann, wird damit die metrologische Rückführbarkeit des Ergebnisses [Brinkmann, 2007] sichergestellt. Um eine präzise und zuverlässige Qualitätsangabe zu erhalten, sind alle Einflussfaktoren, die den jeweiligen Messprozess beeinflussen, zu berücksichtigen. Die erforderliche Messunsicherheit ist abhängig von den in der Industrie spezifizierten Toleranzen für ein Werkstück [ISO 14253-1:2017, 2018]. Zwischen der Messunsicherheit und der Toleranzangabe kann ein Faktor von bis zu zehn liegen. Die Messunsicherheit muss in jedem Schritt möglichst klein gehalten werden, wofür aufwändige und genaue Messungen notwendig sind. Für die Rückführungsmessungen ist die Verwendung stationärer, konventioneller, taktil messender Koordinatenmessgeräte (KMG) weit verbreitet. Zur Messunsicherheitsermittlung ist eine ganzheitliche Erfassung des Messprozesses mit all

seinen Einflussfaktoren und dessen Auswirkungen notwendig. Hierzu müssen die einfließenden Faktoren identifiziert und deren spezifisches Verhalten charakterisiert werden. Daraufhin kann die Messunsicherheitsermittlung mit einer der klassischen Modellbildung erfolgen oder anhand der Monte-Carlo-Methode simuliert werden. Für letzteres wird der Messprozess virtuell nachgebildet. Basierend auf einer tatsächlichen Messung, kann eine große Anzahl an Stichproben simuliert und anschließend statistisch ausgewertet werden, wodurch die Messunsicherheit für den Messprozess ermittelt wird.

Für die Rückführung von Messungen an großen Bauteilen gibt es bislang lediglich erste Untersuchungen. Da sie aber aus den genannten Gründen notwendig ist, hat sich der Fachbereich 5.3 „Koordinatenmesstechnik“ der PTB die Entwicklung geeigneter Normale und zugehöriger Kalibrierstrategien mit dem „Kompetenzzentrum WIND“ zur Aufgabe gemacht. Der Fokus liegt darauf die Messtechnik zur Effizienzsteigerung von Windenergieanlagen zu optimieren. Bei den Anlagen werden große Getriebebauteile, u. a. große Zahnräder benötigt. Um die Rückführung zu gewährleisten, muss eine zuverlässige Messunsicherheitsermittlung der Messungen an den Großbauteilen erfolgen. Hierzu müssen die Einflussfaktoren und deren Auswirkungen ermittelt werden, die spezifisch bei der Messung von Großbauteilen auf einem Groß-KMG auftreten. Für eine zuverlässige Ermittlung der Messunsicherheit bei Parametern großer Bauteile müssen bekannte Einflussfaktoren angepasst und neue Faktoren identifiziert werden. Weiterhin sind spezielle Messverfahren zur Optimierung der Messprozesse erforderlich, da immer kleinere Fertigungstoleranzen und dadurch kleinere Messunsicherheiten gefordert sind.

In dieser Arbeit wird zunächst in das Thema der Messunsicherheitsermittlung in der taktilen Koordinatenmesstechnik eingeführt. Hierbei wird ein besonderer Schwerpunkt auf die simulative Ermittlung gelegt. Weiterhin werden die Objekte vorgestellt, die als Grundlage für die Untersuchungen in der vorliegenden Arbeit zur Verfügung standen. Anschließend werden ausgewählte Einflussfaktoren untersucht, die durch das Messgerät und durch das Werkstück entstehen und im Messprozess auftreten. Die Untersuchungen zielen auf eine Verbesserung der Erfassung von statischen Geometrieabweichungen ab. Darüber hinaus werden zwei Modellansätze zur Berücksichtigung der thermisch bedingten Geometrieabweichungen an einem Groß-KMG verglichen. Weitere Untersuchungen beschäftigen sich mit den Auswirkungen der thermischen und gravitativen Einflussfaktoren auf ein Großbauteil. Die Erkenntnisse bieten eine wichtige Grundlage für die simulationsbasierten Messunsicherheitsermittlung bei Messungen von Großbauteilen auf einem Groß-KMG. Zuletzt folgt eine Zusammenfassung der ermittelten Erkenntnisse und ein Ausblick auf zukünftige Arbeiten.

## **2 Stand der Technik zur Messunsicherheitsermittlung in der taktilen Koordinatenmesstechnik**

Bei der Qualitätssicherung von Bauteilen in der fertigen Industrie werden vermehrt Messsysteme der Koordinatenmesstechnik verwendet, da diese hochgenaue Messungen mit einem flexiblen Einsatz verbinden. Sie basieren auf einem komplexen Zusammenspiel der einzelnen Bestandteile des Messprozesses, sodass die Messunsicherheitsermittlung aufwendig und anspruchsvoll ist. Die Messunsicherheit ist definiert als nichtnegativer Parameter, der die Streuung der Messwerte einer Messgröße unter Verwendung spezifischer Informationen beschreibt [Brinkmann, 2007]. Die Einflussfaktoren, die auf den Messprozess einwirken, beeinflussen den ermittelten Messwert und die dazugehörige Messunsicherheit. Der quantitative Beitrag der einzelnen Einflussfaktoren variiert und führt zu unterschiedlichen Messabweichungen sowie zu abweichenden Komponenten bei der Messunsicherheitsermittlung. Somit ist die aufgabenspezifische Betrachtung der einzelnen Komponenten notwendig, um eine umfassende Messunsicherheitsbilanz aufzustellen. Die sich ergebende Bilanz „ermöglicht die Angabe einer Messunsicherheit, der Komponenten dieser Messunsicherheit und ihrer Berechnung und Kombination“ [Brinkmann, 2007].

In diesem Kapitel werden entsprechende Messsysteme, die (Haupt-)Einflussfaktoren und verschiedene Varianten der Ermittlung der Messunsicherheit beschrieben. Weiterhin werden die spezifischen Herausforderungen von Messaufgaben großer Dimensionen diskutiert, insbesondere ob und wie sie bisher in der Messunsicherheitsermittlung betrachtet wurden.

### **2.1 Taktile Koordinatenmessgeräte**

Die Koordinatenmesstechnik umfasst viele verschiedene Messsysteme. Zur Überwachung der Produktqualität in der fertigen Industrie werden häufig stationäre, konventionelle KMG verwendet. Diese ermöglichen hochgenaue Messungen durch drei orthogonal angeordnete Längenmaßverkörperungen und sind in verschiedenen Bauarten sowie Dimensionen verfügbar. Mit KMG wird die genaue Messung großer Werkstücke ermöglicht. Hierbei sind taktile Messverfahren oft genauer als optische Verfahren. Anhand eines computergestützten Auswerteprozesses können aus den erfassten Oberflächenkoordinaten die entscheidenden Messgrößen eines gefertigten Bauteils abgeleitet werden. Mithilfe eines Soll-Ist-Vergleichs und einem Nachweis

der Konformität oder Nichtkonformität nach ISO 14253-1:2017 [2018] kann daraufhin eine Qualitätsaussage für das gefertigte Bauteil erfolgen.

### 2.1.1 Aufbau und Funktionsweise eines Koordinatenmessgerätes

Stationäre, konventionelle KMG sind mit drei kartesischen Achsen aufgebaut (siehe Bild 1), an denen je eine Längenmaßverkörperungen fixiert ist. Sie existieren in verschiedenen Bauweisen [ISO 10360-1, 2003]. Hierzu zählen Ein-Arm-Messgeräte sowie KMG in Brücken- oder Portalbauweise. Die Aufnahme von Punktkoordinaten ist prinzipiell im kompletten Messvolumen möglich, aber von der Zugänglichkeit zur Antastung abhängig.

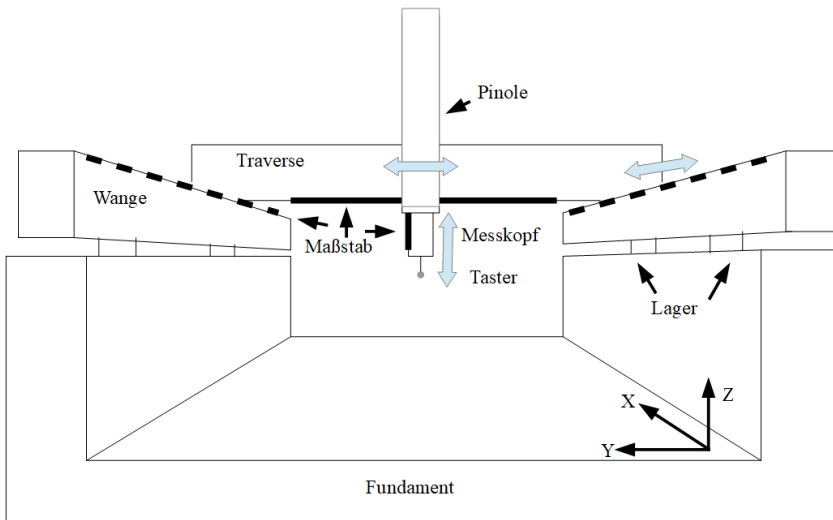


Bild 1: Skizze zum Aufbau eines KMG in Brückenbauweise

Dabei wird der Antastprozess von einem Messkopfsystem durchgeführt, welches an der Z-Verfahrachse, der sogenannten Pinole, angebracht ist. Individuell konfigurierte und kombinierte Taster und Tasterverlängerungen bilden das Tastersystem, welches am Messkopf angebracht und durch eine Einmessung definiert wird. Das Tastersystem kann an der Oberfläche vor dem Messobjekt positioniert und anschließend mit einer zuvor definierten Antastkraft zur Berührung geführt werden. Hierbei ermitteln die Ableseeinheiten an den Maßstäben der drei Achsen die entsprechenden Positionen. Dies erfolgt bei jeder einzelnen Führung z. B. über codierte Maßstäbe. Weiterhin wird das Ergebnis mit der Auslenkung des Tasters und der Tasterradiuskorrektur verrechnet. Danach erfolgt die Ausgabe oder Speicherung von 3D-

Punktkoordinaten. Aus der erfassten 3D-Punktwolke können anschließend die Werte der zu bestimmenden Messgröße abgeleitet werden.

### 2.1.2 Einflussgrößen auf die Messung mit einem Koordinatenmessgerät

Für eine realistische Abschätzung der Messunsicherheit eines Messwertes müssen alle Einflussfaktoren auf den Messprozess berücksichtigt werden. Es handelt sich dabei um potentielle systematische und zufällige Beiträge. Wie Bild 2 zeigt, sind viele verschiedene Einflüsse im Messprozess beteiligt, die sich auf den Messwert und die Messunsicherheit auswirken. Hierzu zählen Einflussfaktoren der Kategorien Messgerät, Umgebung, Strategie, Werkstück und Anwender.

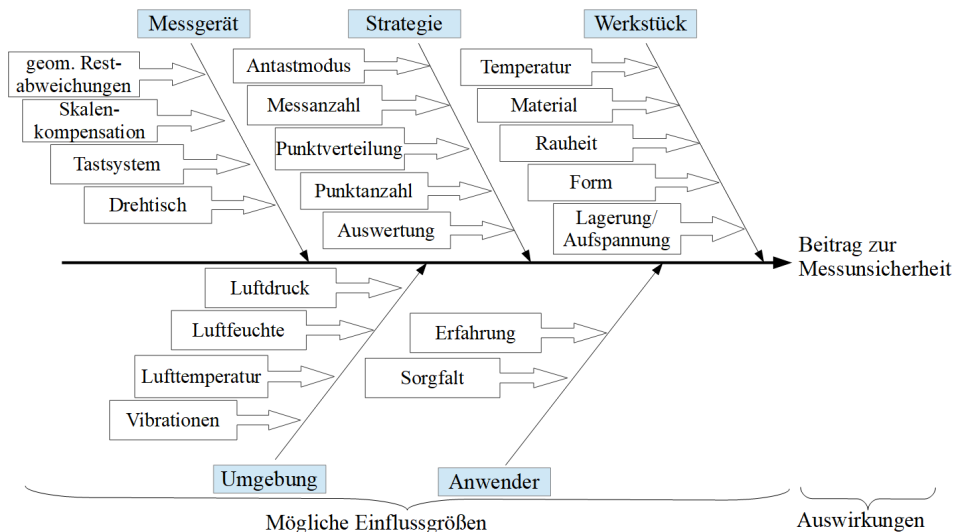


Bild 2: Ishikawa-Diagramm der Einflussfaktoren des Messprozesses beim KMG (nach Weckenmann [2012])

Variationen bei einem dieser Einflussfaktoren können teilweise aktiv beeinflusst werden, beispielsweise indem die Messstrategie geändert wird. Andere Abweichungen entstehen ohne den Einfluss des Anwenders. Beispielsweise kann durch mangelhafte Erfassung von Temperaturwerten eine abweichungsbefahtene Messlänge ermittelt werden. Dies führt zu einem unbekanntem Anteil an der Messabweichung, der sich jedoch unter gleichen Bedingungen reproduzieren lässt. Dies ist eine sogenannte systematische Abweichung. Durch die Untersuchung der Einflussfaktoren können die systematischen und zufälligen Auswirkungen auf den Messprozess ermittelt werden. Daraufhin können in einigen Fällen Korrekturmaßnahmen [Brinkmann, 2007] eine

Minimierung systematischer Abweichungen ermöglichen, um die Messabweichungen gering zu halten, wenn der Korrektur eine Messunsicherheitsbeitrag beigeordnet wird. Nach dem Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen (Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement) [JCGM 100, 2008], dem sogenannten GUM, ist eine solche Reduzierung der Systematiken zwingend notwendig. Verfahren zur Ermittlung und Korrektur der systematischen Komponenten sind in mehreren Normen und Richtlinien [DIN ISO/TS 23165, 2006; ISO 15530-3, 2011; VDI/VDE 2617-7, 2008; VDI/VDE 2617-11, 2011] für signifikante Einflüsse bei gängigen KMG festgelegt. Im Folgenden werden Hintergründe zu den Haupteinflussgrößen der Messunsicherheit bei KMG-Messungen erläutert.

## Geometrie

Eine wichtige Komponente zur Beschreibung des KMG und dessen Einfluss auf die Messwerte sind die Geometrieabweichungen der Verfahrachsen. Diese werden oft in einem Starrkörpermodell mit 21 Abweichungen dargestellt. Eine Erfassung der vorhandenen Geometrieabweichungen erfolgt über geeignete Normale, wie Endmaße, Kugelstäbe, Loch- oder Kugelplatten. Anhand der kalibrierten geometrischen Zusammenhänge und der vorgeschriebenen Positionierungen sowie Orientierungen [ISO 10360-2, 2009] können Rückschlüsse auf die Geometrieabweichungen des KMG gezogen werden. Ebenso ist der Einsatz von interferometrischen Messsystemen zur Bestimmung der Geometrieabweichungen bei Achslängen von mehr als 2 m [VDI/VDE 2617-2.1, 2014] möglich. Das Starrkörpermodell setzt sich aus translatorischen und rotatorischen Abweichungen für jede der drei Achsen zusammen. Pro Achse existiert eine Positionsabweichung, die eine Abweichung in axialer Richtung definiert. Hierbei wird die gemessene Koordinate verfälscht, indem ein oder mehrere Achsanteile zu groß oder zu klein vom KMG erfasst werden und entspricht der Längenmessabweichung. Weiterhin sind zwei Geradheitsabweichungen pro Achse definiert, mit denen Abweichungen einer Achse zu ihrer idealen Form beschrieben werden. Zusätzlich können die Achsen um jeweils drei Winkel bei der Bewegung kippen. Dies sind die Rotationsabweichungen. Ebenso sind drei Rechtwinkligkeitsabweichungen, die die Winkelabweichungen der nominell orthogonalen Achsen zueinander beschreiben, zu bestimmen. Die Geometrieabweichungen sind wie folgt bezeichnet:

- Positionsabweichungen:  $\Delta x_{t,x}$ ,  $\Delta y_{t,y}$ ,  $\Delta z_{t,z}$
- Geradheitsabweichungen:  $\Delta x_{t,y}$ ,  $\Delta x_{t,z}$ ,  $\Delta y_{t,x}$ ,  $\Delta y_{t,z}$ ,  $\Delta z_{t,x}$ ,  $\Delta z_{t,y}$

- Rotationsabweichungen:
  - Rollen:  $\Delta\varphi_{x,r,x}$ ,  $\Delta\varphi_{y,r,y}$ ,  $\Delta\varphi_{z,r,z}$
  - Nicken:  $\Delta\varphi_{x,r,y}$ ,  $\Delta\varphi_{y,r,x}$ ,  $\Delta\varphi_{z,r,x}$
  - Gieren:  $\Delta\varphi_{x,r,z}$ ,  $\Delta\varphi_{y,r,z}$ ,  $\Delta\varphi_{z,r,y}$
- Rechtwinkligkeitsabweichungen:  $\Delta\varphi_{x,y}$ ,  $\Delta\varphi_{x,z}$ ,  $\Delta\varphi_{y,z}$

Im VCMM [PTB, 2014; PTB, 2022] sind die Parameter, analog zur geltenden Normung VDI/VDE 2617-3 [1989] und ISO 230-1 [1996] bei der Modellerstellung, bezeichnet mit:

- Positionsabweichungen:  $xtx$ ,  $yty$ ,  $ztz$
- Geradheitsabweichungen:  $xty$ ,  $xtz$ ,  $ytx$ ,  $ytz$ ,  $ztx$ ,  $zty$
- Rotationsabweichungen:
  - Rollen:  $xrx$ ,  $yry$ ,  $zrz$
  - Nicken:  $xry$ ,  $yrx$ ,  $zrx$
  - Gieren:  $xrz$ ,  $yrz$ ,  $zry$
- Rechtwinkligkeitsabweichungen:  $xwy$ ,  $xwz$ ,  $ywz$

Die erfassten Geometrieabweichungen beinhalten verschiedene Anteile. Sie werden beeinflusst durch die Werte des aktuell vorherrschenden statischen, thermischen und dynamischen Zustands sowie dem Zustand des KMG unter Last. Verändert sich ein Anteil dieser Kombination, so ändern sich auch die Werte der Geometrieabweichungen.

## Tastersystem

Das Tastersystem, als Bestandteil des KMG, beeinflusst ebenfalls den Messprozess [ISO 10360-1, 2003]. Dieses System besteht aus der Tastkopfaufnahme am Messkopf mit Tasterwechselsystem, Tasterverlängerungen, dem Tasterschaft und den Tastelementen, welche aufgabenspezifisch zusammengestellt werden. Die spezifischen Eigenschaften fließen bei der Bestimmung von Koordinaten jedes einzelnen Punktes ein. Daher sind die entsprechenden Zusammenstellungen und deren Auswirkungen auf die Messung individuell zu berücksichtigen. Vor dem Gebrauch wird das Tastersystem an einer bekannten, kalibrierten Einmesskugel eingemessen. Durch die integrierte und automatisch ablaufende Messung von gleichmäßig verteilten Punkten auf der Kugeloberfläche des Einmessnormals mit definierter Messkraft wird der wirksame Tasterdurchmesser [ISO 10360-1, 2003], der die Tastergeometrie und das Tasterverhalten (z. B. die Durchbiegung des Tasters und der Tastkugeldurchmesser) beschreibt, bestimmt.

## Werkstückoberfläche

Die Beschaffenheit der Werkstückoberfläche stellt einen weiteren Einfluss auf den zu bestimmenden Messwert dar. Hierbei ist die gewählte Messstrategie entscheidend. Werden die Messpunkte in zu geringer Anzahl oder nur in einem kleinen Bereich der Oberfläche aufgenommen, ist die diese nicht repräsentativ abgebildet. Ausgeprägte Gestaltabweichungen [DIN 4760-06, 1982] der Oberflächenbeschaffenheit, wie die Formabweichung, Welligkeit und Rauheit, werden möglicherweise nicht erfasst, obwohl sie die Messgrößen entscheidend beeinflussen können. Um die Eigenschaften einer Oberfläche messtechnisch zu erfassen, ist eine gleichmäßige, großflächige Erfassung erforderlich. Ebenfalls kann die Untersuchung mehrerer Werkstücke desselben Herstellungsprozesses aufschlussreich sein. Eine hohe Punktzahl und das Erfassen weiterer Werkstücke wird aus wirtschaftlichen Gründen häufig nicht realisiert, sodass der Einfluss der Formabweichung daher nach oben abgeschätzt wird. Zur Abschätzung der Standardabweichung  $s$  sind nach VDI/VDE 2617-11 [2011] mehr als 50 Messpunkte anzutasten. Häufig werden weniger Messpunkte angetastet, ein Ausgleichselement für die erfasste Werkstückoberfläche gerechnet und die Standardmessunsicherheiten der Messpunkte als obere Grenze für den Messunsicherheitsbeitrag verwendet [VDI/VDE 2617-11, 2011]. Sobald die Messunsicherheit möglichst klein gehalten werden soll, ist eine aufwendigere Lösung mit deutlich mehr Messpunkten zu empfehlen.

## Temperatur

Für alle Messungen ist eine Referenztemperatur von  $20,0\text{ °C}$  [ISO 1, 2016] festgelegt. Wenn die vorherrschende Temperatur abweicht, beeinflusst sie sowohl das Messgerät als auch das Werkstück. Nach Richtlinie VDI/VDE 2617-11 [2011] wird eine Homogenität der Temperatur im Werkstück angenommen. Temperaturdifferenzen, -gradienten und -driften verursachen Messabweichungen der Längenmessung, zusammengesetzt aus Veränderungen des Messgerätes und des eckemWerkstücks. Die konstanten Temperaturabweichungen zu der Referenztemperatur verursachen systematische Abweichungen, welche zu korrigieren sind. Eine Temperaturüberwachung durch mindestens vier Temperatursensoren am Messgerät wird empfohlen [ISO/IEC 17025, 2018], um die vorherrschenden Temperaturen zu erfassen. Dafür sind die Sensoren zur Messung der Umgebungstemperatur so angeordnet, dass jede Achse einmal abgebildet werden kann. Weiterhin wird empfohlen während der Messung ebenfalls diejenigen Temperatursensoren zu verwenden, die an den Maßstäben des KMG integriert sind. Zusätzlich können ein oder mehrere Werkstücktemperatursensoren Informationen während des Messprozesses

liefern, die in der Regel von der Anwendersoftware automatisch ausgelesen und zur Kompensation verwendet werden können. Die Korrekturbeträge ergeben sich aus den Ausdehnungskoeffizienten der Materialien der Maßstäbe und des Werkstücks. Eine gemessene Länge ist bei Temperaturen, die größer sind als die Referenztemperatur, um den Korrekturbetrag zu minimieren und umgekehrt.

### 2.1.3 Spezifische Einflüsse bei Messungen mit Groß-Koordinatenmessgeräten

Besondere metrologische Herausforderungen stellen große Bauteile dar. Die Werkstücke, beispielsweise aus der Windenergiebranche, benötigen ein großes Messvolumen und einen hochgenauen Messprozess. Spezifiziert sind kleine Toleranzen, die entsprechend geringe Messunsicherheiten fordern. Um die erforderliche Genauigkeit zu erreichen, ist ein starrer Aufbau des KMG mit temperaturinvarianten Materialien notwendig. Diese Anforderungen erfüllen z. B. KMG in Brückenbauweise. Die zuvor beschriebenen Einflussfaktoren treten bei einem solchen Messgerät mit langen Achslängen und großen Werkstücken ebenfalls auf. Ihr quantitativer Beitrag kann im Vergleich zu den charakteristischen Eigenschaften von kleineren Aufbauten allerdings abweichen. Zur Erfassung der geometrisch bedingten Abweichungen wird hauptsächlich ein interferometrisches Verfahren verwendet, da kalibrierte Referenzobjekte nicht in der entsprechenden Größe und Genauigkeit zur Verfügung stehen. Das Referenzobjekt muss bei solchen Messungen 66 % der längsten Messachse abdecken [ISO 10360-2, 2009]. Das interferometrische Kalibrierverfahren weist im Vergleich zu der Aufnahme mit einer physischen Maßverkörperung, abweichende Standardmessunsicherheiten für die Abweichungen auf.

Ein Unterschied ist die berührungslose Erfassungsmethode von Koordinaten im Messvolumen, wodurch der Einfluss des Antastprozesses entfällt. Zu beachten ist weiterhin, dass die Überprüfung der Längenmessabweichung sowie Positions- und Rechtwinkligkeitsprüfungen [VDI/VDE 2617-2.1, 2014] kombiniert erfolgen. Eine homogene Temperaturverteilung am Groß-KMG im kompletten Messvolumen ist schwerer zu realisieren als bei kleineren Messgeräten. Neben den räumlichen Temperaturänderungen (Temperaturgradienten) ist von zeitlichen Änderungen der Temperatur auszugehen, da die Erfassung eines großen Werkstücks in der Regel durch weite Verfahrenswegen und größere Messbereiche mit längeren Messzeiten einhergeht. Der Einfluss der Umgebungstemperatur wirkt auf das KMG und die großen Bauteile. Es sind somit Inhomogenitäten und längere Temperierungsprozesse vor den Messprozessen zu erwarten. Häufig werden zur Messung größerer

Werkstücke komplexe und auch längere Tastersysteme eingesetzt, die eine wesentlich höhere Instabilität aufweisen als kompaktere Tastersysteme. Weiterhin sind größere Tastkugeln und Schaftdurchmesser im Einsatz. Diese Tasterkonfigurationen führen bei der Einmessprozedur zu anderen Werten der Tasterdurchbiegung und Rotationsabweichung und es können weitere nicht korrigierbare zufällige Restabweichungen entstehen. Der Einfluss der Werkstückoberfläche wirkt sich bei großen und kleinen Bauteilen in ähnlicher Weise aus. Neben den bisher betrachteten Einflussfaktoren sind auch Einflüsse zu betrachten, die insbesondere bei großen Werkstücken beziehungsweise in einem erheblichen Ausmaß auftreten. Hierbei handelt es sich um die Temperatur eines großen Werkstücks, welches aufgrund der Masse eine längere Zeit zur Akklimatisierung bedarf als kleine Werkstücke. Ebenso spielen inhomogene Temperaturverteilungen eine größere Rolle. Als weiterer Einflussfaktor ist die Lagerung zu nennen und detaillierter zu betrachten. Die bewährte Drei-Punkt-Lagerung bei kleinen Werkstücken bedeutet in dem Fall größere Abstände zwischen den Lagern. Im Zusammenhang mit dem erheblich größeren Gewicht sind gravitativ bedingte Verformungen zu berücksichtigen oder zu vermeiden. Die Untersuchung dieser (zusätzlichen) Einflüsse und ihre Modellierung zur Ermittlung der aufgabenspezifischen Messunsicherheit am Beispiel großer Zahnräder mit dem Groß-KMG ist Inhalt der vorliegenden Arbeit. Die Erkenntnisse dienen als Grundlage zur Anpassung und Erweiterung des virtuellen KMG der PTB. Auf die Grundlagen der Messunsicherheitsermittlung und die dazugehörige Software wird im Folgenden eingegangen.

## **2.2 Ansätze der Messunsicherheitsermittlung**

Die Messunsicherheit dient als Angabe der Qualität einer Messung und beschreibt die potentielle Auswirkung aller beeinflussenden Faktoren. Sie setzt sich aus verschiedenen Komponenten zusammen, die je nach Messaufgabe in unterschiedlichen Kombinationen auftreten können. Zur Ermittlung des funktionalen Zusammenhangs zwischen den Einflüssen bzw. der Eingangsgrößen und der Auswirkung in Form einer Messabweichung muss zunächst für das Standardvorgehen nach GUM eine Modellgleichung für die Messgröße aufgestellt werden. Nachfolgend müssen für alle Eingangswerte beste Schätzwerte und Informationen zu deren Messunsicherheiten ermittelt werden.

Hierzu werden im GUM zwei konventionelle Verfahren (siehe Abschnitt 2.2.1) vorgestellt [JCGM 100, 2008]. Die experimentelle Herangehensweise entspricht der Messunsicherheitsermittlung nach Variante A. Die Variante B basiert schwerpunktmäßig auf Ermittlungsstrategien der theoretisch-

physikalischen Modellbildung [VDI/VDE 2617-11, 2011]. Eine ebenfalls GUM-konforme, praxisnahe Methode zur Bestimmung der Messunsicherheit in der Koordinatenmesstechnik beinhaltet die Substitutionsmethode nach ISO 15530-3 [2011] unter Verwendung von Normalen (siehe Abschnitt 2.2.2). Eine weitere Variante der Messunsicherheitsermittlung verwendet Simulationen [VDI/VDE 2617-7, 2008] und ist im Supplement 1 des GUM beschrieben [JCGM 101, 2008] (siehe Abschnitt 2.2.3). Die Wahl der Variante ist abhängig von den messtechnischen Voraussetzungen und dem Aufwand, der erbracht werden kann. Zusätzlich ist entscheidend, welche Informationen über den Messprozess, die einzelnen Einflussgrößen und Zusammenhänge bekannt sind.

### 2.2.1 Messunsicherheitsbilanz nach dem Guide of the expression of uncertainty in measurement

Die konventionellen Ermittlungsverfahren der Messunsicherheit anhand der Messunsicherheitsbilanz basieren auf den Varianten A und B des GUM, auf welche in diesem Abschnitt kurz eingegangen wird.

#### Variante A

Die Variante A des GUM basiert auf der statistischen Auswertung von wiederholten Messungen. Die Wiederholungen werden durchgeführt, um den zufälligen Einfluss der Eingangsgröße experimentell zu bestimmen. Durch gleichbleibende Bedingungen während der Erfassung mehrerer Stichproben, werden die Systematiken vernachlässigt. Der zufällige Abweichungsanteil der unabhängigen Beobachtungen, welcher sich in jedem Messwert  $n$  der wiederholten Messungen anders ausprägt, wird anhand der Statistik mit der empirischen Varianz des Einzelwertes  $s^2(q)$  [JCGM 100, 2008] aufgezeigt mit

$$s^2(q) = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (q_j - \bar{q})^2 \quad . \quad (1)$$

Basierend auf der Varianz des Einzelwertes  $s^2(q)$ , welche die Einzelwerte  $q_j$  und den Mittelwert der Einzelwerte  $\bar{q}$  berücksichtigt, ist die Varianz des Mittelwertes  $s^2(\bar{q})$  abzuleiten nach JCGM 100 [2008]:

$$s^2(\bar{q}) = \frac{s^2(q)}{n} \quad . \quad (2)$$

Daraus ergibt sich die Standardmessunsicherheit  $u(q)$ , welche der empirischen Standardabweichung des Mittelwertes und damit der Quadratwurzel aus der empirischen Varianz des Mittelwertes entspricht, zu

$$u(\bar{q}) = s(\bar{q}) \quad . \quad (3)$$

## Variante B

In der Variante B des GUM wird die Charakteristik eines Einflussfaktors durch theoretisches Vorwissen wie Kalibrierscheine, Angaben der Hersteller oder Erfahrungswerte des Anwenders gewonnen. Dies wird für jeden Einflussfaktor unter Berücksichtigung einer Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion berücksichtigt. Potentielle Wahrscheinlichkeitsverteilungen sind die Normalverteilung, Rechteckverteilung, Dreieckverteilung, arcsin-Verteilung und bimodale Verteilung [VDI/VDE 2617-11, 2011]. Für den Fall, dass keine empirischen Informationen über die jeweilige Eingangsgröße  $x_i$  bekannt sind, werden die theoretischen Angaben mit einer Rechteckverteilung beschrieben, welche durch eine Obergrenze  $a_+$  und Untergrenze  $a_-$  abgebildet wird. Die Eingangsgröße  $x_i$  sowie der Schätzwert für die Varianz  $s^2(x_i)$  [JCGM 100, 2008] ergeben sich zu

$$x_i = \frac{1}{2}(a_- + a_+) \quad (4)$$

und

$$s^2(x_i) = \frac{1}{12}(a_+ - a_-)^2 \quad . \quad (5)$$

Grundsätzlich ist der Messprozess eines KMG sehr komplex, sodass eine vollständige und schlüssige Messunsicherheitsbilanz mit konventionellen Herangehensweisen des GUM schwierig zu erstellen ist. Die Methoden der beiden folgenden Abschnitte bilden eine praxisnahe Umsetzung der Forderungen des GUM und somit eine Erleichterung bei der Messunsicherheitsermittlung.

### 2.2.2 Messunsicherheitsbestimmung mittels Substitutionsmethode

Die Substitutionsmethode dient der Messwertbestimmung und Messunsicherheitsermittlung auf Basis von Vergleichsobjekten [ISO 15530-3, 2011]. Bei der Substitution werden zwei Werkstücke benötigt: ein zu bestimmendes Werkstück und ein bekanntes, kalibriertes Vergleichswerkstück, ein Normal. Eine maßgebende Vergleichbarkeit der Werkstücke ist notwendig, sodass eine

zuverlässige Messung und Auswertung erfolgen kann. Ein zuvor definiertes Vorgehen im Messprozess ist für beide Werkstücke anzuwenden. Die Differenz zwischen Kalibrierwert und aktuell gemessenem Messwert am Normal dient als Korrektur für den Messwert, der am zu bestimmenden Werkstück ermittelt wird, um systematische Messabweichungen zu eliminieren. Die Messunsicherheit des korrigierten Messwertes ergibt sich entsprechend der Gleichung (6) als kombinierte Messunsicherheit  $u$  einzelner Beiträge.

$$u = \sqrt{u_{\text{cal}}^2 + u_{\text{p}}^2 + u_{\text{b}}^2 + u_{\text{w}}^2} \quad (6)$$

Abweichungen eines oder mehrerer Aspekte der zwei Messprozesse oder Variationen der zwei Werkstücke werden in einem systematischen Beitrag  $u_{\text{b}}$  beschrieben. Je mehr Unterschiede es bei den beiden Messprozessen gibt, desto größer wird dieser systematische Beitrag. Neben den Einflüssen des kalibrierten Werkstücks  $u_{\text{cal}}$  werden die Messunsicherheitsbeiträge der Werkstückeigenschaften  $u_{\text{w}}$  und des Messprozesses  $u_{\text{p}}$  miteinbezogen. Die Ermittlung dieser Beiträge kann nach Variante A oder Variante B des GUM erfolgen.

### 2.2.3 Messunsicherheitsbestimmung mittels Simulation

Die Messunsicherheitsermittlung unter Verwendung der numerischen Simulation ist im Supplement 1 des GUM [JCGM 101, 2008] beschrieben. Mit der Simulation des Messprozesses wird die Ermittlung des Messwertes und der Messunsicherheit bei komplexen Prozessen ohne Vergleichsobjekte ermöglicht. Der Messprozess wird aufgabenspezifisch betrachtet, alle beitragenden Einflussfaktoren identifiziert und deren Auswirkungen auf die Messung und das Messergebnis ermittelt. Hierzu werden theoretische Zusammenhänge analysiert sowie Simulationen und Messungen durchgeführt, die den Zusammenhang zwischen dem jeweiligen Einflussfaktor und der Messabweichung beschreiben. Mit diesen Erkenntnissen wird der Messprozess in physikalischen Modellen analytisch beschrieben. Ein Modell gibt den Zusammenhang zwischen einem Einflussfaktor und dessen Auswirkung auf den Messprozess über einen systematischen Wert und den Bereich der zufälligen Anteile wieder. Hierzu wird eine Wahrscheinlichkeitsverteilung angegeben. Innerhalb dieser zuvor definierten Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen wird unter Verwendung der Monte-Carlo-Simulation (MCS) ein zufälliger Wert pro Simulationsdurchlauf für den jeweiligen Einflussfaktor oder Beitrag zum Einfluss ermittelt. Das Zusammenspiel der systematischen und simulativ ermittelten Beiträge führt zu einer Stichprobe der virtuellen Messung. Über

eine Vielzahl an Wiederholungen kann eine statistische Auswertung erfolgen. Daraufhin ergibt sich ein Mittelwert, der den Messwert der gesuchten Messgröße wiedergibt und eine Spanne, die der Messunsicherheit entspricht. Der Ablauf zur Entwicklung des virtuellen KMG ist in Bild 3 dargestellt. Die

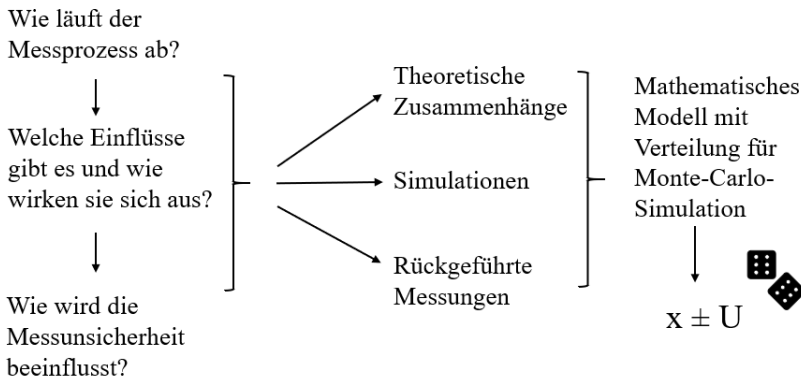


Bild 3: Prinzipische Skizze zum Ablauf der Entwicklung eines virtuellen Messgerätes

einzelnen Modelle können für die verwendete Messmethode, Bauart, das spezifische Messgerät, Umgebungsbedingungen etc. variieren. Für jede Messaufgabe wird individuell entschieden, ob und in welcher Form ein Modell berücksichtigt werden muss. Die jeweilige Modellgleichung benötigt Eingangswerte, die den Einflussfaktor beschreiben. Die Werte müssen je nach Eigenschaft in kurz- oder langzeitigen Abständen neu ermittelt werden. Beispielsweise verändert sich die Geometrie des Messgerätes im konstanten Umfeld nicht oder nur wenig, sodass es empfohlen ist, die Werte alle zwei Jahre neu aufzunehmen. Dahingegen wird die Tasterkonfiguration für jede Messaufgabe individuell gestaltet, sodass eine Bestimmung der spezifischen Eigenschaften für jede Messung einzeln erfolgen muss. Die Messunsicherheit, die aus den Simulationen des entsprechenden virtuellen Messprozesses folgt, ist mit  $u_{\text{sim}}$  zusammengefasst. Die Modellierung weiterer Einflussfaktoren  $u_i$  kann mit der konventionellen Messunsicherheitsermittlung nach Variante A oder B bestimmt werden. Dies wird in der kombinierten Messunsicherheit  $u$  [VDI/VDE 2617-7, 2008] berücksichtigt:

$$u = \sqrt{u_{\text{sim}}^2 + \sum_{i=1}^n u_i^2} \quad (7)$$

Die simulative Ermittlung einer großen Menge virtuell erzeugter Stichproben ist die grundlegende Idee vieler Softwarelösungen. Darauf basiert beispielsweise die Software *MUSE* der Eidgenössischen Technischen Hochschule (ETH) Zürich zusammen mit der Eidgenössischen Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (EMPA) der Schweiz [Wolf et al., 2007]. Die Bestimmung der Messunsicherheitsbeiträge erfolgt in allgemein gehaltenen Modellen. Sie ist charakterisiert durch ein Bausteinprinzip, bestehend aus einzelnen Modellen der Einflussfaktoren verschiedener Messprozesse. Anhand der MCS wird daraus die kombinierte Messunsicherheit zusammengesetzt. Unter den modellierten Einflussfaktoren sind u. a. einzeln verwendbare und kombinierbare Komponenten zur Beschreibung des Messprozesses eines KMG enthalten. Die Bausteine werden mit mehreren Beispieldatensätzen für Standardfälle gefüllt [Wolf et al., 2007], sodass eine Ermittlung der jeweiligen Werte des Einflussfaktors nicht nötig ist. Aus wirtschaftlicher Sicht ergibt sich eine Zeitersparnis. Dies bedingt größere Messunsicherheiten als bei der Verwendung von aufwendig, individuell angepassten Werten. Für komplexe Messprozesse mit hohen Anforderungen an die Güte der Messunsicherheitsangaben ist ein allgemeingültiger Ansatz für mehrere Messsysteme nicht sinnvoll. Die detaillierte und möglichst komplette Erfassung und Bestimmung der Einflussfaktoren eines komplexen Messprozesses in der Koordinatenmesstechnik sind spezifisch notwendig. Beispielsweise wurden in Polen [Sladek et al., 2013] und in China [Gao et al., 2017] speziell für interferometrisch messende Gelenkarme simulationsbasierte Lösungen für virtuelle Messungen entwickelt. Weiterhin wurden bei der PTB spezifische Modelle zur Umsetzung eines virtuellen Lasertrackers [PTB, 2009] und eines virtuellen Verzahnungsmessgerätes [Rost et al., 2016] erstellt. Für KMG haben verschiedene Institutionen Lösungen zur Messunsicherheitsermittlung mit Hilfe der MCS entwickelt. Es handelt sich u. a. die Brunel Universität in London [Hu et al., 2012; Hu, 2010], die Universität von Hong Kong [Yang et al., 2005], das National Institute of Standards and Technology (NIST) in den Vereinigten Staaten [Philipps et al., 2003; Baldwin et al., 2007], eine Forschungskooperation aus den Niederlanden [Haitjema et al., 2001; Dorp et al., 2001] sowie die PTB [Trapet et al., 1996; Wäldele et al., 2002; Trenk et al., 2004; Franke et al., 2017; Heißelmann et al., 2018]. Diese werden im Folgenden hinsichtlich ihrer unterschiedlichen Realisierungen kurz vorgestellt. Die Software *PUNDITCMM* wurde von der Firma MetroSage in Kooperation mit dem NIST entwickelt und berücksichtigt einzelne Einflüsse auf den Messprozess eines KMG. Während des eigentlichen Messprozesses wird bereits die Vollständigkeit der Messstrategie und die Einhaltung der vorgegebenen Toleranzen geprüft und angezeigt [Philipps et al., 2003]. Berücksichtigung finden die geometrischen Abweichungen des KMG, die Umgebungsbedingungen, das 3D-Tastersystem, die Werkstückform, das Messpunktumfeld und die Berechnungsalgorithmen [Baldwin et al., 2007]. Es

ist für einen Optimierungsprozess während der Messung ausgelegt. Das Softwarepaket *AVCMM*, Advanced Virtual Coordinate Measuring Machine, der Brunel Universität beinhaltet neben der Bestimmung der Messunsicherheit durch MCS einen weiteren Teil zur virtuellen Optimierung der Messprozessplanung. Hierbei kann die Messstrategie auf Grundlage von CAD-Daten des Werkstücks bewertet werden. Bei der Messunsicherheitsermittlung werden die geometrischen Abweichungen des KMG und das Antastverhalten des 3D-Tastersystems berücksichtigt [Hu et al., 2012]. Des Weiteren wurde an der Universität Krakau ein Softwarepaket entwickelt, welches die Messunsicherheitsermittlung von Messaufgaben an KMG ermöglicht. Bei den berücksichtigten Einflüssen handelt es sich um die geometrischen Abweichungen, das Antastverhalten des 3D-Tastersystems und die Umgebungsbedingungen. Das Verhalten der geometrischen Abweichungen ist anhand eines LaserTracers mit interferometrischer Längenmessung erfasst und ermöglicht die Messung für große Dimensionen [Sladek et al., 2013]. Die Zusammenarbeit der Universität Eindhoven mit dem niederländischen Metrologieinstitut Van Swinden Laboratory (VSL) und Zeiss Nederland B.V. brachte einen weiteren Ansatz eines virtuellen KMG hervor. Detaillierte Untersuchungen der KMG-Geometrie [Dorp et al., 2001] führten zu einem Modell, welches die Auswirkung der geometrischen Abweichungen auf die Messunsicherheit simuliert. Andere Einflüsse auf die Messunsicherheitsermittlung bei Instrumenten der Koordinatenmesstechnik wie z. B. Rauheitsmessgeräten [Haitjeman et al., 2000] und Ebenheits- und Rundheitsmessgeräten [Haitjema et al., 2001] sind in weiteren Projekten als unabhängige Modelle entwickelt worden. Bei den verschiedenen Simulationsmodellen werden weitere Messunsicherheitseinflüsse wie die Umgebungstemperatur, der Ausdehnungskoeffizient und Filtereinstellungen berücksichtigt.

Das virtuelle KMG der PTB, *VCMM* (Virtual Coordinate Measuring Machine), zur Messunsicherheitsbestimmung anhand numerischer Simulation bei KMG wird im Folgenden detailliert beschrieben, da es die Grundlage dieser Arbeit bildet.

### **2.3 Das virtuelle Koordinatenmessgerät der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt**

Für das *VCMM* wurden die Einflussfaktoren auf den Messprozess eines KMG bei möglichst vielfältigen Messaufgaben untersucht. Allgemeingültige, aber auch spezifische Einflussfaktoren, die sich bei Messungen auf das Messergebnis auswirken, wurden festgestellt, analysiert und beschrieben. Die Untersuchung eines Einflussfaktors kann über theoretische, physikalische Zusammenhänge, Simulationen oder Messungen ermittelt werden. Sobald

die systematischen und die zufälligen Auswirkungen bekannt sind, kann ein Modell für diesen Einflussfaktor aufgestellt werden. Unter Umständen sind mehrere Modellvarianten eines einzelnen Einflussfaktors zu berücksichtigen. Dies betrifft beispielsweise die Temperaturverteilung, welche homogen oder inhomogen sein kann. Entsprechend sind unterschiedliche Modelle zu berücksichtigen. Weiterhin ist es bei vielen KMG möglich, eine automatische Temperaturkompensation durchzuführen. Dementsprechend ist die korrekte Modellierung für Messungen mit oder ohne diese Korrekturmaßnahme festzulegen. Das *VCMM* ermöglicht die Messunsicherheitsbestimmung aufgabenspezifischer Messungen an einem stationären, dreiachsigen KMG, indem mit der Mess- und Auswertesoftware interagiert wird. Das Prinzip des virtuellen KMG der PTB (siehe Bild 4) beruht darauf, dass die vom KMG erfassten Punkte als Grundlage der Simulation dienen. Jeder erfasste Messpunkt wird in Abhängigkeit mehrerer Eigenschaften (Position, Tastelementversatz, Messmodus, etc.) über die erstellten Modelle mit der MCS variiert. Aus den daraus resultierenden, virtuell beeinflussten Messpunkten wird für jeden einzelnen virtuellen Messdurchlauf die entsprechende Messgröße eines gängigen Auswerteelementes mit der Auswertesoftware des KMG ermittelt. Der Vorgang wird mehrmals wiederholt, woraufhin die dadurch ermittelten (virtuellen) Stichproben statistisch ausgewertet werden.

Die erste industriereife Variante der Software *VCMM* wurde im Jahr 2002 veröffentlicht. Von Anfang an berücksichtigt die Software neben der Geometrie der Achsführungen [Trapet et al., 1991] auch den Längenanschluss der Maßstäbe und die Drift des KMG. Weiterhin ist das taktile Messkopfsystem inklusive der Tastereinmessung und das Werkstück modelliert. Die Umgebungsbedingungen werden über die mittlere räumliche Temperatur und thermischen Gradienten angegeben. Diese Informationen werden in den Modellen der Geometrieabweichungen, der Drift des KMG und der Ausdehnung des Werkstücks verarbeitet [Trapet et al., 1989]. Die Größen haben signifikanten Einfluss auf die Messung mit einem KMG und sind bei der Messunsicherheitsermittlung zwingend zu berücksichtigen [Wäldele et al., 2002]. Im Laufe der Zeit wurden weitere Einflussparameter eingebunden, die in Bild 5 grau markiert sind. Häufig handelt es sich dabei um optional zu berücksichtigende Einflüsse, wie z. B. die Verwendung eines Drehtisches oder die Messung im Scanning-Modus, die aufgabenspezifisch ergänzt werden können. Weiterhin ist die Berücksichtigung der Unterabtastung der Werkstückform eingepflegt worden. Daraus hat sich eine weitere industriereife Version entwickelt [Kistner et al., 2016; Franke et al., 2017], welche 2018 veröffentlicht wurde. Aktuell ist das *VCMM* in die Anwendersoftware der Firmen *Carl Zeiss* und *Hexagon Metrology* eingebunden. Die Parameter der berücksichtigten Einflussfaktoren müssen für den Messraum, das

Messgerät und das Werkstück spezifisch ermittelt und über die Software für die Modelle eingegeben werden. Zur Parametrisierung sind detaillierte Untersuchungen notwendig, die mit Expertenwissen und nach Anleitung aus dem Handbuch [PTB, 2014] sowie der Modellbeschreibung [PTB, 2022] in regelmäßigen zeitlichen Abständen erfolgen müssen. Zeitgleich wurde eine

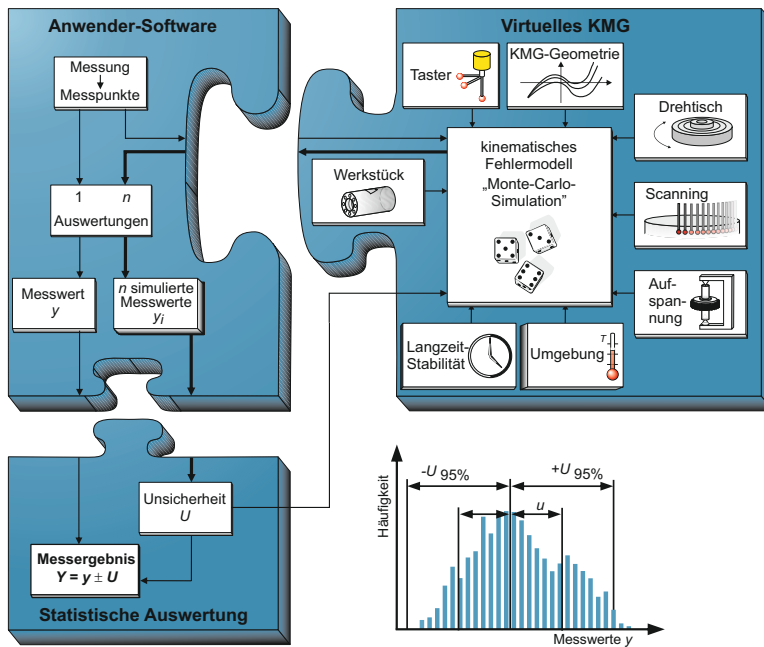


Bild 4: Prinzipische Skizze zur Funktion des VCMM der PTB [AG5,32, 2020]

vereinfachte Parametrisierung eingepflegt, welche einige Einflussfaktoren einer Baureihe oder eines KMG-Modells nach Erfahrungswissen einheitlich konservativ abgeschätzt werden. Dies bietet die Möglichkeit, mit weniger Aufwand Messunsicherheiten zu ermitteln, welche jedoch vergleichsweise größer sind. Sobald präzise Messunsicherheiten und eine hohe Reproduzierbarkeit vorausgesetzt wird, muss die aufwendige Variante verwendet werden [Franke et al., 2017].

### 2.3.1 Modelle und Parameterermittlung

Die bestehenden Modelle des virtuellen KMG der PTB zur Beschreibung der Auswirkungen verschiedener Einflussfaktoren auf den Messprozess sind im Folgenden in verkürzter Form beschrieben. In Hinsicht auf diese Arbeit sind die Teilmodelle der statischen und thermischen Geometrieabweichungen des KMG sowie die thermische Ausdehnung und die Aufspannung

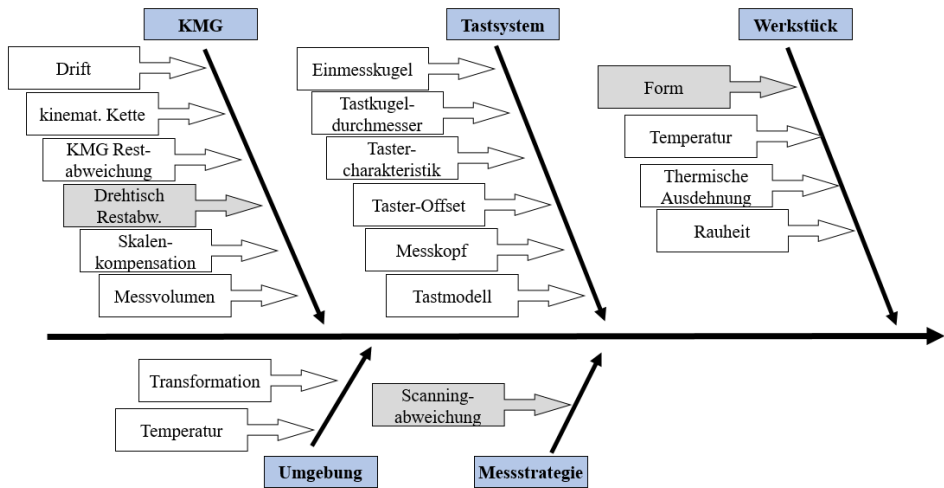


Bild 5: Ishikawa-Diagramm als Übersicht der Einflussfaktoren des VCMM (nach Kistner et al. [2016])

des Werkstücks von besonderer Bedeutung. Es ist zu erwarten, dass die größer dimensionierten Messaufgaben nicht auf die bestehenden Modellen übertragbar sind. Die Beschreibung dieser und weiterer Einflussfaktoren sind in dem technischen Report zur Modellbeschreibung des VCMM im Detail nachzulesen [PTB, 2022]. Die Softwarelösung ist in Module aufgeteilt, welche einer Klasse an Einflussfaktoren entsprechen und die jeweilige Parametrisierung ermöglicht. In *xml*-Dateien werden die aufgabenspezifisch ermittelten Werte den Einflussfaktoren zugeordnet und für die Weiterverarbeitung bereitgestellt. Dahinter steht eine komplexe Software-Architektur zur Verknüpfung der Werte mit den hinterlegten Modellen.

## Geometrie

Das Modell der KMG-Geometrie im VCMM basiert auf einem Starrkörpermodell mit 21 Geometrieabweichungen. Die Erfassung der dazugehörigen Werte erfolgt mit kalibrierten Maßverkörperungen oder einem Laserinterferometer. Die statischen Geometrieabweichungen sind im Modul `<GuidewayGeometry>` des virtuellen KMG dargestellt. Hierbei werden translatorische, rotatorische und Rechtwinkligkeitsabweichungen der Verfahrenachsen sowie der Längenanschluss und kurzperiodische Abweichungen berücksichtigt. Je nach Bauweise des KMG werden zusätzlich elastische Verformungen eingebunden. Temperaturbedingte Längenausdehnungen der Maßstäbe und Verformungen der Maschinenstruktur sowie eine Drift werden als thermisch verursachte Geometrieabweichungen unter dem Modul

<MachineStructure> modelliert. Die mathematischen Modelle basieren auf den Zusammenhängen experimenteller Untersuchungen [Trapet et al., 1989] an gängigen KMG in Portalbauweise mit einem Messvolumen von  $\sim 1 \text{ m}^3$ . In den Modellen wird unterschieden, ob eine automatische Temperaturkompensation der Achsmaßstäbe aktiv ist oder nicht. Weiterhin werden unterschiedliche Modelle bei einem beweglichen oder festen Messtisch gewählt. In die Gleichungen fließen spezifische Eigenschaften des verwendeten KMG ein. Dies beinhaltet die wirksamen Längen sowie die entsprechenden Ausdehnungskoeffizienten vom Material mit dessen Standardunsicherheiten. Alle Gleichungen sind abhängig von der Position des Tastelementes und den Temperaturgradienten, die aus den vorherrschenden Umgebungstemperaturen resultieren. Die Simulation der Auswirkung auf einen Messpunkt durch die Positionsabweichungen erfolgt über die allgemeine Gleichung zur Simulation des Abweichungsvektors  $\vec{e}_{G_i}$  nach PTB [2022] in Abhängigkeit vom Messpunkt  $\vec{p}_i$  mit

$$\vec{e}_{G_i} = \vec{e}_{GT_i} + E_{GR_i} \cdot \vec{p}_i + E_{GP_i} \cdot \vec{l}_v + s_{GM} \cdot \vec{p}_i \quad (8)$$

Darin werden die translatorischen Abweichungen  $\vec{e}_{GT_i}$ , die rotatorischen Abweichungen, welche unabhängig vom verwendeten Taster  $E_{GR_i}$  sowie abhängig vom Tastelementversatz  $E_{GP_i} \cdot \vec{l}_v$  sind, und der Längenanschluss  $s_{GM}$  berücksichtigt. In Bezug auf die Messunsicherheitsermittlung mit dem virtuellen KMG der PTB sind die zufälligen und systematischen Beiträge der Geometrieabweichungen zu unterscheiden. Der systematische Anteil an den Abweichungen wird erfasst und in der Anwendersoftware des KMG in Form von Korrekturwerten hinterlegt. Dieser wird bei der Ermittlung der Koordinaten automatisch verrechnet. Es verbleiben Restabweichungen, die mit einem geringeren Aufwand regelmäßig ermittelt und im VCMM als Abweichung berücksichtigt werden. Hierzu dient eine *xml*-Datei, welche die Daten beispielsweise in Form einer Lookup-Tabelle enthält. Darin sind die Messwerte und Messunsicherheiten sowie Wahrscheinlichkeitsverteilungen für jeden Parameter aufgelistet. Die Informationen sind zwischen den Schritten eng interpoliert und der jeweiligen Geometrieabweichung zugeordnet. Für den virtuellen Messprozess werden daraus individuelle Abweichungsvektoren für jeden Messpunkt ermittelt. Diese variieren bei jedem virtuellen Durchlauf im Rahmen der zufälligen Anteile der Restabweichungen mittels der MCS. Damit werden die Messpunkte verschoben und neue Koordinaten erzeugt, aus denen die Messgröße als Stichprobe des Durchlaufs abgeleitet wird. Dies wird für viele virtuelle Messdurchläufe wiederholt und statistisch ausgewertet. Um die Messabweichung und die resultierende Messunsicherheit gering zu halten, müssen systematische und zufällige Restabweichungen getrennt, die systematischen Anteile eliminiert

und die Werte möglichst genau erfasst werden. Falls eine Korrektur der Systematiken erfolgen kann, muss die Unsicherheit der Korrekturmaßnahme berücksichtigt werden.

## Umgebungstemperatur

Die thermischen Umgebungsbedingungen im Modul <Environment> befassen sich mit den vorherrschenden Temperaturen im Messvolumen, den dazugehörigen räumlichen Temperaturgradienten und der zeitlichen Temperaturänderung. Hierzu muss eine langfristige Überwachung der Temperaturen im Messvolumen an mindestens vier Punkten stattfinden. Basierend auf den gewonnenen Daten können Temperaturen in ihrer räumlichen Verteilung und deren zeitliche Veränderung pro Achse ermittelt werden. Die Informationen sind sowohl für die thermische Ausdehnung der Achsmaßstäbe als auch für die Verformung der Maschinenstruktur zu verwenden. Dies bietet die Möglichkeit, den Einfluss der thermisch verursachten Geometrieabweichungen zu ermitteln. Für die Wärmeausdehnung der Maßstäbe an den Verfahrachsen  $\Delta a_{t,a}$  sind die folgenden Gleichungen unter Berücksichtigung der Position des Tastersystems  $\vec{p}$  je Komponente  $p_a$ , des Ausdehnungskoeffizienten  $\alpha_{sa}$  und einer simulierten Temperatur  $\vartheta_{sa}$  mit  $a = X, Y, Z$  relevant. Weiterhin können die Unsicherheiten des thermischen Ausdehnungskoeffizienten und der Temperatur jeweils als Differenz zum angenommenen Wert mit  $\Delta\alpha_{sa}$  und  $\Delta\vartheta_{sa}$  simuliert werden. Die beiden Gleichungen [PTB, 2022] unterscheiden, ob eine Temperaturkompensation aktiv ist wie in Gleichung (9) oder nicht wie in Gleichung (10).

$$\Delta a_{t,a} = -p_a \cdot [\alpha_{sa} \cdot \Delta\vartheta_{sa} + \Delta\alpha_{sa} \cdot (\vartheta_{sa} - 20,0 \text{ °C})] \quad (9)$$

$$\Delta a_{t,a} = -p_a \cdot \alpha_{sa} \cdot (\vartheta_{sa} - 20,0 \text{ °C}) \quad (10)$$

Für die Änderungen der Maschinenstruktur wird ermittelt, wie die räumlichen Temperaturgradienten und zeitlichen Temperaturänderungen sich auf die weiteren Geometrieabweichungen auswirken. Als Grundlage zur Ermittlung der signifikanten thermisch verursachten Deformationen dienen Experimente an einem KMG in Portalbauweise [Trapet et al., 1989]. Daraus wurden die folgenden, zusätzlichen thermisch verursachten Geometrieabweichungen als signifikant ermittelt:

- $\Delta x_{t,x}, \Delta y_{t,y}, \Delta z_{t,z}$
- $\Delta x_{t,y}, \Delta x_{t,z}, \Delta y_{t,x}, \Delta y_{t,z}, \Delta z_{t,x}, \Delta z_{t,y}$
- $\Delta\varphi_{x,r,y}, \Delta\varphi_{x,r,z}, \Delta\varphi_{y,r,x}, \Delta\varphi_{y,r,z}, \Delta\varphi_{z,r,x}, \Delta\varphi_{z,r,y}$
- $\Delta\varphi_{x,z}$

Die Simulation der thermisch verursachten Abweichungen eines Messpunktes erfolgt über die allgemeine Gleichung zur Simulation des Abweichungsvektors  $\vec{e}_{T_i}$  [PTB, 2022] in Abhängigkeit der Position des Messpunktes  $\vec{p}_i$  mit

$$\vec{e}_{T_i} = \vec{e}_{TT_i} + \mathbf{E}_{TR_i} \cdot \vec{p}_i + \mathbf{E}_{TP_i} \cdot \vec{l}_v \quad . \quad (11)$$

Darin werden die translatorischen  $\vec{e}_{TT_i}$  und die rotatorischen, thermischen Abweichungen  $\mathbf{E}_{TR_i}$  und  $\mathbf{E}_{TP_i}$  verrechnet. Diese werden in Bezug zur Position des Messpunktes  $\vec{p}_i$  und zu dem Tastelementversatz  $\vec{l}_v$  gesetzt.

## Werkstücktemperatur

Die Berücksichtigung des Einflusses einer thermischen Ausdehnung des Werkstücks ist in dem Modul <Workpiece> realisiert. Hierbei wird angenommen, dass sich die temperaturbedingte Ausdehnung des Werkstücks  $\vec{e}_{W_{\alpha_i}}$  (siehe Gleichung (15)) grundsätzlich wie translatorische Abweichungen der Maßstäbe auswirkt. Aufgrund der unterschiedlichen Beschaffenheiten von Werkstücken, wie deren Größe sowie Komplexität der Geometrie und den unterschiedlich auftretenden Temperaturverteilungen, ist die Beschreibung des Verhaltens aufwendig. Das Modell beinhaltet daher eine vereinfachte Abschätzung zur Ermittlung des Beitrags der Messunsicherheit. Damit möglichst viele Werkstücke abgebildet werden können, sind verschiedene Modelle der Materialzusammensetzung und dessen Verhalten wählbar. Hierbei handelt es sich um ein isotropes, schwach anistropes oder anisotropes Ausdehnungsverhalten der Materialien. In der Anwendung wirken sich diese drei Fälle auf den thermischen Ausdehnungskoeffizienten unterschiedlich aus, indem der systematische Anteil des Koeffizienten  $\alpha_o$  sowie der dazugehörige zufällige Anteil in Form einer Wahrscheinlichkeitsverteilung  $\delta\alpha$  berücksichtigt werden. Im Fall eines isotropen Verhaltens wird ein Wert für den Ausdehnungskoeffizienten  $\alpha_o$  aller Richtungen angenommen und ein Wert für die dazugehörige Standardmessunsicherheit  $\delta\alpha$  simuliert, welche im Rahmen einer entsprechenden Wahrscheinlichkeitsverteilung liegt. Beim zweiten und dritten Fall werden unterschiedliche Verteilungen je Achsrichtung für die Unsicherheiten angenommen, sodass zwischen  $\delta\alpha_x$ ,  $\delta\alpha_y$  und  $\delta\alpha_z$  unterschieden wird. Beim anisotropen Verhalten wird zusätzlich der systematische Anteil in drei unterschiedliche Werte aufgespalten, sodass daraus die Verwendung von  $\alpha_{o_x}$ ,  $\alpha_{o_y}$  und  $\alpha_{o_z}$  folgt. Weiterhin müssen Eingangswerte für die grundlegenden Variablen der Simulation vorliegen. Diese enthalten neben den Informationen über das Werkstückverhalten für das isotrope Modell oder eines der anisotropen Modelle auch Angaben zur vorherrschenden Temperatur. Neben den Ausdehnungskoeffizienten und

deren Wahrscheinlichkeitsverteilungen sind dies eine Temperatur im Innern des Werkstücks mit der Modellgleichung nach PTB [2022]

$$\vartheta_{\text{TM}}(t) = \vartheta_{\text{TM},o} + \delta\vartheta_{\text{TM}} + \frac{\partial\vartheta_{\text{TM}}}{\partial t} \cdot (t - t_{\text{reset}}) \quad . \quad (12)$$

Darin entspricht  $\vartheta_{\text{TM},o}$  dem Anfangswert der Materialtemperatur ohne einen zeitlichen Einfluss und  $\delta\vartheta_{\text{TM}}$  einem Wert für den zufälligen Anteil, ermittelt aus der dazugehörigen Wahrscheinlichkeitsverteilung. Eine zeitliche Änderung der Materialtemperatur  $\partial\vartheta_{\text{TM}}/\partial t$  wird in Zusammenhang mit einem Zeitintervall  $t - t_{\text{reset}}$  verwendet. Bei dem zeitabhängigen, thermischen Einfluss wird der Index ‚reset‘ verwendet, um einen zeitlichen Bezugspunkt zu definieren, der das Setzen der Temperatur zur KMG-internen, automatischen Maßstabskorrektur beschreibt. Weiterhin wird die Modellierung der Umgebungstemperatur  $\vartheta_{\text{env}}(t)$  nach PTB [2022] verwendet, welche analog einen Anfangswert der Umgebungstemperatur  $\vartheta_{\text{env},o}$  sowie den zufälligen Anteil dessen  $\delta\vartheta_{\text{env}}$  und die zeitliche Änderung dieser  $\partial\vartheta_{\text{env}}/\partial t$  berücksichtigt, da sie sich deutlich von der Materialtemperatur im Innern des Werkstücks unterscheiden kann. Hieraus folgt für die Temperatur der Umgebung  $\vartheta_{\text{env}}$  der Zusammenhang

$$\vartheta_{\text{env}}(t) = \vartheta_{\text{env},o} + \delta\vartheta_{\text{env}} + \frac{\partial\vartheta_{\text{env}}}{\partial t} \cdot (t - t_{\text{reset}}) \quad . \quad (13)$$

Daraus ergibt sich eine Näherung für die Werkstücktemperatur  $\vartheta_{\text{W}}$  mit

$$\vartheta_{\text{W}}(t) = \vartheta_{\text{env}}(t) + (\vartheta_{\text{TM},o} - \vartheta_{\text{env},o}) + (\vartheta_{\text{TM}}(t) - \vartheta_{\text{TM},o}) \quad (14)$$

für das thermisch verursachte Verhalten des Werkstücks. Basierend auf diesen mathematischen Modellen kann der geometrische Abweichungsvektor ermittelt werden. Dabei wird unterschieden zwischen Messungen mit und ohne automatischer Kompensation der Werkstücktemperatur. Falls das KMG die Möglichkeit einer Temperaturkompensation bietet, ist diese implementiert in den Mess- und Auswerteprozess. Die entsprechenden Temperaturwerte werden über einen oder mehrere integrierte Temperatursensoren  $\vartheta_{\text{W,Sensor}}$  erfasst, die am Werkstück temporär montiert werden. Eine eindimensionale Länge zwischen dem jeweiligen Messpunkt  $\vec{p}_i$  und dem definierten Referenzpunkt  $\vec{p}_{\text{ref}}$  wird linear korrigiert. Hierfür wird die Eingabe eines Ausdehnungskoeffizienten des Materials  $\alpha_{\text{W}_o}$  sowie die dazugehörige Abweichung  $\delta\alpha_{\text{W}}$  in der KMG-Software benötigt. Der Vektor der temperaturabhängigen Abweichung  $\vec{e}_{\text{W}\alpha_i}$  [PTB, 2022] zu einem bestimmten Zeitpunkt  $t_i$  ergibt sich zu

$$\vec{e}_{W\alpha_i} = [(\vartheta_W(t_i) - 20,0 \text{ °C}) \cdot \alpha_W + (\vartheta_W(t_i) - \vartheta_{W,\text{Sensor}}(t_i)) \cdot \alpha_{W0}] \cdot (\vec{p}_i - \vec{p}_{\text{ref}}) \quad . \quad (15)$$

Die Gleichung gilt sowohl für die Kompensation zu einem Zeitpunkt  $t_j$  mit der erfassten Temperatur  $\vartheta_{W,\text{Sensor}}$  als auch ohne Temperaturkompensation und wird durch eine entsprechende Fallunterscheidung beeinflusst. Der systematische Einfluss der thermisch bedingten Ausdehnung wird unter Verwendung von  $\vartheta_W(t_j)$  ermittelt. Der systematische Anteil der Längenausdehnung wird vernachlässigt, sobald die Temperatur mit einem Wert von  $20,0 \text{ °C}$  angenommen wird. Hierbei findet nur der Anteil mit Standardmessunsicherheit Verwendung, sodass die Unsicherheit der Kompensation abgebildet wird. Es gilt

$$\vartheta_{W,\text{Sensor}} = \begin{cases} 20,0 \text{ °C}, & \text{ohne Kompensation} \quad , \\ \vartheta_W(t_j), & t_j < t < t_j + 1, \quad \text{mit Kompensation} \quad . \end{cases} \quad (16)$$

## Aufspannung

Die Aufspannung ist bisher im Rahmen des *VCMMGear* für Verzahnungsmessgeräte modelliert [Rost et al., 2016]. Bei diesem speziellen KMG wird davon ausgegangen, dass das Werkstück zwischen zwei Spitzen oder mit einem Backenfutter fixiert wird. Bei der Aufspannung zwischen zwei Spitzen verfügt die entsprechende Verzahnung in der Regel über zwei Zentrierbohrung. Damit kann das Werkstück im Messvolumen von zwei Seiten ausgerichtet und fixiert werden. Bei einem (Drei-)Backenfutter wird das Werkstück einseitig durch Klemmkraft gehalten. Zwei verschiedene Faktoren beeinflussen hierbei eine exakte und reproduzierbare Aufspannung. Der eine Faktor wird vom Messgerät, der andere vom Werkstück bedingt. Das Verzahnungsmessgerät kann eine Exzentrizität zwischen der oberen und unteren Spitze oder des Backenfutters aufweisen. Weiterhin kann das Werkstück über exzentrische Zentrierbohrungen verfügen. Die Einflussfaktoren sind untersucht und modelliert worden [PTB, 2008; Rost, 2017]. Da bei Verzahnungsmessgeräten ein direkter Zusammenhang der Aufspannung zur Bewegung des Drehtisches besteht, sind die Faktoren als zusätzliche Beiträge der Drehtischabweichungen modelliert.

### 2.3.2 Herausforderungen bei der Anwendung am Groß-Koordinatenmessgerät

Die bisherigen Modelle des virtuellen KMG der PTB basieren auf Untersuchungen eines KMG in Portalbauweise [Trapet et al., 1989]. Weiterhin wurden Verifikationsmessungen bei einem Messgerät in Brückenbauweise durchgeführt. Bisher ist die Aufnahme der Geometrieabweichungen für das Starrkörpermodell mit physischen Maßverkörperungen erfolgt. Bei einem Groß-KMG muss dies mit einem anderen Verfahren durchgeführt werden, da physische Referenzobjekte zu klein oder in größerer Ausführung zu instabil sind. Es wird auf ein Messverfahren mit einem interferometrischen Messprinzip zurückgegriffen, welches hochgenaue Längenmessungen von mehreren Metern ermöglicht. Die Wahl der Messstrategie für ein Groß-KMG in Brückenbauweise ist nicht in der Normung festgelegt. Hinweise, die zur Optimierung dienen, sind dem Handbuch zur Software *TracCal* von Hexagon (ehemals Etalon) und den Veröffentlichungen von Kniel und Schwenke [2007] und PTB [2007] zu entnehmen.

Eine geeignete komplette Strategie zur Erfassung der Geometrieabweichungen in Bezug auf die spezifischen Begebenheiten an dem verwendeten Groß-KMG ist jedoch entscheidend, um möglichst kleine Standardmessunsicherheiten der Geometrieabweichungen zu erreichen. Es muss somit eine Strategie aufgestellt werden, die mit möglichst geringem Aufwand reproduzierbare Werte und geringe Standardabweichungen hervorruft. Einen entscheidenden Einfluss auf die Genauigkeit der interferometrischen Messung wird durch die Temperaturverteilung im Messvolumen ausgeübt. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass Erfahrungswerte für kleine Messvolumen mit nahezu homogenen Temperaturen vorliegen. Für das Groß-KMG werden Temperatursensoren angebracht, die es ermöglichen, Aussagen über drei (lineare) Gradienten entlang der Achsen und zu zeitlichen Temperaturänderungen sowie deren Standardmessunsicherheiten zu treffen. Die Parameter, die aus der Interferometermessung hervorgehen, sind meist bereits thermisch kompensiert. Hierbei wird allerdings ein einzelner Temperaturwert ermittelt und als homogene Temperatur entlang des Messstrahls angenommen. Bei großen Messvolumen ist von inhomogenen und eventuell nicht-linearen Temperaturverteilungen auszugehen, sodass sich die Brechzahl  $n_{\text{env}}$  räumlich verändert. Dies hat Auswirkungen auf die Wellenlänge  $\lambda_{\text{env}}$ , welche von der Vakuumwellenlänge  $\lambda_{\text{vac}}$  und der Brechzahl  $n_{\text{env}}$  des Mess- und Referenzstrahls in den durchlaufenen Medien abhängig ist. Die Bestimmung des Messergebnisses müsste sich aus dem Kehrwert der Brechzahl und dem zurückgelegten Weg des Strahls  $s_l$  per Integration ergeben [Hausotte, 2011]. Weiterhin ist in diesem Zusammenhang das Zusammenspiel der einzelnen Parameter des Starrkörpermodells von

Bedeutung. Die in der Modellierung bisher verwendeten Messgeräte haben maximale Achslängen von 2 m, die am Anfang und am Ende gelagert sind. Das gesamte KMG ist häufig auf vier statischen Füßen gelagert. Dahingegen weisen große KMG Lagerungen auf mehreren Füßen auf, welche dynamisch sein können. Die Achsen mit Längen von mehr als 2 m sind beispielsweise an den Bessel-Punkten gelagert, um die Durchbiegung zu minimieren. Die bisherigen Modelle des Verhaltens der Achsen unter thermischen Einfluss, welche auf die Lagerungsvariante der kleinen KMG ausgelegt sind, müssen in dieser Hinsicht überprüft werden. Die Werkstücktemperatur ist bisher mit einem räumlichen Temperaturmittelwert und einer linearen, zeitlichen Temperaturänderung modelliert. Bei großen Massen ist jedoch kein schnelles und gleichmäßiges Temperieren zu erwarten. Eine Betrachtung von nicht-linearen zeitlichen Temperaturänderungen ist bei großen Werkstücken somit notwendig. Weiterhin ist der thermische Einfluss, der bei kleinen, schnell-temperierten Werkstücken nicht gesondert berücksichtigt wurde, von Bedeutung für potentielle Korrekturmaßnahmen. Dies gilt besonders für komplizierte Geometrien, bei denen der Zusammenhang zwischen einer Temperaturveränderung und der thermischen Ausdehnung nicht direkt von einem Ausdehnungskoeffizienten, einem Temperaturunterschied und einer Länge ableitbar ist.

Zuletzt ist die Aufspannung bzw. Lagerung der Werkstücke zu untersuchen, die bei großen und schweren Bauteilen einen entscheidenden Einfluss hat. Aufgrund des hohen Eigengewichts und der großen Abstände zwischen den Lagern entstehen Deformationen. Weiterhin ist eine besondere Handhabung zu bedenken. Aufgrund der großen Massen müssen die Werkstücke mit einem Kran positioniert werden. Manuelle Anpassungen sind nicht möglich. Einige der vorhandenen Modelle können nicht ohne Weiteres für Messungen mit dem Groß-KMG übernommen werden. Diese müssen in Hinsicht auf die genannten Unterschiede überprüft und eventuell abgeändert oder ergänzt werden. In der vorliegenden Arbeit werden daher die folgenden vier Themen betrachtet. Zunächst werden die geometrischen Abweichungen am KMG untersucht, die mit einem interferometrischen Erfassungssystem erfasst werden. Neben der Genauigkeit der eigentlichen Erfassung werden auch die Auswirkungen von langfristigen thermischen Einflüssen auf die Genauigkeit betrachtet, was sich je nach Bauart des KMG unterschiedlich auswirken kann. Weiterhin befassen sich die Untersuchungen mit Verformungen des Werkstücks durch verschiedene Temperatureinflüsse und die Auswirkungen des Eigengewichts bei unterschiedlichen Lagerungsvarianten.

### 3 Groß-Koordinatenmessgerät und Großverzahnungsnormal der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt

Für die Umsetzung des virtuellen KMG der PTB für Messaufgaben großer Dimensionen müssen Einflussfaktoren identifiziert, definiert und modelliert werden, die durch die spezifischen Eigenschaften des Groß-KMG und des Großverzahnungsnormalen auftreten. Detaillierte Untersuchungen sind zur Aufstellung korrekter mathematischer Modelle aller Einflussgrößen und zur Entwicklung geeigneter Verfahren für deren individuelle Erfassung notwendig. Die Erkenntnisse werden ebenfalls für eine potentielle Korrektur von systematischen Anteilen der Messabweichungen verwendet, wodurch die resultierende Messunsicherheit minimiert werden kann. Die betrachteten Einflussfaktoren am Groß-KMG sind die statischen Geometrieabweichungen, die trotz Korrektur bestehen bleiben, und die thermisch bedingten Geometrieabweichungen. Des Weiteren werden Einflussfaktoren des Werkstücks untersucht. Hierzu zählen die Temperatur und die Schwerkraft. Dafür werden theoretische und experimentelle Untersuchungen durchgeführt, welche aufzeigen, in welcher Weise sich der jeweilige Einflussfaktor auswirkt. Zur Untersuchung der angesprochenen Einflussfaktoren wird das Groß-KMG der PTB und das weltweit größte Verzahnungsnormal verwendet.

#### 3.1 Groß-Koordinatenmessgerät der PTB

Das verwendete Groß-KMG (siehe Bild 6) ist ein konventionelles KMG in Brückenbauweise. Das kommerzielle Messgerät der Marke *Leitz* mit der Bezeichnung *PMM-G 50-40-20/B5* hat ein Messvolumen von 5 m in der *X*-Achse, 4 m in der *Y*-Achse und 2 m in der *Z*-Achse. Das Maschinenfundament aus Stahlbeton ist vom Fundament des Gebäudes entkoppelt, indem es auf aktiven Druckluftlagern aufgebaut ist. Zwei Granitwangen tragen die Maßstäbe der *X*-Achsen und die Führungen der Traverse bzw. Brücke. An der Traverse aus Granit ist der Maßstab der *Y*-Achse befestigt sowie die Führung der *Z*-Achse mit der Pinole. Die Pinole wiederum ist aus Keramik gefertigt und trägt den *Z*-Maßstab. Aufgrund der neuartigen Steuerung ist eine Spezifikation der höchstzulässigen Anzeigeabweichung eines KMG für Längenmessung  $MPE_E$  [ISO 10360-1, 2003] von Seiten des Herstellers nicht festgelegt. Die geschätzte Spezifikation des Messgerätes beläuft sich auf  $3,3 \mu\text{m} + 2,5 \mu\text{m}/\text{m}$ . Die vorherrschenden Umgebungsbedingungen des Messraums werden mit Hilfe von acht Lufttemperatursensoren überwacht. Diese sind an den vier vertikalen Kanten des Messvolumens in zwei verschiedenen Höhen angebracht.



Bild 6: Groß-KMG der PTB

Die Überwachung der kontrollierbaren Klimatisierung erfolgt kontinuierlich und weist eine durchschnittliche Temperatur von  $\vartheta_{\text{env}} = 20,0 \text{ }^\circ\text{C}$  über alle räumlich verteilten Temperatursensoren auf. Der räumliche Gradient beläuft sich auf  $\nabla\vartheta_{\text{env}} \leq \pm 0,1 \text{ K/m}$ . Weiterhin existiert eine zeitliche Temperaturänderung mit  $\partial\vartheta_{\text{env}}/\partial t = 0,1 \text{ K/h}$ , welche durch die Regelung der Klimatisierung einen sinusförmigen Verlauf und eine maximale Spanne von  $R_{\vartheta_{\text{env}}} = 0,3 \text{ K}$  aufweist. Bei den Lufttemperatursensoren handelt es sich um  $Pt100$ -Sensoren, welche vom Hersteller mit einer Standardunsicherheit der Temperaturerfassung von  $u_{\vartheta} = 0,1 \text{ K}$  angegeben sind. Ein Kran zur Handhabung der großen und schweren Bauteile befindet sich außerhalb des Messraums in der Anlieferungshalle. Der Transport der Werkstücke in das Messvolumen wird unter Verwendung eines Palettensystems, welches auf eingebrachten Schienen läuft, realisiert. Die verwendeten Paletten (siehe Bild 6) wiegen ungefähr  $3\,000 \text{ kg}$  und werden mit einem druckluftgesteuerten Kreuzfahrwagen bewegt. Ihre Oberfläche besteht aus einzelnen gleichmäßig verteilten Stahlstreben, die sich auf einer Höhe von ca.  $60 \text{ cm}$  befinden. Zwischen der Anlieferungshalle und dem Messraum befindet sich die Vorklimatisierung, in der die Bauteile gelagert und durch eine geregelte Umgebungstemperatur von nahezu  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  vortemperiert werden können.

### 3.2 Großverzahnungsnormal der PTB

Als Beispiel für ein großes Werkstück der Windenergiebranche dient das Großverzahnungsnormal der PTB [Wiemann et al., 2017, 2019b], welches in Bild 7 dargestellt ist. Dieses Referenzobjekt eines großen Zahnrads hat einen zylindrischen, ringförmigen Grundkörper mit einem Außendurchmesser von 1 980 mm und einem Innendurchmesser von 1 685 mm. Das Gewicht beläuft sich auf 2 700 kg.

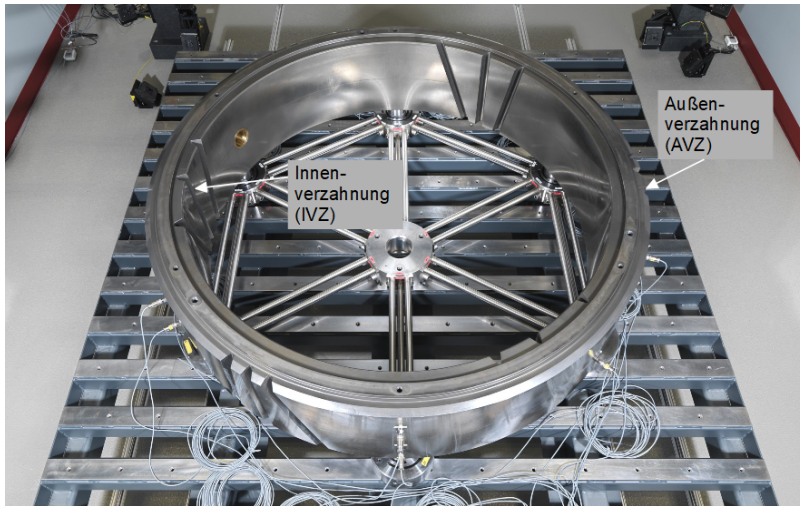


Bild 7: Großverzahnungsnormal als Beispiel eines großen Werkstücks

Am Innen- und Außenzylinder sind jeweils dreimal drei verschiedene Verzahnungselemente verkörpert. Sie sind mit unterschiedlichen Schrägungswinkeln ( $0^\circ$ ,  $10^\circ$  und  $20^\circ$ ) und Steigungsrichtungen (geradverzahnt, linkssteigend,  $l'$  und rechtssteigend,  $r'$ ) versehen, sodass eine Vielzahl von gängigen Zahnrädern abgebildet wird. Ein einzelnes Verzahnungselement verfügt jeweils über eine Links- und eine Rechtsflanke (im Folgenden mit  $L'$  und  $R'$  abgekürzt), welche eine evolventische Profilform besitzen. Die Evolvente ist eine komplizierte Geometrie, die nach Roloff et al. [2009] wie folgt beschrieben ist: „Kreisevolventen sind Kurven, die ein Punkt einer Geraden beschreibt, die auf einem Kreis, dem Grundkreis, abrollt.“ Die nominellen Koordinaten der evolventischen Zahnflanken ergeben sich nach Härtig et al. [2019], indem die Form über den Zusammenhang von dem Grundkreisradius  $r_b$  und dem Schrägungswinkel am Grundkreis  $\beta_b$  mit dem Flankenlinienkoeffizienten  $c$  beschrieben wird als

$$c = \frac{\tan(\beta_b)}{r_b} \quad . \quad (17)$$

Des Weiteren wird die Evolventengleichung ‚inv‘, welche den Zusammenhang zwischen dem Grundkreisradius und der Abwicklung der Evolvente aufstellt, aufgestellt. Die Abwicklung, beschrieben durch den Winkel  $\alpha$ , ist abhängig vom Radius  $r$ , wie in Gleichung (18) aufgezeigt.

$$\text{inv } \alpha(r) = \tan(\alpha(r)) - \alpha(r) = \tan\left(\cos^{-1}\left(\frac{r_b}{r}\right)\right) - \cos^{-1}\left(\frac{r_b}{r}\right) \quad (18)$$

Werden zusätzlich die Faktoren ‚hand‘ für die entsprechende Steigungsrichtung und ‚flank‘ für die Flankenseite verwendet, ergibt sich für die Parametrisierung der Koordinaten der Evolvente die Gleichung zu

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r \cdot \cos(\varphi_b + \text{hand} \cdot c \cdot Z + \text{flank} \cdot \text{inv } \alpha(r)) \\ r \cdot \sin(\varphi_b + \text{hand} \cdot c \cdot Z + \text{flank} \cdot \text{inv } \alpha(r)) \\ Z \end{bmatrix} . \quad (19)$$

Hierbei steht  $\varphi_b$  für die Position der Flanke und  $Z$  für die Höhe, bezogen auf eine definierte Bezugsfläche. Die folgenden Fallunterscheidungen für die Steigungsrichtung

$$\text{hand} = \begin{cases} -1 & : \text{linkssteigend} \\ 0 & : \text{geradverzahnt} \\ +1 & : \text{rechtssteigend} \end{cases} \quad (20)$$

und der Flankenseite

$$\text{flank} = \begin{cases} -1 & : \text{Linksflanke} \\ +1 & : \text{Rechtsflanke} \end{cases} \quad (21)$$

führen dazu, dass die Gleichung (19) allgemeingültig ist. Daraufhin können Koordinaten für jeden Punkt auf der Evolvente einer entsprechenden Verzahnung generiert werden. In direktem Zusammenhang mit der Geometrie der Evolvente stehen die Profil- und Flankenlinien (siehe Bild 8, links). Die entsprechenden Messgrößen sind die Winkel-, Form- und Gesamtabweichung (siehe Bild 8, rechts). Diese werden für die Profile mit  $f_{H\alpha}$ ,  $f_{f\alpha}$ ,  $F_\alpha$  und für die Flankenlinien mit  $f_{H\beta}$ ,  $f_{f\beta}$ ,  $F_\beta$  bezeichnet. Die Verkörperungen von unterschiedlichen Zahnradgeometrien werden bei diesen Untersuchungen messtechnisch berücksichtigt, indem jeweils eine Gruppe der Außenverzahnung (AVZ) und eine der Innenverzahnung (IVZ) erfasst wird. Eine solche Gruppe besteht je aus drei Verzahnungselementen, mit verschiedenen Schrä-

gungswinkeln und Steigungsrichtungen, dessen geometrische Kenngrößen in Tabelle 1 aufgelistet sind.

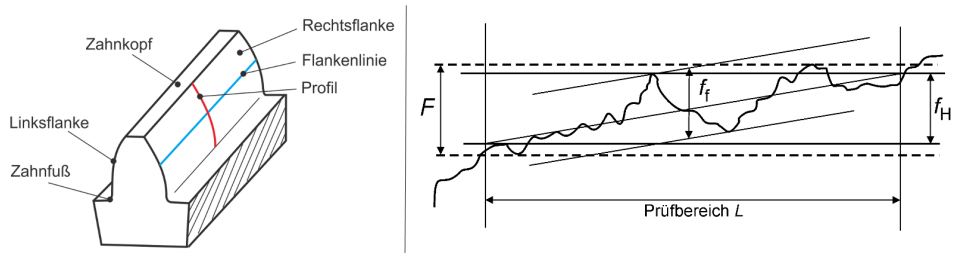


Bild 8: Beschreibung von Profil und Flankenlinie sowie der Verzahnungsmessgrößen Winkel- ( $f_H$ ), Form- ( $f_f$ ) und Gesamtabweichung ( $F$ )

Das werkstückspezifische Koordinatensystem des Großverzahnungsnormals wird über die oberen Prüfbunde (siehe Bild 9) gebildet. Die  $XY$ -Ebene des Werkstückkoordinatensystems wird bestimmt, indem ein Kreis gemessen wird, welcher in  $Z$ -Richtung angetastet wird. Der Normalenvektor der entsprechenden Ausgleichsebene definiert die Bezugsachse.

Tabelle 1: Verzahnungsparameter des Großverzahnungsnormals

Außenverzahnung			
Schrägungswinkel $\beta$ mit Steigungsrichtung	0°	10° r	20° l
Normalmodul $m_n$ in mm	18	18	18
Zähnezahl $z_z$	107	105	101
Normaleingriffswinkel $\alpha_n$ in °	20	20	20
Profilverschiebungsfaktor $x$	0,50	0,69	0,26
Zahnbreite $b$ in mm	420	420	420
Innenverzahnung			
Schrägungswinkel $\beta$ mit Steigungsrichtung	0°	10° l	20° r
Normalmodul $m_n$ in mm	18	18	18
Zähnezahl $z_z$	-95	-93	-89
Normaleingriffswinkel $\alpha_n$ in °	20	20	20
Profilverschiebungsfaktor $x$	-0,31	-0,59	-0,45
Zahnbreite $b$ in mm	424	424	424

Daraufhin erfolgt über eine Kreismessung, die in der XY-Ebene angetastet und als Ausgleichskreis mit Mittelpunkt ausgewertet wird, die Ermittlung der Position der Bezugsachse. Zuletzt wird die Bezugshöhe über einen einzelnen Punkt festgelegt. Hierbei wird unterschieden, ob die Parameter der AVZ oder IVZ gemessen werden sollen. Es wird je ein Koordinatensystem gebildet, das sich ausschließlich in der Bezugshöhe unterscheidet. Die Punkte befinden sich je zwischen der 0°- und 10°-Verzahnung (,AVZ 1' und ,IVZ 1') und wird in Z-Richtung angetastet.

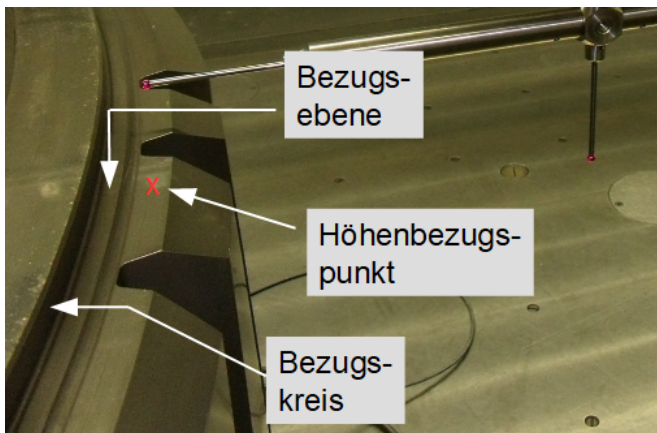


Bild 9: Prüfbunde am Großverzahnungsnormal zur Bildung des werkstückspezifischen Koordinatensystems (Beispiel: ,AVZ 1')

### 3.3 Erfassung der Temperatur des Großverzahnungsnormal

Zur Erfassung der Werkstücktemperatur des Materials des Großverzahnungsnormal [Wiemann et al., 2017] können zwölf Temperatursensoren anhand von Gewindebohrungen ins Werkstückinnere (siehe Bild 7) eingeschraubt werden. Die Sensoren messen die Materialtemperatur  $\vartheta_{M,I}$  bei der halben Wandstärke des Hohlzylinders. Die Verteilung wird in Bild 10 deutlich, indem die Lage der Bohrungen mit Kreisen dargestellt und nummeriert ist. Das Überwachungssystem nimmt die Messwerte alle 15 min auf. Für die Untersuchungen in Abschnitt 5.1 werden weitere sechs Temperatursensoren eines anderen Erfassungssystems an der Oberfläche des Werkstücks angebracht. Diese sind in Bild 10 mit Kreuzen markiert und mit Buchstaben beschriftet. Dieses System erfasst Temperaturwerte an der Oberfläche  $\vartheta_{M,O}$  und speichert diese alle 5 min. Ein weiterer Temperatursensor, der an der Materialoberfläche angebracht werden kann, ist in Bild 10 mit einem ,W' gekennzeichnet. Dieser

ist am KMG integriert und ermöglicht die Erfassung der Werkstücktemperatur  $\vartheta_W$  während des Messprozesses, ausgelöst durch die Anwendersoftware. Dadurch ist eine automatische Kompensation der thermischen Ausdehnung möglich. Bei den Temperaturerfassungssystemen werden  $Pt100$ -Sensoren mit einer Standardunsicherheit der Temperaturerfassung von  $u_{\vartheta} = 0,1 \text{ K}$  verwendet.

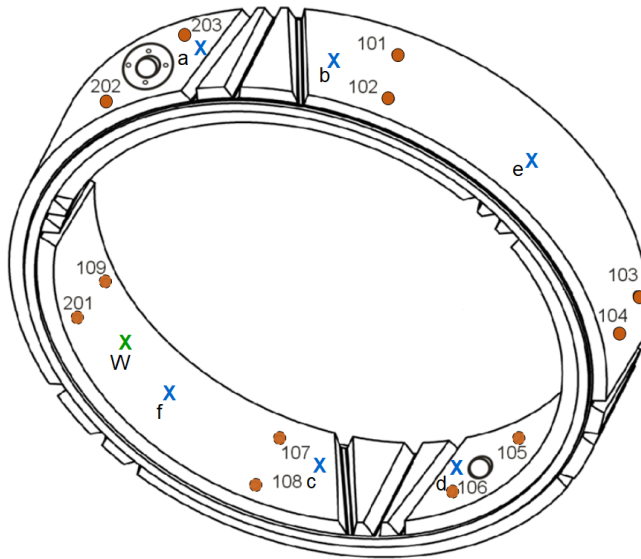


Bild 10: Positionen der Temperaturmesssensoren an der Oberfläche (Kreuze) und im Innern (Kreise) des Werkstücks

### 3.4 Lagerung des Großverzahnungsnormal

Eine definierte und wiederholbare Lagerung des Großverzahnungsnormal ist in zwei verschiedenen Varianten möglich. Die erste Lagerungsvariante erfolgt über eine speziell entworfene und gebaute Auflagevorrichtung mit sechs Füßen [Wiemann et al., 2017]. Die zylindrischen Lagerungsflächen sind alle  $60^\circ$  verteilt und mit Querstreben miteinander sowie mit einem mittigen Zylinder verbunden (siehe Bild 7). Hierzu wurde eine Mischung aus einer Kelvin- und einer Maxwell-Lagerung verwendet. Die V-Nuten sind auseinandergezogen und mit sechs zueinander ausgerichteten  $45^\circ$ -Flächen realisiert. Dabei ist ein Fuß in allen Richtungen fixiert und die anderen sind über Kreuzmembranfedern in einem geringen Maße beweglich. Der Gegenpart zu dem jeweiligen Fuß ist am Großverzahnungsnormal mit Hilfe von Gewindeschrauben fest montiert. Diese Lagerung ist im weiteren Verlauf als

6P-Lagerung bezeichnet. Die zweite Lagerungsvariante besteht aus drei starren Halbkugeln, die fest über Gewindestücke in das Großverzahnungsnormal geschraubt werden, welche an der flachen Seite der Halbkugel integriert sind. Hierbei sind die Lagerungspunkte gleichverteilt, alle  $120^\circ$ , angebracht. Gro-

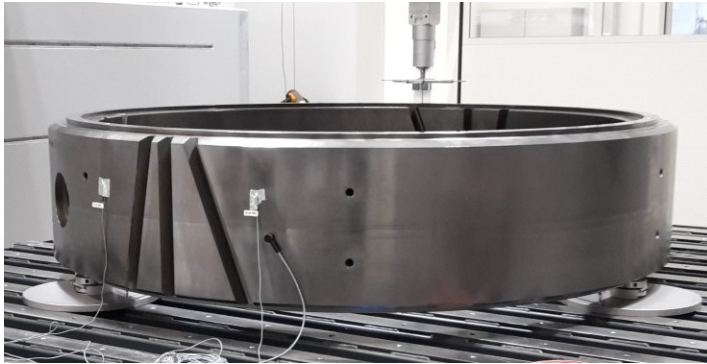


Bild 11: Lagerungsvariante mit drei Auflagern

ße Teller, welche eine Führungsschiene aufweisen, dienen als Auflagefläche des Pols der Halbkugel (siehe Bild 11). Diese Lagerung auf drei Lagerungspunkten, im Folgenden 3P-Lagerung genannt, ist in zwei Stellungen nutzbar. Dies ist möglich, da für die 6P-Lagerung alle  $60^\circ$  Gewindebohrlöcher zum Einschrauben der Füße vorhanden sind. Die Bohrungen sind am Großverzahnungsnormal mit den Buchstaben A - F versehen, sodass eine eindeutige Zuweisung möglich ist. Das Befestigen der Halbkugelfüße ist an den Bohrungen A, C und E (im Folgenden mit ACE betitelt) sowie um  $60^\circ$  versetzt an den Bohrungen B, D und F (im Folgenden BDF genannt) möglich. Die verschiedenen Anbringungsmöglichkeiten sind in Bild 12 markiert.

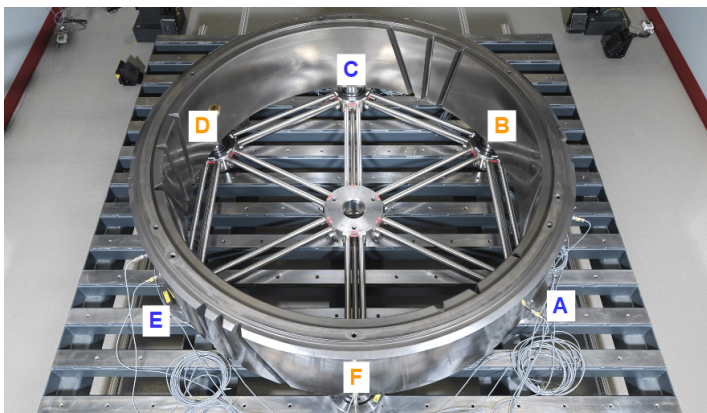


Bild 12: Anbringungsmöglichkeiten der Lagerungspunkte

## 4 Messabweichungen durch das Koordinatenmessgerät

Bei Untersuchungen der Genauigkeit von Messungen in Bezug auf die spezifischen Messabweichungen an einem Groß-KMG spielen die Geometrieabweichungen der Führungen eine entscheidende Rolle [ISO 230-1, 2012]. Die Abweichungen haben bei KMG-Messungen einen großen Einfluss auf die erfassten Koordinaten einer Messaufgabe [Kniel und Schwenke, 2007]. Diese werden hier über 21 Parameter des Starrkörpermodells beschrieben und unter Verwendung eines Referenzobjektes, z. B. Kugel- oder Lochplatten und Parallel- oder Stufenendmaße erfasst, wie in Abschnitt 2.1.2 beschrieben. Eine besondere Herausforderung ergibt sich, wenn die geometrischen Abweichungen der langen Führungen eines Groß-KMG erfasst werden sollen. Hierzu wird bei Achslängen größer 2 m häufig ein interferometrisches Messsystem verwendet. Im Folgenden wird eine Messstrategie zur Erfassung der Geometrieabweichungen am Groß-KMG mit einem solchen Messsystem vorgestellt und verschiedene Einflussfaktoren auf die Erfassung der Parameter untersucht (siehe Abschnitt 4.1). Weiterhin wird der Einfluss von thermischen Veränderungen am KMG und dessen Auswirkungen auf die Geometrieabweichungen (siehe Abschnitt 4.2) betrachtet.

### 4.1 Untersuchung der Erfassung von Geometrieabweichungen mit einem LaserTracer

Einen Anteil der systematischen Geometrieabweichungen des KMG bilden die statischen Abweichungen, die entstehen, da Bestandteile der kinematischen Kette nicht mit absoluter Präzision hergestellt und aufgebaut werden können. In der Regel wird von einem stabilen Aufbau des Messgerätes und einer wiederholbaren Erfassung dieser Werte, die die Maschinenstruktur beschreiben, ausgegangen. Dadurch ist es möglich, für die statischen Abweichungen einen Kompensationsprozess [Schwenke, Neukirch et al., 2010] zu integrieren. Die vorherrschenden Werte der Geometrieabweichungen werden erfasst, als Korrekturwerte gespeichert und für eine automatische Kompensation verwendet. Eine solche Erfassung kann ebenfalls mit aktiver Korrektur erfolgen, um verbliebene Abweichungen zu ermitteln. Die sogenannten Restabweichungen entstehen durch zufällige oder nicht eliminierte systematische Anteile während des Erfassungsprozesses und wirken sich auf die Messung von Werkstücken aus. Die erfassten Werte und die Messunsicherheiten der (Rest-)Abweichungen werden für den virtuellen Messprozess verwendet. Für die folgenden Untersuchungen werden die

Geometrieabweichungen am Groß-KMG mit einem nachführenden interferometrischen Messsystem zur hochgenauen Längenbestimmung [Kniel, 2007] erfasst. Das Laserinterferometer ‚LaserTRACER-NG‘ (siehe Bild 13), im Folgenden als LaserTracer (LT) bezeichnet, wird mit der dazugehörigen Mess- und Auswertesoftware *TracCal* von der Firma Hexagon AB (ehemals Etalon AG) vertrieben. Die Erfassung der Geometrieabweichungen erfolgt anhand der sequentiellen Multilateration [Schwenke, Franke et al., 2005]. Bei der Multilateration wird aus mindestens drei Längenmessungen, die gleichzeitig von unterschiedlichen Positionen aus aufgenommen werden, die Position eines Messpunktes ermittelt. Bei der sequentiellen Methode wird das interferometrische Messsystem nacheinander an verschiedenen Positionen im Messvolumen aufgebaut, von denen die Messungen einer gleichbleibenden Punktmenge, die vom KMG für jede Position des LT erneut angefahren wird, erfolgen.



Bild 13: ‚LaserTRACER-NG‘ - ein nachführendes interferometrisches Längenmesssystem

Zur Erfassung der Geometrieabweichungen sind die Messpunkte, die sogenannten Stützstellen, den Positionen des LT in der dazugehörigen Konfiguration individuell zugeordnet. Für die interferometrische Längenmessung muss ein Reflektor anstelle des Tastelementes befestigt werden, dessen Versatz zum Bezugspunkt der Pinole jedoch in gleicher Weise berücksichtigt wird. In dem Messprozess wird jede Punktcoordinate einer Stützstelle vom KMG und gleichzeitig die dazugehörige Längenmessung vom LT erfasst. Daraufhin kann mit den ermittelten Informationen ein Gleichungssystem aufgestellt werden. Wenn dieses mit Hilfe der Ausgleichsrechnung erfolgreich gelöst wird,

folgt die Ermittlung der einzelnen Werte anhand eines Fehlertrennverfahrens. Die dazugehörigen Messunsicherheiten der geometrischen Abweichungen werden mit der MCS ermittelt. In Abschnitt 4.1.1 werden die Auswirkungen der Positionierung des LT und die Verteilung der Stützstellen simuliert, um eine optimierte Strategie zu finden, die möglichst kleine Messunsicherheitsbeiträge für die Geometrieabweichungen aufweist. Darüber hinaus wirken bei dem Erfassungsprozess verschiedene Einflüsse auf die interferometrische Längenmessung, welche zu systematischen Messabweichungen der gesuchten Parameter führen können. Hierzu zählen beim Interferometer hauptsächlich die Temperatur, der Luftdruck und die relative Feuchte [Edlen, 1966]. In Abschnitt 4.1.2 wird die Auswirkung des Temperatureinflusses untersucht, da dieser den größten Messunsicherheitsbeitrag bei der Bestimmung der Brechzahlkompensation aufweist [Meiners-Hagen et al., 2010]. Weiterhin wird die Auswirkung der Geometrieabweichungen auf die Messabweichungen und Messunsicherheit an zwei Beispielen von Messaufgaben in Abschnitt 4.1.3 betrachtet.

#### 4.1.1 Messtechnische Optimierung einer Erfassungsstrategie

Zur Optimierung der Erfassung von Geometrieabweichungen mit dem LT wird zunächst die Strategie in Bezug auf verschiedene Positionen des LT und Verteilungen der Stützstellen untersucht. Hierzu wurden Simulationen mit der Software *TracCal* (Version 4.1 - 4.6 von Etalon AG) durchgeführt, die ebenfalls im Mess- und Auswerteprozess verwendet werden. Dies führt dazu, dass systematische Einflüsse der Erfassungsstrategie erkannt und minimiert werden, sodass eine optimierte Strategie mit möglichst kleinen Messunsicherheiten entsteht. Die gesuchte Messstrategie zur Erfassung der Geometrieabweichungen soll dabei möglichst einfach und schnell umzusetzen sein. Der wirtschaftliche Aspekt ist hierbei von besonderer Bedeutung für die Industrie. Zusätzlich ist die Dauer der Erfassung wichtig, um eine gewisse Stabilität des Messsystems zu gewährleisten.

Im Folgenden wird somit anhand einer möglichen Strategie aufgezeigt, wie systematische Beiträge durch die LT-Positionen und die Stützstellenverteilung in die Messunsicherheitsermittlung einfließen und wie sie reduziert werden können. Bei der Simulation wird eine für die Parametererfassung konfigurierte Messstrategie verwendet, um Messunsicherheiten zu ermitteln. Dabei dienen die Längen, welche aus den Positionen des LT und den definierten Stützstellen berechnet werden, als Grundlage. Die Simulationen erfolgen mit der MCS unter Berücksichtigung der Längenmessunsicherheit bei den Messungen mit einem LT und einem Reflektor am KMG. Im Folgenden gilt ein fester Anteil von  $0,2 \mu\text{m}$  und ein längenabhängiger Anteil von  $0,3 \mu\text{m}/\text{m}$  als

Längenmessunsicherheit des verwendeten Messsystems. Der virtuelle Erfassungsprozess in *TracCal* enthält im festen Anteil die Standardunsicherheit der Temperaturerfassung des am LT integrierten Temperaturmesssystems und die Messunsicherheit der Kalibrierung des Interferometers. Darin kann ebenfalls die Reflektor-Exzentrizität berücksichtigt werden, die in diesem Fall vernachlässigt wird, da sie konstant und für den Optimierungsprozess der Strategie nicht relevant ist. Zusätzlich kann eine Standardunsicherheit für den Reflektor-Offset einbezogen werden, die der Genauigkeit des manuell gemessenen Offsets entspricht, die ebenfalls als konstant angenommen wird. Der längenabhängige Term trägt jedoch am meisten zur Messunsicherheitsermittlung der Erfassungsstrategie am Groß-KMG bei, da die Position des LT und die der Stützstellen zu sehr unterschiedlichen Längenmessungen führen, die mit großen Längen von bis zu 6,7 m einfließen können. Die Simulation wird mit einer definierten Anzahl an Schleifendurchläufen durchgeführt. In den folgenden Untersuchungen ist die Anzahl auf  $n = 500$  gesetzt. Hierbei treten in fünf unabhängigen Wiederholungen des Berechnungsprozesses für die Messunsicherheiten der Geometrieabweichungen maximale Schwankungen von  $0,1 \mu\text{m}$  und  $0,1 \mu\text{rad}$  auf. Bei den folgenden Simulationen und Messungen ist das gewählte Volumen angepasst an die Gegebenheiten am Groß-KMG der PTB. Das aktiv genutzte Messvolumen ist definiert mit 4 900 mm Länge in X-Richtung, einer Ausdehnung von 3 600 mm in Y-Richtung und mit einer Länge von 1 750 mm in der Z-Achse. Der Abstand der Stützstellen beläuft sich auf 245 mm in der X-Achse, 200 mm in der Y-Achse und 175 mm in der Z-Achse. Die Abstände erfüllen die Anforderungen der Richtlinie VDI/VDE 2617-2.1 [2014], welche besagt, dass der Abstand zwischen zwei Stützstellen maximal 500 mm oder 10 % der Achslänge betragen darf. Zum Lösen des Gleichungssystems der Multi-Iteration sind bei der Aufnahme der Koordinaten und Längen, welche als Eingangsparameter dienen, Randbedingungen zu beachten.

Für das reduzierte Starrkörpermodell ‚reduced rigid body‘ (RRB) mit 17 Parametern muss der Reflektor so nah wie möglich am Referenzpunkt der Pinole (z. B. durch den Tastkugelmittelpunkt eines Referenz-tasters definiert) angebracht sein. Es ist notwendig von mindestens drei unterschiedlichen Positionen aus zu messen. Dabei muss eine Mehrfachbestimmung einer gewissen Anzahl an Stützstellen bei den verschiedenen Positionen vorhanden sein. Zur Berechnung des vollständigen Starrkörpermodells, auch ‚full rigid body‘-(FRB) genannt, sind zusätzliche Messungen mit seitlich auskragendem Reflektor erforderlich. Daraufhin ist es möglich die vier fehlenden rotatorischen Abweichungen zu bestimmen, sodass alle 21 Geometrieabweichungen ermittelt werden können. Um eine repräsentative Erfassung der Abweichungen des Messvolumens zu erhalten, ist es sinnvoll, die Stützstellen über den

größtmöglichen Raum zu verteilen. Eine einfache Anordnung wird erzeugt, wenn die Stützstellen in Linien entlang der Achsen definiert werden. Für eine Position folgt daraus, dass die Messpunkte sich auf einem quaderförmigen Rahmen befinden, der parallel zu den Achsen des Messgerätes ausgerichtet ist. Eine Positionierung des LT in den Ecken des Rahmens gewährleistet, dass viele Stützstellen mit einer hohen Genauigkeit erfasst werden können, da sie in Richtung des Messstrahls liegen. Bei Aufbauten des LT in den Ecken ergibt sich der Vorteil, dass die Genauigkeit der erfassten Stützstellen nahezu gleichmäßig ist [Wendt et al., 2001]. Weiterhin ergibt sich, dass die Erfassung der Stützstellen in Messstrahlrichtung dazu führt, dass die Messabweichungen getrennt ermittelt werden können [Schwenke, Franke et al., 2005]. Soweit es möglich ist, beinhalten alle Eckpositionen die gleichen Stützstellen, sodass die Beobachtungen aus mindestens drei verschiedenen Richtungen erfolgen und zur Multilateration beitragen können. Die Position des LT ist bei den individuell zugewiesenen Stützstellen jeweils vom Rahmen ausgeschlossen (siehe Bild 14, links), sodass der Reflektor des KMG nicht mit dem entsprechend positionierten LT kollidiert.

### **Simulationen - Reduziertes Modell**

Zu Beginn werden die Untersuchungen auf das reduzierte Starrkörpermodell beschränkt. Der Versatz des Reflektors zum Referenzpunkt der Pinole beträgt in diesem Fall 90 mm in Z-Richtung. Die Positionen des LT werden teilweise in unterschiedlichen Höhen aufgebaut, sodass die Beobachtungen unter veränderten Elevationswinkeln des LT stattfinden. Im Folgenden werden 13 verschiedene Varianten untersucht (entsprechend Spalte 1 - 3 in Tabelle 2). In den ersten neun Varianten sind alle vier Positionen des LT in den Ecken des Messvolumens berücksichtigt. Bei den ersten fünf Varianten sind alle Positionen auf einer einheitlichen Höhe  $H_1$  aufgebaut, welche zwischen den Varianten verändert wird. In den Varianten 6 bis 9 sind zwei unterschiedliche Aufbauhöhen in einem Messablauf integriert (siehe Bild 14, links). Hierbei befinden sich die Positionen LT 2 und LT 3 in einer konstanten Höhe von  $H_1 = 300$  mm und die Positionen LT 1 und LT 4 in einer Höhe  $H_2$ , welche zwischen den Simulationsvarianten verändert wird. Zuletzt werden in den Simulationen 10 bis 13 die Anzahl der verwendeten Positionen variiert, indem nacheinander je eine Position ausgelassen wird. Die Ergebnisse der verschiedenen Varianten sind in Tabelle 2 dargestellt. Hierbei werden jeweils die größten Werte der ermittelten Messunsicherheiten aufgelistet. Sobald der Maximalwert bei mehreren Abweichungen auftritt, ist dies mit ‚var.‘ gekennzeichnet. Die Werte sind den translatorischen und rotatorischen Geometrieabweichungen zugewiesen. Aus den Varianten 1 bis 5 lässt sich ableiten, dass die Messstrategie mit einer Aufbauhöhe von

#### 4 Messabweichungen durch das Koordinatenmessgerät

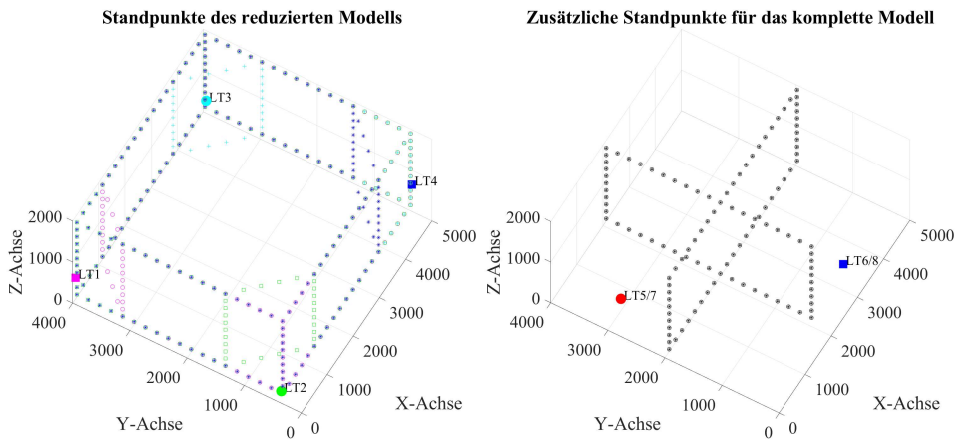


Bild 14: Skizze zur Lage der LT-Positionen und Stützstellen für das reduzierte (Variante 6, links) und zusätzliche LT-Positionen und Stützstellen für das komplette Starrkörpermodell (Variante 18, rechts) am Groß-KMG

300 mm und 1 000 mm die größten Messunsicherheiten hat. Dies lässt sich anhand von schlechten Schnittbedingungen erklären. Dahingegen führt eine Aufbauhöhe von 2 000 mm zu den kleinsten Messunsicherheiten für die Geometrieabweichungen. Eine ähnlich geringe Größenordnung wie bei Variante 5 kann erreicht werden, wenn zwei Aufbauhöhen kombiniert verwendet werden, wie in den Varianten 6 bis 9. Dies ist eine entscheidende Erkenntnis, da ein statisch stabiler Aufbau mit  $H_1 = 2\,000\text{ mm}$  mit den vorhandenen Ressourcen nicht realisierbar ist. Die maximal realisierbare Aufbauhöhe beträgt  $H_1 = 1\,365\text{ mm}$  (siehe Variante 7). Zuletzt ergibt sich aus den Simulationen der Varianten 10 bis 13, dass alle Positionen aufgrund der größeren Überbestimmung berücksichtigt werden sollten, wobei die kleinsten Messunsicherheiten ermittelt werden.

### Simulationen - Vollständiges Modell

Für das vollständige Parametermodell müssen Positionen integriert werden, welche einen Reflektor mit Versatz in Richtung der X- oder Y-Achse verwenden. Unter Zuhilfenahme eines auskragenden Reflektors können die Rotationen der Z-Achse bestimmt werden. Es handelt sich um die Abweichungen  $\Delta\varphi_{y,r,z}$ ,  $\Delta\varphi_{z,r,x}$ ,  $\Delta\varphi_{z,r,y}$  und  $\Delta\varphi_{z,r,z}$ . Wenn der Reflektor-Versatz bereits bei den Messungen der Eckstandpunkten des reduzierten Modells verwendet wird, ist das Lösen des Gleichungssystems nicht möglich. Es sind somit zwingend zusätzliche Positionen zu berücksichtigen. Auf Basis der

Tabelle 2: Übersicht der Simulationsvarianten des RRB mit den maximalen Messunsicherheiten der Geometrieabweichungen

	Position LT				Höhe in mm		transl.	Wert	rotat.	Wert
	1	2	3	4	$H_1$	$H_2$	Abw.	in $\mu\text{m}$	Abw.	in $\mu\text{rad}$
1	x	x	x	x	300	-	$\Delta z_{t,z}$	35,5	var.	<0,6
2	x	x	x	x	750	-	$\Delta z_{t,z}$	3,2	var.	<0,6
3	x	x	x	x	1000	-	$\Delta z_{t,z}$	38,9	var.	<0,6
4	x	x	x	x	1500	-	$\Delta z_{t,z}$	9,7	var.	<0,6
5	x	x	x	x	2000	-	$\Delta z_{t,z}$	1,2	var.	<0,6
6	x	x	x	x	300	750	$\Delta x_{t,z}$	1,2	var.	<0,6
7	x	x	x	x	300	1365	$\Delta x_{t,z}$	1,3	var.	<0,6
8	x	x	x	x	300	1500	$\Delta x_{t,z}$	1,3	var.	<0,6
9	x	x	x	x	300	2000	$\Delta x_{t,z}$	1,2	var.	<0,6
10	-	x	x	x	300	750	$\Delta x_{t,z}$	1,7	$\Delta\varphi_{y,r,x}$	0,7
11	x	-	x	x	300	750	$\Delta x_{t,z}$	3,2	$\Delta\varphi_{x,r,x}$	0,9
12	x	x	-	x	300	750	$\Delta x_{t,z}$	1,6	$\Delta\varphi_{y,r,x}$	0,6
13	x	x	x	-	300	750	$\Delta x_{t,z}$	3,8	$\Delta\varphi_{x,r,x}$	1,0

Variante 6 des RRB wird die Konfiguration um weitere Positionen ergänzt und die entsprechenden Simulationen durchgeführt. Um die Stützstellen und damit den messtechnischen Aufwand auf ein Minimum zu reduzieren, wurde lediglich eine XZ- und eine YZ-Ebene generiert, die ungefähr mittig platziert sind (siehe Bild 14, rechts). In den Varianten 14 bis 16 sind zwei zusätzliche LT-Positionen eingebunden. Variante 14 weist einen Versatz des Reflektors für die Position LT 5 in positiver und für LT 7 in negativer X-Richtung auf. Analog dazu ist Variante 15 mit Reflektor-Versätzen in positiver und negativer Y-Richtung erfolgt. In Variante 16 ist eine Position mit einem Reflektor-Versatz in X- und eine mit einem Versatz in Y-Richtung integriert. Danach erfolgen Simulationen mit vier zusätzlichen Messdurchläufen, die Messungen von zwei weiteren Positionen für den LT und je Versatz in beiden Achsrichtung beinhalten. Zwischen Variante 17 und 18 verändert sich die Achsrichtung der Reflektor-Versätze. Zuletzt wird in Variante 19 ein längerer Reflektor-Versatz mit 1 000 mm betrachtet. Hierbei werden die Positionen LT 5 und LT 7 in der Höhe  $H_2 = 750$  mm und LT 6 und LT 8 in der Höhe  $H_1 = 300$  mm aufgebaut. Die Simulationen führen zu den Ergebnissen in Tabelle 3.

Tabelle 3: Übersicht der Simulationsvarianten verschiedener Versätze für das FRB mit den maximalen Messunsicherheiten der Geometrieabweichungen

	Position LT mit Versatz-Richtung				Versatz in mm		Abw. in $\mu\text{m}$		Abw. in $\mu\text{rad}$	
	5	6	7	8	in X	in Y	transl.		rotat.	
14	+X	-	-X	-	400	-	$\Delta x_{t,x}$	0,9	$\Delta\varphi_{z,r,x}$	13,2
15	+Y	-	-Y	-	-	400	$\Delta x_{t,x}$	0,9	$\Delta\varphi_{z,r,y}$	13,8
16	+X	-	+Y	-	400	400	var.	<0,9	$\Delta\varphi_{x,r,z}$	8,9
17	+X	+Y	+X	+Y	400	400	$\Delta x_{t,x}$	0,8	$\Delta\varphi_{z,r,x}$	3,5
18	+X	+Y	-X	-Y	400	400	$\Delta x_{t,x}$	0,9	$\Delta\varphi_{z,r,x}$	3,6
19	+X	+Y	-X	-Y	1000	1000	$\Delta x_{t,x}$	0,8	$\Delta\varphi_{x,r,y}$	1,8

Aus den Simulationen mit erweiterter Messstrategie geht hervor, dass eine Minimierung der Messunsicherheiten der translatorischen Werte unter Verwendung eines Tastelementversatzes erfolgt. Die weiteren vier rotatorischen Abweichungen können mit der Erweiterung der Strategie um zwei Messdurchläufe erstmals ermittelt werden. Bei einem Versatz in einer einzigen Koordinatenachse (Variante 14 und 15) ergeben sich große Messunsicherheiten für die Verkipfung der Z-Achse um die X- ( $\Delta\varphi_{z,x}$ ) oder Y-Achse ( $\Delta\varphi_{z,y}$ ). Dies kann mit Hilfe von auskragenden Reflektoren in beiden Achsrichtungen (Variante 16) reduziert werden. Sobald vier weitere Messdurchläufe von zwei zusätzlichen LT-Positionen mit jeweils beiden Versätzen wie in den Varianten 17 bis 19 eingebunden werden, ergibt sich eine verringerte Messunsicherheit. Um den Aufwand der Positionierungen zwischen den Messdurchläufen der einzelnen Positionen gering zu halten, werden von einer Position ausgehend zwei Messdurchläufe durchgeführt. Dabei wird die LT-Position (LT 5/LT 7) beibehalten, aber die Achsrichtung des Reflektors wird gewechselt.

Für die folgenden Simulationen wird der Vorgang auf einer weiteren Position (LT 6/LT 8) wiederholt. Eine Reduzierung der Messunsicherheit der rotatorischen Abweichungen um 60 % auf maximal 3,6  $\mu\text{rad}$  wird bei der Verwendung von vier zusätzlichen LT-Positionen bzw. Reflektorkonfigurationen in Variante 17 und 18 ermöglicht. Eine weitere Minimierung kann theoretisch mit einem längeren Versatz erreicht werden, wie Variante 19 aufzeigt. Solch ein Aufbau ist jedoch für die Messung nicht realisierbar, da die Pinole dabei das Messvolumen verlassen müsste. Weiterhin ist die Stabilität des Aufbaus nicht ausreichend gewährleistet. Dennoch führt diese Simulation zu der Erkenntnis, dass ein möglichst langer Tastelementversatz

verwendet werden sollte. Ein stabiler Aufbau mit vorhandenen Mitteln ist bei einer Versatzlänge von 400 mm möglich.

Standpunkte des LT und Stützstellen des reduzierten Modells der Doppelkreuzform

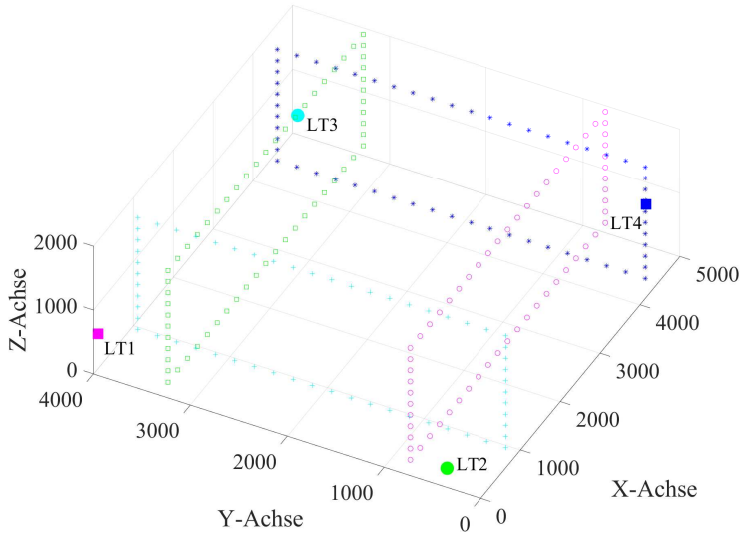


Bild 15: Angepasste Strategie zur interferometrischen Erfassung der Parameter des reduzierten Modells in Doppelkreuzform

Beim Groß-KMG der PTB wurde nachträglich ein weiterer metrologischer Rahmen an drei Granitsäulen in den Ecken des Messvolumens integriert. Dadurch müssen die Positionen des LT vom RRB nach Innen versetzt werden. Die Ebenen der Rahmen, die zuvor am äußersten Rand des Messvolumens lagen, werden ebenfalls verschoben, sodass eine Doppelkreuzform entsteht (siehe Bild 15). Dies ermöglicht weiterhin, dass die Rahmen die kompletten Achslängen abdecken. Die Konfiguration der zusätzlichen Positionen mit Reflektor-Versatz bleiben unverändert. Die simulierten Werte liegen bei maximal  $\Delta x_{t,x} = 0,8 \mu\text{m}$  und  $\Delta \varphi_{z,y} = 2,8 \mu\text{rad}$ .

## Messung

Für das reduzierte und vollständige Starrkörpermodell werden Messungen mit den ermittelten Strategien 7 und 18 durchgeführt. Hierbei werden die geplanten Stützstellen vom KMG angefahren und sowohl die Koordinatenbestimmung vom Groß-KMG als auch eine Längenmessung vom LT gespeichert. Im Gegensatz zu der Berechnung der Simulationen werden bei der Ausgleichung neben den Messunsicherheiten auch Werte für die Geome-

trieabweichungen ermittelt. Diese ergeben sich aus den Differenzen zwischen der sequentiellen Multilateration basierend auf den Soll-Koordinaten, den interferometrischen Längenmessungen und den erfassten Punktkoordinaten, die vom KMG zurückgemeldet werden. Weiterhin berücksichtigt die MCS zusätzliche Beiträge zur Messunsicherheitsermittlung, die sich während des Messprozesses ergeben. Dies sind sowohl die Abweichungen bei der Koordinatenbestimmung des Groß-KMG als auch die der Längenermittlung des LT. Bei dem Messdurchlauf der entwickelten Strategie des RRB nach Variante 7 müssen Anpassungen an der Konfiguration stattfinden. Diese entstehen durch die tatsächlich vorherrschenden Sichtbedingungen. Zusätzlich fließen zufällige Abweichungen weiterer Einflussfaktoren des KMG mit ein. Es ergeben sich abweichende Messunsicherheiten zu den Simulationen, welche für die translatorischen Abweichungen Maximalwerte von  $1,7 \mu\text{m}$  für  $\Delta x_{t,z}$  und von  $1,4 \mu\text{m}$  für  $\Delta x_{t,x}$  erreichen. Die rotatorischen Parameter weisen Messunsicherheiten kleiner  $0,8 \mu\text{rad}$  auf. Die Messungen des FRB erfolgen mit einer Reflektorkonfiguration der Variante 18. Die verwendete Positionierung beinhaltet Aufbauhöhen von  $H_1 = 300 \text{ mm}$  und  $H_2 = 1365 \text{ mm}$ . Die Auswertung liefert Messunsicherheiten mit Werten bis zu  $1,2 \mu\text{m}$  in den translatorischen und bis zu  $5,0 \mu\text{rad}$  in den rotatorischen Abweichungen. Abschließend stellt sich für das Groß-KMG der PTB eine Strategie mit acht LT-Positionen als die mit den kleinsten Messunsicherheiten heraus. Bei den Standpunkten in den Ecken des Messvolumens sind die LT in zwei unterschiedlichen Höhen positioniert. Der Reflektor ist hierbei mittig, mit möglichst wenig Z-Versatz an der Pinole befestigt. Die restlichen vier Messdurchläufe werden von zwei unterschiedlichen Positionen des LT aus durchgeführt, wobei pro Position jeweils eine Messung mit X- und eine mit Y-Versatz des Reflektors eingebunden wird. Die resultierenden Messunsicherheiten für alle Geometrieabweichungen sind in Tabelle 4 für die Werte der Simulation der angepassten Messstrategie und für die der eigentlichen Messung gegenübergestellt. Die Messunsicherheiten der Parameter der Messung sind wie erwartet höher als die der Simulation, da sich hierbei die Umgebungsbedingungen für die Längenbestimmung des LT und die Einflüsse des KMG auswirken. Insbesondere die rotatorischen Abweichungen sind hiervon betroffen. Dies liegt daran, dass diese schwieriger zu erfassen sind und empfindlicher auf Widersprüche in der Auswertung der Ausgleichsrechnung reagieren. Das wird besonders deutlich, bei den Abweichungen, bei denen die Z-Achse beteiligt ist. Diese liefert im Vergleich zu den anderen Achsen, am wenigsten Informationen für die Ausgleichsrechnung. Durch die eingeschränkte, maximale Aufbauhöhe ergeben sich größere Messunsicherheiten der Parameter  $\Delta\varphi_{y,z}$ ,  $\Delta\varphi_{z,x}$  und  $\Delta\varphi_{z,y}$ .

Tabelle 4: Übersicht der in *TracCal* simulierten Messunsicherheiten aller Parameter der geplanten und durchgeführten Messstrategie

transl. Abw.	Wert in $\mu\text{m}$		rotat. Abw.	Wert in $\mu\text{rad}$	
	Simulation	Messung		Simulation	Messung
$\Delta x_{t,x}$	0,8	1,2	$\Delta\varphi_{x,r,x}$	0,3	0,4
$\Delta y_{t,y}$	0,5	0,9	$\Delta\varphi_{x,r,y}$	0,4	0,6
$\Delta z_{t,z}$	0,4	0,7	$\Delta\varphi_{x,r,z}$	0,3	0,4
$\Delta x_{t,y}$	0,5	0,9	$\Delta\varphi_{y,r,x}$	0,4	0,5
$\Delta x_{t,z}$	0,8	1,2	$\Delta\varphi_{y,r,y}$	0,4	0,6
$\Delta y_{t,x}$	0,5	0,8	$\Delta\varphi_{y,r,z}$	1,9	2,7
$\Delta y_{t,z}$	0,7	1,0	$\Delta\varphi_{z,r,x}$	2,6	5,0
$\Delta z_{t,x}$	0,3	0,4	$\Delta\varphi_{z,r,y}$	2,3	3,3
$\Delta z_{t,y}$	0,3	0,4	$\Delta\varphi_{z,r,z}$	0,9	1,2
			Rechtw.		
-	-	-	$\Delta\varphi_{x,y}$	0,1	0,2
-	-	-	$\Delta\varphi_{x,z}$	0,2	0,2
-	-	-	$\Delta\varphi_{y,z}$	0,2	0,2

#### 4.1.2 Einfluss von Temperaturgradienten auf die interferometrische Erfassungsstrategie

Die erfassten, restlichen Geometrieabweichungen enthalten möglicherweise trotz Korrektur weitere systematische Anteile, die auf den interferometrischen Erfassungsprozess zurückzuführen sind. Für eine genaue Interferometermessung ist die Brechzahlkorrektur [Edlen, 1966] wichtig. Die Brechzahl ist beeinflusst von der Umgebungstemperatur, dem Luftdruck, der Luftfeuchte und dem  $\text{CO}_2$ -Gehalt der Luft. Der Einfluss der Temperatur ist dabei maßgeblich [Meiners-Hagen et al., 2010], da diese bei Veränderungen die größte Wirkung auf die Brechzahl haben. Besonders in der fertigungsnahen Industrie sind zeitliche Temperaturänderungen und bei großen Messvolumen räumliche Temperaturänderung anzunehmen. Die beiden nächststärksten Einflüsse, der Luftdruck und die relative Luftfeuchte, können vor diesem Hintergrund verhältnismäßig als vernachlässigbar gelten, da es sich um geschlossene Räume handelt. Bei der Erfassung der Geometrieabweichungen mit einem LT wird die Temperatur von dem interferometrischen Messsystem über einen kabelgebundenen Temperatursensor erfasst. Dieser einzelne Sensor kann

mit einem Abstand von ungefähr 1,5 m zum LT im Messvolumen einmal pro Position platziert werden. Der dort gemessene Wert wird zur automatischen Korrektur der Brechzahl und damit der Längenermittlung verwendet. Die Standardunsicherheit der Temperaturerfassung ist als resultierender zufälliger Abweichungsanteil in der angegebenen Spezifikation der Längenmessung berücksichtigt. Systematische Anteile können dadurch entstehen, dass die punktuell erfasste Temperatur nicht die individuellen Temperaturverteilungen entlang der vielen Messstrecken von einer LT-Position wiedergibt. Dies ist im Fall der vorgestellten Messungen am Groß-KMG anzunehmen, da Messlängen von bis zu 6,33 m in verschiedenen Richtungen durch das Messvolumen verlaufen. Dementsprechend ist die Messwertaufnahme des Temperatursensors an einer diskreten Stelle nicht ausreichend, insbesondere wenn keine stabile Klimatisierung vorherrscht, wie es in einem industriellen Umfeld anzunehmen wäre. Die Parameter, die bei einer mangelhaften Abbildung der Temperaturverteilung und dadurch mit unvollständiger Kompensation entstehen, sind unabhängig von der tatsächlichen Struktur der Maschine. Sie entsprechen nicht den thermischen Geometrieabweichungen, die durch eine thermisch bedingte Verformung des Messgerätes entstehen. Diese werden in Abschnitt 4.2.3 betrachtet. Die Temperaturdifferenzen im Messraum des Groß-KMG der PTB sind mit einer räumlichen Spanne über alle Temperaturmesswerte von  $R_{\vartheta_{\text{env}}} = 0,1 \text{ K}$  und einer zeitlichen Schwankung der mittleren Temperatur im Messraum von bis zu  $0,3 \text{ K}$  sehr gering und die Verteilung nahezu homogen. Bei Messungen an KMG in fertigungsnaher Umgebung in der Industrie oder bei Werkzeugmaschinen kann dies nicht vorausgesetzt werden. Hierbei ist von inhomogenen und stark schwankenden Temperaturverteilungen auszugehen. Um die Auswirkungen des Temperatureinflusses auf die Längenmessungen und die daraus abgeleiteten Geometrieabweichungen abzuschätzen, werden künstlich Testdaten generiert. Dazu wird der thermische Einfluss auf die Längenmessung errechnet, auf die idealen Längen addiert und mit der Software *TracCal* wie gewohnt ausgewertet. Die Berechnung der thermisch veränderten Längen sowie das Erstellen der Messdatei erfolgt mit *Matlab* (Version R2012b). Dabei wird der Einfluss der Lufttemperatur  $\vartheta_{\text{env}}$  als Differenz zur Referenztemperatur  $\vartheta_{\text{ref}} = 20,0 \text{ °C}$  auf die thermisch beeinflusste Brechzahl  $n_{\text{temp}}$  und damit als Effekt auf die Längenmessung mit

$$\Delta n_{\text{temp}}(\Delta \vartheta_{\text{env}} = +1 \text{ K}) \approx -1 \cdot 10^{-6} \quad (22)$$

nach Meiners-Hagen et al. [2010] vereinfacht dargestellt. Als Annahme einer einfachen, aber aussagekräftigen Simulation werden drei lineare Gradienten verwendet. Die Temperaturgradienten, die je Achse einen Wert zugeordnet bekommen, bleiben über den kompletten, virtuellen Messverlauf konstant.

Es wird keine Korrektur der Brechzahl durchgeführt, sodass der Einfluss in vollem Umfang dargestellt wird. Die erzeugten Daten basieren auf der, am Ende von Abschnitt 4.1.1, gewählten Messstrategie. Hierbei werden die gespeicherten Positionsangaben des Groß-KMG als ideal angenommen, da es an mehreren Stellen der Achsmaßstäbe Temperatursensoren zur automatischen Kompensation besitzt. Zusätzlich gilt, dass eine Veränderung der Messgerätemperatur bei kurzfristigen Veränderungen der Umgebungstemperatur nicht oder nur in sehr geringem Ausmaß zu erwarten ist. In den generierten Daten werden für die Reflektorpositionen Soll-Koordinaten verwendet. Nur die resultierenden, berechneten Messlängen zwischen Reflektor und LT-Position werden anschließend thermisch beeinflusst. Für die nachfolgenden Gleichungen gilt, dass analog zu der Herangehensweise im technischen Report zur Modellbeschreibung des VCMM [PTB, 2022] ein Temperaturgradient pro Achse berücksichtigt wird. Da zur Vereinfachung ausschließlich von linearen thermischen Gradienten ausgegangen wird, kann im folgenden mit einem Mittelwert pro Achse bzw. Messlänge entlang einer Achse gerechnet werden. Der jeweilige Temperaturgradient wirkt in positiver Achsrichtung, wobei der Nullpunkt aller Achsen mit einer Temperatur von  $\vartheta_{\text{ref}} = 20,0 \text{ }^\circ\text{C}$  versehen ist. Zuerst werden die Längen unter Berücksichtigung des thermischen Einflusses berechnet. Dazu sind die idealen Längen über die Anzahl  $i$  der geplanten LT-Positionen  $\vec{p}_{\text{LT},i}$  und die Anzahl  $j$  der KMG-Stützstellen  $\vec{p}_{\text{KMG},j}$  zu ermitteln. Zusätzlich fließt der entsprechende Versatz des verwendeten Reflektors  $\vec{l}_{v,i}$  ein. Die jeweiligen, idealen Längenanteile  $\vec{p}_l$

$$\vec{p}_l = \vec{p}_{\text{KMG},j} + \vec{l}_{v,i} - \vec{p}_{\text{LT},i} \quad (23)$$

werden komponentenweise mit den Temperaturgradienten der Achsen  $\nabla\vartheta_a$  für  $a = X, Y, Z$  verrechnet. Für die linearen Gradienten kann eine mittlere Temperaturdifferenz  $\Delta\vartheta_{W,a}$  je Komponente zwischen Start- und Endpunkt der zu messenden Länge durch

$$\Delta\vec{\vartheta}_W = 0,5 \cdot \nabla\vec{\vartheta} \cdot (\vec{p}_{\text{KMG},j} + \vec{l}_{v,i} + \vec{p}_{\text{LT},i}) \quad (24)$$

ermittelt werden. Dies wird zur Berechnung der thermisch bedingten Längenanteile  $\vec{p}_{l,\text{temp}}$  in Gleichung (25) verwendet. Hierbei wird der Längenanteil  $\vec{p}_l$  ohne thermischen Einfluss und der thermisch bedingte Längenanteil berücksichtigt. Dieser wird gebildet, indem die ideale Länge unter Einfluss der Brechzahl in Abhängigkeit der Temperaturdifferenz durch Multiplikation verrechnet wird.

$$\vec{p}_{l,\text{temp}} = \vec{p}_l \cdot (1 + \Delta n_{\text{temp}}(\Delta\vec{\vartheta}_W)) \quad (25)$$

Die Länge dieses Vektors entspricht dem Längenmesswert  $l_{\text{temp}}$  (siehe Gleichung (26)), der den systematischen thermischen Effekt als Abweichung zur idealen Länge beinhaltet.

$$l_{\text{temp}} = |\vec{p}_{l,\text{temp}}| = \sqrt{p_{X,\text{temp}}^2 + p_{Y,\text{temp}}^2 + p_{Z,\text{temp}}^2} \quad (26)$$

Beispielhaft wird eine Länge entlang der  $X$ -Achse unter dem thermischen Einfluss berechnet, welche bei einem Temperaturgradienten entlang dieser Achse entsteht. Die Position des LT liegt bei  $X = 50$  mm mit einer Aufbauhöhe von  $H_1 = 300$  mm. Der Reflektor hat am anderen Achsende bei  $X = 4\,950$  mm auf maximaler Höhe  $Z = 1\,950$  mm einen Versatz von  $Z = -90$  mm. Daraus ergibt sich eine ideale Messlänge von  $5\,142,334$  mm. Bei einem Temperaturgradienten im industriellen Umfeld von beispielsweise  $\nabla\vartheta_x = 1$  K/m ergibt sich der thermische Einfluss zu einer Längenabweichung von  $-12,9$   $\mu\text{m}$ , wenn keine Korrektur erfolgt. Dieser Wert wird als thermisch verursachte Abweichung auf die ideale Länge addiert und in den generierten Messdateien verwendet, um die resultierenden Geometrieabweichungen zu ermitteln. Die einzelnen berechneten Längenmesswerte werden in der Messdatei den jeweiligen Positionen und den entsprechenden Stützstellen zugeordnet. Bei der Messstrategie mit einer Kombination von Variante 6 und 18 aus Abschnitt 4.1.1 werden insgesamt  $1\,206$  einzelne Messlängen berechnet. Damit kann anschließend die Auswirkung auf die Geometrieabweichungen ermittelt werden.

Generierte Messdateien werden für verschiedene Temperaturszenarien erstellt. Die Varianten 1 und 2 dienen dazu, den Zusammenhang zwischen dem gewählten Temperaturgradienten entlang der  $X$ -Achse und den Geometrieabweichungen zu verdeutlichen. Die Varianten 3 und 4 veranschaulichen den Einfluss eines Gradienten der  $Y$ -Achse sowie Variante 5 und 6 für den der  $Z$ -Achse. Die Ergebnisse sind in Tabelle 5 unter Angabe der größten translatorischen und rotatorischen, systematischen Geometrieabweichung und dem dazugehörigen Maximalwert angegeben. Weiterhin werden Messdateien generiert, die bei Kombinationen von Temperaturgradienten in mehreren Achsen auftreten. Bei den Varianten 7 bis 9 sind die  $X$ - und  $Y$ -Achse betroffen. In Variante 10 ist eine Kombination von Temperaturgradienten entlang der  $Y$ - und  $Z$ -Achse und in Variante 11 die  $X$ - und  $Z$ -Achse berücksichtigt. Zuletzt sind in Variante 12 alle Achsen mit thermischen Gradienten versehen. Die resultierenden maximalen Geometrieabweichungen und die entsprechenden Werte sind in Tabelle 6 aufgelistet. In den Varianten mit einer thermisch beeinflussten Achse (Variante 1 bis 6) ergeben sich die größten translatorischen Abweichungen bei der Positionsabweichung der jeweiligen Achse ( $\Delta x_{t,x}$ ,  $\Delta y_{t,y}$  oder  $\Delta z_{t,z}$ ). Für die Rotationsabweichungen gilt, dass bei einem

Tabelle 5: Übersicht der Simulationsvarianten des Einflusses eines Temperaturgradienten und die größten Abweichungen mit den maximalen Werten

	Temperaturgradient der			größte transl. Abw.	max. Wert in $\mu\text{m}$	größte rotat. Abw.	max. Wert in $\mu\text{rad}$
	X-Achse in K/m	Y-Achse in K/m	Z-Achse in K/m				
1	0,5	-	-	$\Delta x_{t,x}$	6,1	$\Delta \varphi_{z,r,y}$	1,0
2	1	-	-	$\Delta x_{t,x}$	12,3	$\Delta \varphi_{z,r,y}$	1,9
3	-	0,5	-	$\Delta y_{t,y}$	3,8	$\Delta \varphi_{y,r,z}$	0,7
4	-	1	-	$\Delta y_{t,y}$	7,8	$\Delta \varphi_{y,r,z}$	1,4
5	-	-	0,5	$\Delta z_{t,z}$	0,9	var.	0,1
6	-	-	1	$\Delta z_{t,z}$	1,8	var.	0,1

Temperaturgradienten entlang der X-Achse, der längsten Achse, die Rotation der Z-Achse um die Y-Achse ( $\Delta \varphi_{z,r,y}$ ) am meisten beeinflusst wird. Bei der hier dargestellten steigenden Temperatur parallel zur Y-Achse sind die größten Auswirkungen auf die rotatorischen Abweichungen bei  $\Delta \varphi_{y,r,z}$  zu erkennen. Ein thermischer Einfluss entlang der Z-Achse zeigt keine Auswirkungen auf die rotatorischen Abweichungen. Bei den Simulationen von kombinierten Temperaturgradienten in zwei (Variante 7 - 11) oder drei Achsrichtungen (Variante 12) sind die größten translatorischen Abweichungen bei der Achse zu erkennen, welche die größte Temperaturdifferenz zwischen Start- und Endpunkt erreicht. Dies ist abhängig von dem Ausmaß des Temperaturgradienten und der Länge der Achse. Die rotatorischen Abweichungen sind zusätzlich beeinflusst von dem Temperaturgradienten der anderen Achsen, wodurch eine Minimierung des Wertes einer Rotation möglich ist, da sich die Auswirkungen gegenseitig aufheben können. Ein systematischer Anteil bei verschiedenen Parametern der Geometrieabweichungen ist deutlich zu erkennen. Dieser ist durch einen thermischen Einfluss bei der Erfassung der Abweichungen verursacht. Die Verwendung dieser fehlerhaften Parameter der Geometrieabweichungen im virtuellen Messprozess führt zu großen aufgabenspezifischen Messunsicherheiten. Ein Ansatz zur Korrektur dieser systematischen Beiträge wird in dem folgenden Abschnitt 4.1.3 gegeben.

### 4.1.3 Auswirkungen der Erfassung der Geometrieabweichungen auf die Messunsicherheitsermittlung

In Bezug auf die Messunsicherheitsermittlung müssen die Erkenntnisse zur Erfassung der Geometrieabweichungen mit einem interferometrischen Mess-

Tabelle 6: Übersicht der Simulationsvarianten des Einflusses kombinierter Temperaturgradienten und die größten Abweichungen mit den maximalen Werten

	Temperaturgradient der			größte transl. Abw.	max. Wert in $\mu\text{m}$	größte rotat. Abw.	max. Wert in $\mu\text{rad}$
	X-Achse in K/m	Y-Achse in K/m	Z-Achse in K/m				
7	0,5	0,5	-	$\Delta x_{t,x}$	6,1	$\Delta \varphi_{z,r,y}$	0,7
8	1	0,5	-	$\Delta x_{t,x}$	12,0	$\Delta \varphi_{z,r,y}$	1,7
9	0,5	1	-	$\Delta y_{t,y}$	7,7	$\Delta \varphi_{y,r,z}$	1,0
10	-	0,5	0,5	$\Delta y_{t,y}$	3,8	$\Delta \varphi_{y,r,z}$	0,7
11	0,5	-	0,5	$\Delta x_{t,x}$	6,1	$\Delta \varphi_{z,r,y}$	0,9
12	0,5	0,5	0,5	$\Delta x_{t,x}$	6,0	$\Delta \varphi_{z,r,y}$	0,6

system unterschiedlich behandelt werden. Die möglichen systematischen Beiträge sind durch die optimierte Messstrategie weitestgehend minimiert. Die verbleibenden Systematiken ergeben sich unter anderem aus der Längenmessung, die eine längenabhängige Standardunsicherheit aufweist, und sind unumgänglich. Dieser Anteil an den Messunsicherheiten der Geometrieabweichungen werden über die Lookup-Tabellen im VCMM berücksichtigt. Wie in Abschnitt 4.1.2 festgestellt, können weitere systematische Abweichungen durch mangelhaft berücksichtigte Temperaturverteilungen als Beitrag in der Messunsicherheitsermittlung auftreten. Hierbei ergeben sich besonders große Abweichungen, wenn keine stabile und gleichmäßige Klimatisierung möglich ist, wie beispielsweise bei KMG in der fertigungsnahen Umgebung oder bei Werkzeugmaschinen. Bei der Erfassung der Geometrieabweichungen wird eine Vielzahl von Längenmessungen durchgeführt, welche individuelle Temperaturanteile der drei Achsen aufweisen. Um Systematiken zu ermitteln und gegebenenfalls zu korrigieren ist die Berücksichtigung des jeweilig vorherrschenden Temperatureinflusses bei den einzelnen Längenmessungen notwendig. Dies ist ein sehr aufwendiger Prozess. Um dies zu vermeiden, wird im Folgenden das Verhalten der Geometrieabweichungen in Abhängigkeit zur Temperatur abgeschätzt. Die folgenden Ergebnisse gelten für die beschriebene Messstrategie (Variante 6 und 18) aus Abschnitt 4.1.1. Hierbei sind die Standardunsicherheit durch den Reflektor, die Reproduzierbarkeit sowie die zufälligen Temperaturschwankungen nicht berücksichtigt. Diese Einflussfaktoren sind für einen systematischen, thermischen Einfluss nicht relevant. Um die Auswirkungen dieses Einflusses zu verdeutlichen, werden Simulationen mit erheblichen Temperaturgradienten von bis zu  $\nabla \vartheta_a = 3 \text{ K/m}$  für jede Achse durchgeführt. Hierbei zeigt sich, welche Abweichungen von einer

mangelnden Temperaturerfassung betroffen sind. Geometrieabweichungen, die Werte größer 0,2  $\mu\text{m}$  bzw. 0,2  $\mu\text{rad}$  aufweisen, sind:

- translatorische Abweichungen:  $\Delta x_{t,x}$ ,  $\Delta y_{t,y}$ ,  $\Delta z_{t,z}$
- rotatorische Abweichungen:  $\Delta\varphi_{y,r,z}$ ,  $\Delta\varphi_{z,r,x}$ ,  $\Delta\varphi_{z,r,y}$

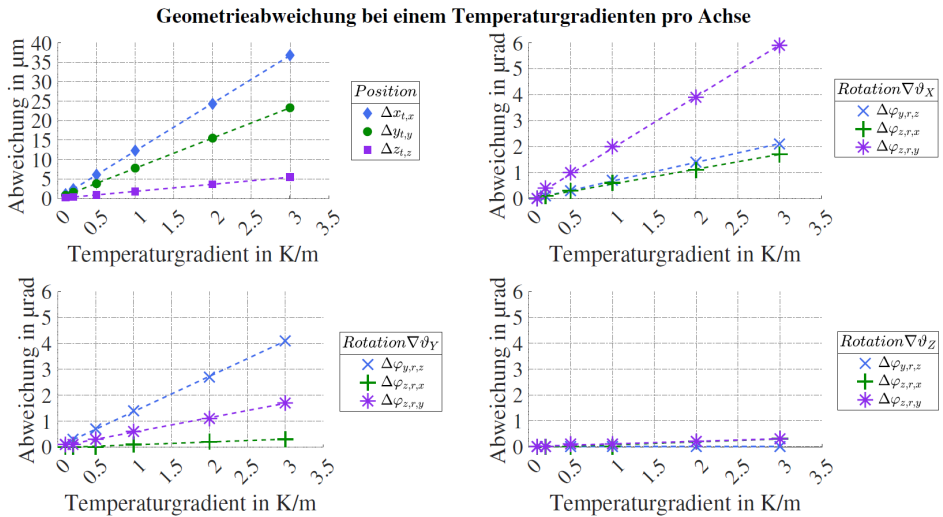


Bild 16: Diagramm der Geometrieabweichungen bei verschiedenen Temperaturgradienten je einer Achse und deren Regressionsgeraden

Den Zusammenhang zwischen verschiedenen Temperaturgradienten einer Achse und den resultierenden translatorischen und rotatorischen Abweichungen zeigt Bild 16. Am Beispiel eines sehr hohen Temperaturgradienten entlang der X-Achse von  $\nabla\vartheta_x = 3 \text{ K/m}$  zeigen sich Abweichungen in Höhe von 37  $\mu\text{m}$  für  $\Delta x_{t,x}$ . Bei einem ebenso großen Wert für den Gradienten entlang der Y-Achse ergeben sich 24  $\mu\text{m}$  für  $\Delta y_{t,y}$  und analog für die Z-Achse 5  $\mu\text{m}$  für  $\Delta z_{t,z}$ . Die Abhängigkeit der Positionsabweichungen vom Temperaturgradienten der jeweiligen Achse ist in Bild 16 (oben, links) dargestellt und weist einen linearen Verlauf auf. Das Verhalten der rotatorischen Abweichungen ist ebenfalls als linearer Zusammenhang zu beschreiben, wobei die Auswirkungen geringer sind. Der größte Wert tritt hierbei ebenfalls bei der X-Achse auf und beträgt 6  $\mu\text{rad}$  für  $\Delta\varphi_{z,r,y}$  (siehe Bild 16, oben, rechts). Dabei ist die längste Achse beteiligt und somit auch der größte Temperatureinfluss. Für die etwas kürzere Y-Achse treten bei  $\nabla\vartheta_y$  in Bild 16 (unten, links) Werte bis zu 4  $\mu\text{rad}$  für die Rotationsabweichung  $\Delta\varphi_{y,r,z}$  auf. Die Werte, die aus einem thermischen Einfluss entlang der Z-Achse resultierend, sind dabei vernachlässigbar klein wie Bild 16 (unten, rechts) zeigt. Bei der Betrachtung von thermischen Gradienten in mehreren Achsen zeigen sich jedoch Wechselwirkungen. Diese

können sowohl einen mindernden als auch einen verstärkenden Einfluss auf den systematischen Beitrag einer einzelnen Geometrieabweichung zufolge haben. Ein Beispiel wird in der Bild 17 veranschaulicht. Darin sind die Temperaturgradienten wie folgt angenommen:

- links:  $X_{fix}$  bzw.  $Y_{fix} - \nabla\vartheta_{X/Y} = 0,5 \text{ K/m}$  und  $\nabla\vartheta_{Y/X}$  mit je 0,5; 1,0; 1,5; 2,0 K/m
- rechts:  $X_{fix}$  bzw.  $Z_{fix} - \nabla\vartheta_{X/Z} = 0,5 \text{ K/m}$  und  $\nabla\vartheta_{Z/X}$  mit je 0,5; 1,0; 1,5; 2,0 K/m

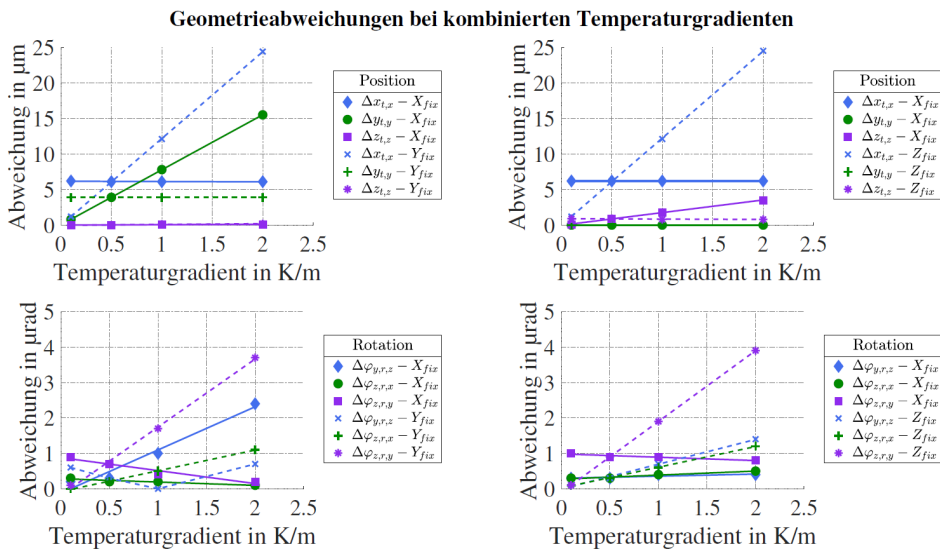


Bild 17: Diagramm der Geometrieabweichungen bei kombinierten Temperaturgradienten und deren Regressionsgeraden

Aus den Untersuchungen der kombinierten Temperaturgradienten folgt, dass eine pauschale Abschätzung und einfache Berücksichtigung des thermischen Einflusses auf die Geometrieabweichungen nicht möglich ist. Die vorherrschenden Temperaturverteilungen müssen individuell berücksichtigt werden. Ohne eine detaillierte Berücksichtigung eines inhomogenen Temperaturfeldes, z. B. durch einen einzelnen Temperaturwert, werden für die Parameter der Geometrieabweichungen fehlerhafte Werte ermittelt. Alternativ kann eine Korrektur erfolgen, um die thermisch beeinflussten systematischen Beiträge im virtuellen Messprozess gering zu halten. Dabei muss der Korrekturprozess als Beitrag bei der Ermittlung der Messunsicherheit berücksichtigt werden. Für eine reale Messung bedeutet dies, dass die Erfassung der vorherrschenden thermischen Gradienten während der Messung mit einem unabhängigen Messsystem notwendig ist. Anschließend muss

für diesen thermischen Zustand eine Messdatei generiert werden, welche die korrigierten Messlängen beinhaltet und als Basis für die Ermittlung der Geometrieabweichungen dient. Der dazu erstellte *MATLAB*-Quellcode ist in Anhang A eingefügt und berücksichtigt die Gleichungen aus Abschnitt 4.1.2. Dabei ist darauf zu achten, dass in *MATLAB* die tatsächlichen, nicht die geplanten, LT-Positionen und Stützstellen als Grundlage der Korrektur verwendet werden. Ansonsten können Diskrepanzen entstehen, welche zu Abweichungen in der Längenermittlungen führen. Es wird eine Messdatei erzeugt, welche die gemessenen Längen einzeln korrigiert. Dabei ist die Auswirkung der Temperaturdifferenz von der am LT erfassten und der für die jeweilige Messlänge gerechneten Temperatur zu berücksichtigen. Mit dieser Messdatei kann eine gewohnte Auswertung der Geometrieabweichungen in *TracCal* erfolgen. Weiterhin kann eine Lookup-Tabelle in Form einer *xml*-Datei erstellt werden. Diese wird als Parametrisierung der Maschinenstruktur im *VCMM* verwendet. Die Genauigkeit des Korrekturprozesses ist ausschließlich von der Erfassung der vorherrschenden Temperaturgradienten abhängig, da der Prozess selbst mit den gleichen Algorithmen wie die gewohnte Auswertung stattfindet. Da der Auswerteprozess von der thermisch beeinflussten Längenermittlung bis hin zu den Geometrieabweichungen komplex ist, kann die resultierende Messunsicherheitsermittlung für den Beitrag des Korrekturprozesses am besten empirisch ermittelt werden. Dabei wird für die Standardunsicherheit der Temperaturerfassung ein Wert von  $u_{\vartheta} = 0,1$  K angenommen, welcher als Rechteckverteilung berücksichtigt wird.

Der Temperaturgradient einer Achse  $\nabla\vartheta_a$  wird als Differenzenquotient beschrieben über die Gleichung (27). Hierbei sind die Temperaturen am Anfang  $\vartheta_{Start}$  und am Ende der Achse  $\vartheta_{End}$  berücksichtigt und wird auf die entsprechende Achslänge  $l_a$  bezogen.

$$\nabla\vartheta_a = (\vartheta_{End} - \vartheta_{Start})/l_a \quad (27)$$

Mit Hilfe der partiellen Ableitung kann der Grenzwert für die Temperatur zur Standardunsicherheit eines Temperaturgradienten einer Achse  $u_{\nabla\vartheta_a}$  umgerechnet werden zu

$$u_{\nabla\vartheta_a}^2 = \left(\frac{\partial f}{\partial \vartheta_i}\right)^2 \cdot u_{\vartheta_i}^2 = 2 \cdot \left(\frac{1}{l_a}\right)^2 \cdot u_{\vartheta_i}^2 \quad (28)$$

Mit den Werten  $l_x = 5,0$  m,  $l_y = 4,0$  m und  $l_z = 2,0$  m für die Länge der jeweiligen Achse ergeben sich draus für  $u_{\nabla\vartheta_x} = 0,03$  K/m,  $u_{\nabla\vartheta_y} = 0,04$  K/m und  $u_{\nabla\vartheta_z} = 0,07$  K/m. Diese werden als Standardunsicherheit der Temperaturgradienten in die Simulation mit *MATLAB* und *TracCal* zur Ermittlung

des Temperatureinflusses auf die Geometrieabweichungen eingefügt. Für die entsprechenden Temperaturgradienten entlang der X-, Y- und Z-Achse sowie der Kombination für alle drei Achsen gleichzeitig werden die resultierenden maximalen Anteile an der Messunsicherheit abgeschätzt. Die Ergebnisse sind für alle Abweichungen kleiner gleich  $0,2 \mu\text{m}$  bzw.  $0,1 \mu\text{rad}$ . Der Beitrag kann manuell in eine kombinierte Messunsicherheit mit den ermittelten Werten, die aus der Erfassungsstrategie ohne thermischen Einfluss entstehen, verrechnet werden. Diese werden wiederum in die Lookup-Tabelle der Geometrieparameter des VCMM eingefügt. Die Änderungen zu den zuvor berücksichtigten Messunsicherheiten ist mit Werten kleiner  $0,1 \mu\text{m}$  und  $0,1 \mu\text{rad}$  sehr gering, sodass in Abhängigkeit von der angenommenen Standardunsicherheit der Temperaturerfassung mit  $0,1 \text{ K}$  von einem sehr genauen Korrekturprozess ausgegangen werden kann. Eine weitere Abschätzung der Messunsicherheit, die den Beitrag des Korrekturverfahrens und den Beitrag des Messprozesses kombiniert, kann mit der Software *TracCal* erfolgen. Dies erfolgt, indem die thermisch beeinflusste Längenmessunsicherheit berechnet wird. Wenn der entsprechende Eingabewert, der normalerweise nur den Anteil der Spezifikation beinhaltet, in der Software *TracCal* verändert wird, verwendet die MCS dies als Grundlage zur Ermittlung der Messunsicherheiten von den Geometrieabweichungen. Der Wert, welcher in die Simulation einfließen muss, wird mit der Gleichung (29) abgeschätzt.

$$e_l(\vartheta) = l \cdot \Delta n_{\text{temp}}(u_{\nabla\vartheta_a}) \quad (29)$$

Bei einer gemessenen Länge von  $l = 1 \text{ m}$  und der maximalen Messunsicherheit des Gradienten  $u_{\nabla\vartheta_z} = 0,07 \text{ K/m}$  ergibt sich mit dem entsprechenden Anteil der Spezifikation ein maximaler längenabhängiger Wert von  $0,27 \mu\text{m/m}$ . Die Änderung der simulativ ermittelten Messunsicherheiten der Geometrieabweichungen, die daraufhin entstehen, sind in Tabelle 7 dargestellt. Die Differenzen zwischen den zwei simulativ ermittelten Messunsicherheiten für die Geometrieabweichungen haben unterschiedliche Ausmaße. Für die Positionsabweichungen ergeben sich vernachlässigbar kleine Werte. Für die rotatorischen Abweichungen liegen die größten Differenzen zwischen  $0,4 \mu\text{rad}$  und  $1,8 \mu\text{rad}$ . Die Unterschiede zu den Messunsicherheiten ohne die Berücksichtigung der thermischen Gradienten sind verhältnismäßig klein. Damit gehen jedoch erhebliche Messabweichungen der Geometrieabweichungen einher, welche mit dem Quellcode aus Anhang A beschrieben werden können und daher zwingend zu korrigieren sind.

Tabelle 7: Differenzen der simulativ ermittelten Messunsicherheiten der Geometrieabweichungen unter Berücksichtigung der Genauigkeit der Temperaturerfassung bei einem Korrekturprozess

	Differenz in $\mu\text{m}$			Differenz in $\mu\text{rad}$		
	$\Delta x_{t,x}$	$\Delta y_{t,y}$	$\Delta z_{t,z}$	$\Delta \varphi_{y,r,z}$	$\Delta \varphi_{z,r,x}$	$\Delta \varphi_{z,r,y}$
Messunsicherheit	0,3	-0,1	0,0	0,4	0,6	1,8

### Messabweichungen und Messunsicherheiten an beispielhaften Messaufgaben

Der Einfluss der thermisch beeinflussten Erfassung der Geometrieabweichungen wirkt sich während des virtuellen Messprozesses auf die Messabweichungen bei einer Messaufgabe aus. Um dies zu verdeutlichen, werden im Folgenden zwei Beispiele mit dem bestehenden *VCmm2Tool* (Version 1.2.0.33 Rev. 2582 der PTB) berechnet. Beispiel 1 befasst sich mit den Linien der Längenmessprüfung nach ISO 10360-2 [2009] und Beispiel 2 verkörpert die Prüfbunde des Großverzahnungsnormal (siehe Kapitel 3), an denen ein Durchmesser und eine Ebenheit ausgewertet werden. Beiden Beispielen liegt die gleiche Parametrisierung des Messprozesses zugrunde. Es handelt sich um die zufälligen und systematischen Beiträge der Geometrieabweichungen und zufälligen Anteile aller anderen Einflussfaktoren. Die wichtigsten Bestandteile der Parametrisierung sind in Anhang C zusammengefasst. Als aussagekräftiges Temperaturszenario wird ein Gradient entlang der X-Achse mit  $\nabla \vartheta_x = 1,3 \text{ K/m}$  gewählt. Dieser Temperaturgradient weist in Bild 16 Messabweichungen auf, die außerhalb der ermittelten Messunsicherheiten liegen. Es ergeben sich anhand der zuvor genannten Simulationen (mit *MATLAB* und *TracCal*), Lookup-Tabellen mit Geometrieabweichungen zur Parametrisierung des KMG mit einem thermischen Einfluss von  $\nabla \vartheta_x = 1,3 \text{ K/m}$ . Diese und weitere Parameter werden im *VCmm2Tool* verwendet, um sowohl die Messabweichungen als auch die Messunsicherheiten zu simulieren. In Beispiel 1 werden 63 Messpunkte virtuell gemessen, die sich aus jeweils neun Punkten entlang der X-, Y- und Z-Achse sowie der vier Raumdiagonalen (R1 - R4) zusammensetzen. Die Punkte einer Messlinie sind dabei gleichverteilt mit dem maximal erlaubten Abstand von 10 % der Linienlänge [VDI/VDE 2617-11, 2011]. Das *VCMM*-Softwaretool wiederholt die virtuellen Messdurchläufe mindestens 200 Mal und maximal bis ein Abbruchkriterium für eine hinreichende Stabilität [Franke et al., 2017] der Simulationsergebnisse erfüllt ist.

Bei Beispiel 1 wurden 209 Simulationsdurchläufe ausgeführt. Die Auswertung ergibt mittlere Abweichungen zwischen Soll- und Ist-Messlänge sowie deren Standardabweichung. Das Ergebnis ist in Bild 18 dargestellt, welches die Teillängen und die dazugehörigen Längenabweichung abbildet. Zusätzlich ist die längenabhängige Spezifikation des KMG und es sind die Abweichungsbalken der Standardabweichungen der Werte eingezeichnet. Die Auswirkungen

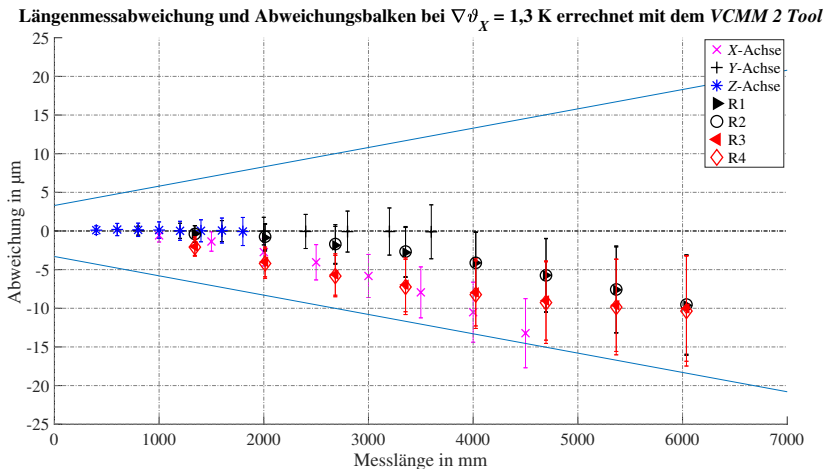


Bild 18: Diagramm der resultierenden Längenmessabweichungen bei  $\nabla\vartheta_X = 1,3 \text{ K/m}$  mit dem *VCmm2Tool* und die dazugehörigen Standardabweichungen als Abweichungsbalken

der thermisch beeinflussten X-Achse ist in den Ergebnissen zu erkennen. Die Messpunkte entlang dieser Achse als auch die Raumdiagonalen sind beeinflusst. Je größer die Messlänge und somit der Temperatureinfluss, umso deutlicher wirkt sich dieser Einfluss aus. Dies gilt ebenso für die Messunsicherheiten, die ebenfalls mit Zunahme der Messlänge größer werden. Dies ist jedoch ein Effekt, der in einem ähnlichen Ausmaß ebenso bei den unbeeinflussten Messlängen auftritt. Die Auswirkung von konkreten Geometrieabweichungen auf Messpunkte kann ebenso mit der Software nach Lin et al. [2020] erfolgen. Dieses Softwaretool ist in *Mathematica* (Version 7.0.1.0) erstellt und ermöglicht eine Abschätzung der Messabweichungen verschiedener Parameter, verursacht durch die systematischen Geometrieabweichungen. Hierzu ist keine parametrisierte Beschreibung aller vorherrschenden Bedingungen nötig, wodurch die Messunsicherheiten der Geometrieabweichungen und alle anderen zufälligen Anteile des Messprozesses vernachlässigt werden. Die einzelnen Messpunktkoordinaten werden mit den entsprechenden Abweichungsvektoren aus der Lookup-Tabelle der Maschinengeometrie versehen. Die Ergebnisse sind graphisch in Bild 19 zu finden. Analog zu Bild 18 ergeben sich die gleichen, von dem Temperatureinfluss auf die X-Achse und der

Messlänge abhängigen, Messabweichungen. Eine Messunsicherheit kann nicht ermittelt werden. Bei Beispiel 2 werden 72 Messpunkte betrachtet, die

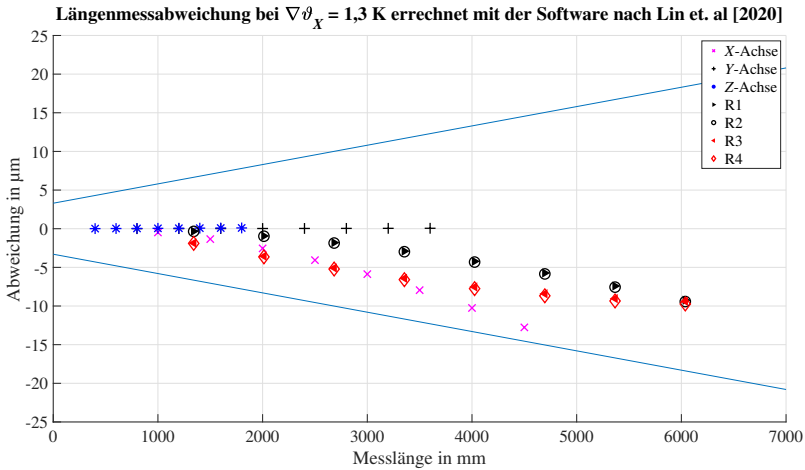


Bild 19: Diagramm der resultierenden Längenmessabweichungen bei  $\nabla\vartheta_x = 1,3 \text{ K/m}$  mit der Software nach Lin et al. [2020]

auf einem Kreis mit dem nominellen Durchmesser  $d_{\text{Soll}} = 1875,0 \text{ mm}$  und einer Ebene mit einer idealen Ebenheit von  $f_{\text{Soll}} = 0,0 \mu\text{m}$  liegen. Hierbei ist das Abbruchkriterium nach 492 Durchläufen erreicht. Die Auswertung ergibt (mittlere) Werte der Parameter sowie deren Standardabweichungen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 8 dargestellt. Darin ist zusätzlich ein Vergleich zu Ergebnissen mit der Software nach Lin et al. [2020] enthalten. Die Abwei-

Tabelle 8: Einfluss der Geometrieabweichungen bei einem Temperaturgradienten von  $\nabla\vartheta_x = 1,3 \text{ K/m}$  bei der virtuellen Beispielmessungen eines Kreises

	VCmm2Tool		nach Lin et al. [2020]
	Wert in $\mu\text{m}$	$u$ in $\mu\text{m}$	Wert in $\mu\text{m}$
Diff. Durchmesser $\Delta d$	32,9	2,5	27,1
Ebenheit $f$	1,9	0,5	0,0

chung des Durchmessers zum idealen Wert und die der Ebenheit weisen unter Verwendung des VCMM-Softwaretools mit  $\Delta d_{\text{VCMM}} = 32,9 \mu\text{m}$  und  $f_{\text{VCMM}} = 1,9 \mu\text{m}$  größere Werte auf als mit der Berechnung nach Lin et al. [2020]. Hier entspricht die Abweichung des Durchmessers  $\Delta d_{\text{Lin}} = 27,1 \mu\text{m}$  und die der Ebenheit  $f_{\text{Lin}} = 0,0 \mu\text{m}$ . Die Unterschiede ergeben sich, da im Gegensatz zu den Berechnungen in *Mathematica* Lin et al. [2020], beim VCMM weitere Einflussfaktoren für die virtuelle Nachbildung des kompletten

Messprozesses verwendet werden, wie z. B. die zufälligen Abweichungen des Tastersystems, der Umgebungstemperatur und des Werkstücks. Die Software nach Lin et al. [2020] ist hauptsächlich zur komplexen Bestimmung der Verzahnungsmessgrößen ausgelegt und ermöglicht eine Abschätzung der, aus den Geometrieabweichungen, resultierenden Messabweichungen an dem Großverzahnungsnormale. Die Auswirkungen bei einem thermischen Gradienten von  $\nabla\vartheta_x = 1,3 \text{ K/m}$  entlang der  $X$ -Achse auf die systematischen Anteile der Geometrieabweichungen und den resultierenden Winkelabweichungen sind beispielhaft für die Linksflanken einer Verzahnungsgruppe der Außenverzahnung berechnet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 9 aufgelistet.

Tabelle 9: Maximale Werte der Winkelabweichungen (Linksflanken, AVZ 1) als Betrag bei thermisch beeinflusster Erfassung der Geometrieabweichungen mit  $\nabla\vartheta_x = 1,3 \text{ K/m}$

	Profil-Winkelabw. $f_{H\alpha}$ in $\mu\text{m}$	Flankenlinien-Winkelabw. $f_{H\beta}$ in $\mu\text{m}$
0° geradverzahnt	0,4	0,1
10° rechtssteigend	0,4	0,3
20° linkssteigend	0,4	0,5

Die Ergebnisse für die Verzahnungsparameter zeigen, dass sowohl die Profil- als auch die Flankenlinien-Winkelabweichungen betroffen sind. Bei den Profilen sind die Auswirkungen bei  $0,4 \mu\text{m}$  und unabhängig von der Steigung. Eine Verformung der Evolventenprofile entsteht in diesem Beispiel, da nur eine Koordinatenkomponente (die  $X$ -Achse) von dem Temperatureffekt betroffen ist. Bei den Flankenlinien ist eine Abhängigkeit zur Steigung zu erkennen. Insgesamt sind die Auswirkungen auf die Winkelabweichung mit maximal  $0,5 \mu\text{m}$  bei der Flankenlinie mit  $20^\circ$ -Steigung im Rahmen der Messunsicherheit, die bei der Messung einer Großverzahnung ermittelt werden kann. Alle durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass sowohl die Messabweichungen als auch die Messunsicherheiten von der gewählten Messstrategie und den Temperaturgradienten, die bei der Erfassung der statischen Geometrieabweichungen herrschen, beeinflusst werden. Sobald der integrierte Temperatursensor des interferometrischen Messsystems die Temperatur nicht mehr ausreichend abbildet, da sich diese inhomogen verteilt, müssen unabhängig Temperaturgradienten ermittelt und im Nachhinein korrigiert werden. Andernfalls entstehen Messabweichungen und Messunsicherheitsbeiträge, die durch diese Temperaturänderungen bedingt sind.

## 4.2 Einfluss der Umgebungstemperatur auf das Groß-Koordinatenmessgerät

Bei der Erfassung der Geometrieabweichungen ist zu beachten, dass die entsprechenden Werte nicht ausschließlich statische Abweichungen enthalten, sondern ebenso temperaturbedingte Beiträge umfassen können. Die thermisch bedingten Geometrieabweichungen sind zu berücksichtigen, wenn eine langfristige Änderung der vorherrschenden Umgebungstemperatur auftritt. Eine solche Temperaturänderung hat Einfluss auf die physische Beschaffenheit der Komponenten des Groß-KMG. Dies wirkt sich u. a. als Verformung der Führungen und Maßstäbe aus. Herrscht bei der Erfassung der Abweichungen eine andere Temperatur als bei der Messung eines Werkstücks, so werden Werte als Grundlage für den Kompensationsprozess verwendet, die nicht den aktuell vorherrschenden Geometrieabweichungen des Messgerätes entsprechen. Somit ergibt sich eine Veränderung zu den statischen und thermisch nicht beeinflussten Geometrieabweichungen. Dieser Einfluss der thermisch bedingten Geometrieabweichungen ist getrennt von dem der statischen Abweichungen oder der fehlerhaft ermittelten Werte der thermisch beeinflussten Längenmessung (siehe Abschnitt 4.1.2) zu betrachten und zu modellieren. Zwei unterschiedliche Ansätze der Modellierung, die in der Praxis bereits Anwendung finden, sind der thermische Ausdehnungskreis (siehe Abschnitt 4.2.1) und das thermisch bedingte Starrkörpermodell des virtuellen KMG der PTB (siehe Abschnitt 4.2.2). Die Ansätze werden im Folgenden auf die spezifische Charakteristik des Groß-KMG angepasst, verwendet und diskutiert.

### 4.2.1 Anwendung des Modells eines thermischen Ausdehnungskreises

Bei dem thermischen Ausdehnungskreis [Schmidt, 2008; Hausotte, 2011; Balzer, 2015] wird die Ausdehnung aller beteiligten Komponenten des Messkreises berücksichtigt. Dazu werden alle relevanten Bauteile, welche die Ablesung der Maßstäbe bei einem Messpunkt am Werkstück beeinflussen, einbezogen und die thermische Ausdehnung der jeweiligen Messachse ermittelt. Jeder Messkreis wird ausgehend von einem definierten Bezugspunkt betrachtet. Dieser Bezug ist mittig im Messvolumen definiert, sodass alle Bauteile des Messgerätes zu gleichen Teilen in dem Messkreis beteiligt werden. Dadurch sind entsprechende Vorzeichen zu beachten, die zusätzlich zum Referenzpunkt auch von den Fixierungen der Bauteile abhängig sind. Weiterhin ist es möglich, dass einige Komponenten nur anteilig berücksichtigt werden müssen, je nach Position des Tastelements. Ein vereinfachtes Beispiel ist in Bild 20 dargestellt, welche den Messkreis für zwei verschiedene

Positionen der Y-Achse verdeutlicht. Der Anteil vom Messkreis, den das KMG beeinflusst, teilt sich in vier Teile auf. Beim KMG wird der Einfluss der Länge vom Bezugspunkt bis zur Lagerung der Granitwange  $L_{1_i}$  mit negativem Vorzeichen, der Einfluss der Länge von dort bis zur Fixierung des Maßstabes  $L_{2_i}$  an der Traverse und schließlich die positionsabhängige Länge  $L_{3_i}$  bis zum Bezugspunkt der Pinole ein.

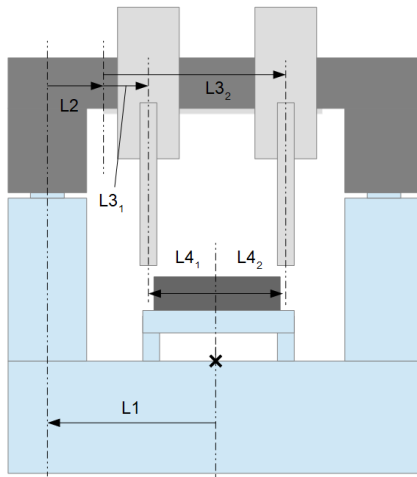


Bild 20: Skizze des thermischen Ausdehnungskreises für die Y-Achse bei zwei unterschiedlichen Antastpunkten

Zusätzlich ist die Länge des verwendeten Tastelements in Verbindung mit der Länge vom Antastpunkt des Werkstücks zum Bezugspunkt  $L_{4_i}$  zu berücksichtigen. Hierbei sind die Vorzeichen individuell zu betrachten. Die einzelnen Längen werden unter Berücksichtigung der vorherrschenden Temperatur und des individuellen Ausdehnungskoeffizienten berücksichtigt und aufsummiert. Dies wird in Gleichung (30) als mathematischer Zusammenhang des thermischen Ausdehnungskreises am Beispiel der Nanopositioniermessmaschine, bei welcher dieser Ansatz bisher angewendet wird, aufgezeigt. Darin wird nach Schmidt [2008] die gemessene Länge  $l_m$  um einen Term erweitert, der die Ausdehnung der einzelnen Bestandteile  $\Delta l_{\text{Stab}}$  beinhaltet. Die zum Messkreis beitragenden Teillängen  $l_i$  der Komponenten, deren spezifische Ausdehnungskoeffizienten  $\alpha_i$  und die Stabilität der Temperatur  $\Delta\vartheta_{\text{Stab}}$  sind darin einbezogen.

$$l = l_m + \Delta l_{\text{Stab}} = l_m + \sum_{i=0}^N l_i \cdot \alpha_i \cdot \Delta\vartheta_{\text{Stab}} \quad (30)$$

Am Beispiel der Nanopositioniermessmaschine wird der systematische Anteil der Ausdehnung unter der Annahme einer idealen mittleren Umgebungstemperatur vernachlässigt. Beim Groß-KMG muss dieser Anteil jedoch berücksichtigt werden, sodass der Einfluss der Temperatur als Differenz des Mittelwertes der vorherrschenden Material- bzw. Umgebungstemperatur und der Referenztemperatur mit  $\Delta\vartheta$  angenommen wird. Die Summe der Längenabweichungen der Teillängen bei einer homogenen Temperaturverteilung ergibt die Längenabweichung der jeweiligen Achse  $\Delta l_{\text{hom}}$ , wie in Gleichung (31) dargestellt.

$$\Delta l_{\text{hom}} = \sum_{i=0}^N [l_i \cdot \alpha_i] \cdot \Delta\vartheta \quad (31)$$

Daraufhin kann eine Positionsabweichung und deren Messunsicherheit ermittelt werden. Die entsprechende Berechnung erfolgt für Temperaturszenarien  $\Delta\vartheta_1 = 0,5 \text{ K}$  und  $\Delta\vartheta_2 = 1 \text{ K}$ . Da am Groß-KMG nicht von homogenen Temperaturverteilungen ausgegangen werden kann, ist die Annahme der genannten zwei Szenarien eine ungenaue Abschätzung. In einem weiterführenden Schritt wird nach Hausotte [2011] mit verschiedenen Temperaturen innerhalb eines Messkreises gerechnet. Die individuellen Temperaturdifferenzen  $\Delta\vartheta_i$  für die einzelnen Bauteile<sup>1</sup> und ihre Teillängen  $l_i$  sowie Ausdehnungskoeffizienten  $\alpha_i$  werden in Gleichung (32) berücksichtigt.

$$\Delta l_{\text{inhom}} = \sum_{i=0}^N l_i \cdot \alpha_i \cdot \Delta\vartheta_i \quad (32)$$

Die Messung der einzelnen Materialtemperaturen ist aufgrund der eingeschränkten Zugänglichkeit sehr aufwendig und teilweise gar nicht möglich. Zur Abschätzung werden genäherte Mittelwerte für jedes Bauteil mit Hilfe von räumlichen Temperaturgradienten der Umgebungstemperatur abgeleitet. Das Messsystem der Temperaturerfassung liefert dazu Messwerte, um thermische Gradienten entlang der jeweiligen Achse zu errechnen. Die bauteilspezifische Temperaturdifferenz einer einzelnen Komponente  $\Delta\vartheta_i$  zur Referenztemperatur kann mit Hilfe der Temperatur am Bezugspunkt des KMG  $\vartheta_o$ , der Referenztemperatur  $\vartheta_{\text{ref}} = 20,0 \text{ °C}$ , dem Temperaturgradienten der Achse  $\nabla\vartheta_a$  sowie der entsprechenden Position des Bauteils über Start-  $S_i$  und Endpunkt  $E_i$  auf der Achse bestimmt werden. Somit ergibt sich

$$\Delta\vartheta_i = \vartheta_o + (0,5 \cdot \nabla\vartheta_a \cdot (S_i + E_i)) - \vartheta_{\text{ref}} \quad , \quad (33)$$

wenn von einem linearen Temperaturverlauf ausgegangen wird. In den folgenden Beispielberechnungen wird angenommen, dass am Bezugspunkt des

<sup>1</sup> Die einzelnen Komponenten des KMG sowie ihre Eigenschaften sind Grundlage der Berechnungen, jedoch aus Gründen der Geheimhaltung seitens Hexagon AB nicht separat aufgelistet.

KMG die Referenztemperatur von  $20,0\text{ °C}$  vorherrscht und am anderen Ende der jeweiligen Achse eine Wärmequelle vorhanden ist. Daraus folgt, dass sich  $\vartheta_0$  und  $\vartheta_{\text{ref}}$  aufheben. Dazwischen wird ein linearer Verlauf angenommen. Für die Temperaturszenarien 3 und 4 dienen die Temperaturgradienten  $\nabla\vartheta_3 = 1\text{ K/Achse}$  und  $\nabla\vartheta_4 = 2\text{ K/Achse}$ . Die räumlichen Mittelwerte der Temperatur jeder Achse entsprechen somit den Werten aus den ersten beiden Varianten. Durch den Temperaturverlauf werden jedoch individuelle Temperaturen entlang der Achse in Abhängigkeit der Position und Länge des jeweiligen Bauteils berücksichtigt. Zuletzt werden zwei Temperaturverteilungen angenommen, die repräsentativ für den Messraum des Groß-KMG der PTB sind. Hierbei handelt es sich um den maximalen erlaubten räumlichen Temperaturgradienten  $\nabla\vartheta_5 = 0,5\text{ K/m}$  und den tatsächlich vorherrschenden thermischen Gradienten  $\nabla\vartheta_6 = 0,1\text{ K/m}$  im Messvolumen.

Bei dem ersten Beispiel werden die Positionsabweichungen der Messpunktkoordinaten bei einer interferometrischen Erfassung der Geometrieabweichung nachgebildet. Entscheidend ist, dass die Achse bis zur Soll-Ablesung am Maßstab verfahren wird. Die resultierenden Positionsabweichungen sind achsweise für die minimale und maximale Position ermittelt worden und in Tabelle 10 zusammengefasst. Im zweiten Beispiel wird eine Messaufgabe am Großverzahnungsnormals nachgebildet, die mit berührender Messung erfolgt. Dabei werden die Maßstäbe abgelesen, wenn sich der Taster am entsprechenden Messpunkt befindet. Durch die Ausdehnung aller Achsen ergeben sich Abweichungen zu einer Ablesung ohne Temperatureinfluss. Zusätzlich ist hierbei die Ausdehnung des Werkstücks zu beachten, welche sich durch die Antastung eines thermisch beeinflussten Messpunktes ebenfalls auf diese Abweichungen auswirkt. Die zu messenden Längen  $l_m$  am Beispiel des Großverzahnungsnormals ergeben sich über die Differenz zweier gegenüberliegender Messpunkte am Prüfbund des Großverzahnungsnormals mit Soll-Längen von  $1\,875,0\text{ mm}$  in der XY-Ebene und entlang der Zahnbreite mit einer Soll-Länge von  $420,0\text{ mm}$  in Z-Richtung. Das Werkstück ist mittig in der XY-Ebene des Messvolumens platziert und somit symmetrisch zum Bezugspunkt. Für die Bestimmung der Differenz in der Z-Achse wird ebenfalls die Länge zwischen zwei Messpunkten berücksichtigt, die jedoch beide oberhalb vom Bezugspunkt liegen. In Tabelle 11 sind die Längenabweichungen zwischen zwei Messpunkten des ausgedehnten Messkreises im Vergleich zu den idealen Längen komponentenweise ersichtlich. Die Ergebnisse der Tabelle 10 zeigen, dass die thermisch verursachte Ausdehnung der Komponenten des Messkreises am größten sind, wenn eine homogene Verteilung mit  $\Delta\vartheta = 1\text{ K}$  berücksichtigt wird. Das Temperaturszenario führt dazu, dass die Minimalposition bei der Längenmessung um  $-19,7\text{ }\mu\text{m}$  in X-,  $26,2\text{ }\mu\text{m}$  in Y- und  $11,5\text{ }\mu\text{m}$  in Z-Richtung verschoben werden. Die Ausdehnung beträgt

insgesamt  $30,0 \mu\text{m}$  über die Länge der  $X$ -Achse,  $24,0 \mu\text{m}$  entlang der  $Y$ -Achse und  $8,8 \mu\text{m}$  bei der  $Z$ -Achse. Hierbei entspricht die Ausdehnung des  $X$ - und  $Y$ -Messkreises der der Maßstäbe. Das liegt daran, dass der gleiche Ausdehnungskoeffizient für die Führungskomponenten und Maßstäbe vorherrscht. Bei der  $Z$ -Achse gibt es eine Differenz zwischen dem Ausdehnungskoeffizienten der Materialien der Pinolenkomponenten und dem des Maßstabs. Die Verschiebung des Messkreises beträgt bei  $\Delta\vartheta = 1 \text{ K}$  somit zwischen  $11,5$  und  $20,3 \mu\text{m}$  für den Anfangs- und Endpunkt der Messachse. Hierdurch entsteht eine maximale Ausdehnung des Messkreises von  $8,8 \mu\text{m}$ , wobei die des Maßstabs  $\Delta l_z = 0,0 \mu\text{m}$  beträgt.

Tabelle 10: Nach dem Prinzip des thermischen Ausdehnungskreises ermittelte Positionsabweichungen hervorgerufen durch verschiedene Temperaturszenarien bei der interferometrischen Erfassung der Geometrieabweichungen

Temperatur- szenario	Abweichung in $\mu\text{m}$ bei Minimalposition			Abweichung in $\mu\text{m}$ bei Maximalposition		
	$\Delta l_x$	$\Delta l_y$	$\Delta l_z$	$\Delta l_x$	$\Delta l_y$	$\Delta l_z$
0,5 K	-9,8	13,1	5,7	5,2	1,1	10,1
1 K	-19,7	26,2	11,5	10,3	2,2	20,3
1 K pro Achse	2,9	8,0	6,0	10,3	6,5	7,5
2 K pro Achse	5,8	16,1	12,0	20,5	13,1	15,0
0,5 K/m	7,3	16,1	6,0	25,7	13,1	7,5
0,1 K/m	1,5	3,2	1,2	5,1	2,6	1,5

Für das zweite Beispiel sind in Tabelle 11 die Längenmessabweichungen der Messlängen am Werkstück aufgelistet. Hierbei ergeben sich maximal  $11,3 \mu\text{m}$  Abweichung in der  $X$ - und  $Y$ -Achse sowie  $1,8 \mu\text{m}$  in der  $Z$ -Achse. Die Annahme von  $\Delta\vartheta = 1 \text{ K}$  ergibt eine Ausdehnung des Werkstücks zu  $20,8 \mu\text{m}$  beim Prüfbund und  $4,7 \mu\text{m}$  bei der Zahnbreite. Ohne Werkstücktemperaturkompensation ergeben sich für die  $X$ - und  $Y$ -Achse Abweichungen zum idealen Wert von  $9,5 \mu\text{m}$  und für die  $Z$ -Achse von  $2,9 \mu\text{m}$ . Der Vergleich der Ergebnisse der Varianten 1-2 und 3-4 zeigt, dass bei inhomogenen Temperaturverhalten der Gradient nicht als ein Mittelwert abgebildet werden sollte. Dabei wird die Ausdehnung des Messkreises bei dem großen Messvolumen zu groß abgeschätzt. Bei der Anwendung des thermischen Ausdehnungskreises werden ausschließlich die Positionsabweichungen der jeweiligen Achsen und deren Messunsicherheiten betrachtet. Diese sind im folgenden Modellansatz zur Messunsicherheitsermittlung mit dem virtuellen KMG der PTB ebenfalls einbezogen. Dabei werden ausschließlich die Führungen und Maßstäbe, aber

Tabelle 11: Nach dem Prinzip des thermischen Ausdehnungskreises ermittelte Positionsabweichungen hervorgerufen durch verschiedene Temperaturszenarien bei Längenmessungen am Großverzahnungsnormal

Temperatur- szenario	Abweichung der Längen in $\mu\text{m}$		
	$\Delta l_x$	$\Delta l_y$	$\Delta l_z$
0,5 K	5,6	-5,6	0,9
1 K	11,3	-11,3	1,8
1 K pro Achse	2,8	-0,7	0,3
2 K pro Achse	5,5	-1,4	0,6
0,5 K/m	6,8	-1,4	0,3
0,1 K/m	1,4	-0,3	0,1

nicht die weiteren Bestandteile des Messgeräteaufbaus berücksichtigt. Jedoch werden beim virtuellen KMG zusätzlich thermisch bedingte Rotationen und Rechtwinkligkeitsabweichungen betrachtet. Dies ist im folgenden Abschnitt beschrieben.

#### 4.2.2 Anwendung des Temperaturmodells des thermisch bedingten Starrkörpermodells

Für das virtuelle KMG werden die Geometrieabweichungen am Groß-KMG mit dem interferometrischen Messsystem erfasst. Besteht eine strukturelle Veränderung des KMG aufgrund eines thermischen Einflusses, so werden die hieraus resultierenden Abweichungen mit den statischen Abweichungen überlagert erfasst. Die entsprechenden Messunsicherheitsbeiträge sind jedoch bei der Ermittlung der Messunsicherheit mittels MCS in *TracCal* nicht berücksichtigt, sodass diese im virtuellen Messprozess zusätzlich integriert sind. Für die Positionsabweichungen handelt es sich um die Beiträge einer thermischen Ausdehnung der Achsmaßstäbe ohne automatische Temperaturkompensation oder mit Kompensation. Die weiteren thermisch bedingten Geometrieabweichungen sind experimentell ermittelt worden und belaufen sich auf 13 Gleichungen [PTB, 2022]. Darin werden die Größen der wirksamen Länge des Gerätetisches, des Querbalkens und der Portalhöhe verwendet. Diese müssen bei dem Groß-KMG aufgrund der Brückenbauweise anstelle der bisher betrachteten Portalbauweise überprüft und gegebenenfalls angepasst werden. Unter Verwendung der bisherigen Modellierung des thermisch beeinflussten Starrkörpermodells ergibt sich für die Beispielrechnungen aus Abschnitt 4.2.1 ein Maßstabsfaktor, welcher für die X- und Y-Achse dem

thermischen Ausdehnungsverhalten der Maßstäbe entspricht. Diese sind im VCMM bereits über die Gleichung (10) in Abschnitt 2.3.1 modelliert. Der Zusammenhang kann an dieser Stelle auch für die Z-Achse verwendet werden, wobei der Ausdehnungskoeffizient  $\alpha_z = 0,0 \text{ K}^{-1}$  entspricht. Da das Modell ausschließlich eine Komponente pro Achse zur Ausdehnung berücksichtigt, den Maßstab, entfällt die Summenbildung über mehrere Bauteile wie bei dem thermischen Ausdehnungskreis. Dadurch ergibt sich, dass die Berechnungen für die homogenen Temperaturszenarien mit  $\Delta\vartheta_1 = 0,5 \text{ K}$  und  $\Delta\vartheta_2 = 1 \text{ K}$  den Szenarien mit einem thermischen Gradienten von  $\nabla\vartheta_3 = 1 \text{ K/m}$  und  $\nabla\vartheta_4 = 2 \text{ K/m}$  entlang der kompletten Achse entsprechen. Weiterhin ergibt sich daher, dass der Bezugspunkt für die thermische Ausdehnung beim Anfangspunkt des Maßstabs liegt, sodass die Werte der Minimalposition von Beispiel 1 durchgehend gleich null sind. Die Werte der Maximalposition entsprechen somit der Längenänderung über die komplette Länge des Maßstabs und der maximalen Positionsabweichung (siehe Tabelle 12) bei der Interferometermessung. Die Längenmessabweichungen für die Messaufgabe am Großverzahnungsnormal ergibt sich über die Differenz der Ausdehnung an den Messpunkten (siehe Tabelle 12).

Tabelle 12: Nach dem Prinzip des Starrkörpermodells ermittelte Positionsabweichungen hervorgerufen durch verschiedene Temperaturszenarien bei der interferometrischen Erfassung der Geometrieabweichungen und bei Längenmessungen am Großverzahnungsnormal

Temperatur- szenario	Abweichung in $\mu\text{m}$ bei Maximalposition			Abweichung in $\mu\text{m}$ der Längen		
	$\Delta l_X$	$\Delta l_Y$	$\Delta l_Z$	$\Delta l_{WX}$	$\Delta l_{WY}$	$\Delta l_{WZ}$
0,5 K; 1 K/Achse	15,0	12,0	0,0	5,6	5,6	0,0
1 K; 2 K/Achse	30,0	24,0	0,0	11,2	11,2	0,0
0,5 K/m	37,5	24,0	0,0	14,1	11,2	0,0
0,1 K/m	7,5	4,8	0,0	2,8	2,2	0,0

Die Ergebnisse zeigen eine Abhängigkeit des Wertes von der Achslänge und von der Höhe des Temperaturgradienten. Es ergeben sich bis zu  $37,5 \mu\text{m}$  für die Positionsabweichung der X- und maximal  $24,0 \mu\text{m}$  in der Y-Achse, wenn jeweils ein thermischer Gradient von  $0,5 \text{ K/m}$  vorherrscht. Für die Z-Komponente ergibt sich die Positionsabweichung durchgehend zu null, da der Ausdehnungskoeffizient des Maßstabs null ist. Bei dem zweiten Beispiel ergeben sich thermisch beeinflusste Längenabweichungen für die X- und Y-Komponenten von bis zu  $14,1 \mu\text{m}$ . Diese sind kleiner als die thermisch bedingte Ausdehnung des Werkstücks, da die spezifischen Ausdehnungskoeffizien-

ten der Maßstäbe kleiner sind. Die thermischen Geometrieabweichungen des virtuellen KMG der PTB weisen neben den Positionsabweichungen, die im thermischen Ausdehnungskreis berücksichtigt sind, weitere Abweichungsparameter auf. Die translatorischen und rotatorischen Geometrieabweichungen und die Rechtwinkligkeit sind ebenfalls von der Temperatur des Groß-KMG abhängig. Die Erkenntnisse, die der aktuellen Modellierung zugrunde liegen, bauen auf Untersuchungen an einem Portalmessgerät mit kleinem Messvolumen auf [Wäldele et al., 2002]. Hierbei wurde eine Klimakammer um ein KMG herum aufgestellt, um eine kontrollierte Umgebungstemperatur zu erzeugen. Dies ist bei dem Groß-KMG nicht praktikabel. Weiterhin würde das Temperieren der großen Massen zu einer langen Abkühlzeit und damit zu einer langen Ausfallzeit des Messgerätes führen. Um die signifikanten Auswirkungen eines Temperaturgradienten auf das Groß-KMG in Brückenbauweise abzuschätzen, wurde das Verhalten mit Hilfe der FEM-Software *Ansys Workbench* (Version 19.2.120) simuliert. Als Grundlage für die Simulationen wurde das KMG stark vereinfacht als CAD-Modell in der Software *SolidWorks* (Version Premium 2019 SP3.0) erstellt, wie in Bild 21 dargestellt. Das Modell besteht aus dem Fundament aus Stahlbeton, zwei Granitblöcken entlang der  $X$ -Achse, der Traverse aus Granit und der Pinole aus Glaskeramik. Zuerst wird das CAD-Modell in die FEM-Software importiert und ein automatisches Netz generiert. Bestimmte Stellen von besonderem Interesse werden mit zusätzlichen Geometrieelementen und einer höheren Netzdichte versehen. Dies gilt für die Komponenten, an denen die Führungen für das Tastelement befestigt sind.

Danach werden Randbedingungen des thermisch-statischen Modells festgelegt, welche die physikalischen Eigenschaften der Temperaturverteilung nachbilden und mit einer stationären Simulation die Berechnung der resultierenden Verformung ermöglichen. Die Bezugstemperatur, welche dem ursprünglichen Modell zugewiesen wird, ist die Referenztemperatur mit  $\vartheta_{\text{ref}} = 20,0 \text{ °C}$ . Weiterhin handelt es sich neben dem bisher berücksichtigten Ausdehnungskoeffizient um die Wärmeleitfähigkeit, das Elastizitätsmodul und die Querkontraktionszahl (siehe Tabelle 20 in Anhang B). Für die Berechnung sind die Verbindungen der einzelnen Bauteile untereinander möglichst realitätsnah zu definieren. Die Lagerung des Modells ist an der Unterseite des Fundaments mit 12 zylindrischen Stützstellen realisiert. Diese sind alle in Richtung der Schwerkraft fixiert. Zusätzlich wird eine Fläche in  $XY$ - und eine weitere in der  $Y$ -Richtung fixiert, sodass eine Drehung des KMG ausgeschlossen wird. Die Lager zwischen dem Stahlfundament und den Granitwangen sind je mit einem Fest- und einem Loslager erstellt. Die Verbindung zwischen Traverse und Granitwangen ist ebenfalls auf der einen Seite mit einem festen Kontakt und auf der anderen mit einem gleitenden Kontakt umgesetzt.

Die Pinole wird in den Simulationen vernachlässigt, da diese konstruktiv der Pinole des untersuchten Portalmeßgerätes entspricht. Daher sind keine Veränderungen zu den modellierten thermisch bedingten Geometrieabweichungen zu erwarten. Für die Simulationen werden Temperaturgradienten angenommen, die jeweils einem linearen Verlauf zwischen  $\vartheta_{\text{Start}} = 20,0\text{ °C}$  und  $\vartheta_{\text{End}} = 25,0\text{ °C}$  entlang der X-, Y- und Z-Achse des kompletten Meßgerätes entsprechen. Daraufhin wird die entsprechende Temperaturverteilung und anschließend die resultierende Verformung berechnet. Für den thermischen Einfluss entlang der X-Achse bedeutet dies, dass sich relevante Verformungen der Wangen in der Y- und Z-Richtung ergeben (siehe Bild 22). Die temperaturbedingte Deformation in Y-Richtung ist hierbei gleichmäßig,

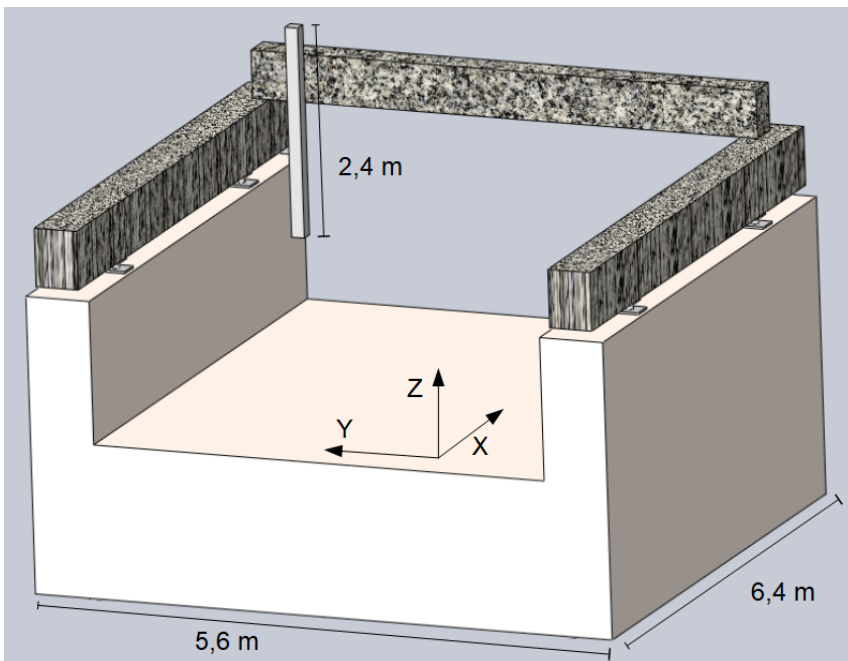


Bild 21: Stark vereinfachtes Modell des Groß-KMG als Grundlage der Simulationen mit FEM zur thermischen Verformung

sodass die Traverse symmetrisch beeinflusst wird und keine Geometrieabweichung daraus folgt. Dahingegen führt der thermische Einfluss zu einer Verformung in Z-Richtung, wodurch diese bei der Erfassung der Geometrieabweichungen der X-Achse Werte ungleich null aufweist. Dabei ist zu unterscheiden, ob die Lagerungen auf zwei fixierten Punkten, wie bei dem bisherigen Modellen, erfolgt oder mit einem Fest- und einem Loslager, wie es bei großen Meßgeräten in Brückenbauweise üblich ist. Daraus ergeben

sich unterschiedliche Deformationen. Die beidseitig eingespannte Variante kann über eine quadratische Funktion beschrieben werden, wie bisher angenommen. Jedoch muss berücksichtigt werden, dass die Lagerpunkte nicht am Anfang und Ende der Führungsachse angebracht sind. Sie befinden sich an spezifischen Punkten, den sogenannten Bessel-Punkten. Unter der Annahme, dass in den Lagerpunkten die Verformung gleich null ist, muss eine Anpassung der, auf der Portalbauweise basierenden, Gleichung durchgeführt werden. Entgegen des quadratischen Verlaufs verformt sich

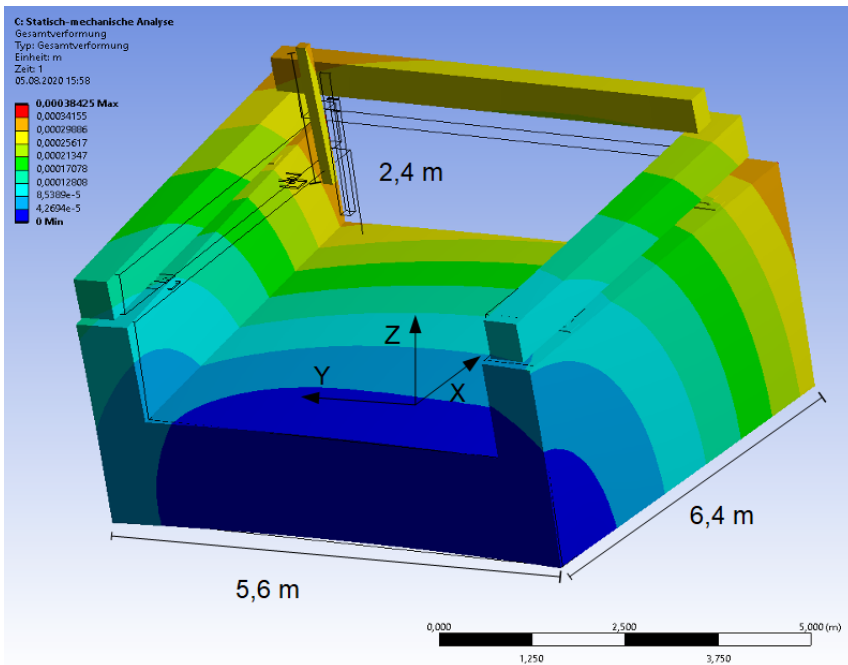


Bild 22: Deformation des KMG bei einem Temperaturgradienten in X-Richtung

die Wange bei einseitiger Lagerung linear in Z-Richtung. Weiterhin ist die Traverse von der Temperaturverteilung beeinflusst. Diese ist bei dem Messgerät in Brückenbauweise ein individuelles Bauteil, anstelle des Querbalkens bei der Portalbauweise, und muss dementsprechend anders betrachtet werden. Die Simulationen werden für ein einseitig und beidseitig eingespanntes System durchgeführt. Hierbei weist die Simulation mit FEM Verformungen der Traverse in X-Richtung auf, wenn ein Temperaturgradient in X-Richtung vorhanden ist. Je nach Lagerung ist ein lineares oder quadratisches Verhalten zu beobachten, welches abhängig von der Position der Traverse unterschiedlich ausgeprägt ist. In einem weiteren Schritt wird ein Temperaturgradient entlang der Y-Achse simuliert (siehe Bild 23). Dieser beeinflusst sowohl die X-Achse in Y- und Z-Richtung als auch die Y-Achse in X- und Z-Richtung.

Zwischen der linken und rechten Wange ergeben sich durch den thermischen Verlauf unterschiedliche Verformungen, woraus sich eine veränderte Führung der Traverse ableiten lässt. Die entsprechenden Deformationen verhalten sich bei einem Los- und einem Festlager zwischen Fundament und Wange jeweils linear. Bei zwei Festlagern überlagert sich der lineare Zusammenhang mit einem quadratischen Anteil.

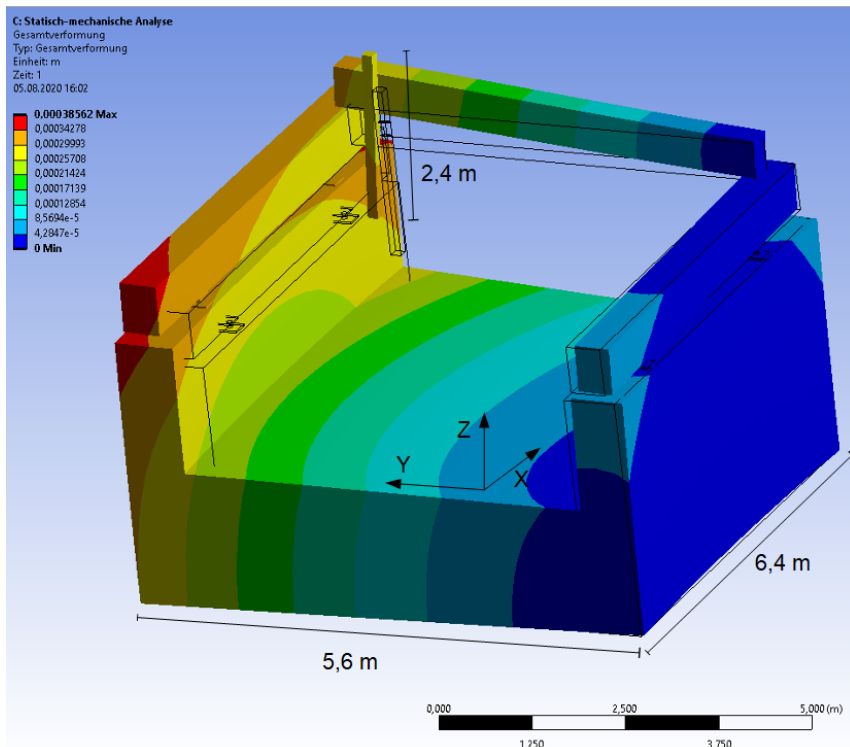


Bild 23: Deformation des KMG bei einem Temperaturgradienten in Y-Richtung

Zusätzlich beeinflussen die Lagervarianten Verformung der Traverse in X-Richtung. Der Verlauf ist linear bei einseitiger Lagerung und quadratisch bei beidseitig fixierten Lagern. Die Z-Komponente der Verformung ist bei beiden Varianten linear. Zuletzt wird ein räumlicher, thermischer Gradient entlang der Z-Achse simulativ nachgebildet (siehe Bild 24). Hierbei verformen sich das Fundament und die Wangen in Y- und Z-Richtung gleichmäßig. Das gleiche gilt für die Deformation der Traverse in X-Richtung, wenn diese einseitig gelagert ist. Dahingegen ist bei beidseitiger Lagerung ein quadratischer Verlauf zu berücksichtigen. Für die Z-Komponente gilt bei beiden Lagervarianten, dass sich die Verformung der Wangen und der Traverse parabelförmig verhält.

Das simulierte Verhalten der Bauteile entspricht nicht durchgehend den Erwartungen. Es wird ersichtlich, dass die Wangen und die Traverse eine starke Wechselwirkung aufeinander haben. Dies wird besonders deutlich, wenn das Material einzelner Bauteile testweise mit einem thermischen Ausdehnungskoeffizienten gleich null gesetzt wird, sodass ausschließlich die Verformung des anderen Bauteils zu sehen sein sollte. Aufgrund der mechanischen Spannungen entstehen auch Verformungen der invarianten Bauteile. Aus den Beobachtungen folgt, dass das stark vereinfachte Modell nicht den realen Eigenschaften des Groß-KMG entspricht. Eine detaillierte Kenntnis und entsprechend komplexe Simulation der Lagerungen ist notwendig. Den-

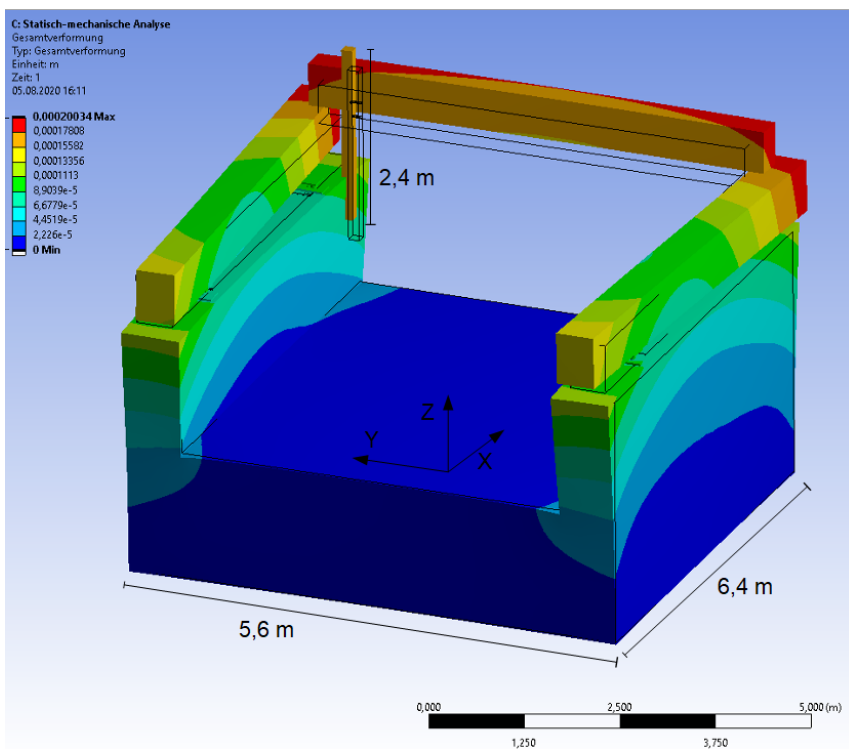


Bild 24: Deformation des KMG bei einem Temperaturgradienten in Z-Richtung

noch können die ermittelten Ergebnisse neue Erkenntnisse für eine Modellierung liefern. Erste Hinweise auf notwendige Anpassungen sind bereits deutlich geworden und müssen in einem weiteren Prozess genau betrachtet werden. Hierzu zählt die abweichende Lagerung der X-Führungen beim Groß-KMG in Brückenbauweise, welche die Modelle der thermischen Geometrieabweichungen für  $\Delta x_{t,y}$  und  $\Delta x_{t,z}$  beeinflussen. Zusätzlich muss der Einfluss eines Temperaturgradienten entlang der Y-Achse auf die Abweichungen

$\Delta y_{t,x}$  und  $\Delta y_{t,z}$  und deren Wechselwirkung zu den Rotationsabweichungen genauer betrachtet werden. Zuletzt ist zu prüfen, ob die Abweichung  $\Delta x_{t,z}$  bei einem Temperaturverlauf in Z-Richtung bei dem Messgerät vernachlässigt werden kann. Daraufhin müssen aus allen translatorischen Geometrieabweichungen die rotatorischen Abweichungen abgeleitet und geprüft werden. Anschließend sollten die Rechtwinkligkeitsabweichungen, insbesondere die Abweichung der X- zur Z-Achse ( $\Delta\varphi_{x,z}$ ), betrachtet werden.

### 4.2.3 Auswirkung der Modellierungen der thermischen Geometrieabweichungen auf die Messunsicherheitsermittlung

In den vorangegangenen Untersuchungen wurden die Auswirkungen eines thermischen Einflusses auf den physischen Zustand des Groß-KMG aufgezeigt. Bei dem Ansatz eines thermischen Ausdehnungskreises werden die spezifischen Längenausdehnungen aller Bauteile berücksichtigt, die in dem Messkreis einer jeweiligen Achse beteiligt sind. Bei den genannten Beispielrechnungen wurden die Eigenschaften des Groß-KMG der PTB verwendet. Aus den thermisch beeinflussten Längenabweichungen des spezifischen Messkreises für einen Messpunkt kann dessen Verschiebung zu einer Position ohne Temperatureinfluss ermittelt werden. Die Differenz zwischen zwei Punkten führt zu Abweichungen in der entsprechenden Achse, welche den Unterschied zur nicht beeinflussten Längenmessung wiedergibt. Für den thermischen Ausdehnungskreis ergeben sich die dazugehörigen kombinierten Messunsicherheiten basierend auf den Messunsicherheitsbeiträgen der jeweiligen Teillängen  $u_{l_i}$ , der Temperaturmessung  $u_{\vartheta}$  und des Ausdehnungskoeffizienten  $u_{\alpha_i}$  ermittelt mit

$$u^2(l) = u_{l_i}^2(l) + u_{\alpha_i}^2(l) + u_{\vartheta}^2(l) \quad . \quad (34)$$

Die einzelnen Beiträge setzen sich wie folgt zusammen:

$$u^2(l) = \sum_{i=0}^N \alpha_i^2 \cdot \Delta\vartheta^2 \cdot u_{l_i}^2 + \sum_{i=0}^N l_i^2 \cdot \Delta\vartheta^2 \cdot u_{\alpha_i}^2 + \sum_{i=0}^N l_i^2 \cdot \alpha_i^2 \cdot u_{\Delta\vartheta}^2 \quad (35)$$

Hierbei werden die Längen und Ausdehnungskoeffizienten der beteiligten Komponenten  $i$ , die vorherrschende Temperatur sowie deren Standardunsicherheiten einzeln berücksichtigt und quadratisch aufsummiert. Die Messunsicherheiten bei den Beispielen zum thermisch Einfluss von Seite 62 ergeben sich zu den Werten in den Tabellen 13 und 14. Für die Berechnung sind die Standardunsicherheit der Längenmessung mit  $u_{l_i} = 1,0 \text{ mm}$  sowie die des Ausdehnungskoeffizienten mit Werten zwischen  $u_{\alpha_i} = 1,0 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$

und  $5,0 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  berücksichtigt. Weiterhin wird bei der homogenen Temperaturverteilung eine Standardunsicherheit der Temperaturerfassung von  $u_\vartheta = 0,1 \text{ K}$  angenommen. Für die inhomogene Temperaturverteilung wird  $\Delta\vartheta$  ebenfalls mit  $0,1 \text{ K}$  abgeschätzt. Die Berücksichtigung ist durch die Längenteile und Ausdehnungskoeffizienten der einzelnen Bauteile dennoch abweichend von der Variante mit inhomogener Temperaturverteilung. Die ermittelten Werte zeigen den größten Wert mit  $6,7 \mu\text{m}$  für die Messunsicherheit der Abweichung  $u_{lX}$ . Dies entspricht dem thermischen Einfluss einer inhomogenen Temperaturverteilung mit  $0,5 \text{ K/m}$  bei der Maximalposition der X-Achse, welche die längste Messlänge in Zusammenhang mit dem größten Temperatureinfluss aufweist. Hierbei ist auch der Wert der Positionsabweichung (siehe Tabelle 10) am größten. Der zweitgrößte Temperatureinfluss in Form der homogenen Temperaturabweichung zur Referenztemperatur von  $20,0 \text{ }^\circ\text{C}$  mit  $1,0 \text{ K}$  führt zum zweitgrößten Messunsicherheitsbeitrag mit  $u_{lX} = 5,2 \mu\text{m}$ .

Tabelle 13: Messunsicherheitsbeiträge der nach dem Prinzip des thermischen Ausdehnungskreises ermittelten Positionsabweichungen hervorgerufen durch verschiedene Temperaturszenarien bei der interferometrischen Erfassung der Geometrieabweichungen

Temperatur-szenario	Messunsicherheit der Abw. in $\mu\text{m}$					
	der Minimalposition			der Maximalposition		
	$u_{lX}$	$u_{lY}$	$u_{lZ}$	$u_{lX}$	$u_{lY}$	$u_{lZ}$
0,5 K	2,0	2,7	1,1	2,8	1,3	2,3
1 K	2,0	3,0	1,2	5,2	2,6	3,0
1 K pro Achse	2,0	2,8	1,3	2,7	1,7	2,1
2 K pro Achse	2,3	2,8	2,0	2,7	1,7	3,2
0,5 K/m	2,4	2,8	1,3	6,7	3,4	2,1
0,1 K/m	2,0	2,8	1,0	1,6	0,8	1,9

Ebenfalls ergibt sich bei dem zweiten Beispiel (siehe Tabelle 14) mit  $u_{wX} = 3,6 \mu\text{m}$  die größte Messunsicherheit bei der größten Längenmessabweichung. Weiterhin sind die Messunsicherheiten der Positionsabweichungen des Starrkörpermodells mit den gleichen Eingangsparametern wie bei dem thermischen Ausdehnungskreis berechnet worden. In der Berechnung wird ausschließlich die Ausdehnung einer Komponente, die des Maßstabs, berücksichtigt. Dadurch entfällt die Summenbildung sowie die Verwendung verschiedener Ausdehnungskoeffizienten, außer für die unterschiedlichen Materialien der Maßstäbe. Die Standardunsicherheit des thermischen Ausdehnungskoeffizienten ist mit  $u = 1 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  definiert. Die Messunsicherheiten beider

Beispiele ergeben sich zu den Werten in Tabelle 15, wobei die Messunsicherheiten der Minimalpositionen mit Werten kleiner  $0,1 \mu\text{m}$  vernachlässigt werden. Aus der Tabelle 15 geht hervor, dass im Vergleich von Beispiel 1 und 2 die Ergebnisse einen längenabhängigen Einfluss aufweisen. Über die verschiedenen Temperaturvarianten bleiben die Werte nahezu gleich. Für das zweite

Tabelle 14: Messunsicherheitsbeiträge der nach dem Prinzip des thermischen Ausdehnungskreises ermittelten Positionsabweichungen hervorgerufen durch verschiedene Temperaturszenarien bei Längenmessungen am Großverzahnungsnormal

Temperatur-szenario	Messunsicherheit in $\mu\text{m}$ der Länge am Werkstück		
	$u_{WX}$	$u_{WY}$	$u_{WZ}$
0,5 K	1,8	2,0	1,8
1 K	3,6	2,0	2,1
1 K pro Achse	1,1	2,2	1,7
2 K pro Achse	1,6	2,3	2,5
0,5 K/m	2,1	2,3	1,7
0,1 K/m	1,1	2,2	1,5

Beispiel mit einem taktil erfassten (virtuellen) Werkstück muss zusätzlich die Ausdehnungen des Werkstücks betrachtet werden. Der thermische Einfluss auf das Werkstück ist in der Modellierung im VCMM bereits mit Gleichung (14) berücksichtigt. Die entsprechenden Messunsicherheitsbeiträge ergeben sich zu  $u_{WX/Y} = 0,7 \mu\text{m}$  und  $u_{WZ} = 0,3 \mu\text{m}$  für eine Temperaturdifferenz von  $0,5 \text{ K}$  sowie  $u_{WX/Y} = 1,1 \mu\text{m}$  und  $u_{WZ} = 0,5 \mu\text{m}$  für  $\Delta\vartheta = 1,0 \text{ K}$ . Bei der Betrachtung einer homogenen Temperaturverteilung entlang der X- oder Y-Achse führen beide Modellierungsansätze zu den gleichen, relativen Längenabweichungen in Bezug auf die Positionsabweichungen ( $\Delta x_{t,x}$  und  $\Delta y_{t,y}$ ). Bei der Abweichung der Z-Achse wirken sich die Ansätze verschieden aus, da entweder die Ausdehnung aller baulichen Komponenten (Ausdehnungskreis) oder nur der Maßstab mit einem Ausdehnungskoeffizienten (Starrkörpermodell) berücksichtigt wird. Weiterhin ist es beim Groß-KMG wichtig, inhomogene Temperaturverteilungen zu betrachten. Bei dem thermischen Ausdehnungskreis werden unterschiedliche Temperaturen für die einzelnen Bauteile bei einer inhomogenen Temperaturverteilung berücksichtigt. Ebenso ergeben sich unterschiedliche Werte zur homogenen Temperaturverteilung für die Messunsicherheitsermittlung. Bei der Modellierung der thermisch bedingten Geometrieabweichungen sind verschiedene Aspekte zu betrachten. Der thermische Ausdehnungskreis bildet absolute

Tabelle 15: Messunsicherheitsbeiträge der nach dem Prinzip des Starrkörpermodells ermittelte Positionsabweichungen hervorgerufen durch verschiedene Temperaturszenarien bei der interferometrischen Erfassung der Geometrieabweichungen und bei Längenmessungen am Großverzahnungsnormal

Temperatur- szenario	Messunsicherheitsbeitrag in $\mu\text{m}$					
	der Maximalposition			der Länge am Werkstück		
	$u_{lX}$	$u_{lY}$	$u_{lZ}$	$u_{WX}$	$u_{WY}$	$u_{WZ}$
0,5 K; 1 K/Achse	3,0	2,4	0,1	2,1	1,8	0,1
1 K; 2 K/Achse	3,0	2,4	0,2	2,1	1,8	0,1
0,5 K/m	3,1	2,4	0,1	2,1	1,8	0,1
0,1 K/m	3,0	2,4	0,0	2,1	1,8	0,0

Positionsabweichungen ab. Bei dem jeweiligen Maßstab wird die Position des Referenzpunktes ermittelt, an dem der Maßstab gelagert ist. Es wird eine Verschiebung des kompletten Maßstabs zu der thermisch unbeeinflussten Position ermittelt. Weitere Punkte, die anschließend erfasst werden, sind ausschließlich von der thermischen Ausdehnung des Maßstabs beeinflusst, sofern die restlichen Ausdehnungen konstant bleiben. Bei den bisherigen Modellierungen der Geometrieabweichungen mit dem Starrkörpermodell wurden Werte erfasst, während das Portalmessgerät thermisch geändert wurde. Solche absoluten Verschiebungen sind somit in der Erfassung enthalten, wurden jedoch nicht mit abgebildet. Die Verformung der Achsen steht bei den mathematischen Zusammenhängen im Vordergrund. Die Simulationen mit FEM erlauben es, neben der Verformung auch die Verschiebung zu ermitteln. In den ausstehenden, detaillierteren Simulationen kann auf beide Aspekte geachtet werden.

## 5 Messabweichungen durch das Werkstück

Bestimmte Eigenschaften des Werkstücks wirken sich auf den Messprozess aus. Die wesentlichen Einflussfaktoren des Werkstücks in der taktilen dimensionellen Messtechnik sind Temperatur, Eigengewicht, Form und Rauheit. Hierbei ist zwischen großen und kleinen Werkstücken zu unterscheiden. Form und Rauheit werden in den nachfolgenden Untersuchungen vernachlässigt, da ihr Verhalten bereits untersucht wurde [Wäldele et al., 2002] und ähnlich zu dem von kleinen Bauteilen ist. Der Einfluss von Temperatur und Eigengewicht ist bei der Messung von Großbauteilen besonders wichtig. Dies liegt daran, dass große Werkstücke länger zum Temperieren benötigen als kleine und die thermische Ausdehnung proportional zur Größe des Bauteils ist. Überprüfungen im Fertigungsprozess finden unter variierenden thermischen Bedingungen statt. Bei einfachen Längenmessungen ist der Einfluss der thermischen Ausdehnung anhand des proportionalen Verhaltens direkt abzuschätzen. Die thermisch bedingte Längenänderung  $\Delta l_W$  ergibt sich für die zu messende ideale Strecke  $l_W$  mit dem Ausdehnungskoeffizienten des Materials  $\alpha_W$  und einer Temperaturdifferenz  $\Delta\vartheta_W$  der vorherrschenden Temperatur  $\vartheta_W$  zur Bezugstemperatur  $\vartheta_{\text{ref}} = 20,0 \text{ °C}$  zu

$$\Delta l_W = l_W \cdot \alpha_W \cdot \Delta\vartheta_W = l_W \cdot \alpha_W \cdot (\vartheta_W - \vartheta_{\text{ref}}) \quad . \quad (36)$$

Entspricht der Messparameter dahingegen nicht einer einfachen Länge, sondern ist eine komplizierte Geometrie des Werkstücks zu berücksichtigen, dann ist diese Abschätzung möglicherweise nicht ausreichend. Dies gilt beispielsweise für evolventische Zahnräder und die dazugehörigen Verzahnungsmessgrößen, wie sie als typische Bauteile und Messgrößen im Bereich der Getriebe von Windenergieanlagen zu finden sind. Weiterhin ist die Lagerung großer und schwerer Werkstücke während des Messprozesses von entscheidender Bedeutung für das Messergebnis. Im Gegensatz zu kleinen Bauteilen sind die auftretenden Kräfte zwischen Stützstellen deutlich größer. Dies führt zu größeren Deformationen, welche einen Einfluss auf die Werkstücklage beim Einmessen eines Werkstückkoordinatensystems und auf die Messgröße selbst haben. Ausführliche Untersuchungen des thermischen und gravitativen Einflusses sind notwendig. Nur unter Kenntnis aller Einflussfaktoren kann die Rückführungskette lückenlos geschlossen werden. Die Untersuchungen des Einflusses in Abschnitt 5.1 (teilweise publiziert in Wiemann et al. [2019a]) dienen dazu, die Auswirkungen der Temperatur auf die Messabweichungen der Verzahnungsmessgrößen und die Messunsicherheiten abschätzen zu können. Darüber hinaus werden Untersuchungen zur Auswir-

kung der Lagerungen in Abschnitt 5.2 diskutiert, um die Größe des Einflusses einzuschätzen und da verschiedene Lagerungsvarianten unterschiedlich Einfluss nehmen.

## 5.1 Einfluss der Werkstücktemperatur am Beispiel des Großverzahnungsnormal

Die Temperatur des Materials hat einen direkten Einfluss auf die geometrischen Eigenschaften des Werkstücks. Im Gegensatz zum Temperieren kleiner Bauteile dauert der Prozess des Abkühlens oder Erwärms bei großen Bauteilen länger. Da die Temperaturen während der Fertigung deutlich höher als die geforderte Referenztemperatur sind, ist im Folgenden ausschließlich ein Abkühlprozess betrachtet. In den folgenden drei Abschnitten wird der Einfluss der Temperatur auf das Großverzahnungsnormal betrachtet. Zunächst wird das Temperaturverhalten des Werkstücks (siehe Abschnitt 5.1.1) theoretisch und experimentell untersucht. Zur Ermittlung der Auswirkungen auf die Verzahnungsmessgrößen werden anschließend Simulationen der Werkstückdeformation mit FEM betrachtet. Dies wird im Vergleich zu den Ergebnissen tatsächlich durchgeführter Verifikationsmessungen in Abschnitt 5.1.2 dargestellt. Zuletzt werden die entsprechenden Messabweichungen und der Messunsicherheitsbeitrag basierend auf den verschiedenen Erkenntnissen in Abschnitt 5.1.3 diskutiert.

### 5.1.1 Ermittlung der Temperaturverteilung im Werkstück

In einem ersten Schritt wird das Abkühlen an dem Großverzahnungsnormal, als Beispiel für ein großes Bauteil, in einer Simulation mit FEM durchgeführt. Als Grundlage für die gewählten Simulationen dient ein CAD-Modell des Werkstücks, welches mit der Software *PTC Creo Parametrics* (Version 3.0 - Mo20 (13.2.20.23)) erstellt wurde. Weiterhin ist das Material berücksichtigt, welches aus einer Chrom-Nickel-Molybdän-Legierung (siehe Tabelle 21 in Anhang B) besteht. Für die Analyse mit FEM wird die Software *Ansys Workbench* (Version 19.2) verwendet. Als Randbedingungen sind Parameter für den Wärmefluss hinterlegt. Die Schwerkraft wird während der Berechnung dieser Simulationen mit FEM nicht berücksichtigt, da die Auswirkung konstant bleibt und nur die Temperatur von Interesse ist. Der Wärmefluss, als entscheidender Parameter zur Ermittlung der Dauer des Abkühlprozesses, wird mit einem Wärmeübergangskoeffizienten von  $h = 9,0 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  [Roloff et al., 2019] berücksichtigt, da dies ein Parameter zur Ermittlung der Dauer des Abkühlprozesses ist. Am Modell wird automatisiert ein grobes Netz erzeugt, wobei jedem Netzpunkt die gleiche, ausgewählte Starttemperatur  $\vartheta_{\text{FEM,W}} = 25,0 \text{ }^\circ\text{C}$  zugewiesen wird. Zusätzlich

ist die Umgebungstemperatur mit  $\vartheta_{\text{env}} = 20,0 \text{ °C}$  festgelegt. Daraufhin folgt die Simulation einer thermisch-transienten Auswertung mit natürlicher Konvektion für den Abkühlprozess. Der Endzeitpunkt wird abhängig von einem Abbruchkriterium ermittelt, welches erreicht ist, wenn ein Grenzwert unterschritten wird. Dieser Grenzwert ist definiert über die Differenz zwischen Minimal- und Maximaltemperatur über alle Knotenpunkte zu jedem Zeitpunkt des Abkühlprozesses. Die Differenz als Grenzwert muss den Wert  $0,2 \text{ K}$  unterschreiten. In diesem Fall ist dies bei einer Abkühlzeit von mehr als  $19 \text{ h}$  erreicht.

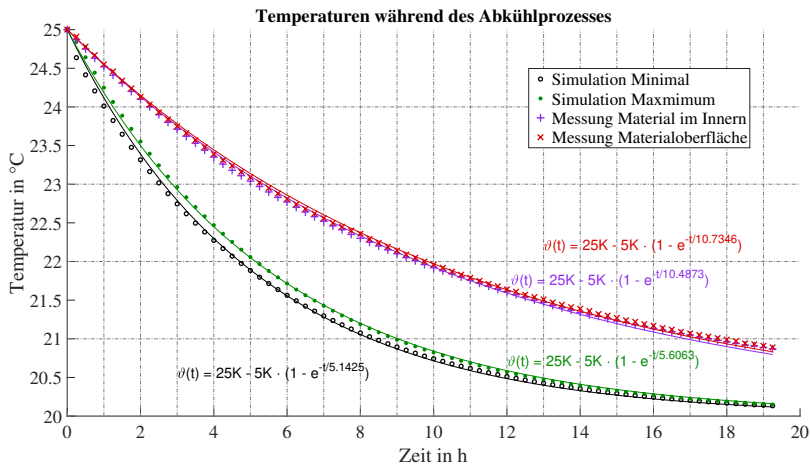


Bild 25: Temperaturverlauf der Simulation mit FEM und der Verifikationsmessung beim Abkühlprozess des Großverzahnungsnormal mit Regressionskurven nach Gleichung (37)

Weiterhin werden Temperaturwerte während eines Abkühlvorgangs am Großverzahnungsnormal gemessen. Das Werkstück wird zuerst gleichmäßig erwärmt und zum Abkühlen in den kontrolliert klimatisierten Messraum befördert. Dort werden die Temperaturwerte mit zwei Überwachungssystemen der inneren Material- und der Oberflächentemperaturen erfasst, wie in Kapitel 3 beschrieben. Die Mittelwerte der Temperaturen aller Sensoren einer Art werden ermittelt und in Bild 25 über der Zeit aufgetragen. Diese sind der Minimal- und Maximaltemperatur der Simulation mit FEM gegenübergestellt. In dem Bild ist zu erkennen, dass alle Datenreihen erwartungsgemäß einen exponentiellen Verlauf aufweisen. Die simulierten Verläufe für die Minimal- und Maximaltemperatur während des Abkühlprozesses sind sich sehr ähnlich, genauso wie die Oberflächen- und Materialtemperaturen der Verifikationsmessung. Die Kurven lassen sich anhand des Newtonschen Abkühlungsgesetzes [Schenk et al., 2014] beschreiben, welches den Temperaturverlauf in Abhängigkeit von der Zeit  $\vartheta(t)$  mit dem Startwert der

Temperatur  $\vartheta_0$ , der Differenz  $\Delta\vartheta$  von diesem zur Referenztemperatur  $\vartheta_{\text{ref}}$ , der Zeit  $t$  und einer Zeitkonstante  $T_1$  beschreibt:

$$\vartheta(t) = \vartheta_0 \pm \Delta\vartheta \cdot (1 - e^{-t/T_1}) \quad (37)$$

Mit der Formel kann für jede Datenreihe eine individuelle Regressionskurve ermittelt werden. Diese sind für die Simulationen und die Verifikationsmessungen ebenfalls in Bild 25 dargestellt. Damit kann ein theoretischer Endzeitpunkt der Abkühlung berechnet werden. Für eine Zieltemperatur von  $20,1\text{ }^\circ\text{C}$  ergibt sich für den Minimalwert der Simulation eine Zeit von  $20,1\text{ h}$ , wohingegen die Zieltemperatur der inneren Materialtemperatur bei der Messung erst nach  $42,0\text{ h}$  erreicht ist. Der Unterschied ergibt sich vermutlich daraus, dass die Wärmeleitfähigkeit bei der Simulation nicht berücksichtigt wurde. Es lässt sich schlussfolgern, dass eine lange Abkühlphase notwendig ist, wenn Messungen mit kleiner Messunsicherheit erfolgen sollen. Die räumliche Temperaturinhomogenität bei der durchgeführten Messung ist durch das gleichmäßige Temperieren gering ausgeprägt. Bei einer mittleren Werkstücktemperatur von  $\bar{\vartheta}_{W,i} = 24,97\text{ }^\circ\text{C}$  ergibt sich die räumliche Spanne über alle Temperatursensoren zu  $R_{\vartheta,W} = 0,5\text{ K}$ . Zur Visualisierung wurden die tatsächlich gemessenen Werte als Eingangsgröße der Knotenpunkte  $\vartheta_{\text{FEM},W,i}$  in das bestehende CAD-Modell in der Software *Ansys Workbench* eingefügt. Die resultierende räumliche Verteilung ist in Bild 26 dargestellt.

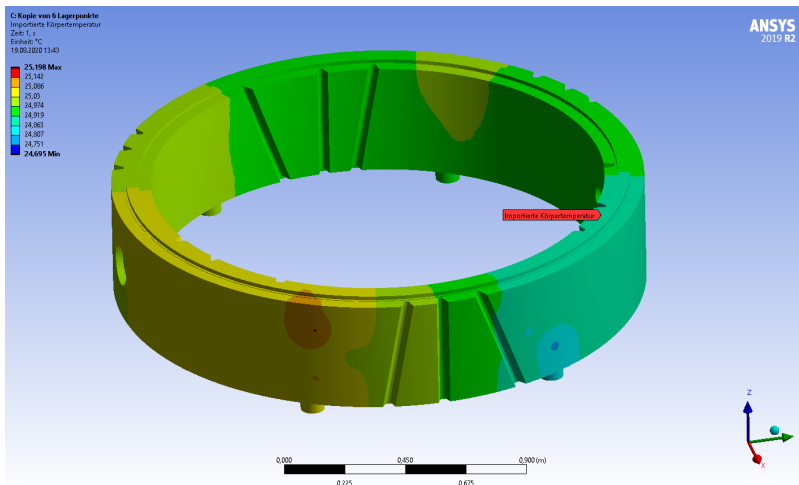


Bild 26: Temperaturverteilung bei dem ersten Durchlauf der Verifikationsmessung des Großverzahnungsnormalms

Es kann davon ausgegangen werden, dass diese räumliche Temperaturverteilung nicht repräsentativ für ein industrielles Umfeld ist, bei dem stark

inhomogene Umgebungsbedingungen und größere Temperaturdifferenzen zu erwarten sind. Dennoch sollte eine Abschätzung der Auswirkungen spezifischer Werkstücktemperaturen erfolgen, um aufzuzeigen, ob und in welcher Weise dieser Einflussfaktor in der Messunsicherheitsermittlung betrachtet werden muss. In dem folgenden Abschnitt werden daher die Auswirkungen einer thermischen Deformation auf die Verzahnungsmessgrößen am Großverzahnungsnormal untersucht.

### 5.1.2 Ermittlung des Einflusses der Werkstücktemperatur auf die Verzahnungsmessgrößen

Um die Auswirkungen der thermisch verursachten Deformationen auf die Messgrößen der Verzahnung zu verdeutlichen, werden in diesem Abschnitt theoretische Untersuchungen mittels FEM und experimentelle Verifikationsmessungen am Groß-KMG dargestellt. Für die theoretischen Untersuchungen wird das CAD-Modell des Großverzahnungsnormal mit allen relevanten Eigenschaften des physischen Zahnrads, wie den spezifischen Verzahnungskenngrößen (siehe Tabelle 1, Seite 31) und den evolventischen Zahnprofilen, erzeugt. Mit der Evolventengleichung (siehe Gleichung (19)) wird die Geometrie der Flanken erstellt. Vor Beginn der Simulation mit der Software *Ansys Workbench* (Version 17.1.127) sind Randbedingungen festzulegen, in denen der entsprechende thermische Ausdehnungskoeffizient  $\alpha_W$  des Materials mit  $11,1 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  berücksichtigt wird. Zusätzlich ist die Auflagevorrichtung im Modell eingebunden, sodass eine möglichst getreue digitale Nachbildung des Großverzahnungsnormal entsteht. Diese ist notwendig, um den Einfluss der Werkstücktemperatur so zu simulieren, wie dieser die Verzahnungsmessgrößen während der Messung beeinflusst. Im nächsten Schritt wird automatisiert das Netz der finiten Elemente erzeugt. Zu Beginn der Simulation ist es möglich, die Abstände der Punkte festzulegen. Neben einer Auswahl an vorgefertigten Netzdichten für das gesamte Modell ist es auch möglich eine konkrete Abstandsangabe bei einzelnen Elementen zu wählen. Dies wird für speziell generierte Elemente, die anschließend für die Auswertung der relevanten Verzahnungsmessgrößen von besonderer Bedeutung sind, umgesetzt. Wie zuvor beschrieben, handelt es sich um die Form-, Winkel- und Gesamtabweichung der Profil- und Flankenlinien. Damit die Auswertung dieser Messgrößen erfolgen kann, sind die Messlinien als geometrische Objekte im CAD-Modell ergänzt worden. Die Geometrielemente entsprechen den Messlinien an der mittleren Zahnbreite für die Profilparameter und den Linien am V-Zylinder für die Flankenlinienparameter. Der V-Zylinder ist nach DIN ISO 21771-08 [2014] „der Zylinder, der von der Bezugsebene der Bezugsstange während der Erzeugung tangiert wird“. Diese Elemente sind mit einer sehr hohen Punktdichte von einem Punkt pro Millimeter versehen. Das

restliche Netz enthält größere Knotenabstände, sodass der Rechenaufwand bei der Simulation so gering wie möglich ist.

Daraufhin wird die Berechnung einer statisch-thermischen Deformation des Modells zu definierten Temperaturverteilungen vorgenommen. Eine Untersuchung erfolgt bei einer homogenen Verteilung der Temperatur des Werkstücks, indem an jedem Knotenpunkt  $\vartheta_{\text{FEM,W}} = 25,0 \text{ }^\circ\text{C}$  angenommen wird. Eine weitere Untersuchung befasst sich mit einer inhomogenen Temperaturverteilung als Grundlage der statischen Simulation. Hierbei liegen unterschiedliche Temperaturwerte  $\vartheta_{\text{FEM,W},i}$  für die Knotenpunkte zu Grunde (siehe Bild 10, Seite 33), welche während der Verifikationsmessung von zwei voneinander unabhängigen Temperaturüberwachungssystemen erfasst wurden. Die Temperaturwerte sind an den entsprechenden Stellen als diskrete Temperaturen eines Knotenpunktes im CAD-Modell als Grundlage der Simulation integriert (siehe Bild 26). Die Auswirkungen einer diskreten thermischen Verteilung werden sowohl graphisch als auch numerisch wiedergegeben. Bei der resultierenden Verschiebung der entsprechenden Anteile der Geometrielemente handelt es sich um die Abweichung der Position eines Netzknotens auf einer Messlinie. Die Positionsabweichung zeigt die Länge des Vektors zwischen einem Netzknoten vor und nach der thermischen Simulation. Diese können entweder als Gesamtdeformation des 3D-Vektors oder als Teildeformation einer jeweiligen Koordinatenachse ausgegeben werden. Um die Positionsabweichungen als Verzahnungsmessgröße auswerten zu können, sind weitere Verarbeitungsschritte notwendig. Für die Auswertung von dreidimensionalen Ist-Koordinaten werden die Teildeformationen jeder Achse komponentenweise auf die Nominalkoordinaten der nicht verformten Flanke addiert. Daraus entstehen Punktkoordinaten auf den deformierten Profil- und Flankenlinien im Werkstückkoordinatensystem.

Die Auswertung der Verzahnungselemente erfolgt in den zwei Softwareanwendungen *InvolutePro* (Version 5.7.23 von Zeiss) und *Quindos* (Version 7.0 Release 1 von Hexagon). Die Auswerteprogramme sind in den automatisierten Mess- und Auswerteprozess integriert. Nach der Berechnung entstehen Diagramme der Profil- und Flankenlinienauswertung sowie Zahlenwerte der dazugehörigen Abweichungsparameter. Da die Unterschiede der Ergebnisse im Bereich von  $0,001 \text{ } \mu\text{m}$  liegen, ist im Folgenden keine weitere Unterscheidung der jeweiligen Softwarelösungen berücksichtigt. Im weiteren Verlauf werden die Ergebnisse auf die Werte der Winkelabweichungen beschränkt. Die Formabweichung kann vernachlässigt werden, da diese auch bei einer idealen Verzahnungsgeometrie mit thermischen Einfluss konstant bei null liegt. Die ideale Form der Oberfläche bleibt erhalten, da es sich um eine relative Ausgleichsgeometrie handelt. Die Ergebnisse der Formabweichungen weisen ausschließlich eine Ungenauigkeit des Rechenprozesses unter

0, 1  $\mu\text{m}$  auf. Des Weiteren wird die Gesamtabweichung vernachlässigt, da diese eine Kombination der beiden anderen Abweichungen ist. Ihr Verhalten entspricht bei diesen Untersuchungen dem der Winkelabweichung. Die Ergebnisse der Simulationen bei einer homogenen und einer inhomogenen Temperaturverteilung sind in Tabelle 16 dargestellt. Die Ergebnisse lassen sich mit den theoretischen Ergebnissen eines mathematischen Zusammenhangs von Temperatureinfluss und Flanken­geometrie vergleichen. Die Links- und Rechtsflanke sind dabei gleich. Der Ansatz basiert auf den geometrischen Zusammenhängen für die Koordinaten eines Profils oder einer Flankenlinie. Dieser kann für die Auswirkungen des Temperatureinflusses auf die Verzahnungsmessgrößen angewandt werden. Die thermisch beeinflussten Parameter beruhen auf dem Modell einer linearen Ausdehnung der Evolvente und sind mit einer Prime gekennzeichnet. Zur Berechnung dienen die Koordinaten der evolventischen Zahnflanken (aus den Gleichungen (17) bis (21), Kapitel 3). Unter der Annahme, dass eine lineare thermische Ausdehnung mit einem isotropen Skalierungsfaktor  $\lambda_{\vartheta}$  versehen ist, folgen thermisch beeinflussten Koordinaten  $(X', Y', Z')$  [Wiemann et al., 2019a]. Hierbei wird der Skalierungsfaktor  $\lambda_{\vartheta}$  unter Verwendung des Ausdehnungskoeffizienten des Materials  $\alpha_W$  und dem Temperaturunterschied  $\Delta\vartheta_W$  berechnet mit

$$\lambda_{\vartheta} = 1 + \alpha_W \cdot \Delta\vartheta_W = 1 + \alpha \cdot (\vartheta_{W,i} - \vartheta_{\text{ref}}) \quad . \quad (38)$$

Hierbei ist der Temperaturunterschied auch als Differenz der gemessenen Temperaturen am Werkstück  $\vartheta_{W,i}$  und der Referenztemperatur  $\vartheta_{\text{ref}}$  zu betrachten. Die thermisch beeinflussten Koordinaten  $(X', Y', Z')$  ergeben sich zu

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} &= \lambda_{\vartheta} \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \lambda_{\vartheta} \cdot r \cdot \cos(\varphi_b + \text{hand} \cdot \frac{c}{\lambda_{\vartheta}} \cdot \lambda_{\vartheta} \cdot Z + \text{flank} \cdot \text{inv} \alpha(\frac{\lambda_{\vartheta} \cdot r}{\lambda_{\vartheta}})) \\ \lambda_{\vartheta} \cdot r \cdot \sin(\varphi_b + \text{hand} \cdot \frac{c}{\lambda_{\vartheta}} \cdot \lambda_{\vartheta} \cdot Z + \text{flank} \cdot \text{inv} \alpha(\frac{\lambda_{\vartheta} \cdot r}{\lambda_{\vartheta}})) \\ \lambda_{\vartheta} \cdot Z \end{bmatrix} \quad . \quad (39) \end{aligned}$$

Die resultierenden Koordinaten  $(X', Y', Z')$  werden für die Profile und Flankenlinien mit einer zuvor spezifizierten Punktdichte ermittelt und können in der Auswertesoftware für Verzahnungsmessgrößen wie gemessene Punkte verarbeitet werden. Die Auswertung erfolgt somit für eine thermisch deformierte Nominalflanke und kann in Tabelle 16 mit den Ergebnissen der Simulationen mit FEM verglichen werden.

Tabelle 16: Betrag der thermisch beeinflussten Werte der Profil- und Flankenlinien-Winkelabweichungen bei mathematisch und simulativ ermittelten Koordinaten

	Temperatur in °C bei		
	mathem.	Simulation mit FEM	
	Gleichungen $\vartheta = 25,0$	homogen $\vartheta_{\text{FEM,W}} = 25,0$	inhomogen $\bar{\vartheta}_{\text{FEM,W,i}} = 24,97$
AVZ	$f_{\text{H}\alpha}$ in $\mu\text{m}$		
0°	4,764	4,752	4,747
10° r	4,607	4,603	4,590
20° l	4,473	4,466	4,454
	$f_{\text{H}\beta}$ in $\mu\text{m}$		
0°	0,000	0,022	0,050
10° r	3,855	3,850	3,797
20° l	7,911	7,958	7,827
IVZ	$f_{\text{H}\alpha}$ in $\mu\text{m}$		
0°	5,032	5,106	5,023
10° l	4,953	5,005	4,926
20° r	4,809	4,875	4,807
	$f_{\text{H}\beta}$ in $\mu\text{m}$		
0°	0,000	0,020	0,070
10° l	3,892	3,908	3,785
20° r	7,986	8,062	8,071

Die beschriebene Aufbereitung der mathematischen Berechnungen und Simulationen wird für eine homogene Temperaturverteilung am Werkstück von  $\vartheta_{\text{FEM,W}} = 25,0$  °C durchgeführt. Die mathematisch ermittelten Werte der Winkelabweichungen ergeben sich zu maximal 5,032  $\mu\text{m}$  für die Profil-Winkelabweichung und 7,986  $\mu\text{m}$  für die Flankenlinien-Winkelabweichung bei einer 20° Steigung. Bei der homogenen Verteilung der Simulation mit FEM ergeben sich Profil-Winkelabweichungen  $f_{\text{H}\alpha}$  von 4,466  $\mu\text{m}$  bis 4,752  $\mu\text{m}$  für die Außenverzahnung und Flankenlinien-Winkelabweichungen  $f_{\text{H}\beta}$  zwischen 0,022  $\mu\text{m}$  und 7,958  $\mu\text{m}$ . Die Werte der Innenverzahnung sind in der gleichen Größenordnung. Die Ergebnisse der inhomogenen Temperaturverteilung mit einer mittleren Temperatur über alle Sensoren von

$\bar{\vartheta}_{W,i} = 24,97^\circ\text{C}$  weichen maximal um  $0,083\ \mu\text{m}$  für die Profil- und  $0,131\ \mu\text{m}$  für die Flankenlinien-Winkelabweichung ab. Die Profil-Winkelabweichungen der unterschiedlichen Verzahnungen weisen unter dem thermischen Einfluss auf das Werkstück nahezu konstante Werte auf. Diese liegen zwischen  $4,454\ \mu\text{m}$  und  $5,106\ \mu\text{m}$ . Dahingegen entstehen bei den Flankenlinien-Winkelabweichungen der Verzahnung mit einem Schrägungswinkel von  $\beta = 0^\circ$  Werte kleiner gleich  $0,070\ \mu\text{m}$ . Bei der rechtssteigenden Außenverzahnung oder linkssteigenden Innenverzahnung mit  $\beta = 10^\circ$  ergeben sich Werte zwischen  $3,785\ \mu\text{m}$  und  $3,908\ \mu\text{m}$ . Für die Verzahnungen mit einem Schrägungswinkel von  $\beta = 20^\circ$  steigen die Werte auf  $7,827\ \mu\text{m}$  bis  $8,071\ \mu\text{m}$ . Um die mathematisch und simulativ ermittelte Auswirkung einer spezifischen Werkstücktemperatur auf die Verzahnungsmessgrößen zu verifizieren, wurden Messungen an dem Großverzahnungsnormal durchgeführt. Dafür wurde das Werkstück in einer warmen Umgebung gelagert und anschließend in der klimatisierten Umgebung des Groß-KMG während des Abkühlprozesses gemessen. Anfangs wurde das Tastsystem einmalig an einer kalibrierten Einmesskugel durch eine automatisiert ablaufende Messstrategie charakterisiert. Dies und die Bestimmung der Werkstücklage erfolgte mit einem Taster des Mehrfachtasters, welcher mit einem Versatz in negativer Z-Richtung ausgerichtet wurde. Die Lage des Werkstückkoordinatensystems wurde bei jedem Messdurchlauf vor der Messung der Außen- und der Innenverzahnung im Einzelpunktmodus bestimmt (siehe Abschnitt 3.2). Ein Messdurchlauf beinhaltet somit zweimal die Bestimmung der Werkstücklage sowie einmalig die Erfassung aller relevanten Außen- und Innenverzahnungen. Die Messungen der Verzahnungen werden im Scanning-Modus durchgeführt. Ein Messdurchlauf dauert 90 min. Es erfolgen zehn Messdurchläufe ohne eine Kompensation der Werkstücktemperatur.

Die Ergebnisse zeigen einen Verlauf der Messwerte in Abhängigkeit der vorherrschenden Temperaturen auf, wie in Bild 27 und Bild 28 dargestellt. Entlang der Abzissen sind die mittleren Temperaturen in Grad Celsius aufgetragen, die je zu Beginn eines Messdurchlaufs der Außen- oder Innenverzahnungsgruppe über alle Sensoren ermittelt und individuell zugeordnet wurden. Auf der Ordinate sind die dazugehörigen Differenzen zwischen dem jeweiligen Ergebnis des Messwertes zu dem einer Referenzmessung in Mikrometern aufgetragen. Die als Referenz verwendeten Messwerte wurden aus einem weiteren Messdurchlauf gewonnen, wobei eine mittlere Temperatur über alle erfassten Temperaturmesswerte von  $\bar{\vartheta}_{\text{ref,temp}} = 20,3\ ^\circ\text{C}$  vorherrschte.

## Winkelabweichungen der Außenverzahnung ohne automatisch kompenzierte Temperatur

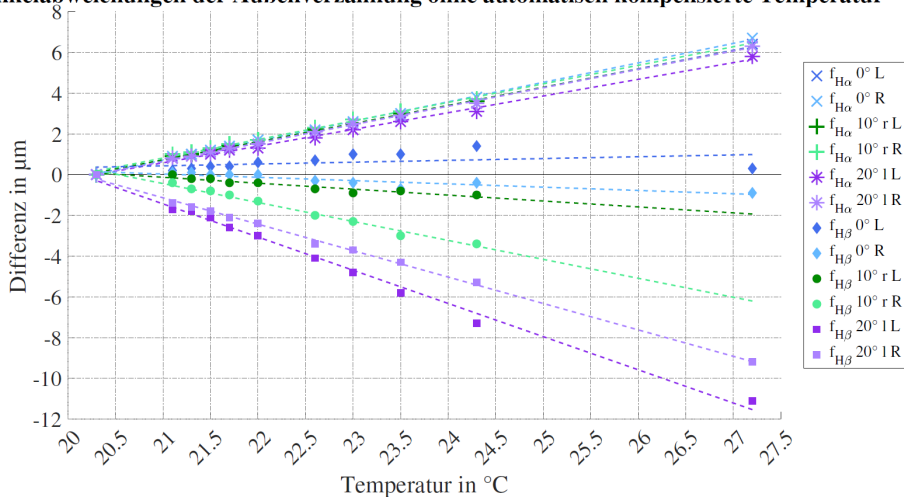


Bild 27: Differenzen der Winkelabweichungen von diskreten Temperaturen zur Referenzmessung der Außenverzahnung ohne thermische Kompensation des Groß-KMG<sup>2</sup>

Aus den Bildern geht hervor, dass eine lineare Abhängigkeit der Profil-Winkelabweichungen  $f_{H\alpha}$  und Flankenlinien-Winkelabweichungen  $f_{H\beta}$  zur Temperatur besteht. Je größer die Temperaturdifferenz zur Referenzmessung, desto größer ist der Unterschied der Winkelabweichungen der sechs verkörperten Verzahnungen. Für die Flankenlinien-Winkelabweichungen gilt zusätzlich eine Abhängigkeit vom Schrägungswinkel der Verzahnung. Entgegen der Auswertung der gerechneten und simulativ generierten Koordinaten ergeben sich für die Links- und Rechtsflanke jeweils leicht andere Werte. In Tabelle 17 sind Ergebnisse bei einer Temperatur von 25,0 °C abzulesen, die sich aus den Verifikationsmessungen ableiten lassen. Die Werte sind durch lineare Interpolation gewonnen, sodass ein Vergleich zu den Ergebnissen der Simulationen aus Tabelle 16 möglich ist. Die dazugehörigen linearen Trendlinien sind in den Bildern 27 und 28 enthalten. Die durch Interpolation gewonnenen Werte zeigen beispielhaft das Ausmaß des thermischen Einflusses auf die Verzahnungsmessgrößen. Die Profil-Winkelabweichungen ergeben sich zu Werten zwischen 3,610 µm und 4,377 µm. Für die Flankenlinien-Winkelabweichungen liegen die Werte zwischen 0,492 µm und 7,442 µm. Die simulativ ermittelte Abhängigkeit der Winkelabweichungen von der Werkstücktemperatur ist durch die Ergebnisse der Messung bestätigt, ebenso wie der zusätzliche Einfluss des Schrägungswinkels der Flankenlinien. Die Profil-Winkelabweichungen weisen, wie erwartet, eine solche Auffälligkeit nicht auf. Im Vergleich der Ergebnisse der Simulationen mit FEM bei

<sup>2</sup> In Bild 27 fehlen aus technischen Gründen die Messwerte der 10° rechtssteigenden Verzahnung des Messdurchlaufs bei  $T = 27,2$  °C.

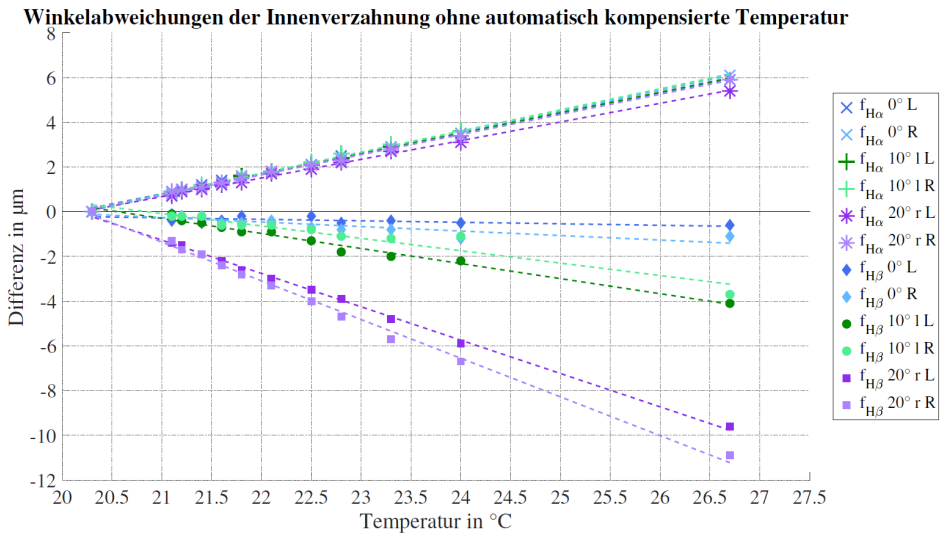


Bild 28: Differenzen der Winkelabweichungen bei diskreten Temperaturen zur Referenzmessung der Innenverzahnung ohne thermische Kompensation des Groß-KMG

inhomogener Temperaturverteilung und den entsprechenden gemessenen Werten ergeben sich Differenzen für die Profil-Winkelabweichung von maximal  $\Delta f_{H\alpha} = 1,2 \mu\text{m}$  und bei der Winkelabweichung der Flankenlinie von  $\Delta f_{H\beta} = 2,6 \mu\text{m}$ . Die Differenzen lassen sich erklären, da Einflussfaktoren bei der Messung vorherrschen, welche in der Simulation nicht berücksichtigt wurden. Hierzu zählen der Einfluss des KMG (z. B. 3D-Tastersystem), des Werkstücks (z. B. Oberflächenbeschaffenheit) sowie der Messstrategie (z. B. Punktdichte) und des Anwenders. Weiterhin erfolgt die Messung während des Abkühlprozesses, wobei die Simulation mit FEM ausschließlich einen statischen thermischen Zustand abbildet. Bei vielen KMG ist es möglich, dass die Werkstücktemperatur automatisiert erfasst und im Messprozess softwareseitig kompensiert wird. Da die automatisierte Kompensation im virtuellen Messprozess ebenfalls Berücksichtigung findet (siehe Abschnitt 2.3.1), wird dies am Beispiel des Großverzahnungsnormalis untersucht. Eine entsprechende Verifikationsmessung erfolgt mit acht Wiederholungen analog zum zuvor beschriebenen Messprozess. Zur Temperaturkompensation dienen die Messwerte eines magnetischen, am Groß-KMG integrierten Temperatursensors, welcher an der Werkstückoberfläche angebracht wird. Der Wert des thermischen Ausdehnungskoeffizienten des Werkstückmaterials muss in der Mess- und Auswertesoftware hinterlegt werden. Der Kompensationsprozess wird über einen speziellen Befehl im Messprogramm verarbeitet. Anschließend wird automatisiert mit einer einfachen linearen Ausdehnung

Tabelle 17: Betrag der interpolierten Differenzen der Winkelabweichungen zur Referenzmessung bei einer Temperatur von 25,0 °C

	Automatische Kompensation der Werkstücktemperatur			
	deaktiviert		aktiviert	
	L	R	L	R
<i>AVZ</i>	$f'_{H\alpha}$ in $\mu\text{m}$			
0°	4,141	4,377	0,284	0,110
10° r	4,114	4,286	0,517	0,268
20° l	3,727	4,112	0,262	0,060
	$f'_{H\beta}$ in $\mu\text{m}$			
0°	0,803	0,604	1,252	0,664
10° r	1,243	4,023	1,960	1,691
20° l	7,707	6,150	0,494	0,473
<i>IVZ</i>	$f'_{H\alpha}$ in $\mu\text{m}$			
0°	3,979	4,036	0,064	0,154
10° l	3,984	4,099	0,191	0,151
20° r	3,610	3,914	0,068	0,082
	$f'_{H\beta}$ in $\mu\text{m}$			
0°	0,492	0,955	0,471	1,668
10° l	2,692	2,004	0,113	1,685
20° r	6,511	7,442	0,293	2,214

jede Punktkoordinate um den Einfluss der gemessenen Temperatur kompensiert. Aus den ermittelten Punkten werden die geometrischen Größen abgeleitet, die korrigierte Ergebniswerte liefern. Der Verlauf von neun Messungen während des Abkühlprozesses vom Großverzahnungsnormal sind als Differenzen zu einer Referenzmessung bei  $\vartheta_{\text{ref, komp}} = 20,6 \text{ °C}$  in Bild 29 und Bild 30 dargestellt. Die dazugehörigen Messwerte sind zu Vergleichszwecken erneut für eine Werkstücktemperatur von  $\vartheta_{\text{W}} = 25,0 \text{ °C}$  interpoliert und in Tabelle 17 den Werten ohne Kompensation der Temperatur gegenübergestellt. Es ergeben sich Differenzen zum Wert der Referenzmessung von bis zu  $\Delta f_{H\alpha} = 0,517 \mu\text{m}$  für die Profil-Winkelabweichungen. Die maximale Differenz der Flankenlinien-Winkelabweichungen entspricht in diesem Fall einem

**Winkelabweichungen der Außenverzählung bei automatisch kompensierter Temperatur**

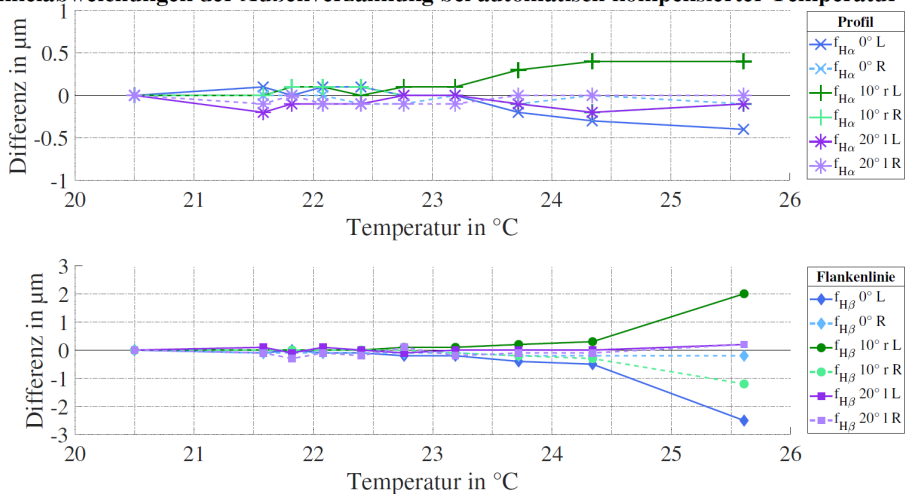


Bild 29: Differenzen der Winkelabweichungen der Außenverzählung mit automatischer Temperaturkompensation des Groß-KMG

**Winkelabweichungen der Innenverzählung bei automatisch kompensierter Temperatur**

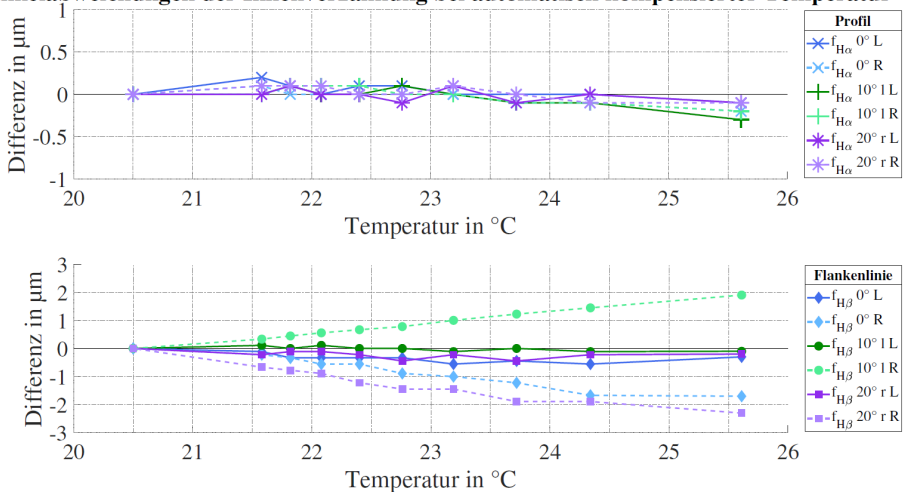


Bild 30: Differenzen der Winkelabweichungen der Innenverzählung mit automatischer Temperaturkompensation des Groß-KMG

Wert von  $\Delta f_{H\beta} = 1,960 \mu\text{m}$ . Somit werden die Messabweichungen der Profil-Winkelabweichung auf ca. 12 % und die Flankenlinien-Winkelabweichung auf ungefähr 30 % der nicht temperaturkompensierten Messabweichungen reduziert. Die Temperaturkompensation führt zu einer Näherung an den erwarteten Wert, jedoch verbleiben Restabweichungen. Diese ergeben sich

unter anderem daraus, dass die Temperatur des großen Werkstücks mit nur einem Temperatursensor nicht ausreichend abgebildet werden kann. Hierbei kann neben einer zu geringen Kompensation auch eine Überkompensation stattfinden. Weiterhin sind systematische Effekte des KMG, des Werkstücks, etc. unabhängig vom thermischen Einfluss vorhanden.

### **5.1.3 Auswirkungen der Werkstücktemperatur auf die Messunsicherheitsermittlung**

Die vorangestellten Untersuchungen geben einen Einblick in das zeitliche und räumliche Temperaturverhalten eines großen Werkstücks. Die Messunsicherheitsbeiträge der Temperatureinflüsse sind stark beeinflusst von der vorherrschenden Temperatur und der Standardmessunsicherheit der Temperaturerfassung. Bei dem zeitlichen Temperaturverhalten wurde bisher ein linearer Verlauf als Näherung für das Verhalten der Materialtemperatur angenommen. Wie Abschnitt 5.1.1 zeigt, gilt dies nicht für den Abkühlprozess am großen Beispielbauteil. Die Temperaturkurven der Simulationen mit FEM und der durchgeführten Temperaturmessung an der Oberfläche und im Inneren des Großverzahnungsnormal weisen Verläufe auf, die exponentiell sind. Die Kurven lassen sich mit Gleichung (37) beschreiben, wie in Bild 25 (Seite 77) aufgezeigt. Für die räumliche, thermische Verteilung der Temperatur während der Verifikationsmessungen ist die Spanne der räumlichen Temperaturverteilung mit einem Wert von  $R = 0,5 \text{ K}$  in Bezug auf die Ausmaße des Großverzahnungsnormal recht klein. Dies ist auf die anfängliche, gleichmäßige Erwärmung bei den durchgeführten Untersuchungen zurückzuführen. Das bestehende Modell einer isotropen Temperaturverteilung ist hierbei anwendbar. Bei einem thermisch stark inhomogenen Umfeld, wie dies in einer industriellen Umgebung zu erwarten ist, muss ein anderes Modell angenommen werden. Das bestehende anisotrope Temperaturmodell aus dem *VCMM* berücksichtigt drei einzelne Temperaturgradienten, wie in Abschnitt 2.3.1 dargestellt. Dies wurde nicht verifiziert, da das Großverzahnungsnormal keinen extremen Bedingungen ausgesetzt werden sollte. Die Auswertung von Verzahnungsparameter ist bisher nicht im *VCMM* enthalten, da die entsprechenden Module nicht in die Anwendersoftware eingebunden werden können.

Bei den Verzahnungsparametern ist eine Abschätzung der thermisch verursachten Messunsicherheitsbeiträge auf Grundlage von den Ergebnissen aus Abschnitt 5.1.2 daher gesondert zu betrachten. Falls die vorherrschende Temperatur nicht erfasst wurde, entstehen große, systematische Messabweichungen. Die thermisch bedingte Abweichung entspricht in vollem Umfang einem systematischen Messunsicherheitsbeitrag. Die Standardmessunsicherheit

der Profil- und Flankenlinien-Winkelabweichungen wird sehr groß, denn der systematische Anteil liegt bei bis zu 4,4  $\mu\text{m}$  für die Profil- und 7,7  $\mu\text{m}$  bei der Flankenlinien-Winkelabweichung (siehe Tabelle 17). Die Angaben gelten für eine Materialtemperatur von 25,0  $^{\circ}\text{C}$ . Da der Einfluss der Temperatur auf die Verzahnungsparameter durch die Untersuchungen jedoch bekannt ist, kann eine Korrektur der systematischen Abweichungen erfolgen. Der Korrekturprozess muss daraufhin in der Messunsicherheitsermittlung zusätzlich berücksichtigt werden. Für die Profil- und Flankenlinien-Winkelabweichungen können über die geometrischen Zusammenhänge direkte Aussagen zu den thermisch bedingten Auswirkungen gemacht werden [Wiemann et al., 2019a]. Die thermisch beeinflusste Evolventenform der Zahnflanke ergibt sich unter Verwendung eines isotropen Skalierungsfaktor  $\lambda_g = 1 + \alpha \cdot \Delta T$  der ausgedehnte Grundkreisradius  $r'_b = \lambda_g \cdot r_b$  und der ausgedehnte Flankenlinienkoeffizient  $c' = c/\lambda_g$ . Für die Profil-Winkelabweichung wird dies mit der Messlänge  $L_{\text{AE}}$  multipliziert. Eine Umrechnung ermöglicht, die Bestimmung der thermisch beeinflussten Profil-Winkelabweichung  $f'_{\text{H}\alpha}$  indem die Messlänge unter Berücksichtigung des Ausdehnungskoeffizienten des Werkstücks  $\alpha_W$  und der Temperaturdifferenz zur Referenztemperatur mit  $\Delta\vartheta_W$  ermittelt wird. Daraus ergibt sich für eine Nominalflanke die Berechnung zu

$$f'_{\text{H}\alpha} = L_{\text{AE}} \cdot \frac{r'_b - r_b}{r_b} = L_{\text{AE}} \cdot (\lambda_g - 1) = L_{\text{AE}} \cdot \alpha_W \cdot \Delta\vartheta_W \quad . \quad (40)$$

Bei einem gefertigten Werkstück kann jedoch nicht von einer Nominalflanke ausgegangen werden. Der tatsächliche Radius des Grundkreises entspricht nicht dem nominellen Grundkreisradius  $r_b$ , sodass zusätzlich ein tatsächlicher Wert  $r_{b,\text{act}}$  berücksichtigt werden muss. Daraus lässt sich ableiten, welchen Wert die Profil-Winkelabweichung  $f_{\text{H},\text{act}}$  ohne thermischen Einfluss aufzeigt. Dies ergibt sich zu

$$\begin{aligned} f_{\text{H},\text{act}} &= L_{\text{AE}} \cdot \frac{r_{b,\text{act}} - r_b}{r_b} = \frac{L_{\text{AE}}}{r_b} \cdot (r'_b - r_b) \\ &= \frac{L_{\text{AE}}}{r_b} \cdot \left( \frac{r_b \cdot f'_{\text{H}\alpha}}{\lambda_g \cdot L_{\text{AE}}} + \frac{r_b}{\lambda_g} - r_b \right) = \frac{f'_{\text{H}\alpha}}{\lambda_g} + L_{\text{AE}} \cdot \left( \frac{1}{\lambda_g} - 1 \right) \quad . \quad (41) \end{aligned}$$

Weiterhin können diese zwei Zusammenhänge für die Flankenlinien-Winkelabweichung aufgestellt werden. Hierbei werden die Zahnbreite  $b$  und der Schrägungswinkel am Grundkreis  $\beta_b$  berücksichtigt. Es ergibt sich für ein ideales Zahnrad unter Berücksichtigung eines Temperatureinflusses die thermisch veränderte Flankenlinien-Winkelabweichung  $f'_{\text{H}\beta}$  zu

$$\begin{aligned}
 f'_{H\beta} &= b \cdot r_b \cdot (c' - c) = b \cdot r_b \cdot c \cdot \left( \frac{1}{\lambda_\vartheta} - 1 \right) \\
 &= b \cdot \tan(\beta_b) \cdot \left( \frac{1}{\lambda_\vartheta} - 1 \right) \quad .
 \end{aligned} \tag{42}$$

Für ein nicht ideales Werkstück wird ein tatsächlicher Schrägungswinkel des Grundkreises im Koeffizienten  $c_{act}$  bei der thermisch beeinflussten Auswertung berücksichtigt. Die tatsächliche Flankenlinie-Winkelabweichung ohne thermischen Einfluss ergibt sich zu

$$\begin{aligned}
 f_{H\beta,act} &= b \cdot r_b \cdot (c_{act} - c) = b \cdot r_b \cdot (\lambda_\vartheta \cdot c' - c) \\
 &= b \cdot r_b \cdot \left( \frac{\lambda_\vartheta \cdot f'_{H\beta}}{b \cdot r_b} + \lambda_\vartheta \cdot c - c \right) \\
 &= \lambda_\vartheta \cdot f'_{H\beta} + b \cdot \tan(\beta_b) \cdot (\lambda_\vartheta - 1) \quad .
 \end{aligned} \tag{43}$$

Mit den mathematischen Zusammenhängen kann der systematische Einfluss der Werkstücktemperatur größtenteils korrigiert werden, falls eine Temperaturerfassung, aber keine Kompensation, während des Messprozesses erfolgt. Diese Variante beinhaltet einen erheblichen Zeit- und Arbeitsaufwand, da zur Anwendung der Gleichungen eine manuelle Zuordnung zwischen Mess-element und Temperaturwert erfolgen muss. Die Korrektur wird auf die Messwerte angewendet, die in der Verifikationsmessung ermittelt wurden. Die Ergebnisse der korrigierten Messwerte sind in Bild 31 und Bild 32 sichtbar. Hierbei verbleiben ebenfalls Restabweichungen. Diese erreichen Werte kleiner als 0,5  $\mu\text{m}$  für die Profil- und 2,0  $\mu\text{m}$  bei der Flankenlinien-Winkelabweichungen. Die Restabweichungen entstehen, da systematische Anteile durch eine unzureichende mittlere Materialtemperatur und zufällige Anteile durch eine Standardunsicherheit der Temperaturmessung einfließen. Weiterhin sind die Restabweichungen auf alle weiteren Einflussfaktoren des Messprozesses zurückzuführen, die nicht thermisch verursacht und daher nicht in der mathematischen Korrektur berücksichtigt sind (wie z. B. Antastabweichungen). Grundsätzlich ergeben sich durch diese Korrektur kleine Restabweichungen, wobei dies ein zusätzliches Temperaturerfassungssystem und einen großen Rechenaufwand bedeutet. Die Restabweichungen, nach mathematischer Korrektur oder automatisierter Kompensation, sind in den durchgeführten Untersuchungen besonders von der erfassten Temperatur beeinflusst. Bei der automatischen Kompensation wird ein am KMG integrierter Temperatursensor  $\vartheta_{KMG}$  an der Oberfläche angebracht, der als Grundlage für die Kompensation dient.

**Winkelabweichungen der Außenverzahnung bei nachträglich korrigierter Temperatur**

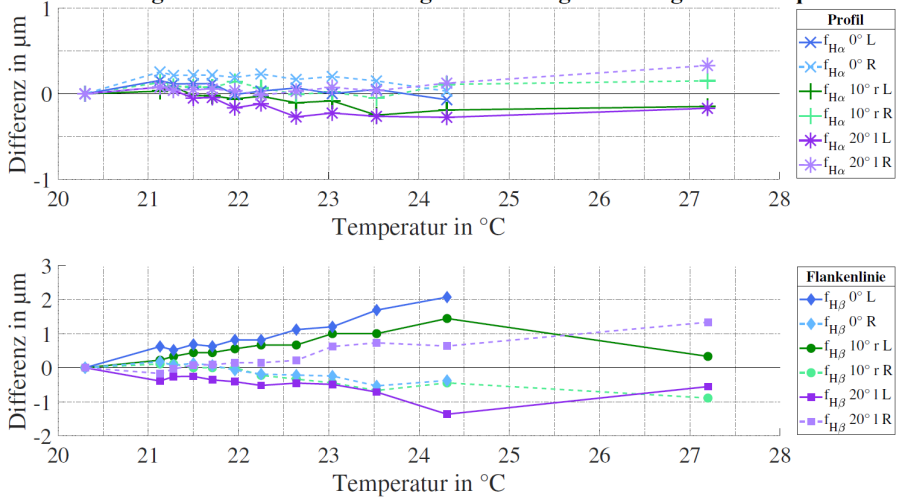


Bild 31: Restabweichung der Profil- und Flankenlinien-Winkelabweichung für die Außenverzahnung nach mathematischer Korrektur<sup>3</sup>

**Winkelabweichungen der Innenverzahnung bei nachträglich korrigierter Temperatur**

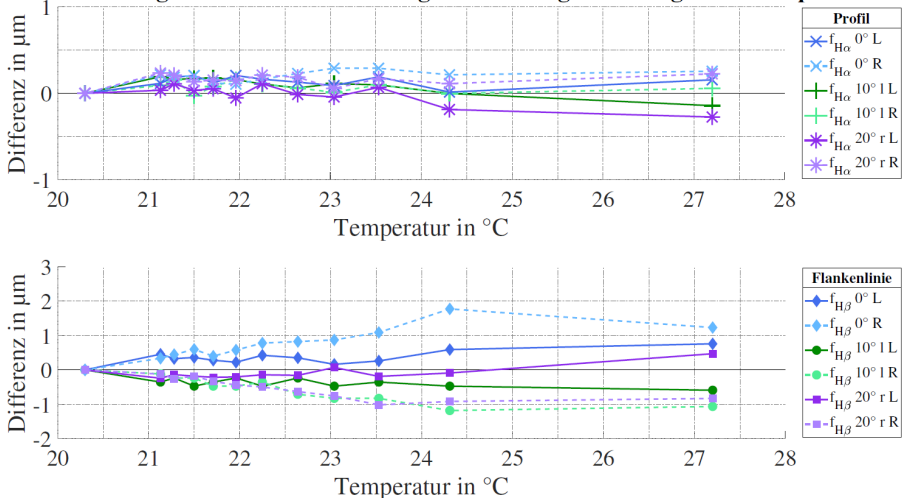


Bild 32: Restabweichung der Profil- und Flankenlinien-Winkelabweichung für die Innenverzahnung nach mathematischer Korrektur

Bei der mathematischen Korrektur werden unabhängige Temperaturüberwachungssysteme an der Oberfläche  $\vartheta_{M,O}$  und im Innern  $\vartheta_{M,I}$  des Werkstücks angebracht. Der mittlere Wert über diese Sensoren bildet die Grundlage zur

<sup>3</sup> In Bild 31 fehlen aus technischen Gründen analog zu der Grundlage aus Bild 27 die Messwerte der  $10^{\circ}$  rechtssteigenden Verzahnung des Messdurchlaufs bei  $\vartheta = 27,2^{\circ}\text{C}$ .

Berechnung des Korrekturwertes. Es ergibt sich ein direkter Zusammenhang zwischen dem verwendeten Temperaturwert und dem kompensierten oder korrigierten Messwert sowie der Messunsicherheit. Umso besser die Temperatur des Werkstücks abgebildet wird, desto geringer sind die Messabweichungen. Da der einzelne, an der Oberfläche angebrachte Temperatursensor des KMG die tatsächliche Temperatur des Werkstücks nicht repräsentativ wiedergibt, entstehen deutliche Unterschiede zwischen  $\vartheta_{\text{KMG}}$  und  $\bar{\vartheta}_{\text{M,O}}$ . Dies liegt sowohl an der Positionierung, als auch an der unterschiedlichen Anzahl der Sensoren bei den beiden Systemen. Die Differenzen der Temperaturwerte beider Erfassungssysteme sind größer, je höher die Temperaturdifferenz zur Referenztemperatur, wie Tabelle 18 zeigt.

Tabelle 18: Temperaturmesswerte eines am Groß-KMG integrierten Sensors und mittlere Werte der externen Sensoren an der Werkstückoberfläche bei der Messung mit automatischer Temperaturkompensation

	$\vartheta_{\text{KMG}}$ in °C	$\bar{\vartheta}_{\text{M,O}}$ in °C	$\Delta\vartheta$ in K
Messung 1	24,623	25,614	0,991
Messung 4	22,770	23,189	0,419
Messung 9	21,316	21,584	0,268

Die zu erwartenden Messabweichungen, die durch die Temperaturdifferenzen entstehen, können mit Hilfe der Gleichungen (40) und (42) abgeschätzt werden. Es ergeben sich Messabweichungen von bis zu  $f_{\text{H}\alpha} = 1,0 \mu\text{m}$  für die Profil-Winkelabweichung und  $f_{\text{H}\beta} = 1,6 \mu\text{m}$  für die entsprechende Flankenlinien-Winkelabweichung. Neben einem systematischen Anteil des thermisch bedingten Messunsicherheitsbeitrags ist in der Messunsicherheitsermittlung der zufällige Anteil zu beachten. Der Kompensationsprozess der Temperatur oder der Korrekturprozess ist als Beitrag zur Standardmessunsicherheit einzubeziehen. Als Grundlage zur Ermittlung dieses Beitrags der Kompensation  $u_{\bar{p}_{\text{komp}}}$  dient die Standardunsicherheit der Temperaturmessung, die nach Herstellerangaben  $u_{\vartheta_{\text{KMG}}} = 0,1 \text{ K}$  beträgt und mit einer Rechteckverteilung angenommen wird. Weiterhin ist der Ausdehnungskoeffizient der Maßstäbe, der vom Hersteller angegeben wird, mit einer Standardunsicherheit von  $u_{\alpha} = 1 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  zu berücksichtigen. Die Berücksichtigung der Standardmessunsicherheit des Kompensationsprozesses als Beitrag zur Messunsicherheitsermittlung ist ebenso wie die Messung und Auswertung der Verzahnungsparameter sehr komplex. Im Messprozess wird die Längenmessung, welche sich aus der Punkterfassung des Messpunktes und einem Bezugspunkt ergibt, thermisch kompensiert. Für die Erfassung

eines Messpunktes  $\vec{p}_i$  mit einer Temperaturkompensation  $\vec{p}_{\text{komp},i}$  gilt nach PTB [2022] folgende Gleichung:

$$\vec{p}_{\text{komp},i} = \vec{p}_i + (\vec{p}_i - \vec{p}_{\text{ref}}) \cdot \alpha_W \cdot \Delta\vartheta_{W,i} = \vec{p}_i + \Delta\vec{p} \cdot \alpha_W \cdot \Delta\vartheta_{W,i} \quad (44)$$

Die Berechnung der Standardmessunsicherheit der kompensierten Längenmessung  $u_{\vec{p}_{\text{komp}}}$  erfolgt über partielle Ableitungen der mathematischen Vorschrift

$$\begin{aligned} u_{\vec{p}_{\text{komp}}}^2 &= \left(\frac{\partial f}{\partial \vec{p}_i}\right)^2 \cdot u_{\vec{p}_i}^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial \alpha_W}\right)^2 \cdot u_{\alpha_W}^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial \Delta\vartheta_W}\right)^2 \cdot u_{\Delta\vartheta_W}^2 \\ &= (1 + \alpha_W \cdot \Delta\vartheta_W)^2 \cdot u_{\vec{p}_i}^2 + (\Delta\vec{p} \cdot \Delta\vartheta_W)^2 \cdot u_{\alpha_W}^2 + (\Delta\vec{p} \cdot \alpha_W)^2 \cdot u_{\Delta\vartheta_W}^2. \end{aligned} \quad (45)$$

Dies entspricht dem Anteil der Standardmessunsicherheit einer Längenmessung mit thermischer Kompensation. Unter Annahme der genannten Standardmessunsicherheiten, der Beispieltemperatur von 25,0 °C und einer Länge  $l$  zwischen dem Messpunkt  $\vec{p}_i$  und einem definierten Referenzpunkt  $\vec{p}_{\text{ref}}$  von  $l = 1,0$  m ergibt sich eine Kompensation um  $\Delta L = 55,5 \mu\text{m}$ . Mit einem idealen Referenzpunkt entspricht die Messunsicherheit des Messpunktes  $u_{\vec{p}_{\text{komp}}}$  der Messunsicherheit für die temperaturkompensierte Messlänge  $u_{l,\text{komp}} = 5,7 \mu\text{m}$ . Dies wird für die Standardmessunsicherheit der entsprechenden Messlänge  $u_{L_{\text{AE}}}$  bei der Messunsicherheitsermittlung des thermischen Einflusses auf die Winkelabweichungen abgeschätzt. Für die Messlänge des Profils mit  $L_{\text{AE},P} = 0,083$  m wird in den partiellen Ableitungen der Gleichungen (40) und (41) eine Standardmessunsicherheit  $u_{L_{\text{AE}}} = u_{L_{\text{AE},P}} = 2,5 \mu\text{m}$  verwendet.

$$\begin{aligned} u_{f_{H\alpha,\text{komp}}}^2 &= \left(\frac{\partial f}{\partial L_{\text{AE}}}\right)^2 \cdot u_{L_{\text{AE}}}^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial \alpha_W}\right)^2 \cdot u_{\alpha_W}^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial \Delta\vartheta_W}\right)^2 \cdot u_{\Delta\vartheta_W}^2 \\ &= (\alpha_W \cdot \Delta\vartheta_W)^2 \cdot u_{L_{\text{AE}}}^2 + (L_{\text{AE}} \cdot \Delta\vartheta_W)^2 \cdot u_{\alpha_W}^2 + (L_{\text{AE}} \cdot \alpha_W)^2 \cdot u_{\Delta\vartheta_W}^2 \end{aligned} \quad (46)$$

Für die Bestimmung der Standardmessunsicherheit der Flankenlinien-Winkelabweichung mit Temperaturkompensation werden die Standardmessunsicherheit der Zahnbreite  $b = 0,424$  m mit  $u_{L_b} = 3,3 \mu\text{m}$  und der Grundkreisradius bei 20°  $r_b = 0,902$  m mit  $u_{r_b} = 5,2 \mu\text{m}$  berücksichtigt.

$$\begin{aligned}
 u_{f_{H\beta, \text{komp}}}^2 &= \left(\frac{\partial f}{\partial b}\right)^2 \cdot u_{L_b}^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial r_b}\right)^2 \cdot u_{r_b}^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial \alpha_W}\right)^2 \cdot u_{\alpha_W}^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial \Delta\vartheta_W}\right)^2 \cdot u_{\Delta\vartheta_W}^2 \\
 &= \left(\frac{r_b}{(1 + \alpha_W \cdot \Delta\vartheta_W)} - r_b\right)^2 \cdot u_{L_b}^2 + \left(\frac{b}{(1 + \alpha_W \cdot \Delta\vartheta_W)} - b\right)^2 \cdot u_{r_b}^2 \\
 &+ \left(-\frac{b \cdot r_b \cdot \Delta\vartheta_W}{(1 + \alpha_W \cdot \Delta\vartheta_W)^2}\right)^2 \cdot u_{\alpha_W}^2 + \left(-\frac{b \cdot r_b \cdot \alpha_W}{(1 + \alpha_W \cdot \Delta\vartheta_W)^2}\right)^2 \cdot u_{\Delta\vartheta_W}^2 \quad (47)
 \end{aligned}$$

Da bekannt ist, dass der einzelne Temperatursensor am KMG, die Temperaturverteilung im Werkstück nicht repräsentativ wiedergeben kann, muss von einer größeren Standardunsicherheit der Temperaturmessung ausgegangen werden. Dafür wird die empirisch ermittelte Standardabweichung  $s_{\vartheta_{\text{KMG}}} = 1,0 \text{ K}$  verwendet, welche aus der maximalen Differenz zwischen dem Mittelwert des externen und dem KMG-internen System abgeleitet wird. Daraufhin folgen die Messunsicherheitsbeiträge von  $u_{f_{H\alpha, \text{komp}}} = 0,5 \text{ }\mu\text{m}$  und  $u_{f_{H\beta, \text{komp}}} = 4,7 \text{ }\mu\text{m}$  für den Kompensationsprozess der Werkstücktemperatur. Die Ermittlung des Messunsicherheitsbeitrags der zufälligen Anteile des Korrekturprozesses erfolgt ebenfalls mit der genannten Standardunsicherheit der thermischen Ausdehnungskoeffizienten der Materialien. Für die der Längenmessung wird ein Wert ohne Einfluss der Kompensation mit  $u_L = 2,5 \text{ }\mu\text{m}$  angenommen und für die der Temperaturmessung der ursprüngliche Wert von  $0,1 \text{ K}$ . Daraus folgt für die Winkelabweichung der Profile eine maximale Standardmessunsicherheit von  $u_{f_{H\alpha, \text{korr}}} = 0,5 \text{ }\mu\text{m}$ . Bei den Winkelabweichungen der Flankenlinien ist die Abhängigkeit zum Schrägungswinkel berücksichtigt. Bei der Verzahnung mit  $20^\circ$  Steigung ergibt sich eine Standardmessunsicherheit des Korrekturprozesses von  $u_{f_{H\beta, \text{korr}}} = 2,0 \text{ }\mu\text{m}$ . Analog zu der Kompensation gilt, dass die Korrektur ungenauer wird, wenn die Temperatur nicht repräsentativ ist. Jedoch liegen die Temperaturwerte des externen Messsystems mit einer großen Anzahl an Temperatursensoren vor. Die Messwerte einzelner Sensoren können den Verzahnungsgruppen individuell zugeordnet werden, wodurch der Korrekturprozess genauer ist als der Kompensationsprozess des KMG. Neben der Kompensation und der Korrektur ist es ebenso möglich, die systematischen Beiträge durch eine Vergleichsmessung mit einem ähnlichen Werkstück zu identifizieren. Hierbei ist es jedoch nicht möglich, den thermischen Einfluss von den restlichen Einflussfaktoren des Messprozesses zu trennen.

## 5.2 Einfluss der Lagerung am Beispiel eines Großverzahnungsnormals

Zusätzlich zu dem Einflussfaktor Temperatur hat auch das Eigengewicht abhängig von der gewählten Lagerung einen Einfluss auf das Werkstück und

den Messprozess. Durch das große Gewicht und die große Ausdehnung des Werkstücks entstehen bei unterschiedlichen Lagerungsvarianten verschiedene Verformungen, welche zu Messabweichungen führen. Eine vollständige, gleichmäßige, extrem steife und ebene Unterlagerung des ringförmigen Großverzahnungsnormal verursacht im Idealfall keine Verformung des Werkstücks. Jedoch kann eine ideale Ebene als Unterlage nicht realisiert werden. Ein weiteres Problem ist hierbei die Reproduzierbarkeit der Messwerte, sobald das Werkstück erneut aufgebaut wird, da keine definierte Lagerung besteht. Bei einzelnen, punktförmigen Auflagern ist dahingegen mit einer Verformung des Werkstücks durch die Auswirkungen der Gewichtskraft zu rechnen. Eine solche Lagerungsvariante mit definierten Auflagern ist zu bevorzugen, um eine Reproduzierbarkeit und zuverlässigere Ergebnisse erzielen zu können. Hierbei entstehen Deformationen, die möglichst gering gehalten werden sollten. Daher wurde für das Großverzahnungsnormal eine Auflagevorrichtung mit sechs Füßen gebaut. Bei kleineren (ringförmigen) Werkstücken werden meist nur drei definierte Lagerungspunkte verwendet. Als Beispielwerkstück dient das ringförmige Großverzahnungsnormal, welches unter Verwendung von drei verschiedenen Lagerungsvarianten untersucht wird. Die Reproduzierbarkeit und Auswirkungen der entstehenden Verformungen werden in den folgenden Abschnitten ermittelt. Zuerst wird der Einfluss des Gewichts auf das Werkstück simuliert und anschließend messtechnisch erfasst. Hierzu wird der Prüfbund des Großverzahnungsnormal in Wirkungsrichtung der Schwerkraft bei verschiedenen Lagerungen beobachtet (siehe Abschnitt 5.2.1). Danach werden die Verzahnungsmessgrößen in Abschnitt 5.2.2 ermittelt. Zuletzt werden daraus die resultierenden Messabweichungen und der Beitrag zur Messunsicherheit in Abschnitt 5.2.3 diskutiert.

### **5.2.1 Ermittlung des Einflusses verschiedener Lagerungen auf das Werkstück**

Um eine Größenordnung für die Verformungen abzuschätzen, die durch die Lagerung großer Werkstücke verursacht wird, werden verschiedene Lagerungsvarianten untersucht. Hierbei handelt es sich um einen Aufbau, wenn keine Auflager angebracht werden. Weiterhin wird das Großverzahnungsnormal mit der speziell gefertigten Auflagevorrichtung auf sechs Auflagern aufgebaut, wie in Abschnitt 3.4 vorgestellt. Eine weitere Lagerung wird mit drei Lagerpunkten realisiert, die jedoch in zwei unterschiedlichen Konfigurationen verwendet werden kann. Dies erfolgt indem die Auflager zwischenzeitlich um  $60^\circ$  versetzt angebracht werden (siehe Abschnitt 3.4). In Bild 33 sind der Aufbau ohne Auflager und eine Übersicht der verwendeten Lagerungspunkte abgebildet. Um den direkten Einfluss der Gewichtskraft zu spezifizieren, wird im Folgenden ein Prüfbund der Großverzahnung detailliert untersucht.

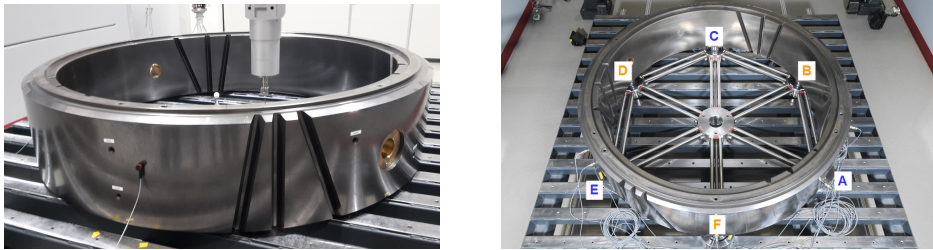


Bild 33: Lagerungsvariante ohne Auflager (links) und die Positionen der verschiedenen verwendeten Lagerungspunkte (rechts)

Hierbei handelt es sich um den Prüfbund, bei dem kreisförmig mit einem Taster in negativer  $Z$ -Richtung Koordinaten zur Bestimmung einer Ebene ermittelt werden. Der Prüfbund ist eine einfache Geometrie und die Auswertung der Ebenheit in Richtung der Schwerkraft besonders aussagekräftig. Da anhand dieser Ebenheitsmessung der Normalenvektor gebildet wird, welcher die Verzahnungsachse beschreibt, ist dieser als Teil der Werkstücklagenbestimmung besonders wichtig. Eine gleichmäßige Verformung beeinflusst die Ausgleichsebene nicht. Bei unregelmäßigen Deformationen kann jedoch eine Verkippung des Vektors entstehen, die zu einer schräg stehenden Verzahnungsachse und abweichenden Verzahnungsmesswerten führt. Hierbei ist hauptsächlich die Flankenlinien-Winkelabweichung  $f_{H\beta}$  betroffen.

Für die theoretischen Untersuchungen wird die Lagerungsvariante ohne Auflager unter der Annahme idealer Ebenheitsverhältnisse als ideale Geometrie angesehen. Dadurch werden die Deformationen sichtbar, welche bei anderen Lagerungen als relative Änderung entstehen. Diese Abweichungen entsprechen den Residuen zu der jeweiligen Ausgleichsebene. Hierbei ist die Größenordnung und die Verteilung der Residuen interessant. Als erste Näherung kann die Berechnung der Durchbiegung eines Balkens mit einem rechteckigen Querschnitt [Strommer, J., 2022] dienen. Hierzu wird die Länge des Balkens mit der Länge des Kreissegmentes zwischen den Auflagern gleichgesetzt. Die Höhe und die Breite entsprechen der Zahnbreite und der Differenz aus Innen- und Außendurchmesser des Großverzahnungsnormal. Es wird von festen Einspannungen und einer Gleichlast ausgegangen. Unter Berücksichtigung der Streckenlast, des Trägheitsmomentes, dem E-Modul und der Länge folgt eine maximale Durchbiegung bei der Lagerung mit sechs Füßen von  $0,04 \mu\text{m}$  und bei der Lagerung mit drei Füßen von  $0,7 \mu\text{m}$ . Die Berechnung weist einen Faktor von 16 zwischen den berechneten Werten auf. Der Punkt, an dem die größte Verformung zu erwarten ist, liegt mittig zwischen den Auflagern. Dabei ist jedoch zu beachten, dass beim Großverzahnungsnormal die zylindrische Form dazu führt, dass dieser Punkt den größten

Abstand zur Sehne zwischen den Auflagern hat. Dies ist rechnerisch wiederum nicht so einfach nachzubilden, sodass anschließend Simulationen mit FEM in der Software *Ansys Workbench* (Version 17.1.127) durchgeführt wurden. Hierbei wurde das CAD-Modell des Großverzahnungsnormal als Grundlage für das Netz und die anschließenden Berechnungen verwendet. Als Randbedingung wurde eine gleichmäßige Belastung aller Knotenpunkte des Netzes berücksichtigt. Hierbei handelt es sich um die Gravitationsbeschleunigung, welche mit  $g = 9,81 \text{ N/kg}$  angenommen wurde. Die Berechnung erfolgt anhand einer statisch-mechanischen Simulation. Weiterhin sind als Randbedingungen Referenzflächen fixiert, die je nach Variante individuell gewählt werden. Bei der Lagerung ohne Auflager ist der komplette untere Prüfbund als Referenzfläche vorgegeben. Bei der Lagerungsvariante mit sechs Punkten, wird die speziell konstruierte Auflagevorrichtung (siehe Abschnitt 3.4) im CAD-Modell vereinfacht einbezogen. Dabei sind die Unterseiten der kreisförmigen Auflager als Fixierung festgelegt. Für die beiden Varianten mit drei Auflagern sind zylindrische Körper an der Unterseite des Großverzahnungsnormal integriert, die einem Teil der Auflagevorrichtung entsprechen. Hierbei sind ebenso die Unterseiten flächenhaft in der Z-Richtung fixiert. Das entscheidende Geometrielement bei dieser Untersuchung ist ein Kreis, der auf dem oberen Prüfbund definiert ist. Das Element hat 400 Knotenpunkten über  $360^\circ$ , dessen Verschiebungen (entsprechend den Residuen zu der Ausgleichsebene) berechnet werden. Die Größenordnung der verschobenen Koordinaten der Z-Achse und die räumliche Anordnung sind in Bild 34 graphisch dargestellt. Aus der Simulation lässt sich ableiten, dass bei den

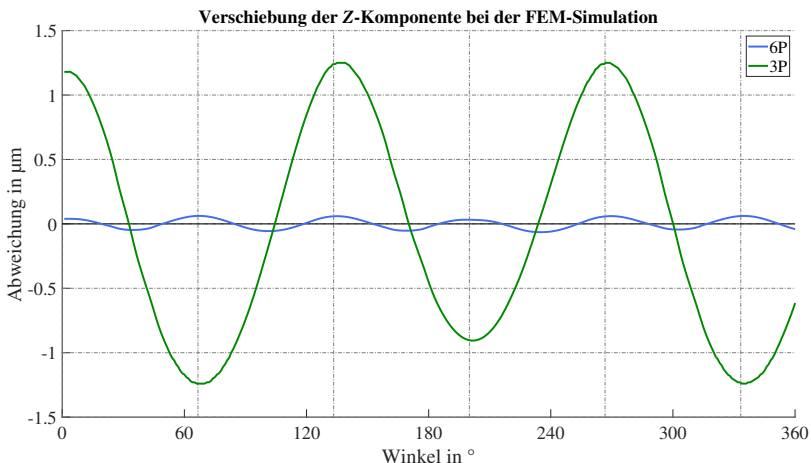


Bild 34: Verschiebung der Z-Koordinate der simulierten Deformation des Prüfbundes bei der 3P-Lagerung und 6P-Lagerung

Lagerungsvarianten mit Auflagern eine Verformung des Prüfbundes entsteht. Die Lagerungsvariante mit sechs Auflagern weist eine geringe Spanne über die Werte der Verschiebung von 0,1  $\mu\text{m}$  auf. Dahingegen zeigt sich bei der Lagerung mit drei Punkten eine stärkere Verformung mit einer Spanne von 2,5  $\mu\text{m}$ . Der Verlauf ist sinusförmig und die Anzahl der Wellenzüge entspricht der gleichen Anzahl wie die der Auflager. Weiterhin erfolgen Messungen mit dem Groß-KMG bei diesen Lagerungsvarianten des Großverzahnungsnormal. Als erstes wurde das Werkstück auf der 6P-Lagerung, anschließend auf den zwei 3P-Lagerungen und zuletzt ohne Auflager positioniert.

Bei den Verifikationsmessungen wurde die gleiche Messstrategie verwendet wie bei der Kalibrierung des Großverzahnungsnormal. Dabei ist der Startpunkt der kreisförmigen Prüfbundmessung in Bezug auf eine Geräteachse definiert. In dem Fall handelt es sich um die positive X-Achse. Bei allen Positionierungen wird darauf geachtet, dass die Ausrichtung des Werkstücks in Bezug auf die Achsen des KMG möglichst gleich ist. Die Erfassung des oberen Prüfbunds erfolgt bei allen Messungen mit demselben Taster, welcher in negativer Z-Richtung antastet. Insgesamt erfolgen drei Messreihen für alle Lagerungsvarianten. Die erste Messreihe erfolgt mit der Erfassung des Werkstückkoordinatensystems inklusive dem entsprechenden Prüfbund im Einzelpunktverfahren mit ca. 360 Punkten (im folgenden als EP-Messung bezeichnet). Die Erfassung der Verzahnungselemente erfolgt dabei im Scanningmodus, um Zeit zu sparen. Die zweite und dritte Messreihe wurde komplett scannend erfasst. Die Anzahl der Messpunkte zur Ermittlung der Ebenheit an den Prüfbunden steigt auf 3 600. Die Messungen unterscheiden sich indem einmal direkt nach dem Umbau (*Scan 1*-Messung) und eine weitere Messung (*Scan 2*-Messung) nach einem erneuten Aufbau und einer Wartezeit von ungefähr 24 h gemessen wird. Somit ist neben der Auswirkung verschiedener Lagerungen auch ein zeitlicher Einfluss in den Untersuchungen einbezogen. Die gerechneten Residuen zur jeweiligen Ausgleichsebene, welche die Gestaltabweichungen überlagert mit dem Einfluss der Lagerung widerspiegeln, sind anhand einer *MATLAB*-Prozedur ermittelt worden. Diese sind zunächst für alle vier Aufbauten der Lagerungsvarianten graphisch in Bild 35 dargestellt. Das arithmetische Mittel der Residuen zu den jeweiligen Ausgleichsebenen bei den Einzelpunktmessungen beträgt 18,79  $\mu\text{m}$ . Dieses Mittel ergibt sich bei den Scanningmessungen ohne Wartezeit (*Scan 1*) zu 19,64  $\mu\text{m}$  und liegt bei den Messungen mit Wartezeit (*Scan 2*) bei 19,72  $\mu\text{m}$ . Die Spanne über alle Residuen der Lagervarianten liegt bei der Messung im Einzelpunktmodus bei 5,64  $\mu\text{m}$  und beim Scanningmodus ohne Wartezeit bei 4,55  $\mu\text{m}$ . Die Formabweichung variiert bei der Scanningmessung ohne Wartezeit um bis zu 6,01  $\mu\text{m}$ . Daraus wird sowohl ersichtlich, dass eine fertigungsbedingte Gestaltabweichung am oberen Prüfbund existiert

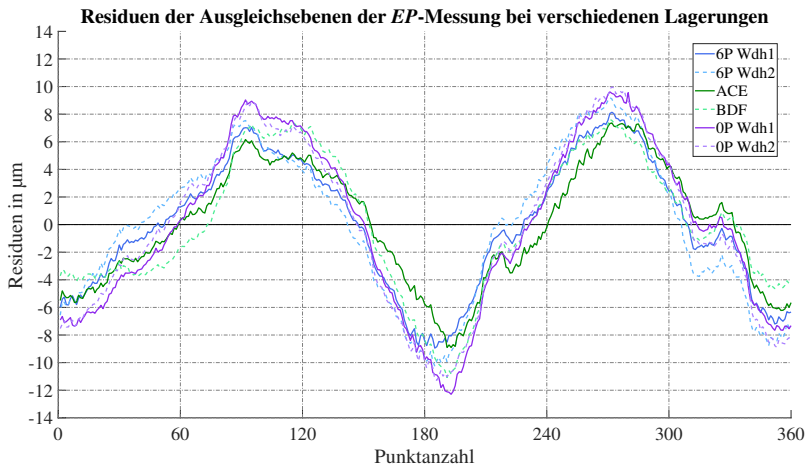


Bild 35: Residuen zur Ausgleichsebene der Prüfbundmessung bei verschiedenen Lagerungsvarianten der EP-Messungen

und dominiert, als auch, dass eine Überlagerung mit den Effekten der Lagerung besteht. Dies wird ersichtlich, da die Gestaltabweichung unabhängig von der Messart und Wartezeit bei der 3P-Lagerungen ACE am kleinsten und bei der 6P-Lagerung am größten ist. Dies widerspricht den Ergebnissen der Simulationen mit FEM, dessen Werte größere Verschiebungen bei der 3P-Lagerung aufgezeigt haben. Um die vorherrschende Gestaltabweichung zu trennen, werden für die folgenden Untersuchungen Summen und Differenzen (mit einem Faktor 0,5) gebildet. Mit den individuellen Residuen zur jeweiligen Ausgleichsebene zeigt die Summenbildung fertigungsbedingte Abweichungen kombiniert mit systematischen Abweichungen des KMG auf. Wenn Differenzen gebildet werden, können die Abweichungen aus den Lagerungsvarianten abgebildet werden. Die erste Berechnung erfolgt für die Residuen der 6P-Lagerung und der flächigen Lagerung (siehe Bild 36). Weiterhin wurde eine solche Berechnung jeweils für die Residuen der 3P-Lagerungen und der flächigen Lagerung durchgeführt (siehe Bild 37). Zuletzt wurde dies ebenfalls für die Residuen der zwei 3P-Lagerungen ACE und BDF berechnet (siehe Bild 38). Da in den Bildern 36 und 37 keine eindeutige Lagerung aus den Differenzbildungen zu erkennen ist, sollte die flächige Lagerung, die in der Theorie als optimal angesehen wird, nicht als Bezug verwendet werden. Dahingegen ist für den Vergleich mit den beiden verschiedenen 3P-Lagerungen in Bild 38 bei der Differenzbildung die Abweichungen der Lagerungsvarianten deutlich zu sehen. Es ergeben sich drei Wellenzüge mit einer Spanne über  $2,8\mu\text{m}$ . Weiterhin wurden Wiederholungsmessungen nach einem erneuten Aufbau der flächigen und der 6P-Lagerung durchgeführt.

## 5 Messabweichungen durch das Werkstück

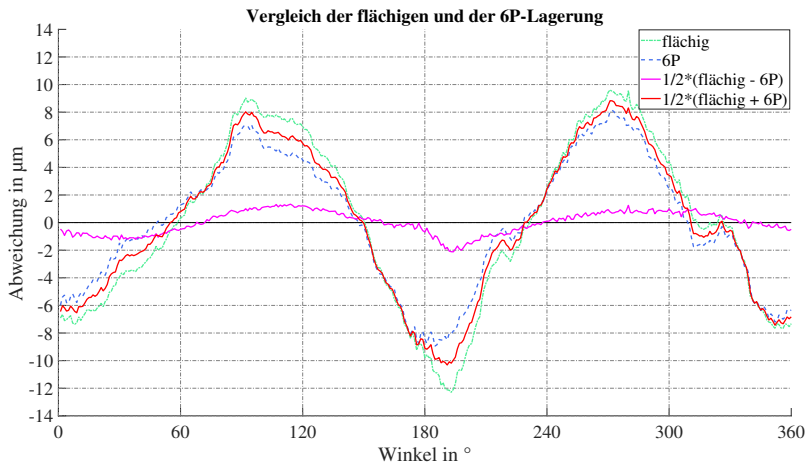


Bild 36: Residuen der Ausgleichsebenen der flächigen und 6P-Lagerung mit Summen- und Differenzbildungen im EP-Messmodus

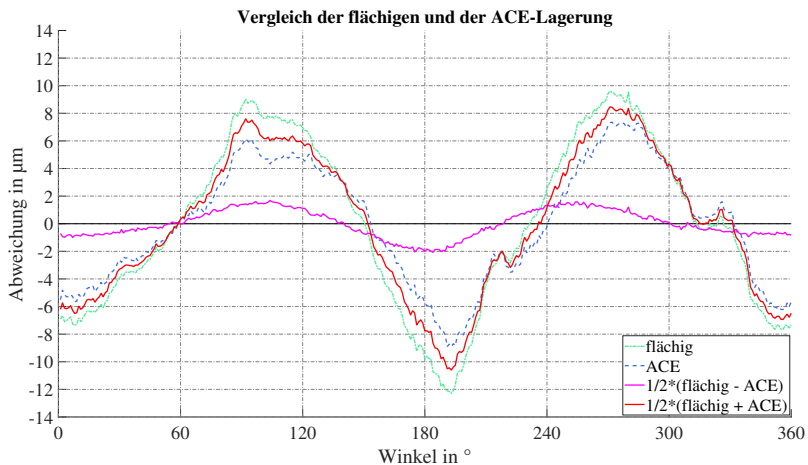


Bild 37: Residuen der Ausgleichsebenen der flächigen und einer 3P-Lagerung (ACE) mit Summen- und Differenzbildungen im EP-Messmodus

Diese können einen Hinweis darauf geben, wie gut sich die Lagerung reproduzieren lässt (siehe Bild 39). Hierbei ergeben sich Spannen zwischen den Wiederholungsmessungen bei der flächigen Lagerung von  $R_{\text{flächig}} = 3,4 \mu\text{m}$  und bei der 6P-Lagerung von  $R_{6P} = 4,3 \mu\text{m}$ . Ein möglicher Einflussfaktor auf die flächige Lagerung ist eine Balligkeit der Palette des Zuführsystems. Bei der 6P-Lagerung ist eine Veränderung der Auflager denkbar, welches durch die Kreuzfedermembranen entsteht. Dies könnte sich ungleichmäßig

## 5.2 Einfluss der Lagerung am Beispiel eines Großverzahnungsnormalis

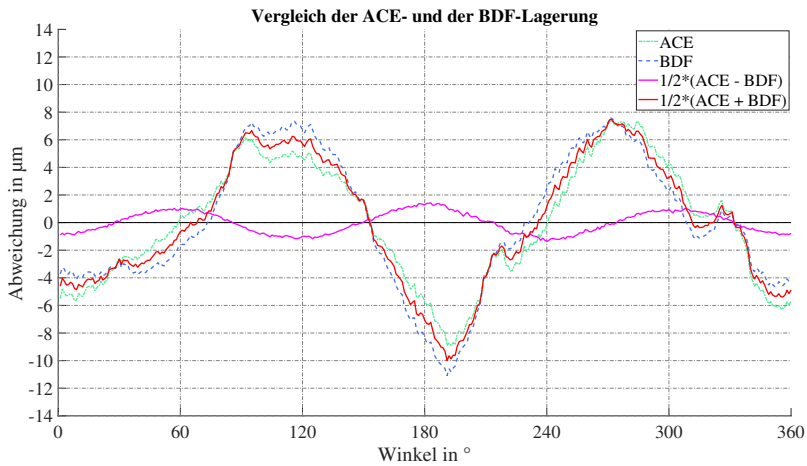


Bild 38: Residuen der Ausgleichsebenen der 3P-Lagerungen (ACE und BDF) sowie Summen- und Differenzbildung im EP-Messmodus

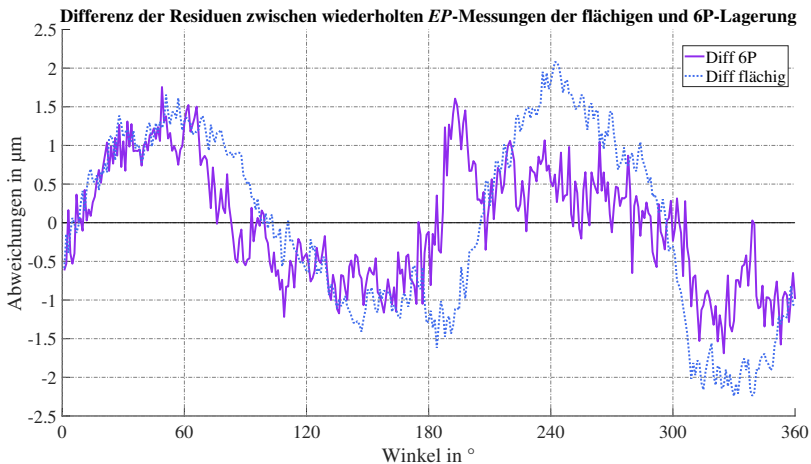


Bild 39: Differenzen der Residuen zwischen wiederholten EP-Messungen der flächigen und 6P-Lagerung

auf den kompletten Prüfbund auswirken und bei einzelnen, wiederholten Aufbauten zu nicht erwarteten Abweichungen führen. Weiterhin wird ein potentielles Setzverhalten über die Zeit untersucht. Hierzu wurden bei den Messungen im Scanningmodus direkt nach dem Absetzen und zusätzlich nach weiteren 24 h gemessen. Die Abweichungen der *Scan1*-Messung von der *Scan2*-Messung wurden subtrahiert, so dass die Differenzen den Einfluss der Wartezeit verdeutlichen. Die Ergebnisse befinden sich in Bild 40. Das

Bild weist bei der 6P-Lagerung Differenzen im Bereich von  $\pm 1,5 \mu\text{m}$  und der flächigen Lagerung im Bereich von  $\pm 2,0 \mu\text{m}$  auf. Die Lagerungen mit drei einzelnen Auflagern zeigen bei beiden Varianten je eine Spanne von ungefähr  $2 \mu\text{m}$ . Die Ergebnissen weisen daraufhin, dass die Reproduzierbarkeit der Prüfbundmessung von einem zeitlichen Effekt beeinflusst wird. Die entsprechende Betrachtung der Verzahnungsmessgrößen folgt im nächsten Abschnitt.

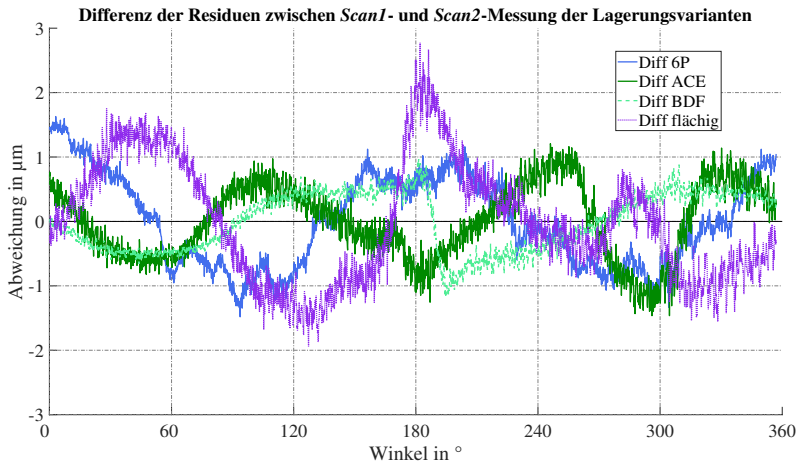


Bild 40: Differenzen der Residuen mit verschiedenen Wartezeiten zweier Messungen im Scanningmodus (*Scan 2-Scan 1*)

### 5.2.2 Theoretische und experimentelle Untersuchung des Lagerungseinflusses auf die Verzahnungsmessgrößen

Zur Ermittlung der Auswirkungen verschiedener Lagerungsvarianten auf die Verzahnungsmessgrößen wurden ebenfalls theoretische und experimentelle Untersuchungen ausgeführt. Hierzu wurden die Geometrielemente der Profil- und Flankenlinien aus den Simulationen mit FEM der Lagerungsvarianten verwendet. Wie in Abschnitt 5.1.2 folgen weitere Verarbeitungsschritte, um die Werte der Verzahnungsmessgrößen mithilfe einer kommerziellen Softwarelösung aus den verschobenen 3D-Koordinaten zu ermitteln. Die Ergebnisse der Flankenlinien-Winkelabweichungen bei den zuvor genannten Lagerungsvarianten sind in Tabelle 19 gegenüber der Idealgeometrie, die bei einer Lagerung ohne Stützstellen angenommen wird, aufgelistet. Die Form- und Gesamtabweichungen werden nicht näher betrachtet, da die Ergebnisse der Simulation mit FEM Werte von maximal  $\pm 0,1 \mu\text{m}$  über alle Varianten aufzeigen. Ebenso gelten hier die zuvor genannten Gründe aus Abschnitt 5.1.2.

Die Differenzen der Flankenlinien-Winkelabweichungen zeigen vernachlässigbare Veränderungen, wenn eine 6P-Lagerung im Vergleich zur flächigen Lagerung verwendet wird. Bei der 3P-Lagerung ergeben sich dahingegen Differenzen bis zu  $1,4 \mu\text{m}$  für die Flankenlinien-Winkelabweichungen. Die Verifikationsmessungen am Großverzahnungsnormal mit dem Groß-KMG erfolgen analog zu den Messungen der Prüfbunde.

Zuerst wird ein Vergleich der Auswirkungen der Lagerungsvarianten erstellt, indem die gemessenen Werte der Verzahnungsparameter einer Messreihe der 6P- und der zwei 3P-Lagerungen als Differenz zu den Werten der flächigen Lagerung gerechnet werden. Die Ergebnisse sind in Tabelle 19 den Ergebnissen der Simulationen gegenübergestellt. Hierbei sind die Differenzen zwischen der 6P- und der flächigen Messung nicht vernachlässigbar klein, wie bei der Simulation mittels FEM. Die maximale Differenz der Flankenlinien-Winkelabweichung ergibt sich zu  $3,6 \mu\text{m}$  für die Linksflanke der  $10^\circ$ -steigenden Außenverzahnung. Bei der Innenverzahnung beträgt die größte Differenz  $-1,2 \mu\text{m}$ . Die Parameter der Flanken der Innenverzahnung unterscheiden sich hierbei durchgehend geringer zur flächigen Messung als bei der Außenverzahnung. Die Werte der zwei Varianten mit je drei Lagern weichen im gleichen Maße von den Werten der Messung ohne Auflager ab als die 6P-Lagerung. Es ergeben sich Differenzen bis zu  $-3,5 \mu\text{m}$ . Im Vergleich zur Simulation mit FEM ergeben sich keine einheitlichen Abweichungen.

Weiterhin wird der zeitliche Aspekt bei der Reproduzierbarkeit der Verzahnungsmessgrößen überprüft, indem die Messreihen mit und ohne Wartezeit gegenübergestellt werden. Bei allen Werten handelt es sich um die Differenzen zur Variante ohne Auflager, wodurch systematische Anteile des Messprozesses eliminiert sind und die Vergleichbarkeit zu den Ergebnissen der Simulation mit FEM verbessert wird. Ein graphischer Vergleich der Auswirkungen unterschiedlicher Lagerungen und des zeitlichen Aspektes kann dem Bild 41 entnommen werden. Der Einfluss der Zeit auf die Deformationen ist anhand der Wartezeiten nach dem Aufbau bei *Scan1* mit  $t_{\min}$  und bei *Scan2* mit  $t_{\max}$  berücksichtigt, wobei  $\Delta t \approx 24 \text{ h}$  entspricht. In dem Diagramm sind die Messunsicherheiten in Form von Abweichungsbalken eingetragen, die sich aus der Kalibrierung des Großverzahnungsnormal ergeben haben.

Die Differenz der beiden Messreihen, welche den zeitlichen Aspekt beinhalten, ergeben sich bei der 6P-Lagerung zu maximal  $\Delta f_{\text{H}\beta,6\text{P}} = 1,2 \mu\text{m}$  und für die beiden anderen Lagerungsvarianten zu  $\Delta f_{\text{H}\beta,3\text{P}} = 0,6 \mu\text{m}$ . Der Vergleich der Lagerungsvarianten untereinander wird für die Messwerte aller Varianten mit Wartezeit durchgeführt, sodass sich die spezifische Deformation der Lagerungsvarianten stabilisiert hat. Die maximale Differenz der 6P-Lagerung zur Variante ohne Auflager ergibt sich zu  $3,7 \mu\text{m}$ , wobei die Simulation einen Unterschied von maximal  $0,1 \mu\text{m}$  ergibt. Aus dem Vergleich zwischen der

Tabelle 19: Differenz der Flankenlinien-Winkelabweichungen der Simulation mit FEM und der Verifikationsmessung bei verschiedenen Lagerungsvarianten im Vergleich zur Lagerung ohne Auflager

	Simulation mit FEM			Verifikationsmessung		
	ACE	BDF	6P	ACE	BDF	6P
<i>AVZ</i>	$f'_{H\beta}$ in $\mu\text{m}$			$f'_{H\beta}$ in $\mu\text{m}$		
0° L	0,9	1,0	0,0	1,9	0,4	3,0
0° R	0,7	-0,9	0,0	0,1	-1,0	1,6
10° r L	0,6	-0,3	0,0	2,0	0,5	3,6
10° r R	1,0	-1,1	0,0	0,9	-1,2	1,9
20° l L	1,2	-1,2	0,0	-1,6	0,6	-1,5
20° l R	0,2	-0,6	0,0	0,2	1,3	-1,6
<i>IVZ</i>	$f'_{H\beta}$ in $\mu\text{m}$			$f'_{H\beta}$ in $\mu\text{m}$		
0° L	1,2	-1,4	0,0	-1,8	0,0	-0,1
0° R	1,4	-1,3	0,0	-2,7	-0,8	-0,5
10° l L	0,7	-1,0	0,0	0,8	-0,5	1,1
10° l R	1,4	-1,4	-0,1	1,9	0,4	0,8
20° r L	1,3	1,4	0,1	-3,2	-0,9	0,5
20° r R	0,7	-0,4	0,1	-3,5	-2,1	-1,2

flächigen Lagerung und der ACE-Lagerung geht eine maximale Differenz von  $-3,5 \mu\text{m}$  und bei der BDF-Lagerung von  $-2,2 \mu\text{m}$  als Abweichung hervor. Die Ergebnisse weisen teilweise deutlich größere Unterschiede zwischen den Messergebnissen der verschiedenen Lagerungen auf als die Simulationsergebnisse. Ein Grund für die größeren Schwankungen kann das Zusammenspiel aus der Werkstücklagenbestimmung, den deformierten Prüfbunden und einer fertigungsbedingten Verformung der Flanken sein, die sich anders auswirkt als die ideale Geometrie der Simulation. Bei den Simulationen werden ausschließlich die Koordinaten der durch Schwerkraft verformten (Soll-)Flanken als Grundlage der Verzahnungsauswertung verwendet. Der Einfluss des Prüfbundes wird vernachlässigt. Bei der Messung hingegen, wird in dem zuvor ermittelten und bereits beeinflussten Werkstückkoordinatensystem die Erfassung der Koordinaten der Evolventenfläche durchgeführt. Dadurch können die beiden Einflüsse nicht voneinander getrennt betrachtet werden.

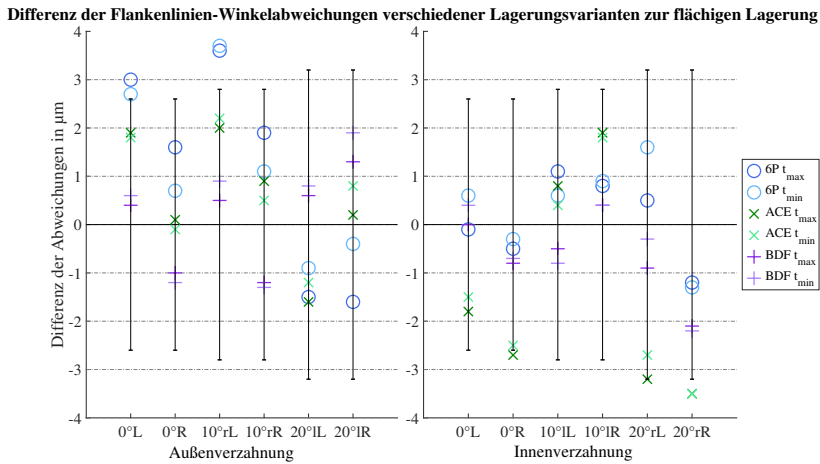


Bild 41: Differenzen der Flankenlinien-Winkelabweichungen der Lagervarianten ohne ( $t_{\min}$ ) und mit Wartezeiten ( $t_{\max}$ ) zur Messung ohne Auflager

### 5.2.3 Auswirkungen des Lagerungseinflusses auf die Messunsicherheitsermittlung

Aus den Simulationen mit FEM verschiedener Lagerungsvarianten gehen unterschiedliche Verformungen an den Prüfbunden hervor. Diese sind gleichmäßig verteilt und lassen daher keine Veränderung der Werkstücklage erwarten. Das Verhalten aus den Simulationen kann bei den durchgeführten Messungen nur teilweise verifiziert werden. Die Verformung des Prüfbunds bei der simulierten 6P-Lagerung ist deutlich geringer als die gemessene Abweichung. Dahingegen ist die Deformation des Prüfbundes bei einer der zwei Lagerungsvarianten mit drei Auflagern sowohl in der Simulation als auch in der Messung zu erkennen. Die Ebenheitsmessung ist von allen Lagerungsvarianten deutlich beeinflusst. Bei den 3P-Lagerungen ist die Verformung größtenteils gleichmäßig. Bei der flächigen und der 6P-Lagerung jedoch nicht, sodass die anschließende Bestimmung des Normalenvektors sowie der Verzahnungsachse beeinflusst sind. Weiterhin wurden Simulationen für die Verzahnungsmessgrößen durchgeführt, wobei veränderte Winkelabweichungen der Flankenlinien als Auswirkung der Lagerungsvarianten auftreten. Die durchgeführten Messungen weisen hierbei ebenfalls Abweichungen auf. Grundsätzlich ist der systematische Beitrag, der durch die Lagerung verursacht wird, in den Messwerten enthalten und unbekannt, wodurch ein großer Messunsicherheitsbeitrag entsteht. Aus den durchgeführten Untersuchungen gehen keine eindeutigen Erkenntnisse hervor, aus denen mathematische Zusammenhänge oder Systematiken zur Modellierung abgeleitet werden können. Es ist jedoch ersichtlich, dass die Aspekte der Reproduzierbarkeit

der Aufbauten und des zeitlichen Einflusses nach dem Aufbau abgebildet werden müssen. Bis weitere Untersuchungen vorliegen, muss ein konservativ abgeschätzter Beitrag in die Messunsicherheitsermittlung einfließen, wodurch die Messunsicherheit größer wird.

Zur konventionellen Ermittlung der Messunsicherheit werden die systematischen und zufälligen Anteile der Messgröße experimentell abgeschätzt. Die ermittelten Messwerte der Ebenheit bei wiederholten Messdurchläufen eines einmaligen Messaufbaus streuen um bis zu  $u_{C,r} = 0,4 \mu\text{m}$ . Ein weiterer Anteil, der bei diesen Einflussfaktor zu berücksichtigen ist, ist die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse nach Ab- und Wiederaufbau  $u_{C,a}$ . Die Differenz der Formabweichung zwischen zwei wiederholten Aufbauten weist nach Bild 39 maximal  $4,3 \mu\text{m}$  auf. Aus den Untersuchungen geht ebenso hervor, dass ein zeitlicher Aspekt berücksichtigt werden muss. Nach jedem Umbau des Großverzahnungsnormalis gibt es ein Setzverhalten. Da lange Wartezeiten in der Fertigungsindustrie nicht möglich sind, wird die kontinuierliche Veränderung während der Messung als ein weiterer (zufälliger) Anteil bedacht. Der resultierende Messunsicherheitsbeitrag wird mit  $u_{C,t}$  angegeben. Dieser Beitrag ist bei der Lagerung ohne Auflager mit  $4,6 \mu\text{m}$  am größten. Die anderen Varianten zeigen Differenzen zwischen den Messungen mit und ohne Wartezeit von bis zu  $2,8 \mu\text{m}$ . Der Messunsicherheitsbeitrag der Lagerung  $u_C$  setzt sich dabei aus den einzelnen Komponenten dieses Einflussfaktors, wie in Gleichung (48) beschrieben, zusammen:

$$u_C = \sqrt{u_{C,r}^2 + u_{C,a}^2 + u_{C,t}^2} \quad (48)$$

Der Beitrag ergibt sich zu maximal  $u_{C,\text{flächig}} = 6,3 \mu\text{m}$ ,  $u_{C,3P} = 4,7 \mu\text{m}$  und  $u_{C,6P} = 4,4 \mu\text{m}$  für die unterschiedlichen Lagerungen. Daraus folgt, dass die flächige Lagerungsvariante bei dem vorliegenden Aufbau nicht als Referenz verwendet werden sollte. Diese wurde analog zu den Simulationen gewählt, weist jedoch die größte Ungenauigkeit auf. Dies kann daran liegen, dass keine definierten Auflagepunkte vorhanden sind und die Palette als Unterlage mit Unebenheiten und einer Balligkeit keine stabile Auflagefläche bzw. reproduzierbare Lagerung für den unteren Prüfbund des Großverzahnungsnormalis bietet. Für die Verzahnungsparameter gehen aus den Untersuchungen ebenfalls keine eindeutigen Ergebnisse hervor.

Für eine Abschätzung des Messunsicherheitsbeitrags auf die konventionelle Art, wird für den zeitlichen Einfluss ein Beitrag  $u_{C,t}$  mit maximal  $1,2 \mu\text{m}$  angenommen. Der systematische Anteil, der sich durch die Lagerungsvarianten im Vergleich zu den Messwerten ohne Auflager ergibt, berücksichtigt die Wiederholbarkeit einer Messung nicht, jedoch die eines wiederholten Aufbaus.

Dies ergibt in diesem Fall den größten Anteil mit bis zu  $4,4 \mu\text{m}$ . Die daraus resultierenden Messunsicherheiten betragen entsprechend der verschiedenen Lagerungsvarianten maximal  $u_{C,\text{sys},3P} = 0,7 \mu\text{m}$ ,  $u_{C,\text{sys},\text{flächig}} = 3,6 \mu\text{m}$  und  $u_{C,\text{sys},6P} = 4,6 \mu\text{m}$  für die Flankenlinien-Winkelabweichungen. Die Lagerungsvariante mit sechs Auflagern weist hierbei die größte Ungenauigkeit auf. Die Ergebnisse spiegeln dabei nicht die Erkenntnisse aus vorangegangenen Vergleichsmessungen nach Wiemann et al. [2017] und Wiemann et al. [2019b] wieder, wobei das Großverzahnungsnormal auf zwölf verschiedenen Messgeräten, zumeist mit der 6P-Lagerung, gemessen haben. Die Werte streuen deutlich geringer, wobei sämtliche Einflussfaktoren des Messprozesses wie verschiedene Messinstrumente, Anwender, etc. in den Messwerten enthalten sind. Der Einfluss von Unebenheiten und Balligkeiten der Palette sollte als erstes hinterfragt werden. Weiterhin ist der Einfluss der Handhabung mit dem Kran zu diskutieren, welcher bei jedem Umbau des Großverzahnungsnormal verwendet werden muss. Hierbei hängt das Gesamtgewicht an drei Ringschrauben, die in Bohrungen in der Nähe des oberen Prüfbundes eingeschraubt und mit Kettenhaken des Krans versehen sind. Damit wird das Großverzahnungsnormal hochgehoben, unter Umständen zwischenzeitlich abgesetzt und nach einem kurzen Umbau der Unterlagerung erneut hochgehoben und auf der Palette positioniert. Hierbei treten Deformationen auf, welche in der Größenordnung von mehreren Mikrometern liegen können (Gespräch mit Röhr, H. [2019]). Bei dem Umbau zwischen zwei Lagervarianten ist dies bisher einen unvermeidbarer Einfluss, welcher sich mit den zuvor diskutierten Effekten der Lagerungsvarianten überlagert.



## 6 Bedeutung der Ergebnisse für das virtuelle Koordinatenmessgerät der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt

In den vorangegangenen Abschnitten wurden vier verschiedene Einflussfaktoren auf den Messprozess eines Großverzahnungsnormals mit dem Groß-KMG der PTB untersucht. Die Erkenntnisse dienen zur Anpassung und Erweiterung des bisherigen virtuellen KMG der PTB für Messvolumen bis  $1 \text{ m}^3$ . Besonderheiten und Herausforderungen, die mit einem Groß-KMG in Brückenbauweise und den entsprechenden großen Werkstücken einhergehen, wurden ermittelt und untersucht.

Bei dem ersten untersuchten Einflussfaktor handelt es sich die Strategie zur Erfassung der statischen Geometrieabweichungen des KMG (in Abschnitt 4.1.1). Aus den Untersuchungen verschiedener Strategien geht die Empfehlung hervor, dass für das reduzierte Starrkörpermodell (*RRB*) mit 17 ermittelten Geometrieabweichungen vier Standpunkte für den LT verwendet werden sollen. Um die geometrische Verformung aller Führungen des Messgerätes möglichst genau zu erfassen, sind Stützstellen entlang jeder Achse in Form von Rahmen parallel zur *XZ*- und zur *YZ*-Ebene zu platzieren. Hierbei sind maximale Abstände von 10 % der Achse einzuhalten. Eine Genauigkeitssteigerung für die ermittelten Parameter ist zu erreichen, wenn die LT bei zwei der vier Standpunkten möglichst nah am Boden und bei den anderen zwei Standpunkten möglichst hoch aufgebaut werden (siehe Bild 14, links). Dabei ist auf einen stabilen Aufbau zu achten. Grundsätzlich ist beim *RRB* der Reflektor möglichst nah am Bezugspunkt anzubringen. Dahingegen ist bei der Erfassung der Parameter des vollständigen Starrkörpermodells (*FRB*) darauf zu achten, dass zusätzlich auskragende Reflektorkonfigurationen verwendet werden. Umso größer der Versatz, desto genauer können die Rotationsparameter erfasst werden. Die Herausforderung ist hierbei erneut ein stabiler Aufbau. Es muss sowohl ein *X*- als auch ein *Y*-Versatz am Tastersystem verwendet werden. Beide Varianten sind jeweils von zwei unterschiedlichen Standpunkten des LT (siehe Bild 14, rechts) aus durchzuführen. Die Stützstellen der Rahmen zur Ermittlung der zusätzlichen vier Parameter, aus wirtschaftlichen Gründen in minimierter Anzahl, sind erneut von zwei verschiedenen Aufbauhöhen aus zu erfassen. Um einen möglichst geringen Aufwand beim Umbauen der Standpunkte zu gewährleisten, wird ein Standpunkt für zwei Messdurchläufe verwendet und ausschließlich der Tasterversatz geändert. Werden diese Empfehlungen eingehalten, ergeben sich laut der Simulationen, die geringsten Messunsicherheiten für

die erfassten Geometrieabweichungen. Die simulativ ermittelten Werte beinhalten dabei die Längenmessunsicherheit des LT inklusive der Standardunsicherheit der Temperaturerfassung (mit  $u_g = 0,1$  K bei  $Pt100$ -Sensoren). Für die Simulationen und bei der tatsächlichen Längenmessung wird die Temperatur automatisch anhand eines integrierten Sensors berücksichtigt. Bei dem Groß-KMG und besonders in einem industriellen Umfeld ist die vorherrschenden Temperatur mit einem Sensor nicht ausreichend abgebildet. Simulative Untersuchungen in Abschnitt 4.1.2 zeigen daher den Einfluss von inhomogenen Temperaturverteilungen, in Form von linearen Temperaturgradienten entlang der drei Achsen, auf die Geometrieabweichungen. Auf Basis des *MATLAB*-Quellcodes aus Anhang A werden künstlich beeinflusste Messdaten erzeugt und wie gewohnt mit *TracCal* ausgewertet, um die thermisch bedingten Messabweichungen zu erhalten. Daraus wird ersichtlich, dass lineare Abhängigkeiten zwischen den Temperaturgradienten und den Geometrieabweichungen bestehen. Bei großen Temperaturänderungen entlang der Achsen (größer 1,3 K) oder thermischen Gradienten bei mehreren Achsen, die mindernde oder verstärkende Auswirkungen aufweisen, reicht die vorgesehene Temperaturerfassung und Kompensation nicht aus. Es ist zu empfehlen, die vorherrschenden Temperaturverhältnisse während der Parametererfassung möglichst genau zu erfassen und die ermittelten Längenmessungen nachträglich zu korrigieren. Dazu werden die Gleichungen (23) bis (26) bzw. Anhang A angewandt und der Temperatureinfluss rechnerisch kompensiert. Das Korrekturverfahren ermöglicht damit, die systematischen Abweichungen zu eliminieren. Die zufälligen Anteile des Korrekturverfahren können abgeschätzt und in der Messunsicherheitsermittlung berücksichtigt werden. Da sich der Korrekturprozess auf die Längenmessung bezieht, jedoch die Messunsicherheit der Geometrieabweichungen von Bedeutung ist, wird der Zusammenhang über den gewohnten Bearbeitungsprozess in *TracCal* hergeleitet. Dazu wird die Längenmessunsicherheit angepasst, die sich aus einer erhöhten Streuung der Temperaturerfassung ergibt. Die daraus ermittelten Messunsicherheiten finden, wie gewohnt, in der Lookup-Tabelle im *VCMM* in Form einer *xml*-Datei Berücksichtigung.

Der zweite Einflussfaktor, der untersucht wurde, entspricht der thermisch beeinflussten Veränderung der Struktur des Groß-KMG und handelt somit von den thermischen Geometrieabweichungen. Zwei bestehende Modellansätze, die sich mit der Temperaturendeckung von Komponenten des Messgerätes beschäftigen, werden angewendet. In Abschnitt 4.2.1 wird der thermische Ausdehnungskreis berücksichtigt, welcher pro Achse aufgestellt wird. Darin werden alle beteiligten Bauteile zwischen einem definierten Bezugspunkt und dem Messpunkt mit den entsprechenden Längenanteilen, Ausdehnungskoeffizienten und Temperaturen aufsummiert. Es folgt die

Ermittlung einer Positionsabweichung zu der Position, welche sich ohne thermischen Einfluss ergeben würde. Solche Abweichungen wurden für zwei virtuelle Messaufgaben berechnet. Eine Anwendung ist in diesem Fall nicht möglich, da die thermische Erfassung der Materialtemperaturen einzelnen Bauteile nicht vorgesehen ist. Über partielle Ableitungen können die dazugehörigen Messunsicherheiten ermittelt werden. Im direkten Vergleich wurde das Starrkörpermodell, welches im VCMM integriert ist, für die thermischen Geometrieabweichungen in Abschnitt 4.2.2 betrachtet. Für die Positionsabweichungen wird in diesem Fall ausschließlich die thermisch bedingte Ausdehnung der Maßstäbe an den Achsführungen berücksichtigt. Die gleichen zwei virtuellen Beispiele wurden berechnet. Für das Beispiel ohne Antastung kommen die gleichen Werte für die Längenmessabweichung heraus. Für das Beispiel mit Antastung ergeben sich Differenzen, da die Ausdehnung des Werkstück selbst in dem thermischen Ausdehnungskreis, aber nicht in der Modellierung des Starrkörpermodells berücksichtigt wird. Das Werkstück wird im virtuellen KMG der PTB in einem anderen Modell berechnet. Im virtuellen Messprozess spielen beide Modelle mit vielen weiteren Modellen zusammen. Solange keine absoluten Positionen, sondern relative Längenmessungen ermittelt werden sollen, kommen beide Modellansätze zum gleichen Ergebnis. Beim thermisch beeinflussten Starrkörpermodell können zusätzlich die translatorischen und rotatorischen Abweichungen sowie die Rechtwinkligkeit unter dem Einfluss der Temperatur bestimmt werden (siehe Abschnitt 4.2.2). Dazu sind einzelne funktionale Zusammenhänge aufgestellt worden, die jedoch an einem KMG in einer anderen Bauweise und Größe empirisch ermittelt wurden. Die entsprechenden Untersuchungen sind für das Groß-KMG in einer Simulation mit FEM erfolgt. Dazu wird die Verformung eines vereinfachten CAD-Modells des Messgerätes in einer thermisch-transienten Simulation ermittelt. Aufgrund mangelnder Details bei der Modellierung können nicht alle Geometrieabweichungen auf die Notwendigkeit einer Anpassung kontrolliert werden. Dazu sind weitere Untersuchungen notwendig. Dennoch geht aus den Simulationen hervor, dass die funktionalen Zusammenhänge der Abweichungen  $\Delta x_{t,x}$  und  $\Delta \varphi_{z,x}$  angepasst werden müssen. Dies liegt daran, dass die Lagerung der X-Achse anders ist, als bei dem bisher untersuchten Messgerät. Bei einer neuen Modellierung folgen andere Variationen für die Messabweichungen und somit für die Messunsicherheit der Parameter während der MCS.

Der nächste Einflussfaktor entspricht einem Temperatureinfluss, welcher Deformationen am Großverzahnungsnormal und somit Messabweichungen verursacht. Die thermische Verformung des Werkstücks ist im VCMM bisher unter zeitlichen als auch räumlichen Temperaturveränderungen berücksichtigt. Der zeitliche Aspekt ist in einem linearen Zusammenhang abgebildet.

Wie die Untersuchungen aus Abschnitt 5.1.1 zeigen, kann dies bei dem großen Werkstück nicht angenommen werden. Die simulativen und experimentellen Untersuchungen weisen einen exponentiellen Temperaturverlauf über die Zeit auf. Die Modellierung muss dahingehend nach Gleichung (37) angepasst bzw. in Verbindung mit der Auswahl, dass es sich um ein großes Werkstück handelt, ergänzt werden. Der Aspekt eines räumlichen Temperaturverhaltens ist im *VCMM* bereits für homogene und inhomogene Verteilungen vorhanden. Da das Großverzahnungsnormal keinen extremen Bedingungen ausgesetzt werden sollte, wie diese in einem fertigungsnahen Umfeld zu erwarten sind, konnte das bisherige anisotrope Modell nicht am Großverzahnungsnormale überprüft werden. Dennoch ist der Einfluss der Temperatur auf die Verzahnungsparameter untersucht worden. Bisher sind die komplizierten Verzahnungselemente nicht Bestandteil der Geometrien, die im *VCMM* ausgewertet werden können, da die Implementierung in die Module der Auswertesoftware fehlt. Um diese Geometrien zukünftig zu ergänzen, muss die Modellierung vorhanden sein. Dass dabei auch die thermische Verformung der Verzahnungselemente berücksichtigt werden müssen, wird in Abschnitt 5.1.2 deutlich. Sowohl die Verschiebungen, die aus der Simulation hervorgehen, als auch die Messung der thermisch beeinflussten Verzahnungsparameter bestätigen dies. Anhand der Gleichungen (17) bis (19) sind die Koordinaten der einzelnen Messpunkte auf einer evolventischen Zahnflanke definiert. Der Einfluss der Temperatur auf die Koordinaten ist in Gleichung (39) abgebildet und kann darüber modelliert werden. Es kann sowohl ein systematischer als auch ein zufälliger thermischer Einfluss auf die Messpunkte der Verzahnungselemente simuliert werden. Solange die Geometrie der Zahnradflanken nicht im virtuellen Messprozess berücksichtigt wird, kann der Beitrag der Temperatur zur Messunsicherheit über die Gleichungen (40) und (42) abgeschätzt werden. Darüber kann ebenfalls eine Korrektur der Profil- und Flankenlinien-Winkelabweichungen erfolgen. Der thermische Einfluss auf die Verzahnungsparameter kann mithilfe der Formeln korrigiert werden. Dazu ist die Zuordnung zu den, bei der Messung vorherrschenden, Temperaturen notwendig. Anschließend werden die Werte der Winkelabweichungen korrigiert, damit diese der gefertigten Flanke ohne thermischen Einfluss entsprechen. Der Korrekturprozess muss in der Messunsicherheitsermittlung Berücksichtigung finden.

Der letzte Einflussfaktor, der untersucht wurde, ist der Einfluss der Schwerkraft durch verschiedene Lagerungsvarianten, der sich auf das Großverzahnungsnormale als großes Werkstück auswirkt. Zuerst wird eine einfache Geometrie in Form der Ebenheit eines Kreises entsprechend dem Prüfbund des Normals untersucht (siehe Abschnitt 5.2.1). Hierbei sind eine Lagerung ohne Auflagepunkte, zwei mit drei und eine mit sechs gleichmäßig verteilten

Auflagern berücksichtigt. Die simulativen und experimentellen Untersuchungen ergeben hierbei kein einheitliches Bild. Weitere Untersuchungen sind daher notwendig. Die Ergebnisse weisen jedoch daraufhin, dass in Bezug auf die Reproduzierbarkeit der Lagerung und auf ein zeitabhängiges Setzverhalten, Abweichungen entstehen. Diese sind als systematischer und auch als zufälliger Beitrag zu berücksichtigen. In welchem Ausmaß ist jedoch bisher nicht ermittelt, sodass keine Systematik abgeschätzt werden und keine Korrektur erfolgen kann. Weiterhin werden die Verzahnungsparameter in Abhängigkeit von den verschiedenen Lagerungsvarianten untersucht. Dazu sind in Abschnitt 5.2.2 Ergebnisse der Simulationen mit FEM und Messungen aufgelistet. Die Messwerte passen nicht zu den Ergebnissen der Simulationen und ergeben ebenfalls keine eindeutigen Schlussfolgerungen. Dies kann daran liegen, dass die Ermittlung der Verzahnungsparameter stark von der Lage des Werkstückkoordinatensystems abhängt, welches wiederum abhängig von den Prüfbunden ist, da darüber die Verzahnungsachse bestimmt wird. In diesem Fall wird ebenfalls deutlich, dass eine Modellierung notwendig ist, welche auf Basis dieser Ergebnisse jedoch nicht aufgestellt werden kann.



## 7 Zusammenfassung und Ausblick

Bei den Einflussfaktoren des Groß-KMG handelt es sich um statische und thermisch bedingte Geometrieabweichungen. Im Hinblick auf das virtuelle KMG der PTB ist der Messunsicherheitsbeitrag der statischen Geometrieabweichungen durch die *xml*-Datei, welche von der Software *TracCal* des interferometrischen Erfassungssystems erzeugt wird, berücksichtigt. Potentielle systematische Anteile, die durch kurzzeitige Temperaturschwankungen bei der interferometrischen Erfassung entstehen können, sind in den ermittelten Werten enthalten und wirken sich im virtuellen Messprozess aus. Wenn die vorherrschenden Temperaturgradienten bekannt sind, können die Systematiken mithilfe des entwickelten *Matlab*-Quellcodes korrigiert werden. Falls dieser verwendet wird, muss die Unsicherheit des Korrekturprozesses in die Messunsicherheitsbetrachtung integriert werden. Dies erfolgt über die empirische Messunsicherheitsermittlung nach Variante B des GUM. Hierzu wurde ein Grenzwert für die Rechteckverteilung ermittelt und der resultierende Einfluss auf die kombinierte Messunsicherheit der Messgröße aufgezeigt (siehe Abschnitt 4.1). Die thermisch bedingten Geometrieabweichungen am KMG, welche entstehen, wenn sich die physische Beschaffenheit des KMG durch einen langfristigen Temperatureinfluss verändert, sind mit zwei unterschiedlichen Ansätzen untersucht worden. Bei dem thermischen Ausdehnungskreis werden Positionsabweichungen ermittelt, welche entstehen, da sich die Bestandteile des Messkreises ausdehnen. Hierbei sind zwei Beispiele für eine homogene und den erweiterten Ansatz einer inhomogenen Temperaturverteilung berechnet worden. Dies wurde verglichen mit den Positionsabweichungen, die durch das Starrkörpermodell im virtuellen KMG der PTB berücksichtigt sind. Für relative Längenmessungen stimmen die Ergebnisse der Ansätze überein. Zur Anpassung der zusätzlichen thermischen Geometrieabweichungen des Starrkörpermodells wurden simulative Verformungen der Bestandteile des Groß-KMG bei verschiedenen Temperaturverteilungen mittels FEM ermittelt. Daraufhin kann der Zusammenhang zwischen den verformten Führungen der KMG-Achsen und den resultierenden Geometrieabweichungen untersucht werden. Aus den simulativen Erkenntnissen geht hervor, dass weitere Untersuchungen erfolgen müssen. Deutlich wird jedoch, dass die veränderte Lagerung der *X*-Achse eine Anpassung der Gleichung für  $\Delta x_{t,x}$  erfordert. Ebenso ist die Modellierung der *Y*-Achse (Traverse) als eigenständiges Bauteil, statt als Bestandteil des Portals, anzupassen (siehe Abschnitt 4.2).

Weiterhin sind spezifischen Einflussfaktoren des Großverzahnungsnormal, als Beispiel für ein Großbauteil, in Hinblick auf den Temperatureinfluss und

die spezifischen Verformungen bei verschiedenen Lagerungen untersucht worden. Ein Temperaturverhalten des Werkstücks ist bereits im virtuellen Messprozess modelliert. Bei den Untersuchungen an dem großen Werkstück hat sich herausgestellt, dass das Modell für große Bauteile angepasst werden muss. Die zeitliche Veränderung wurde für kleinere Werkstücke über ein lineares Verhalten beschrieben, wobei sich bei dieser Messaufgabe ein exponentieller Verlauf abzeichnet. Für die räumliche Temperaturverteilung kann das Modell in der Form bestehen bleiben, die bereits modelliert ist, wenn von einer kontrollierten und stabilen Umgebung ausgegangen wird. Extreme thermische Veränderungen, die in der Industrie zu erwarten sind, konnten nicht nachgestellt werden. Die komplizierte Geometrie der evolventischen Flanken des Zahnrades ist bisher nicht in der Kommunikation zwischen dem virtuellen KMG der PTB und der Anwendersoftware berücksichtigt. Die Erweiterung ist in einem beantragten Forschungsprojekt geplant. Die Untersuchungen in dieser Arbeit bieten dabei eine Grundlage für thermische und lagerungsbedingte Variationen an Verzahnungen. Über die Gleichung (39) ist es möglich, den thermischen Einfluss auf die Koordinaten der Evolvente im Rahmen der MCS einzufügen. Dabei wird der theoretische, mathematische Zusammenhang, welcher in den Messungen bestätigt wurde, zwischen den Messwerten und dem Temperatureinfluss über den Faktor  $\lambda_\theta$  in Gleichung (38) beschrieben. Für den thermischen Einfluss auf die Messunsicherheit können dem Linearfaktor rein zufällige oder auch systematische Anteile als Temperaturdifferenz zugewiesen werden. Diese variieren innerhalb einer bestimmten Wahrscheinlichkeitsverteilung, wobei die Variationen mithilfe der MCS entstehen. Dadurch werden die individuellen Stichproben für jeden virtuellen Messdurchlauf erzeugt (siehe Abschnitt 5.1).

Zuletzt wurde der Einfluss verschiedener Lagerungsvarianten auf die Großverzahnung betrachtet. Dabei handelt es sich um eine speziell konstruierte Auflagevorrichtung mit sechs Lagerpunkten, zwei Varianten mit je drei Halbkugeln als Lagerung und eine ohne Auflager. Simulationen mit FEM und Messungen wurden unter den verschiedenen Lagerungsbedingungen für eine Ebenheitsmessung an einem Prüfbund und für die Verzahnungsmessgrößen durchgeführt. Die Ergebnisse der theoretischen Betrachtung konnten nicht vollständig durch die praktischen Untersuchungen verifiziert werden. Bei den Messungen zeigen sich jedoch mehrere Beiträge, die bei der Messunsicherheitsermittlung dieses Einflussfaktors berücksichtigt werden müssen. Neben der Wiederholbarkeit des Messprozesses nach einem erneuten Aufbau einer Lagerungsvariante betrifft dies auch ein Setzverhalten, dessen Einfluss davon abhängig ist, wie viel Zeit zwischen dem Aufbau des Werkstücks und der Messung vergangen ist (siehe Abschnitt 5.2). Die besonderen Umstände, dass das Großverzahnungsnormale ausschließlich mit dem Kran und dem

Palettensystem transportiert werden kann, können dabei nicht als zufällige Beiträge zur Verformung ausgeschlossen werden. In der Kalibrierstrategie sind häufig Messungen in vier oder wenn möglich acht Positionen gewünscht, um beispielsweise Rotationsabweichungen der Pinole auszugleichen. Die Drehungen um  $90^\circ$  müssen bei dem Großverzahnungsnormals bisher ebenfalls jedes Mal mit dem Kran durchgeführt werden. Auch die 6P-Auflage muss mit dem Kran gedreht werden. Um den Einfluss des Krans an dieser Stelle zu vermeiden, müssten die Drehungen über einen großen Drehtisch oder hydraulische Kissen erfolgen. Dabei ist mit einer Genauigkeitssteigerung in Hinsicht auf Deformationen des Großverzahnungsnormals zu rechnen, allerdings sind weitere Einflussfaktoren wie der Drehtisch oder die Hydraulik selbst zu berücksichtigen. Auch dies könnte Bestandteil weiterer Untersuchungen sein. Aktuell befinden sich solche Untersuchungen in der Durchführung. Hierbei wird die Verformung des Werkstücks am Kran oder bei einer geänderten Lagerung mit interferometrischen Messlinien, die am Werkstück befestigt sind, erfasst. Es zeigen sich Verformungen von wenigen Mikrometern bedingt durch den Kran. Weiterhin wird das Werkstück flächig und mit drei hydraulisch geführten Auflagern erfasst, wobei relative Verformungen in der Größenordnung mehrerer Mikrometer entstehen. Um den ermittelten Zeitaspekt bei der lagerungsbedingten Deformation beschreiben zu können, waren Messungen mit längerer Wartezeiten geplant, in denen kontinuierlich vom KMG gemessen wird. Der Verlauf der Messwerte kann neue Erkenntnisse für einen Grenzwert oder auch für eine Modellierung liefern. Solche Langzeitmessungen müssen pro Lagerungsvariante durchgeführt werden. Diese Messungen sind mehrfach zu wiederholen, sodass die Reproduzierbarkeit des Grenzwertes der Deformation ebenfalls ermittelt werden kann. Dadurch würde sich eine Messstrecke über einen langen Zeitraum von mehreren Wochen erstrecken. Die dafür notwendigen Langzeitmessungen mit allen vier Varianten waren im Rahmen dieser Arbeit nicht durchführbar. Mit dem im späteren Verlauf integrierten interferometrischen Messsystem können nun Werte während des Setzens erfasst werden, ohne dass die Messung mit dem KMG ausgeführt werden muss. Weiterhin ist nach den Untersuchungen zu dieser Arbeit ein Umbau der Palette erfolgt. Ein zusätzlicher Aufbau aus einer durchgängigen, geschliffenen Platte wurde auf den Streben der Palette montiert. Ob dies zu einer gleichmäßigeren und stabileren Unterlage für das Verzahnungsnormals oder die Auflagevorrichtung führt, wird ebenfalls untersucht.

Abschließend ist festzuhalten, dass ein wichtiger Beitrag zur Erweiterung des virtuellen KMG der PTB anhand der neuen Erkenntnisse zu den genannten Einflussfaktoren erfolgt ist. Das Vorgehen zur Erfassung und Berücksichtigung ist für die statischen Geometrieabweichungen und potentielle

systematische Anteile beschrieben. Bei den zusätzlichen thermisch verursachten Geometrieabweichungen sind Anpassungen und Erweiterungen in Form von mathematischen Gleichungen detaillierter zu untersuchen. Die Ergebnisse müssen als Modell für große KMG in Brückenbauweise programmiert und in das komplexe System des virtuellen KMG der PTB eingebunden werden. Danach sind Verifikationsmessungen nötig, die möglichst an einem großen Werkstück mit einfachen Geometrien durchgeführt werden sollten. Anhand von Messungen an einem Portalmessgerät und dem Groß-KMG in Brückenbauweise kann ein Vergleich aufgestellt werden. Weiterhin ist der thermische Einfluss auf das Werkstück untersucht worden, der exponentiell beschrieben werden kann. Die Ungenauigkeit der Temperaturerfassung der Umgebung kann sich in zufälligen und systematischen Abweichungen auf das Ergebnis auswirken. Die Parametrisierung zur Beschreibung der thermisch beeinflussten Geometrie der Evolvente muss spezifisch in das virtuelle KMG eingepflegt werden, um den thermischen Einfluss als Messunsicherheitsbeitrag einzubinden. Dies ist notwendig, da der geometrische Zusammenhang mit komplexen mathematischen Beziehungen beschrieben ist. Ebenso gilt dies für das thermische Verhalten der Materialtemperatur als systematischen Beitrag zur Messunsicherheitsermittlung. Eine Verifizierung der Anpassung des bisherigen Modells und der Erweiterung der Geometrie muss anschließend erfolgen. In Hinblick auf den Einfluss verschiedener Lagerungsvarianten müssen weitere Untersuchungen erfolgen, um Standardmessunsicherheiten für die verschiedenen Aufbauten zu ermitteln. Zusätzlich ist das Setzverhalten mathematisch zu beschreiben, damit der Einfluss in die Messunsicherheitsermittlung eingepflegt werden kann.

# Anhang

## A Matlab-Code zur Berechnung der thermisch beeinflussten Längen bei der Erfassung der Geometrieabweichungen

```
%% Prozedur zur Ermittlung des thermischen
%% Einflusses bei der Erfassung der
%% Geometrie-/Restabweichungen mit einem
%% LaserTracer
%% Ann-Kathrin Wiemann, AG5.33, PTB - 20.06.2020

%% Temperaturgradienten in Kelvin pro Meter

alpha = -1*10(-6);
TempGradX = 0.1;
TempGradY = 0.0;
TempGradZ = 0.0;

%% Pfad eingeben für *.inp-Dateien aus 'TracCal'
%% der LT-Positionen und
%% Stützstellenverteilung einlesen
data_dirs = 'C:\Users\Desktop\';
folder = uigetdir(data_dirs);
fileList = dir(fullfile(folder, '*.inp'));
Anz_Ele = length(fileList());

delimiterIn = ' ';
headlinesIn = 1;

%% ausgeben
file_id = fopen('Restabw_Temperatur.tcd', 'w');

%% Schelife um Punkte je Position einzulesen
%% (ggf. Anzahl anpassen)
for j = 1:Anz_Ele
clear matrixComplete;
filename = [data_dirs, fileList(j).name];
array = importdata(filename,delimiterIn,...
headlinesIn);
matrixComplete = array.data;
```

```
if j == 1
MP_Pos1 = matrixComplete(:,1:3);
elseif j == 2
MP_Pos2 = matrixComplete(:,1:3);
elseif j == 3
MP_Pos3 = matrixComplete(:,1:3);
elseif j == 4
MP_Pos4 = matrixComplete(:,1:3);
elseif j == 5
MP_Pos5 = matrixComplete(:,1:3);
elseif j == 6
MP_Pos6 = matrixComplete(:,1:3);
elseif j == 7
MP_Pos7 = matrixComplete(:,1:3);
elseif j == 8
MP_Pos8 = matrixComplete(:,1:3);
elseif j == 9
LTPos = matrixComplete(:,1:3);
end

j = j+1;

end

%% Datei-Kopf schreiben
fprintf(file_id, '%% file version number Trac-Cal,
...
linear, static: 2003\n');
fprintf(file_id, '%% Beschreibung der Abkürzungen\n')
;
fprintf(file_id, '%% P: Punktnummer\n');
fprintf(file_id, '%% X,Y,Z: Maschinenkoordinaten ...
[mm]\n');
fprintf(file_id, '%% L: Laserlänge [mm]\n');
fprintf(file_id, '%% Std: Standardabweichung der ...
Laserlänge [mm]\n');
fprintf(file_id, '%% H: Horizontalwinkel [°]\n');
fprintf(file_id, '%% V: Vertikalwinkel (ETALON ...
LaserTRACER) [°]\n');
fprintf(file_id, '%% Q: Qualität des Lasersignals ...
(ETALON LaserTRACER) [%%]\n');
```

```

fprintf(file_id, '%% T: Temperatur vom Fühler des ...
Laser-Gerätes [°C]\n');
fprintf(file_id, '%% TX: Temperatur der ...
X-Achse [°C]\n');
fprintf(file_id, '%% TY: Temperatur der ...
Y-Achse [°C]\n');
fprintf(file_id, '%% TZ: Temperatur der ...
Z-Achse [°C]\n');
fprintf(file_id, '%% TA: Lufttemperatur [°C]\n');
fprintf(file_id, '%% DP: Anzahl Totstrecken\n');
fprintf(file_id, '%%\n');

```

```

%% Schleife über alle Positionen mit jeweiligem
%% Reflektor-Versatz (ggf. anpassen)

```

```

for p = 1:1:8

if p == 1
MP = MP_Pos1;
X_Versatz = 0;
Y_Versatz = 0;
Z_Versatz = -80;
elseif p == 2
MP = MP_Pos2;
X_Versatz = 0;
Y_Versatz = 0;
Z_Versatz = -80;
elseif p == 3
MP = MP_Pos3;
X_Versatz = 0;
Y_Versatz = 0;
Z_Versatz = -80;
elseif p == 4
MP = MP_Pos4;
X_Versatz = 0;
Y_Versatz = 0;
Z_Versatz = -80;
elseif p == 5
MP = MP_Pos5;
X_Versatz = 400;
Y_Versatz = 0;
Z_Versatz = -30;
elseif p == 6

```

```
MP = MP_Pos6;
X_Versatz = 0;
Y_Versatz = 400;
Z_Versatz = -30;
elseif p == 7
MP = MP_Pos7;
X_Versatz = 400;
Y_Versatz = 0;
Z_Versatz = -30;
elseif p == 8
MP = MP_Pos8;
X_Versatz = 0;
Y_Versatz = 400;
Z_Versatz = -30;
end

%% Starttemperatur für homogenen Anteil einer
%% Position ermitteln
TempStartX = LTPos(p,1)*TempGradX;
TempStartY = LTPos(p,2)*TempGradY;
TempStartZ = LTPos(p,3)*TempGradZ;

PunktNr = length(MP(:,1));

% Datei-Teil schreiben
fprintf(file_id, '%% MAC-file, TRAC-CAL...
(Build: 0016 vom 2018-11-01), opened:...
20-Nov-2018 11:20:54\n');
fprintf(file_id, '%% Start position...
%1$i (%2$i points)\n', p,PunktNr);
fprintf(file_id, '%% \n');
fprintf(file_id, '%% //HEADER, DO NOT EDIT!\n');
fprintf(file_id, '%% //Date: - 20-Nov-2018\n');
fprintf(file_id, '%% //Time: - 12:18:15\n');
fprintf(file_id, '%% //Laser: - Etalon ...
LaserTRACER-NG(LT ; RE10 ; Beam Break detection on ;
...
SN: LT-00177 ; FW: RE10_0023; USB DLL: 5.1.1.130 ; ...
IFM DLL: unknown)\n');
fprintf(file_id, '%% //Machine: - dme ...
(n17603: 1294)\n');
fprintf(file_id, '%% //EDS: - none\n');
```

```

fprintf(file_id, '%% //Temperature: - 20.00 °C\n');
fprintf(file_id, '%% //Pressure: - 1006 hPa\n');
fprintf(file_id, '%% //Humidity: - 33 %\n');
fprintf(file_id, '%% //Coordinates: - Machine\n');
fprintf(file_id, '%% //Parameters: - Messzeit pro
...
Punkt: 1.25s; Abtastrate: 10240Hz ; Grad der ...
Mittelung: 256 ; Grenze Stillstand: 0.003mm ; ...
Grenze Bewegung: 0.02mm ; Timeout: 30s ; Anz. ...
Maschinenpos. In Messzeit: 5\n');
fprintf(file_id, '%%\n');
fprintf(file_id, '%%          P      X      Y      Z      L      ...
Std H      V      Q      T      TX      TY      TZ      TA      DP\n');

%% Schleife über alle Messpunkte einer Position
for i=1:1:length(MP)

%% Temperaturen am Messpunkt und entsprechende
%% Messlänge bestimmen
TempEndX = MP(i,1)*TempGradX;
TempEndY = MP(i,2)*TempGradY;
TempEndZ = MP(i,3)*TempGradZ;

DeltaX = MP(i,1)-LTPos(p,1)+X_Versatz;
DeltaTempX = -20 + (TempStartX + TempEndX)/2;
TempX = DeltaX+DeltaX*DeltaTempX*alpha*10(-3);

DeltaY = MP(i,2)-LTPos(p,2)+Y_Versatz;
DeltaTempY = -20 + (TempStartY + TempEndY)/2;
TempY = DeltaY+DeltaY*DeltaTempY*alpha*10(-3);

DeltaZ = MP(i,3)-LTPos(p,3)+Z_Versatz;
DeltaTempZ = -20 + (TempStartZ + TempEndZ)/2;
TempZ = DeltaZ+DeltaZ*DeltaTempZ*alpha*10(-3);

Dist = sqrt(TempX2 + TempY2 + TempZ2);

%% Datei-Teil schreiben
fprintf(file_id, 'Pos%1$i %2$i %3$8f %4$8f ...
%5$8f %6$8f 0.0000 0.0000 0.0000 75.00 ...
20.00 20.00 20.00 20.00 20.00 1\n', ...
p, i, MP(i,1), MP(i,2), MP(i,3), Dist);

```

**end**

*%% Datei-Ende schreiben*

```
fprintf(file_id, '%% \n');  
fprintf(file_id, '%% //COMMENTS, DO NOT EDIT!\n');  
fprintf(file_id, '%% //C: End position %i \n',p);  
fprintf(file_id, '%% \n');  
fprintf(file_id, '%% //FOOTER, DO NOT EDIT!\n');  
fprintf(file_id, '%% //Date:          - 20-Nov-2018\n')  
;  
fprintf(file_id, '%% //Time:          - 12:55:42\n');  
fprintf(file_id, '%% //Temperature: - 20.00 °C\n');  
fprintf(file_id, '%% \n');
```

**end**

```
fclose('all');
```

## B Randbedingungen der Simulationen mit der Methode der Finiten Elemente

Zusammenfassungen der verwendeten Randbedingungen bei den Simulationen mit FEM sind in Tabelle 20 und 21 zu finden:

Tabelle 20: Randbedingungen bei den Simulationen mit FEM für das Groß-KMG

<b>thermisch-stationär</b> (s. Abschnitt 4.2.2)				
Temperatur: $\vartheta_{\text{ini}} = 20,0 \text{ }^\circ\text{C}$ , $\vartheta_{\text{min}} = 20,0 \text{ }^\circ\text{C}$ , $\vartheta_{\text{max}} = 25,0 \text{ }^\circ\text{C}$				
Material	Ausdehnungs- koeffizient in $\text{K}^{-1}$	Dichte in $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	Elastizitäts- modul in Pa	Poisson- zahl
Baustahl	$12,50 \cdot 10^{-6}$	7850	$2,00 \cdot 10^{11}$	0,300
Beton	$14,00 \cdot 10^{-6}$	2300	$3,00 \cdot 10^{10}$	0,180
Glasskeramik	$7,07 \cdot 10^{-8}$	2530	$9,10 \cdot 10^{10}$	0,240
Granit	$7,90 \cdot 10^{-6}$	2900	$5,92 \cdot 10^{10}$	0,197
<b>statisch-mechanisch</b> (s. Abschnitt 4.2.2)				
Fixierung: 1 Fläche in X, Y, Z, 1 Fläche in X, Z, 10 Flächen in Z				

Tabelle 21: Randbedingungen bei den Simulationen mit FEM für das Großverzahnungsnormal

<b>thermisch-transient</b> (s. Abschnitt 5.1.1)				
	Temperatur: $\vartheta_{\text{FEM,W}} = 25,0 \text{ °C}$ , $\vartheta_{\text{env}} = 20,0 \text{ °C}$			
Material	Dichte in $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	Wärmeleit- fähigkeit in $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	spez. Wärme- kapazität in $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$	
34CrNiMo6	7730	42,6	470	
<b>thermisch-mechanisch</b> (s. Abschnitt 5.1.2)				
	Temperatur: $\vartheta_{\text{FEM,W}} = 25,0 \text{ °C}$ , $\bar{\vartheta}_{\text{FEM,W,i}} = 24,97 \text{ °C}$			
Material	Ausdehnungs- koeffizient in $\text{K}^{-1}$	Dichte in $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	Elastizitäts- modul in Pa	Poisson- zahl
34CrNiMo6	$11,10 \cdot 10^{-6}$	7730	$2,10 \cdot 10^{11}$	0,285
	Wärmeübergangskoeffizient $9,00 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$			
<b>statisch-mechanisch</b> (s. Abschnitt 5.2.1)				
Material	Ausdehnungs- koeffizient in $\text{K}^{-1}$	Dichte in $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	Elastizitäts- modul in Pa	Poisson- zahl
Baustahl	$12,50 \cdot 10^{-6}$	7850	$2,00 \cdot 10^{11}$	0,300
	Gravitationsbeschleunigung $-9,8066 \text{ m/s}^2$ in Z-Komponente			
Fixierung	flächig	unterer Prüfbund in X, Y, Z		
	3P	1 Auflager in X, Y, Z und 2 Auflager in Z		
	6P	1 Auflager in X, Y, Z und 5 Auflager in Z		

## C Parametrisierung des Groß-KMG für das VCmm2Tool

Eine Zusammenfassung der verwendeten Parametrisierung des Groß-KMG der PTB für das VCmm2Tool ist in Tabelle 22 zu sehen:

Tabelle 22: Zusammenfassung der Parametrisierung des Groß-KMG für das VCmm2Tool

Parameter	Wert	Verteilung	Standard- abweichung
<i>Drift</i>			
TemporalIncrement	0,0	equal	$5 \cdot 10^{-5}$
<b>AzimuthAngle</b>			
MainDirection	0,0	equal	3,1416
DircetionalVariation	0,0	equal	0,0
ElevationAngle	0,0	equal	0,1
MainDirection	0,0	equal	3,1416
DircetionalVariation	0,0	equal	0,0
<i>Environment</i>			
<b>Temperatur</b>			
AverageTemperature	20,0	equal	0,3
SpatialTemp.Gradient	0,0	equal	0,05
TemporalTemp.Gradient	0,0	equal	0,2
<b>Pressure</b>			
AveragePressure	1013,25	equal	0,0
SpatialPressureGradient	$z = -80$		
Humidity	80,0	equal	0,0
<i>Guideway Geometry</i>			
21 Geometrieparameter der LT-Erfassung als LookUp-Tabelle			
<i>Stylus</i>			
Parameter der Tastereinmessung als LookUp-Tabelle			

Parameter	Wert	Verteilung	Standard- abweichung
<i>Workpiece</i>			
Roughness	0,0005	equal	0,00015
AverageTemperature	20,0	equal	0,2
TemporalTemp.Gradient	0,0	equal	0,2
ThermalCoeff.Expansion	$11,1 \cdot 10^{-6}$	equal	$1,0 \cdot 10^{-6}$
<i>Kinematic Chain</i>			
<b>ScaleCompensation</b>			
X - alpha	$5 \cdot 10^{-6}$	equal	$0,1 \cdot 10^{-6}$
X - deltaT	0,0	equal	0,05
Y - alpha	$5 \cdot 10^{-6}$	equal	$0,1 \cdot 10^{-6}$
Y - deltaT	0,0	equal	0,1
Z - alpha	$0 \cdot 10^{-6}$	equal	$0,1 \cdot 10^{-6}$
Z - deltaT	0,0	equal	0,1
Table - alpha	$6 \cdot 10^{-6}$	equal	$0,2 \cdot 10^{-6}$
Portal - alpha	$6 \cdot 10^{-6}$	equal	$0,2 \cdot 10^{-6}$
Traverse - alpha	$4,4 \cdot 10^{-6}$	equal	$0,5 \cdot 10^{-6}$

# Literaturverzeichnis

- AG5.32 (2020). *Arbeitsgruppe 5.32 der PTB - Koordinatenmesssysteme - Prinzipskizze des VCMM*. Eingesehen im August 2020. URL: <https://www.ptb.de/cms/ptb/fachabteilungen/abt5/fb-53/ag-532.htm>.
- Baldwin, J. M., K. D. Summerhays und D. A. Campbell (2007). „Application of Simulation Software to Coordinate Measurement Uncertainty Evaluations“. In: *Measure* 2.4, S. 40–52.
- Balzer, F. G. (2015). „Entwicklung und Untersuchung zur 3-D-Nanopositioniertechnik in großen Bewegungsbereichen“. Dissertation. TU Ilmenau.
- BMWi (2020a). *Bundesministerium für Wirtschaft und Energie - Bruttostromerzeugung in Deutschland 2017 in TWh*. Eingesehen August 2020. URL: <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Dossier/erneuerbare-energien.html>.
- BMWi (2020b). *Bundesministerium für Wirtschaft und Energie - Das Erneuerbare-Energien.Gesetz*. Eingesehen August 2020. URL: <https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Dossier/eeg.html>.
- Brinkmann, B. (2007). *Internationales Wörterbuch der Metrologie - Grundlegende und allgemeine Begriffe und zugeordnete Benennungen (VIM) - Deutsch-englische Fassung - ISO/IEC-Leitfaden 99:2007*. Beuth.
- DIN 4760-06 (1982). *Gestaltabweichungen; Begriffe, Ordnungssystem*.
- DIN ISO 21771-08 (2014). *Zahnräder und Zylinderradpaare mit Evolventenverzahnung - Begriffe und Geometrie*. ISO.
- DIN ISO/TS 23165 (2006). *Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Leitfaden zur Ermittlung der Testunsicherheit von Koordinatenmessgeräten (KMG)*. ISO/TS.
- Dorp, B. van, H. Haitjema, F. Delbressine, R. Bergmans und P. Schellekens (2001). „Virtual CMM using Monte Carlo Methods based on Frequency Content of the Error Signal“. In: *Proceedings SPIE* 4401.
- Durstewitz, M., B. Hahn und K. Rohrig (2006). *Wissenschaftliches Mess- und Evaluierungsprogramm (WMEP) zum Breitentest - 250 MW Wind*. Techn. Ber.
- Edlen, B. (1966). „The refractive index of air“. In: *Metrologia* 2, S. 71–80.
- Franke, M., T. Kistner, T. Hausotte, D. Heißelmann, C. Schwehn und K. Wendt (2017). „Bestimmung der Messunsicherheit für Koordinatenmesssysteme“. In: *Technisches Messen*.
- Gao, G., H. Zhang, H. San, X. Wu und W. Wang (2017). „Modeling and Error Compensation of Robotic Articulated Arm Coordinate Measuring Machines Using BP Neural Network“. In: *Complexity*.

- Haitjema, H., B. van Drop, M. Morel und P.H.J. Schellekens (2001). „Uncertainty estimation by the concept of virtual instruments“. In: *Proceedings SPIE* 4401.
- Haitjeman, H. und M. Morel (2000). „Traceable roughness measurements of products“. In: *Proceedings of 1st euspen topical conference on Fabrication and metrology in Nanotechnology 2*, S. 354–357.
- Härtig, F. und M. Stein (2019). „3D involute gear evaluation - Part I: Workpiece coordinates“. In: *Measurement* 134, S. 569–573.
- Hausotte, T. (2011). „Nanopositionier- und Nanomessmaschinen - Geräte für hochpräzise makro- bis nanoskalige Oberflächen- und Koordinatenmessungen“. Habilitation. TU Ilmenau.
- Heißelmann, D., M. Franke, K. Rost, K. Wendt, T. Kistner und C. Schwehn (2018). „Determination of measurement uncertainty by Monte Carlo simulation“. In: *Advanced Mathematical and Computational Tools in Metrology and Testing XI* 58, S. 447–480.
- Hu, Y. (2010). „Advanced virtual coordinate measuring machine“. Dissertation. Brunel University.
- Hu, Y., Q. Yang und X. Sun (2012). „Design, Implementation, and Testing of Advanced Virtual Coordinate Measuring Machines“. In: *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 61, S. 1368–1376.
- ISO 1 (2016). *Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Standardreferenztemperatur für die Geometrische Produktspezifikation und Prüfung*. DIN EN ISO.
- ISO 10360-1 (2003). *Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Annahmeprüfung und Bestätigungsprüfung für Koordinatenmessgeräte (KMG) - Teil 1: Begriffe*. ISO.
- ISO 10360-2 (2009). *Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Annahmeprüfung und Bestätigungsprüfung für Koordinatenmessgeräte (KMG) - Teil 2: KMG angewendet für Längenmessungen*. ISO.
- ISO 14253-1:2017 (2018). *Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Prüfung von Werkstücken und Messgeräten durch Messen - Teil 1: Entscheidungsregeln für den Nachweis von Konfirmität oder Nichtkonfirmität mit Spezifikation*. ISO.
- ISO 15530-3 (2011). *Geometrische Produktspezifikation und -prüfung (GPS) - Verfahren zur Ermittlung der Messunsicherheit von Koordinatenmessgeräten (KMG) - Teil 3: Anwendung von kalibrierten Werkstücken oder Normalen*. ISO.
- ISO 230-1 (1996). *Prüfregeln für Werkzeugmaschinen - Teil 1: Geometrische Genauigkeit von Maschinen, die ohne Last oder unter Schlichtbedingungen arbeiten [zurückgezogen]*. ISO.

- ISO 230-1 (2012). *Prüfregeln für Werkzeugmaschinen - Teil 1: Geometrische Genauigkeit von Maschinen, die ohne Last oder unter quasistatischen Bedingungen arbeiten*. ISO.
- ISO/IEC 17025 (2018). *ISO/IEC 17025 testing and calibration laboratories*. ISO/ICE.
- JCGM 100 (2008). *Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement*. BIPM.
- JCGM 101 (2008). *Evaluation of measurement data - Supplement 1 to the „Guide of the expression of uncertainty in measurement“ - Propagation of distributions using a Monte Carlo method*. BIPM.
- Kistner, T., A. Gabbia und D. Imkamp (2016). „Messunsicherheit durch Simulation Stand der Technik und neue Entwicklungen für die Koordinatenmesstechnik in der industriellen Produktion“. In: *Sensoren und Messsysteme*, S. 474-479.
- Kniel, K. (2007). „Ein Beitrag zur Entwicklung eines laserinterferometrischen Trackingsystems für die Genauigkeitssteigerung in der Koordinatenmesstechnik“. Dissertation. TU Ilmenau.
- Kniel, K. und H. Schwenke (2007). „Genauigkeitssteigerung und Kalibrierung von Koordinatenmessgeräten mit dem LaserTRACER“. In: *PTB Mitteilungen* 117.4, S. 372-378.
- Lin, H., F. Keller und M. Stein (2020). „Influence and compensation of CMM geometric errors on 3D gear measurements“. In: *Measurement* 151.
- Meiners-Hagen, K., F. Pollinger und A. Abou-Zeid (2010). „Brechzahlkompensation mittels Mehrwellenlängen-Interferometrie“. In: *PTB-Mitteilungen* 120.2, S. 110-114.
- Philipps, S. D., B. R. Borchardt und A. Abackerli (2003). „The Validation of CMM Task Specific Measurement Uncertainty Software“. In: *Proceedings of American Society for Precision Engineering*.
- PTB (2007). „Bestimmung der Messunsicherheit von Messungen mit Koordinatenmessgeräten - Status und Ausblick“. In: *PTB Mitteilungen*. Bd. 117. PTB-Mitteilung. PTB. Kap. 4.
- PTB (2008). *Abschlussbericht zu FVA-Forschungsvorhaben 491 I - Ermittlung einer aufgabenspezifischen Messunsicherheit von 3D-Verzahnungsmessungen*. Techn. Ber. FVA-Forschungsheft 858.
- PTB (2009). *Abschlussbericht: Messung großer Bauteile mit Lasertrackern - Bestimmung der aufgabenspezifischen Messunsicherheit*. Techn. Ber. PTB.
- PTB (2014). *VCMM Nutzerhandbuch*. Techn. Ber. PTB.
- PTB (2022). *Modellbeschreibung des Virtuellen Koordinatenmessgerätes VCMM; Stand 29.07.2022*. Techn. Ber. PTB.
- Röhr, H. (Sep. 2019). *Gesprächsnotiz*.
- Roloff und Matek (2009). *Maschinenelemente*. 19. Aufl. Springer.
- Roloff und Matek (2019). *Maschinenelemente: Tabellenbuch*. 19. Aufl. Springer.

- Rost, K. (2017). „Ermittlung einer aufgabenspezifischen Messunsicherheit für Verzahnungsmessungen - Übertragung des virtuellen Koordinatenmessgerätes auf Verzahnungsmessgeräte“. Dissertation. Universität Bremen.
- Rost, K., K. Wendt und F. Härtig (2016). „Evaluating a task specific measurement uncertainty for gear measuring instruments via Monte Carlo simulation“. In: *Precision Engineering* 44, S. 220–230.
- Schenk, W., F. Kremer, G. Beddies, T. Franke, P. Galvosas und P. Rieger (2014). *Physikalisches Praktikum*. Springer Spektrum.
- Schmidt, I. (2008). „Beiträge zur Verringerung der Positionierungsunsicherheit in der Nanopositionier- und Nanomessmaschine“. Dissertation. TU Ilmenau.
- Schwenke, H., M. Franke, J. Hannaford und H. Kunzmann (2005). „Error mapping of CMMs and machine tools by a single tracking interferometer“. In: *CIRP Annals* 54.1, S. 475–478.
- Schwenke, H., C. Neukirch, M. Weigel und W. Wiedmann (2010). „Prüfung und Korrektur von Koordinatenmessgeräten mit dem Lasertracer - Einsatz und Praxiserfahrung“. In: *VDI-Fachtagung Koordinatenmesstechnik*.
- Sladek, J., A. Gaskam und M. Olszewska (2013). „Virtual coordinate measuring machine built using LaserTracer system and spherical standard“. In: *Metrology and measurement systems XX*, S. 77–86.
- Strommer, J. (2022). *Balkenrechner für Biegemoment, Biegespannung, Querkraft & Auflagerreaktionen eines Trägers*. Eingesehen im November 2022. URL: <https://www.johannes-strommer.com/rechner/balkenberechnung/>.
- Trapet, E. und F. Wäldele (1989). „Koordinatenmessgeräte in der Fertigung - Temperatureinflüsse und erreichbare Messunsicherheiten“. In: *VDI Berichte* 751, S. 209–227.
- Trapet, E. und F. Wäldele (1991). „A reference object based method to determine the parametric error components of coordinate measuring machines and machines tools“. In: *Measurement* 9.1, S. 17–22.
- Trapet, E. und F. Wäldele (1996). „The Virtual CMM Concept“. In: *Advanced Mathematical Tools in Metrology, World Scientific Publ. Comp.*, S. 238–247.
- Trenk, M., M. Franke und H. Schwenke (2004). „The „Virtual CMM“ a software tool for uncertainty evaluation - practical application in an accredited calibration lab“. In: *Proc. of ASPE: Uncertainty Analysis in Measurement and Design* 9, S. 68–75.
- VDI/VDE 2617-11 (2011). *Genauigkeit von Koordinatenmessgeräten Kenngrößen und deren Prüfung Ermittlung der Unsicherheit von Messungen auf Koordinatenmessgeräten durch Messunsicherheitsbilanzen*. VDI/VDE.
- VDI/VDE 2617-2.1 (2014). *Genauigkeit von Koordinatenmessgeräten - Kenngrößen und deren Prüfung - Leitfaden zur Anwendung von DIN EN ISO 10360-2 zur Messung von Längenmaßen*. VDI/VDE.

- VDI/VDE 2617-3 (1989). *Genauigkeit von Koordinatenmeßgeräten - Kenngrößen und deren Prüfung; Komponenten der Meßabweichung der Gerätes [zurückgezogen]*. VDI VDE.
- VDI/VDE 2617-7 (2008). *Genauigkeit von Koordinatenmessgeräten - Kenngrößen und deren Prüfung - Ermittlung der Unsicherheit von Messungen auf Koordinatenmessgeräten durch Simulation*. VDI VDE.
- Wäldele, F. und H. Schwenke (2002). „Automatische Bestimmung der Messunsicherheit auf KMGs auf dem Weg in die industrielle Praxis“. In: *Technisches Messen* 69, S. 550–557.
- Weckenmann, A. (2012). *Koordinatenmesstechnik*. Hanser Verlag.
- Wendt, K., F. Schwenke, F. Wäldele, M. Krawczyk und K. Kniel (2001). „Error mapping of large CMMs by sequential multi-lateration using a laser tracker“. In: *Proceedings of 2nd euspen International Conference*.
- Wolf, M., M. Müller und M. Rösslein (2007). „Modellierung und Simulation komplexer Messvorgänge mittels der Monte Carlo Methode“. In: *Technisches Messen* 74, S. 485–493.
- Yang, Z. und Y. Chen (2005). „Inspection Path Generation in Haptic Virtual CMM“. In: *Computer-Aided Design & Applications* 2.1-4, S. 273–282.

## **Verzeichnis promotionsbezogener, eigener Publikationen**

- Wiemann, A., M. Stein und K. Kniel (2017). „Rückführung von Verzahnungsmessungen für Großgetriebe“. In: *VDI Verzahnungsmesstechnik* 2316, S. 205–216.
- Wiemann, A., M. Stein und K. Kniel (2019a). „Temperature influence on involute gear measurements“. In: *Forschung im Ingenieurwesen* 83, S. 683–690.
- Wiemann, A., M. Stein und K. Kniel (2019b). „Traceable measurements of large involute gears“. In: *Precision Engineering*, S. 330–338.



## Reihenübersicht

Koordination der Reihe (Stand 2024):  
Geschäftsstelle Maschinenbau, Dr.-Ing. Oliver Kreis, [www.mb.fau.de/diss/](http://www.mb.fau.de/diss/)

Im Rahmen der Reihe sind bisher die nachfolgenden Bände erschienen.

Band 1 – 52  
Fertigungstechnik – Erlangen  
ISSN 1431-6226  
Carl Hanser Verlag, München

Band 53 – 307  
Fertigungstechnik – Erlangen  
ISSN 1431-6226  
Meisenbach Verlag, Bamberg

ab Band 308  
FAU Studien aus dem Maschinenbau  
ISSN 2625-9974  
FAU University Press, Erlangen

Die Zugehörigkeit zu den jeweiligen Lehrstühlen ist wie folgt gekennzeichnet:

Lehrstühle:

<b>FAPS</b>	Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik
<b>FMT</b>	Lehrstuhl für Fertigungsmesstechnik
<b>KTmfk</b>	Lehrstuhl für Konstruktionstechnik
<b>LFT</b>	Lehrstuhl für Fertigungstechnologie
<b>LGT</b>	Lehrstuhl für Gießereitechnik
<b>LPT</b>	Lehrstuhl für Photonische Technologien
<b>REP</b>	Lehrstuhl für Ressourcen- und Energieeffiziente Produktionsmaschinen

**Band 1: Andreas Hemberger**

Innovationspotentiale in der rechnerintegrierten Produktion durch wissensbasierte Systeme  
FAPS, 208 Seiten, 107 Bilder. 1988.  
ISBN 3-446-15234-2.

**Band 2: Detlef Classe**

Beitrag zur Steigerung der Flexibilität automatisierter Montagesysteme durch Sensorintegration und erweiterte Steuerungskonzepte  
FAPS, 194 Seiten, 70 Bilder. 1988.  
ISBN 3-446-15529-5.

**Band 3: Friedrich-Wilhelm Nolting**

Projektierung von Montagesystemen  
FAPS, 201 Seiten, 107 Bilder, 1 Tab. 1989.  
ISBN 3-446-15541-4.

**Band 4: Karsten Schlüter**

Nutzungsgradsteigerung von Montagesystemen durch den Einsatz der Simulationstechnik  
FAPS, 177 Seiten, 97 Bilder. 1989.  
ISBN 3-446-15542-2.

**Band 5: Shir-Kuan Lin**

Aufbau von Modellen zur Lageregelung von Industrierobotern  
FAPS, 168 Seiten, 46 Bilder. 1989.  
ISBN 3-446-15546-5.

**Band 6: Rudolf Nuss**

Untersuchungen zur Bearbeitungsqualität im Fertigungssystem Laserstrahlschneiden  
LFT, 206 Seiten, 115 Bilder, 6 Tab. 1989.  
ISBN 3-446-15783-2.

**Band 7: Wolfgang Scholz**

Modell zur datenbankgestützten Planung automatisierter Montageanlagen  
FAPS, 194 Seiten, 89 Bilder. 1989.  
ISBN 3-446-15825-1.

**Band 8: Hans-Jürgen Wißmeier**

Beitrag zur Beurteilung des Bruchverhaltens von Hartmetall-Fließpreßmatrizen  
LFT, 179 Seiten, 99 Bilder, 9 Tab. 1989.  
ISBN 3-446-15921-5.

**Band 9: Rainer Eisele**

Konzeption und Wirtschaftlichkeit von Planungssystemen in der Produktion  
FAPS, 183 Seiten, 86 Bilder. 1990.  
ISBN 3-446-16107-4.

**Band 10: Rolf Pfeiffer**

Technologisch orientierte Montageplanung am Beispiel der Schraubtechnik  
FAPS, 216 Seiten, 102 Bilder, 16 Tab. 1990.  
ISBN 3-446-16161-9.

**Band 11: Herbert Fischer**

Verteilte Planungssysteme zur Flexibilitätsteigerung der rechnerintegrierten Teilefertigung  
FAPS, 201 Seiten, 82 Bilder. 1990.  
ISBN 3-446-16105-8.

**Band 12: Gerhard Kleineidam**

CAD/CAP: Rechnergestützte Montagefeinplanung  
FAPS, 203 Seiten, 107 Bilder. 1990.  
ISBN 3-446-16112-0.

**Band 13: Frank Vollertsen**

Pulvermetallurgische Verarbeitung eines übereutektoiden verschleißfesten Stahls  
LFT, XIII u. 217 Seiten, 67 Bilder, 34 Tab. 1990.  
ISBN 3-446-16133-3.

**Band 14: Stephan Biermann**

Untersuchungen zur Anlagen- und Prozeßdiagnostik für das Schneiden mit CO<sub>2</sub>-Hochleistungslasern  
LFT, VIII u. 170 Seiten, 93 Bilder, 4 Tab. 1991.  
ISBN 3-446-16269-0.

**Band 15: Uwe Geißler**

Material- und Datenfluß in einer flexiblen Blechbearbeitungszelle  
LFT, 124 Seiten, 41 Bilder, 7 Tab. 1991.  
ISBN 3-446-16358-1.

**Band 16: Frank Oswald Hake**

Entwicklung eines rechnergestützten Diagnosesystems für automatisierte Montagezellen  
FAPS, XIV u. 166 Seiten, 77 Bilder. 1991.  
ISBN 3-446-16428-6.

**Band 17: Herbert Reichel**

Optimierung der Werkzeugbereitstellung durch rechnergestützte Arbeitsfolgenbestimmung  
FAPS, 198 Seiten, 73 Bilder, 2 Tab. 1991.  
ISBN 3-446-16453-7.

**Band 18: Josef Scheller**

Modellierung und Einsatz von Softwaresystemen für rechnergeführte Montagezellen  
FAPS, 198 Seiten, 65 Bilder. 1991.  
ISBN 3-446-16454-5.

**Band 19: Arnold vom Ende**

Untersuchungen zum Biegeumformung mit elastischer Matrize  
LFT, 166 Seiten, 55 Bilder, 13 Tab. 1991.  
ISBN 3-446-16493-6.

**Band 20: Joachim Schmid**

Beitrag zum automatisierten Bearbeiten von Keramikguß mit Industrierobotern  
FAPS, XIV u. 176 Seiten, 111 Bilder, 6 Tab. 1991.  
ISBN 3-446-16560-6.

**Band 21: Egon Sommer**

Multiprozessorsteuerung für kooperierende Industrieroboter in Montagezellen  
FAPS, 188 Seiten, 102 Bilder. 1991.  
ISBN 3-446-17062-6.

**Band 22: Georg Geyer**

Entwicklung problemspezifischer Verfahrensketten in der Montage  
FAPS, 192 Seiten, 112 Bilder. 1991.  
ISBN 3-446-16552-5.

**Band 23: Rainer Flohr**

Beitrag zur optimalen Verbindungstechnik in der Oberflächenmontage (SMT)  
FAPS, 186 Seiten, 79 Bilder. 1991.  
ISBN 3-446-16568-1.

**Band 24: Alfons Rief**

Untersuchungen zur Verfahrensfolge Laserstrahlschneiden und -schweißen in der Rohkarosseriefertigung  
LFT, VI u. 145 Seiten, 58 Bilder, 5 Tab. 1991.  
ISBN 3-446-16593-2.

**Band 25: Christoph Thim**

Rechnerunterstützte Optimierung von Materialflußstrukturen in der Elektronikmontage durch Simulation  
FAPS, 188 Seiten, 74 Bilder. 1992.  
ISBN 3-446-17118-5.

**Band 26: Roland Müller**

CO<sub>2</sub>-Laserstrahlschneiden von kurzglasverstärkten Verbundwerkstoffen  
LFT, 141 Seiten, 107 Bilder, 4 Tab. 1992.  
ISBN 3-446-17104-5.

**Band 27: Günther Schäfer**

Integrierte Informationsverarbeitung bei der Montageplanung  
FAPS, 195 Seiten, 76 Bilder. 1992.  
ISBN 3-446-17117-7.

**Band 28: Martin Hoffmann**

Entwicklung einer CAD/CAM-Prozesskette für die Herstellung von Blechbiegeteilen  
LFT, 149 Seiten, 89 Bilder. 1992.  
ISBN 3-446-17154-1.

**Band 29: Peter Hoffmann**

Verfahrensfolge Laserstrahlschneiden und -schweißen: Prozeßführung und Systemtechnik in der 3D-Laserstrahlbearbeitung von Blechformteilen  
LFT, 186 Seiten, 92 Bilder, 10 Tab. 1992. ISBN 3-446-17153-3.

**Band 30: Olaf Schrödel**

Flexible Werkstattsteuerung mit objektorientierten Softwarestrukturen  
FAPS, 180 Seiten, 84 Bilder. 1992. ISBN 3-446-17242-4.

**Band 31: Hubert Reinisch**

Planungs- und Steuerungswerkzeuge zur impliziten Geräteprogrammierung in Roboterzellen  
FAPS, XI u. 212 Seiten, 112 Bilder. 1992. ISBN 3-446-17380-3.

**Band 32: Brigitte Bärnreuther**

Ein Beitrag zur Bewertung des Kommunikationsverhaltens von Automatisierungsgeräten in flexiblen Produktionszellen  
FAPS, XI u. 179 Seiten, 71 Bilder. 1992. ISBN 3-446-17451-6.

**Band 33: Joachim Hutfless**

Laserstrahlregelung und Optikiagnostik in der Strahlführung einer CO<sub>2</sub>-Hochleistungslaseranlage  
LFT, 175 Seiten, 70 Bilder, 17 Tab. 1993. ISBN 3-446-17532-6.

**Band 34: Uwe Günzel**

Entwicklung und Einsatz eines Simulationsverfahrens für operative und strategische Probleme der Produktionsplanung und -steuerung  
FAPS, XIV u. 170 Seiten, 66 Bilder, 5 Tab. 1993. ISBN 3-446-17604-7.

**Band 35: Bertram Ehmann**

Operatives Fertigungscontrolling durch Optimierung auftragsbezogener Bearbeitungsabläufe in der Elektronikfertigung  
FAPS, XV u. 167 Seiten, 114 Bilder. 1993. ISBN 3-446-17658-6.

**Band 36: Harald Kolléra**

Entwicklung eines benutzerorientierten Werkstattprogrammiersystems für das Laserstrahlschneiden  
LFT, 129 Seiten, 66 Bilder, 1 Tab. 1993. ISBN 3-446-17719-1.

**Band 37: Stephanie Abels**

Modellierung und Optimierung von Montageanlagen in einem integrierten Simulationssystem  
FAPS, 188 Seiten, 88 Bilder. 1993. ISBN 3-446-17731-0.

**Band 38: Robert Schmidt-Heibel**

Laserstrahlbohren durchflußbestimmender Durchgangslöcher  
LFT, 145 Seiten, 63 Bilder, 11 Tab. 1993. ISBN 3-446-17778-7.

**Band 39: Norbert Lutz**

Oberflächenfeinbearbeitung keramischer Werkstoffe mit XeCl-Excimerlaserstrahlung  
LFT, 187 Seiten, 98 Bilder, 29 Tab. 1994. ISBN 3-446-17970-4.

**Band 40: Konrad Grampp**

Rechnerunterstützung bei Test und Schulung an Steuerungssoftware von SMD-Bestücklinien  
FAPS, 178 Seiten, 88 Bilder. 1995. ISBN 3-446-18173-3.

**Band 41: Martin Koch**

Wissensbasierte Unterstützung der Angebotsbearbeitung in der Investitionsgüterindustrie  
FAPS, 169 Seiten, 68 Bilder. 1995. ISBN 3-446-18174-1.

**Band 42: Armin Gropp**

Anlagen- und Prozeßdiagnostik beim Schneiden mit einem gepulsten Nd:YAG-Laser  
LFT, 160 Seiten, 88 Bilder, 7 Tab. 1995. ISBN 3-446-18241-1.

**Band 43: Werner Heckel**

Optische 3D-Konturerfassung und on-line Biege winkelmessung mit dem Lichtschnittverfahren  
LFT, 149 Seiten, 43 Bilder, 11 Tab. 1995. ISBN 3-446-18243-8.

**Band 44: Armin Rothhaupt**

Modulares Planungssystem zur Optimierung der Elektronikfertigung  
FAPS, 180 Seiten, 101 Bilder. 1995. ISBN 3-446-18307-8.

**Band 45: Bernd Zöllner**

Adaptive Diagnose in der Elektronikproduktion  
FAPS, 195 Seiten, 74 Bilder, 3 Tab. 1995. ISBN 3-446-18308-6.

**Band 46: Bodo Vormann**

Beitrag zur automatisierten Handhabungsplanung komplexer Blechbiegeteile  
LFT, 126 Seiten, 89 Bilder, 3 Tab. 1995. ISBN 3-446-18345-0.

**Band 47: Peter Schnepf**

Zielkostenorientierte Montageplanung  
FAPS, 144 Seiten, 75 Bilder. 1995. ISBN 3-446-18397-3.

**Band 48: Rainer Klotzbücher**

Konzept zur rechnerintegrierten Materialversorgung in flexiblen Fertigungssystemen  
FAPS, 156 Seiten, 62 Bilder. 1995. ISBN 3-446-18412-0.

**Band 49: Wolfgang Greska**

Wissensbasierte Analyse und Klassifizierung von Blechteilen  
LFT, 144 Seiten, 96 Bilder. 1995. ISBN 3-446-18462-7.

**Band 50: Jörg Franke**

Integrierte Entwicklung neuer Produkt- und Produktionstechnologien für räumliche spritzgegossene Schaltungsträger (3-D MID)  
FAPS, 196 Seiten, 86 Bilder, 4 Tab. 1995. ISBN 3-446-18448-1.

**Band 51: Franz-Josef Zeller**

Sensorplanung und schnelle Sensorregelung für Industrieroboter  
FAPS, 190 Seiten, 102 Bilder, 9 Tab. 1995. ISBN 3-446-18601-8.

**Band 52: Michael Solvie**

Zeitbehandlung und Multimedia-Unterstützung in Feldkommunikationssystemen  
FAPS, 200 Seiten, 87 Bilder, 35 Tab. 1996. ISBN 3-446-18607-7.

**Band 53: Robert Hopperdietzel**

Reengineering in der Elektro- und Elektronikindustrie  
FAPS, 180 Seiten, 109 Bilder, 1 Tab. 1996. ISBN 3-87525-070-2.

**Band 54: Thomas Rebhahn**

Beitrag zur Mikromaterialbearbeitung mit Excimerlasern - Systemkomponenten und Verfahrensoptimierungen  
LFT, 148 Seiten, 61 Bilder, 10 Tab.  
1996. ISBN 3-87525-075-3.

**Band 55: Henning Hanebuth**

Laserstrahlhartlöten mit Zweistrahltechnik  
LFT, 157 Seiten, 58 Bilder, 11 Tab.  
1996. ISBN 3-87525-074-5.

**Band 56: Uwe Schönherr**

Steuerung und Sensordatenintegration für flexible Fertigungszellen mitkooperierenden Robotern  
FAPS, 188 Seiten, 116 Bilder, 3 Tab.  
1996. ISBN 3-87525-076-1.

**Band 57: Stefan Holzer**

Berührungslose Formgebung mit Laserstrahlung  
LFT, 162 Seiten, 69 Bilder, 11 Tab.  
1996. ISBN 3-87525-079-6.

**Band 58: Markus Schultz**

Fertigungsqualität beim 3D-Laserstrahlschweißen von Blechformteilen  
LFT, 165 Seiten, 88 Bilder, 9 Tab.  
1997. ISBN 3-87525-080-X.

**Band 59: Thomas Krebs**

Integration elektromechanischer CA-Anwendungen über einem STEP-Produktmodell  
FAPS, 198 Seiten, 58 Bilder, 8 Tab.  
1997. ISBN 3-87525-081-8.

**Band 60: Jürgen Sturm**

Prozeßintegrierte Qualitätssicherung in der Elektronikproduktion  
FAPS, 167 Seiten, 112 Bilder, 5 Tab.  
1997. ISBN 3-87525-082-8.

**Band 61: Andreas Brand**

Prozesse und Systeme zur Bestückung räumlicher elektronischer Baugruppen (3D-MID)  
FAPS, 182 Seiten, 100 Bilder. 1997.  
ISBN 3-87525-087-7.

**Band 62: Michael Kauf**

Regelung der Laserstrahlleistung und der Fokusparameter einer CO<sub>2</sub>-Hochleistungslaseranlage  
LFT, 140 Seiten, 70 Bilder, 5 Tab.  
1997. ISBN 3-87525-083-4.

**Band 63: Peter Steinwasser**

Modulares Informationsmanagement in der integrierten Produkt- und Prozeßplanung  
FAPS, 190 Seiten, 87 Bilder. 1997.  
ISBN 3-87525-084-2.

**Band 64: Georg Liedl**

Integriertes Automatisierungskonzept für den flexiblen Materialfluß in der Elektronikproduktion  
FAPS, 196 Seiten, 96 Bilder, 3 Tab.  
1997. ISBN 3-87525-086-9.

**Band 65: Andreas Otto**

Transiente Prozesse beim Laserstrahlschweißen  
LFT, 132 Seiten, 62 Bilder, 1 Tab.  
1997. ISBN 3-87525-089-3.

**Band 66: Wolfgang Blöchl**

Erweiterte Informationsbereitstellung an offenen CNC-Steuerungen zur Prozeß- und Programoptimierung  
FAPS, 168 Seiten, 96 Bilder. 1997.  
ISBN 3-87525-091-5.

**Band 67: Klaus-Uwe Wolf**

Verbesserte Prozeßführung und Prozeßplanung zur Leistungs- und Qualitätssteigerung beim Spulenvickeln  
FAPS, 186 Seiten, 125 Bilder. 1997.  
ISBN 3-87525-092-3.

**Band 68: Frank Backes**

Technologieorientierte Bahnplanung für die 3D-Laserstrahlbearbeitung  
LFT, 138 Seiten, 71 Bilder, 2 Tab.  
1997. ISBN 3-87525-093-1.

**Band 69: Jürgen Kraus**

Laserstrahlumformen von Profilen  
LFT, 137 Seiten, 72 Bilder, 8 Tab.  
1997. ISBN 3-87525-094-X.

**Band 70: Norbert Neubauer**

Adaptive Strahlführungen für CO<sub>2</sub>-Laseranlagen  
LFT, 120 Seiten, 50 Bilder, 3 Tab.  
1997. ISBN 3-87525-095-8.

**Band 71: Michael Steber**

Prozeßoptimierter Betrieb flexibler Schraubstationen in der automatisierten Montage  
FAPS, 168 Seiten, 78 Bilder, 3 Tab.  
1997. ISBN 3-87525-096-6.

**Band 72: Markus Pfestorf**

Funktionale 3D-Oberflächenkenngrößen in der Umformtechnik  
LFT, 162 Seiten, 84 Bilder, 15 Tab.  
1997. ISBN 3-87525-097-4.

**Band 73: Volker Franke**

Integrierte Planung und Konstruktion von Werkzeugen für die Biegebearbeitung  
LFT, 143 Seiten, 81 Bilder. 1998.  
ISBN 3-87525-098-2.

**Band 74: Herbert Scheller**

Automatisierte Demontagesysteme und recyclinggerechte Produktgestaltung elektronischer Baugruppen  
FAPS, 184 Seiten, 104 Bilder, 17 Tab. 1998. ISBN 3-87525-099-0.

**Band 75: Arthur Meßner**

Kaltmassivumformung metallischer Kleinstteile - Werkstoffverhalten, Wirkflächenreibung, Prozeßauslegung  
LFT, 164 Seiten, 92 Bilder, 14 Tab.  
1998. ISBN 3-87525-100-8.

**Band 76: Mathias Glasmacher**

Prozeß- und Systemtechnik zum Laserstrahl-Mikroschweißen  
LFT, 184 Seiten, 104 Bilder, 12 Tab.  
1998. ISBN 3-87525-101-6.

**Band 77: Michael Schwind**

Zerstörungsfreie Ermittlung mechanischer Eigenschaften von Feinblechen mit dem Wirbelstromverfahren  
LFT, 124 Seiten, 68 Bilder, 8 Tab.  
1998. ISBN 3-87525-102-4.

**Band 78: Manfred Gerhard**

Qualitätssteigerung in der Elektronikproduktion durch Optimierung der Prozeßführung beim Löten komplexer Baugruppen  
FAPS, 179 Seiten, 113 Bilder, 7 Tab.  
1998. ISBN 3-87525-103-2.

**Band 79: Elke Rauh**

Methodische Einbindung der Simulation in die betrieblichen Planungs- und Entscheidungsabläufe  
FAPS, 192 Seiten, 114 Bilder, 4 Tab.  
1998. ISBN 3-87525-104-0.

**Band 80: Sorin Niederkorn**

Mefseinrichtung zur Untersuchung der Wirkflächenreibung bei umformtechnischen Prozessen  
LFT, 99 Seiten, 46 Bilder, 6 Tab.  
1998. ISBN 3-87525-105-9.

**Band 81: Stefan Schubert**

Regelung der Fokusslage beim Schweißen mit CO<sub>2</sub>-Hochleistungslasern unter Einsatz von adaptiven Optiken  
LFT, 140 Seiten, 64 Bilder, 3 Tab.  
1998. ISBN 3-87525-106-7.

**Band 82: Armando Walter Colombo**

Development and Implementation of Hierarchical Control Structures of Flexible Production Systems Using High Level Petri Nets  
FAPS, 216 Seiten, 86 Bilder. 1998.  
ISBN 3-87525-109-1.

**Band 83: Otto Meedt**

Effizienzsteigerung bei Demontage und Recycling durch flexible Demontagetechnologien und optimierte Produktgestaltung  
FAPS, 186 Seiten, 103 Bilder. 1998.  
ISBN 3-87525-108-3.

**Band 84: Knuth Götz**

Modelle und effiziente Modellbildung zur Qualitätssicherung in der Elektronikproduktion  
FAPS, 212 Seiten, 129 Bilder, 24 Tab. 1998. ISBN 3-87525-112-1.

**Band 85: Ralf Luchs**

Einsatzmöglichkeiten leitender Klebstoffe zur zuverlässigen Kontaktierung elektronischer Bauelemente in der SMT  
FAPS, 176 Seiten, 126 Bilder, 30 Tab. 1998. ISBN 3-87525-113-7.

**Band 86: Frank Pöhlau**

Entscheidungsgrundlagen zur Einführung räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger (3-D MID)  
FAPS, 144 Seiten, 99 Bilder. 1999.  
ISBN 3-87525-114-8.

**Band 87: Roland T. A. Kals**

Fundamentals on the miniaturization of sheet metal working processes  
LFT, 128 Seiten, 58 Bilder, 11 Tab.  
1999. ISBN 3-87525-115-6.

**Band 88: Gerhard Luhn**

Implizites Wissen und technisches Handeln am Beispiel der Elektronikproduktion  
FAPS, 252 Seiten, 61 Bilder, 1 Tab.  
1999. ISBN 3-87525-116-4.

**Band 89: Axel Sprenger**

Adaptives Streckbiegen von Aluminium-Strangpreßprofilen  
LFT, 114 Seiten, 63 Bilder, 4 Tab.  
1999. ISBN 3-87525-117-2.

**Band 90: Hans-Jörg Pucher**

Untersuchungen zur Prozeßfolge Umformen, Bestücken und Laserstrahllöten von Mikrokontakten  
LFT, 158 Seiten, 69 Bilder, 9 Tab.  
1999. ISBN 3-87525-119-9.

**Band 91: Horst Arnet**

Profilbiegen mit kinematischer Gestalterzeugung  
LFT, 128 Seiten, 67 Bilder, 7 Tab.  
1999. ISBN 3-87525-120-2.

**Band 92: Doris Schubart**

Prozeßmodellierung und Technologieentwicklung beim Abtragen mit CO<sub>2</sub>-Laserstrahlung  
LFT, 133 Seiten, 57 Bilder, 13 Tab.  
1999. ISBN 3-87525-122-9.

**Band 93: Adrianus L. P.**

**Coremans**  
Laserstrahlsintern von Metallpulver - Prozeßmodellierung, Systemtechnik, Eigenschaften laserstrahlgesinterter Metallkörper  
LFT, 184 Seiten, 108 Bilder, 12 Tab.  
1999. ISBN 3-87525-124-5.

**Band 94: Hans-Martin Biehler**

Optimierungskonzepte für Qualitätsdatenverarbeitung und Informationsbereitstellung in der Elektronikfertigung  
FAPS, 194 Seiten, 105 Bilder. 1999.  
ISBN 3-87525-126-1.

**Band 95: Wolfgang Becker**

Oberflächenausbildung und tribologische Eigenschaften excimerlaserstrahlbearbeiteter Hochleistungskeramiken  
LFT, 175 Seiten, 71 Bilder, 3 Tab.  
1999. ISBN 3-87525-127-X.

**Band 96: Philipp Hein**

Innenhochdruck-Umformen von Blechpaaren: Modellierung, Prozeßauslegung und Prozeßführung  
LFT, 129 Seiten, 57 Bilder, 7 Tab.  
1999. ISBN 3-87525-128-8.

**Band 97: Gunter Beitinger**

Herstellungs- und Prüfverfahren für thermoplastische Schaltungsträger  
FAPS, 169 Seiten, 92 Bilder, 20 Tab.  
1999. ISBN 3-87525-129-6.

**Band 98: Jürgen Knobloch**

Beitrag zur rechnerunterstützten verursachungsgerechten Angebotskalkulation von Blechteilen mit Hilfe wissensbasierter Methoden  
LFT, 155 Seiten, 53 Bilder, 26 Tab.  
1999. ISBN 3-87525-130-X.

**Band 99: Frank Breitenbach**

Bildverarbeitungssystem zur Erfassung der Anschlußgeometrie elektronischer SMT-Bauelemente  
LFT, 147 Seiten, 92 Bilder, 12 Tab.  
2000. ISBN 3-87525-131-8.

**Band 100: Bernd Falk**

Simulationsbasierte Lebensdauer vorhersage für Werkzeuge der Kaltmassivumformung  
LFT, 134 Seiten, 44 Bilder, 15 Tab.  
2000. ISBN 3-87525-136-9.

**Band 101: Wolfgang Schlögl**

Integriertes Simulationsdaten-Management für Maschinenentwicklung und Anlagenplanung  
FAPS, 169 Seiten, 101 Bilder, 20 Tab. 2000. ISBN 3-87525-137-7.

**Band 102: Christian Hinsel**

Ermüdungsbruchversagen hartstoffbeschichteter Werkzeugstähle in der Kaltmassivumformung  
LFT, 130 Seiten, 80 Bilder, 14 Tab.  
2000. ISBN 3-87525-138-5.

**Band 103: Stefan Bobbert**

Simulationsgestützte Prozessauslegung für das Innenhochdruck-Umformen von Blechpaaren  
LFT, 123 Seiten, 77 Bilder. 2000.  
ISBN 3-87525-145-8.

**Band 104: Harald Rottbauer**

Modulares Planungswerkzeug zum Produktionsmanagement in der Elektronikproduktion  
FAPS, 166 Seiten, 106 Bilder, 2001.  
ISBN 3-87525-139-3.

**Band 105: Thomas Hennige**

Flexible Formgebung von Blechen durch Laserstrahlumformen  
LFT, 119 Seiten, 50 Bilder, 2001.  
ISBN 3-87525-140-7.

**Band 106: Thomas Menzel**

Wissensbasierte Methoden für die rechnergestützte Charakterisierung und Bewertung innovativer Fertigungsprozesse  
LFT, 152 Seiten, 71 Bilder, 2001.  
ISBN 3-87525-142-3.

**Band 107: Thomas Stöckel**

Kommunikationstechnische Integration der Prozeßebene in Produktionssysteme durch Middleware-Frameworks  
FAPS, 147 Seiten, 65 Bilder, 5 Tab. 2001. ISBN 3-87525-143-1.

**Band 108: Frank Pitter**

Verfügbarkeitssteigerung von Werkzeugmaschinen durch Einsatz mechatronischer Sensorlösungen  
FAPS, 158 Seiten, 131 Bilder, 8 Tab. 2001. ISBN 3-87525-144-X.

**Band 109: Markus Korneli**

Integration lokaler CAP-Systeme in einen globalen Fertigungsdatenverbund  
FAPS, 121 Seiten, 53 Bilder, 11 Tab. 2001. ISBN 3-87525-146-6.

**Band 110: Burkhard Müller**

Laserstrahljustieren mit Excimer-Lasern - Prozeßparameter und Modelle zur Aktorkonstruktion  
LFT, 128 Seiten, 36 Bilder, 9 Tab. 2001. ISBN 3-87525-159-8.

**Band 111: Jürgen Göhringer**

Integrierte Telediagnose via Internet zum effizienten Service von Produktionssystemen  
FAPS, 178 Seiten, 98 Bilder, 5 Tab. 2001. ISBN 3-87525-147-4.

**Band 112: Robert Feuerstein**

Qualitäts- und kosteneffiziente Integration neuer Bauelementetechnologien in die Flachbaugruppenfertigung  
FAPS, 161 Seiten, 99 Bilder, 10 Tab. 2001. ISBN 3-87525-151-2.

**Band 113: Marcus Reichenberger**

Eigenschaften und Einsatzmöglichkeiten alternativer Elektroniklote in der Oberflächenmontage (SMT)  
FAPS, 165 Seiten, 97 Bilder, 18 Tab. 2001. ISBN 3-87525-152-0.

**Band 114: Alexander Huber**

Justieren vormontierter Systeme mit dem Nd:YAG-Laser unter Einsatz von Aktoren  
LFT, 122 Seiten, 58 Bilder, 5 Tab. 2001. ISBN 3-87525-153-9.

**Band 115: Sami Krimi**

Analyse und Optimierung von Montagesystemen in der Elektronikproduktion  
FAPS, 155 Seiten, 88 Bilder, 3 Tab. 2001. ISBN 3-87525-157-1.

**Band 116: Marion Merklein**

Laserstrahlumformen von Aluminiumwerkstoffen - Beeinflussung der Mikrostruktur und der mechanischen Eigenschaften  
LFT, 122 Seiten, 65 Bilder, 15 Tab. 2001. ISBN 3-87525-156-3.

**Band 117: Thomas Collisi**

Ein informationslogistisches Architekturkonzept zur Akquisition simulationsrelevanter Daten  
FAPS, 181 Seiten, 105 Bilder, 7 Tab. 2002. ISBN 3-87525-164-4.

**Band 118: Markus Koch**

Rationalisierung und ergonomische Optimierung im Innenausbau durch den Einsatz moderner Automatisierungstechnik  
FAPS, 176 Seiten, 98 Bilder, 9 Tab. 2002. ISBN 3-87525-165-2.

**Band 119: Michael Schmidt**

Prozeßregelung für das Laserstrahl-Punktschweißen in der Elektronikproduktion  
LFT, 152 Seiten, 71 Bilder, 3 Tab. 2002. ISBN 3-87525-166-0.

**Band 120: Nicolas Tiesler**

Grundlegende Untersuchungen zum Fließpressen metallischer Kleinstteile  
LFT, 126 Seiten, 78 Bilder, 12 Tab. 2002. ISBN 3-87525-175-X.

**Band 121: Lars Pursche**

Methoden zur technologieorientierten Programmierung für die 3D-Lasermikrobearbeitung  
LFT, 111 Seiten, 39 Bilder, 0 Tab. 2002. ISBN 3-87525-183-0.

**Band 122: Jan-Oliver Brassel**

Prozeßkontrolle beim Laserstrahl-Mikroschweißen  
LFT, 148 Seiten, 72 Bilder, 12 Tab. 2002. ISBN 3-87525-181-4.

**Band 123: Mark Geisel**

Prozeßkontrolle und -steuerung beim Laserstrahlschweißen mit den Methoden der nichtlinearen Dynamik  
LFT, 135 Seiten, 46 Bilder, 2 Tab. 2002. ISBN 3-87525-180-6.

**Band 124: Gerd Eßer**

Laserstrahlunterstützte Erzeugung metallischer Leiterstrukturen auf Thermoplastsubstraten für die MID-Technik  
LFT, 148 Seiten, 60 Bilder, 6 Tab. 2002. ISBN 3-87525-171-7.

**Band 125: Marc Fleckenstein**

Qualität laserstrahl-gefügter Mikroverbindungen elektronischer Kontakte  
LFT, 159 Seiten, 77 Bilder, 7 Tab. 2002. ISBN 3-87525-170-9.

**Band 126: Stefan Kaufmann**

Grundlegende Untersuchungen zum Nd:YAG- Laserstrahlfügen von Silizium für Komponenten der Optoelektronik  
LFT, 159 Seiten, 100 Bilder, 6 Tab. 2002. ISBN 3-87525-172-5.

**Band 127: Thomas Fröhlich**

Simultanes Löten von Anschlußkontakten elektronischer Bauelemente mit Diodenlaserstrahlung  
LFT, 143 Seiten, 75 Bilder, 6 Tab. 2002. ISBN 3-87525-186-5.

**Band 128: Achim Hofmann**

Erweiterung der Formgebungsgrenzen beim Umformen von Aluminiumwerkstoffen durch den Einsatz prozessangepasster Platinen

LFT, 113 Seiten, 58 Bilder, 4 Tab.  
2002. ISBN 3-87525-182-2.

**Band 129: Ingo Kriebitzsch**

3 - D MID Technologie in der Automobilelektronik

FAPS, 129 Seiten, 102 Bilder, 10 Tab. 2002. ISBN 3-87525-169-5.

**Band 130: Thomas Pohl**

Fertigungsqualität und Umformbarkeit laserstrahlgeschweißter Formplatinen aus Aluminiumlegierungen

LFT, 133 Seiten, 93 Bilder, 12 Tab.  
2002. ISBN 3-87525-173-3.

**Band 131: Matthias Wenk**

Entwicklung eines konfigurierbaren Steuerungssystems für die flexible Sensorführung von Industrierobotern

FAPS, 167 Seiten, 85 Bilder, 1 Tab.  
2002. ISBN 3-87525-174-1.

**Band 132: Matthias Negendanck**

Neue Sensorik und Aktorik für Bearbeitungsköpfe zum Laserstrahlschweißen

LFT, 116 Seiten, 60 Bilder, 14 Tab.  
2002. ISBN 3-87525-184-9.

**Band 133: Oliver Kreis**

Integrierte Fertigung - Verfahrensintegration durch Innenhochdruck-Umformen, Trennen und Laserstrahlschweißen in einem Werkzeug sowie ihre tele- und multimediale Präsentation

LFT, 167 Seiten, 90 Bilder, 43 Tab.  
2002. ISBN 3-87525-176-8.

**Band 134: Stefan Trautner**

Technische Umsetzung produktbezogener Instrumente der Umweltpolitik bei Elektro- und Elektronikgeräten

FAPS, 179 Seiten, 92 Bilder, 11 Tab.  
2002. ISBN 3-87525-177-6.

**Band 135: Roland Meier**

Strategien für einen produktorientierten Einsatz räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger (3-D MID)

FAPS, 155 Seiten, 88 Bilder, 14 Tab.  
2002. ISBN 3-87525-178-4.

**Band 136: Jürgen Wunderlich**

Kostensimulation - Simulationsbasierte Wirtschaftlichkeitsregelung komplexer Produktionssysteme

FAPS, 202 Seiten, 119 Bilder, 17 Tab.  
2002. ISBN 3-87525-179-2.

**Band 137: Stefan Novotny**

Innenhochdruck-Umformen von Blechen aus Aluminium- und Magnesiumlegierungen bei erhöhter Temperatur

LFT, 132 Seiten, 82 Bilder, 6 Tab.  
2002. ISBN 3-87525-185-7.

**Band 138: Andreas Licha**

Flexible Montageautomatisierung zur Komplettmontage flächenhafter Produktstrukturen durch kooperierende Industrieroboter

FAPS, 158 Seiten, 87 Bilder, 8 Tab.  
2003. ISBN 3-87525-189-X.

**Band 139: Michael Eisenbarth**

Beitrag zur Optimierung der Aufbau- und Verbindungstechnik für mechatronische Baugruppen

FAPS, 207 Seiten, 141 Bilder, 9 Tab.  
2003. ISBN 3-87525-190-3.

**Band 140: Frank Christoph**

Durchgängige simulationsgestützte Planung von Fertigungseinrichtungen der Elektronikproduktion

FAPS, 187 Seiten, 107 Bilder, 9 Tab.  
2003. ISBN 3-87525-191-1.

**Band 141: Hinnerk Hagenah**

Simulationsbasierte Bestimmung der zu erwartenden Maßhaltigkeit für das Blechbiegen

LFT, 131 Seiten, 36 Bilder, 26 Tab.  
2003. ISBN 3-87525-192-X.

**Band 142: Ralf Eckstein**

Scherschneiden und Biegen metallischer Kleinstteile - Materialeinfluss und Materialverhalten

LFT, 148 Seiten, 71 Bilder, 19 Tab.  
2003. ISBN 3-87525-193-8.

**Band 143: Frank H. Meyer-Pittroff**

Excimerlaserstrahlbiegen dünner metallischer Folien mit homogener Lichtlinie

LFT, 138 Seiten, 60 Bilder, 16 Tab.  
2003. ISBN 3-87525-196-2.

**Band 144: Andreas Kach**

Rechnergestützte Anpassung von Laserstrahlschneidbahnen an Bauteilabweichungen

LFT, 139 Seiten, 69 Bilder, 11 Tab.  
2004. ISBN 3-87525-197-0.

**Band 145: Stefan Hierl**

System- und Prozesstechnik für das simultane Löten mit Diodenlaserstrahlung von elektronischen Bauelementen

LFT, 124 Seiten, 66 Bilder, 4 Tab.  
2004. ISBN 3-87525-198-9.

**Band 146: Thomas Neudecker**

Tribologische Eigenschaften keramischer Blechumformwerkzeuge - Einfluss einer Oberflächenendbearbeitung mittels Excimerlaserstrahlung

LFT, 166 Seiten, 75 Bilder, 26 Tab.  
2004. ISBN 3-87525-200-4.

**Band 147: Ulrich Wenger**

Prozessoptimierung in der Wickeltechnik durch innovative maschinenbauliche und regelungstechnische Ansätze

FAPS, 132 Seiten, 88 Bilder, 0 Tab.  
2004. ISBN 3-87525-203-9.

**Band 148: Stefan Slama**

Effizienzsteigerung in der Montage durch marktorientierte Montagestrukturen und erweiterte Mitarbeiterkompetenz

FAPS, 188 Seiten, 125 Bilder, 0 Tab.  
2004. ISBN 3-87525-204-7.

**Band 149: Thomas Wurm**

Laserstrahljustieren mittels Aktoren-Entwicklung von Konzepten und Methoden für die rechnerunterstützte Modellierung und Optimierung von komplexen Aktorsystemen in der Mikrotechnik

LFT, 122 Seiten, 51 Bilder, 9 Tab.  
2004. ISBN 3-87525-206-3.

**Band 150: Martino Celeghini**  
Wirkmedienbasierte Blechumformung: Grundlagenuntersuchungen zum Einfluss von Werkstoff und Bauteilgeometrie  
LFT, 146 Seiten, 77 Bilder, 6 Tab.  
2004. ISBN 3-87525-207-1.

**Band 151: Ralph Hohenstein**  
Entwurf hochdynamischer Sensor- und Regelsysteme für die adaptive Laserbearbeitung  
LFT, 282 Seiten, 63 Bilder, 16 Tab.  
2004. ISBN 3-87525-210-1.

**Band 152: Angelika Hutterer**  
Entwicklung prozessüberwachender Regelkreise für flexible Formgebungsprozesse  
LFT, 149 Seiten, 57 Bilder, 2 Tab.  
2005. ISBN 3-87525-212-8.

**Band 153: Emil Egerer**  
Massivumformen metallischer Kleinstteile bei erhöhter Prozesstemperatur  
LFT, 158 Seiten, 87 Bilder, 10 Tab.  
2005. ISBN 3-87525-213-6.

**Band 154: Rüdiger Holzmann**  
Strategien zur nachhaltigen Optimierung von Qualität und Zuverlässigkeit in der Fertigung hochintegrierter Flachbaugruppen  
FAPS, 186 Seiten, 99 Bilder, 19 Tab.  
2005. ISBN 3-87525-217-9.

**Band 155: Marco Nock**  
Biegeumformen mit Elastomerwerkzeugen Modellierung, Prozessauslegung und Abgrenzung des Verfahrens am Beispiel des Rohrbiegens  
LFT, 164 Seiten, 85 Bilder, 13 Tab.  
2005. ISBN 3-87525-218-7.

**Band 156: Frank Niebling**  
Qualifizierung einer Prozesskette zum Laserstrahlsintern metallischer Bauteile  
LFT, 148 Seiten, 89 Bilder, 3 Tab.  
2005. ISBN 3-87525-219-5.

**Band 157: Markus Meiler**  
Großserientauglichkeit trocken-schmierstoffbeschichteter Aluminiumbleche im Presswerk Grundlegende Untersuchungen zur Tribologie, zum Umformverhalten und Bauteilversuche  
LFT, 104 Seiten, 57 Bilder, 21 Tab.  
2005. ISBN 3-87525-221-7.

**Band 158: Agus Sutanto**  
Solution Approaches for Planning of Assembly Systems in Three-Dimensional Virtual Environments  
FAPS, 169 Seiten, 98 Bilder, 3 Tab.  
2005. ISBN 3-87525-220-9.

**Band 159: Matthias Boiger**  
Hochleistungssysteme für die Fertigung elektronischer Baugruppen auf der Basis flexibler Schaltungsträger  
FAPS, 175 Seiten, 111 Bilder, 8 Tab.  
2005. ISBN 3-87525-222-5.

**Band 160: Matthias Pitz**  
Laserunterstütztes Biegen höchstfester Mehrphasenstähle  
LFT, 120 Seiten, 73 Bilder, 11 Tab.  
2005. ISBN 3-87525-223-3.

**Band 161: Meik Vahl**  
Beitrag zur gezielten Beeinflussung des Werkstoffflusses beim Innenhochdruck-Umformen von Blechen  
LFT, 165 Seiten, 94 Bilder, 15 Tab.  
2005. ISBN 3-87525-224-1.

**Band 162: Peter K. Kraus**  
Plattformstrategien - Realisierung einer varianz- und kostenoptimierten Wertschöpfung  
FAPS, 181 Seiten, 95 Bilder, 0 Tab.  
2005. ISBN 3-87525-226-8.

**Band 163: Adrienn Cser**  
Laserstrahlschmelzabtrag - Prozessanalyse und -modellierung  
LFT, 146 Seiten, 79 Bilder, 3 Tab.  
2005. ISBN 3-87525-227-6.

**Band 164: Markus C. Hahn**  
Grundlegende Untersuchungen zur Herstellung von Leichtbauverbundstrukturen mit Aluminiumschaumkern  
LFT, 143 Seiten, 60 Bilder, 16 Tab.  
2005. ISBN 3-87525-228-4.

**Band 165: Gordana Michos**  
Mechatronische Ansätze zur Optimierung von Vorschubachsen  
FAPS, 146 Seiten, 87 Bilder, 17 Tab.  
2005. ISBN 3-87525-230-6.

**Band 166: Markus Stark**  
Auslegung und Fertigung hochpräziser Faser-Kollimator-Arrays  
LFT, 158 Seiten, 115 Bilder, 11 Tab.  
2005. ISBN 3-87525-231-4.

**Band 167: Yurong Zhou**  
Kollaboratives Engineering Management in der integrierten virtuellen Entwicklung der Anlagen für die Elektronikproduktion  
FAPS, 156 Seiten, 84 Bilder, 6 Tab.  
2005. ISBN 3-87525-232-2.

**Band 168: Werner Enser**  
Neue Formen permanenter und lösbarer elektrischer Kontaktierungen für mechatronische Baugruppen  
FAPS, 190 Seiten, 112 Bilder, 5 Tab.  
2005. ISBN 3-87525-233-0.

**Band 169: Katrin Melzer**  
Integrierte Produktpolitik bei elektrischen und elektronischen Geräten zur Optimierung des Product-Life-Cycle  
FAPS, 155 Seiten, 91 Bilder, 17 Tab.  
2005. ISBN 3-87525-234-9.

**Band 170: Alexander Putz**  
Grundlegende Untersuchungen zur Erfassung der realen Vorspannung von armierten Kaltfließpresswerkzeugen mittels Ultraschall  
LFT, 137 Seiten, 71 Bilder, 15 Tab.  
2006. ISBN 3-87525-237-3.

**Band 171: Martin Prechtel**  
Automatisiertes Schichtverfahren für metallische Folien - System- und Prozesstechnik  
LFT, 154 Seiten, 45 Bilder, 7 Tab.  
2006. ISBN 3-87525-238-1.

**Band 172: Markus Meidert**  
Beitrag zur deterministischen Lebensdauerabschätzung von Werkzeugen der Kaltmassivumformung  
LFT, 131 Seiten, 78 Bilder, 9 Tab.  
2006. ISBN 3-87525-239-X.

**Band 173: Bernd Müller**  
Robuste, automatisierte Montagesysteme durch adaptive Prozessführung und montageübergreifende Fehlerprävention am Beispiel flächiger Leichtbauteile  
FAPS, 147 Seiten, 77 Bilder, 0 Tab.  
2006. ISBN 3-87525-240-3.

**Band 174: Alexander Hofmann**  
Hybrides Laserdurchstrahlschweißen von Kunststoffen  
LFT, 136 Seiten, 72 Bilder, 4 Tab.  
2006. ISBN 978-3-87525-243-9.

**Band 175: Peter Wölflick**

Innovative Substrate und Prozesse mit feinsten Strukturen für blei-freie Mechatronik-Anwendungen  
FAPS, 177 Seiten, 148 Bilder, 24 Tab. 2006.

ISBN 978-3-87525-246-0.

**Band 176: Attila Komlodi**

Detection and Prevention of Hot Cracks during Laser Welding of Aluminium Alloys Using Advanced Simulation Methods

LFT, 155 Seiten, 89 Bilder, 14 Tab. 2006. ISBN 978-3-87525-248-4.

**Band 177: Uwe Popp**

Grundlegende Untersuchungen zum Laserstrahlstrukturieren von Kaltmassivumformwerkzeugen  
LFT, 140 Seiten, 67 Bilder, 16 Tab. 2006. ISBN 978-3-87525-249-1.

**Band 178: Veit Rückel**

Rechnergestützte Ablaufplanung und Bahngenerierung Für kooperierende Industrieroboter  
FAPS, 148 Seiten, 75 Bilder, 7 Tab. 2006. ISBN 978-3-87525-250-7.

**Band 179: Manfred Dirscherl**

Nicht-thermische Mikrojustier-technik mittels ultrakurzer Laserpulse  
LFT, 154 Seiten, 69 Bilder, 10 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-251-4.

**Band 180: Yong Zhuo**

Entwurf eines rechnergestützten integrierten Systems für Konstruktion und Fertigungsplanung räumlicher spritzgegossener Schalungsträger (3D-MID)  
FAPS, 181 Seiten, 95 Bilder, 5 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-253-8.

**Band 181: Stefan Lang**

Durchgängige Mitarbeiterinformation zur Steigerung von Effizienz und Prozesssicherheit in der Produktion  
FAPS, 172 Seiten, 93 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-257-6.

**Band 182: Hans-Joachim Krauß**

Laserstrahlinduzierte Pyrolyse präkeramischer Polymere  
LFT, 171 Seiten, 100 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-258-3.

**Band 183: Stefan Junker**

Technologien und Systemlösungen für die flexibel automatisierte Bestückung permanent erregter Läufer mit oberflächenmontierten Dauermagneten

FAPS, 173 Seiten, 75 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-259-0.

**Band 184: Rainer Kohlbauer**

Wissensbasierte Methoden für die simulationsgestützte Auslegung wirkmedienbasierter Blechumformprozesse

LFT, 135 Seiten, 50 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-260-6.

**Band 185: Klaus Lamprecht**

Wirkmedienbasierte Umformung tiefgezogener Vorformen unter besonderer Berücksichtigung maßgeschneiderter Halbzeuge

LFT, 137 Seiten, 81 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-265-1.

**Band 186: Bernd Zolleiß**

Optimierte Prozesse und Systeme für die Bestückung mechatronischer Baugruppen

FAPS, 180 Seiten, 117 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-266-8.

**Band 187: Michael Kerausch**

Simulationsgestützte Prozessauslegung für das Umformen lokal wärmebehandelter Aluminiumplattinen

LFT, 146 Seiten, 76 Bilder, 7 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-267-5.

**Band 188: Matthias Weber**

Unterstützung der Wandlungsfähigkeit von Produktionsanlagen durch innovative Softwaresysteme  
FAPS, 183 Seiten, 122 Bilder, 3 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-269-9.

**Band 189: Thomas Frick**

Untersuchung der prozessbestimmenden Strahl-Stoff-Wechselwirkungen beim Laserstrahlschweißen von Kunststoffen

LFT, 104 Seiten, 62 Bilder, 8 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-268-2.

**Band 190: Joachim Hecht**

Werkstoffcharakterisierung und Prozessauslegung für die wirkmedienbasierte Doppelblech-Umformung von Magnesiumlegierungen

LFT, 107 Seiten, 91 Bilder, 2 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-270-5.

**Band 191: Ralf Völkl**

Stochastische Simulation zur Werkzeuglebensdaueroptimierung und Präzisionsfertigung in der Kaltmassivumformung

LFT, 178 Seiten, 75 Bilder, 12 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-272-9.

**Band 192: Massimo Tolazzi**

Innenhochdruck-Umformen verstärkter Blech-Rahmenstrukturen

LFT, 164 Seiten, 85 Bilder, 7 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-273-6.

**Band 193: Cornelia Hoff**

Untersuchung der Prozesseinflussgrößen beim Presshärten des höchstfesten Vergütungsstahls 22MnB5

LFT, 133 Seiten, 92 Bilder, 5 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-275-0.

**Band 194: Christian Alvarez**

Simulationsgestützte Methoden zur effizienten Gestaltung von Lötprozessen in der Elektronikproduktion

FAPS, 149 Seiten, 86 Bilder, 8 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-277-4.

**Band 195: Andreas Kunze**

Automatisierte Montage von makromechatronischen Modulen zur flexiblen Integration in hybride Pkw-Bordnetzsysteme

FAPS, 160 Seiten, 90 Bilder, 14 Tab. 2008.

ISBN 978-3-87525-278-1.

**Band 196: Wolfgang Hußnätter**

Grundlegende Untersuchungen zur experimentellen Ermittlung und zur Modellierung von Fließortkurven bei erhöhten Temperaturen

LFT, 152 Seiten, 73 Bilder, 21 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-279-8.

**Band 197: Thomas Bigl**

Entwicklung, angepasste Herstellungsverfahren und erweiterte Qualitätssicherung von einsatzgerechten elektronischen Baugruppen  
FAPS, 175 Seiten, 107 Bilder, 14 Tab.  
2008.  
ISBN 978-3-87525-280-4.

**Band 198: Stephan Roth**

Grundlegende Untersuchungen zum Excimerlaserstrahl-Abtragen unter Flüssigkeitsfilmen  
LFT, 113 Seiten, 47 Bilder, 14 Tab.  
2008. ISBN 978-3-87525-281-1.

**Band 199: Artur Giera**

Prozesstechnische Untersuchungen zum Rührreibschweißen metallischer Werkstoffe  
LFT, 179 Seiten, 104 Bilder, 36 Tab.  
2008. ISBN 978-3-87525-282-8.

**Band 200: Jürgen Lechler**

Beschreibung und Modellierung des Werkstoffverhaltens von presshärtbaren Bor-Manganstählen  
LFT, 154 Seiten, 75 Bilder, 12 Tab.  
2009. ISBN 978-3-87525-286-6.

**Band 201: Andreas Blankl**

Untersuchungen zur Erhöhung der Prozessrobustheit bei der Innenhochdruck-Umformung von flächigen Halbzeugen mit vor- bzw. nachgeschalteten Laserstrahlfügeoperationen  
LFT, 120 Seiten, 68 Bilder, 9 Tab.  
2009. ISBN 978-3-87525-287-3.

**Band 202: Andreas Schaller**

Modellierung eines nachfrageorientierten Produktionskonzeptes für mobile Telekommunikationsgeräte  
FAPS, 120 Seiten, 79 Bilder, 0 Tab.  
2009. ISBN 978-3-87525-289-7.

**Band 203: Claudius Schimpf**

Optimierung von Zuverlässigkeitsuntersuchungen, Prüfabläufen und Nacharbeitsprozessen in der Elektronikproduktion  
FAPS, 162 Seiten, 90 Bilder, 14 Tab.  
2009.  
ISBN 978-3-87525-290-3.

**Band 204: Simon Dietrich**

Sensoriken zur Schwerpunktslagebestimmung der optischen Prozessmissionen beim Laserstrahl-tiefschweißen  
LFT, 138 Seiten, 70 Bilder, 5 Tab.  
2009. ISBN 978-3-87525-292-7.

**Band 205: Wolfgang Wolf**

Entwicklung eines agentenbasierten Steuerungssystems zur Materialflussorganisation im wandelbaren Produktionsumfeld  
FAPS, 167 Seiten, 98 Bilder, 2009.  
ISBN 978-3-87525-293-4.

**Band 206: Steffen Polster**

Laserdurchstrahlschweißen transparenter Polymerbauteile  
LFT, 160 Seiten, 92 Bilder, 13 Tab.  
2009. ISBN 978-3-87525-294-1.

**Band 207: Stephan Manuel Dörfler**

Rührreibschweißen von walzplattiertem Halbzeug und Aluminiumblech zur Herstellung flächiger Aluminiumschaum-Sandwich-Verbundstrukturen  
LFT, 190 Seiten, 98 Bilder, 5 Tab.  
2009. ISBN 978-3-87525-295-8.

**Band 208: Uwe Vogt**

Seriennahe Auslegung von Aluminium Tailored Heat Treated Blanks  
LFT, 151 Seiten, 68 Bilder, 26 Tab.  
2009. ISBN 978-3-87525-296-5.

**Band 209: Till Laumann**

Qualitative und quantitative Bewertung der Crashtauglichkeit von höchstfesten Stählen  
LFT, 117 Seiten, 69 Bilder, 7 Tab.  
2009. ISBN 978-3-87525-299-6.

**Band 210: Alexander Diehl**

Größeneffekte bei Biegeprozessen-Entwicklung einer Methodik zur Identifikation und Quantifizierung  
LFT, 180 Seiten, 92 Bilder, 12 Tab.  
2010. ISBN 978-3-87525-302-3.

**Band 211: Detlev Staud**

Effiziente Prozesskettenauslegung für das Umformen lokal wärmebehandelter und geschweißter Aluminiumbleche  
LFT, 164 Seiten, 72 Bilder, 12 Tab.  
2010. ISBN 978-3-87525-303-0.

**Band 212: Jens Ackermann**

Prozesssicherung beim Laserdurchstrahlschweißen thermoplastischer Kunststoffe  
LPT, 129 Seiten, 74 Bilder, 13 Tab.  
2010. ISBN 978-3-87525-305-4.

**Band 213: Stephan Weidel**

Grundlegende Untersuchungen zum Kontaktzustand zwischen Werkstück und Werkzeug bei umformtechnischen Prozessen unter tribologischen Gesichtspunkten  
LFT, 144 Seiten, 67 Bilder, 11 Tab.  
2010. ISBN 978-3-87525-307-8.

**Band 214: Stefan Geißdörfer**

Entwicklung eines mesoskopischen Modells zur Abbildung von Größeneffekten in der Kaltmassivumformung mit Methoden der FE-Simulation  
LFT, 133 Seiten, 83 Bilder, 11 Tab.  
2010. ISBN 978-3-87525-308-5.

**Band 215: Christian Matzner**

Konzeption produktspezifischer Lösungen zur Robustheitssteigerung elektronischer Systeme gegen die Einwirkung von Betaung im Automobil  
FAPS, 165 Seiten, 93 Bilder, 14 Tab.  
2010. ISBN 978-3-87525-309-2.

**Band 216: Florian Schüßler**

Verbindungs- und Systemtechnik für thermisch hochbeanspruchte und miniaturisierte elektronische Baugruppen  
FAPS, 184 Seiten, 93 Bilder, 18 Tab.  
2010.  
ISBN 978-3-87525-310-8.

**Band 217: Massimo Cojutti**

Strategien zur Erweiterung der Prozessgrenzen bei der Innenhochdruck-Umformung von Rohren und Blechpaaren  
LFT, 125 Seiten, 56 Bilder, 9 Tab.  
2010. ISBN 978-3-87525-312-2.

**Band 218: Raoul Plettke**

Mehrkriterielle Optimierung komplexer Aktorsysteme für das Laserstrahljustieren  
LFT, 152 Seiten, 25 Bilder, 3 Tab.  
2010. ISBN 978-3-87525-315-3.

**Band 219: Andreas Dobroschke**  
Flexible Automatisierungslösungen für die Fertigung wickeltechnischer Produkte

FAPS, 184 Seiten, 109 Bilder, 18 Tab. 2011.

ISBN 978-3-87525-317-7.

**Band 220: Azhar Zam**

Optical Tissue Differentiation for Sensor-Controlled Tissue-Specific Laser Surgery

LPT, 99 Seiten, 45 Bilder, 8 Tab. 2011. ISBN 978-3-87525-318-4.

**Band 221: Michael Rösch**

Potenziale und Strategien zur Optimierung des Schablonendruckprozesses in der Elektronikproduktion

FAPS, 192 Seiten, 127 Bilder, 19 Tab. 2011.

ISBN 978-3-87525-319-1.

**Band 222: Thomas Rechtenwald**

Quasi-isothermes Laserstrahlintern von Hochtemperatur-Thermoplasten - Eine Betrachtung werkstoff-prozessspezifischer Aspekte am Beispiel PEEK

LPT, 150 Seiten, 62 Bilder, 8 Tab. 2011. ISBN 978-3-87525-320-7.

**Band 223: Daniel Craiovan**

Prozesse und Systemlösungen für die SMT-Montage optischer Bauelemente auf Substrate mit integrierten Lichtwellenleitern

FAPS, 165 Seiten, 85 Bilder, 8 Tab. 2011. ISBN 978-3-87525-324-5.

**Band 224: Kay Wagner**

Beanspruchungsangepasste Kaltmassivumformwerkzeuge durch lokal optimierte Werkzeugoberflächen

LFT, 147 Seiten, 103 Bilder, 17 Tab. 2011. ISBN 978-3-87525-325-2.

**Band 225: Martin Brandhuber**

Verbesserung der Prognosegüte des Versagens von Punktschweißverbindungen bei höchstfesten Stahlgüten

LFT, 155 Seiten, 91 Bilder, 19 Tab. 2011. ISBN 978-3-87525-327-6.

**Band 226: Peter Sebastian Feuser**

Ein Ansatz zur Herstellung von pressgehärteten Karosseriekomponenten mit maßgeschneiderten mechanischen Eigenschaften:

Temperierte Umformwerkzeuge. Prozessfenster, Prozesssimulation und funktionale Untersuchung LFT, 195 Seiten, 97 Bilder, 60 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-328-3.

**Band 227: Murat Arbak**

Material Adapted Design of Cold Forging Tools Exemplified by Powder Metallurgical Tool Steels and Ceramics

LFT, 109 Seiten, 56 Bilder, 8 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-330-6.

**Band 228: Indra Pitz**

Beschleunigte Simulation des Laserstrahlumformens von Aluminiumblechen

LPT, 137 Seiten, 45 Bilder, 27 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-333-7.

**Band 229: Alexander Grimm**

Prozessanalyse und -überwachung des Laserstrahlhartlötens mittels optischer Sensorik

LPT, 125 Seiten, 61 Bilder, 5 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-334-4.

**Band 230: Markus Kaupper**

Biegen von höhenfesten Stahlblechwerkstoffen - Umformverhalten und Grenzen der Biegebarkeit LFT, 160 Seiten, 57 Bilder, 10 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-339-9.

**Band 231: Thomas Kroiß**

Modellbasierte Prozessauslegung für die Kaltmassivumformung unter Berücksichtigung der Werkzeug- und Pressenauffederung LFT, 169 Seiten, 50 Bilder, 19 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-341-2.

**Band 232: Christian Goth**

Analyse und Optimierung der Entwicklung und Zuverlässigkeit räumlicher Schaltungsträger (3D-MID)

FAPS, 176 Seiten, 102 Bilder, 22 Tab. 2012.

ISBN 978-3-87525-340-5.

**Band 233: Christian Ziegler**

Ganzheitliche Automatisierung mechatronischer Systeme in der Medizin am Beispiel Strahlentherapie

FAPS, 170 Seiten, 71 Bilder, 19 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-342-9.

**Band 234: Florian Albert**

Automatisiertes Laserstrahllöten und -reparaturlöten elektronischer Baugruppen

LPT, 127 Seiten, 78 Bilder, 11 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-344-3.

**Band 235: Thomas Stöhr**

Analyse und Beschreibung des mechanischen Werkstoffverhaltens von presshärtbaren Bor-Manganstählen

LFT, 118 Seiten, 74 Bilder, 18 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-346-7.

**Band 236: Christian Kägeler**

Prozessdynamik beim Laserstrahlschweißen verzinkter Stahlbleche im Überlappstoß

LPT, 145 Seiten, 80 Bilder, 3 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-347-4.

**Band 237: Andreas Sulzberger**

Seriennahe Auslegung der Prozesskette zur wärmeunterstützten Umformung von Aluminiumblechwerkstoffen

LFT, 153 Seiten, 87 Bilder, 17 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-349-8.

**Band 238: Simon Opel**

Herstellung prozessangepasster Halbzeuge mit variabler Blechdicke durch die Anwendung von Verfahren der Blechmassivumformung

LFT, 165 Seiten, 108 Bilder, 27 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-350-4.

**Band 239: Rajesh Kanawade**

In-vivo Monitoring of Epithelium Vessel and Capillary Density for the Application of Detection of Clinical Shock and Early Signs of Cancer Development

LPT, 124 Seiten, 58 Bilder, 15 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-351-1.

**Band 240: Stephan Busse**

Entwicklung und Qualifizierung eines Schneidclinchverfahrens LFT, 119 Seiten, 86 Bilder, 20 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-352-8.

**Band 241: Karl-Heinz Leitz**  
Mikro- und Nanostrukturierung mit kurz und ultrakurz gepulster Laserstrahlung  
LPT, 154 Seiten, 71 Bilder, 9 Tab.  
2013. ISBN 978-3-87525-355-9.

**Band 242: Markus Michl**  
Webbasierte Ansätze zur ganzheitlichen technischen Diagnose  
FAPS, 182 Seiten, 62 Bilder, 20 Tab.  
2013.  
ISBN 978-3-87525-356-6.

**Band 243: Vera Sturm**  
Einfluss von Chargenschwankungen auf die Verarbeitungsgrenzen von Stahlwerkstoffen  
LFT, 113 Seiten, 58 Bilder, 9 Tab.  
2013. ISBN 978-3-87525-357-3.

**Band 244: Christian Neudel**  
Mikrostrukturelle und mechanisch-technologische Eigenschaften widerstandspunktgeschweißter Aluminium-Stahl-Verbindungen für den Fahrzeugbau  
LFT, 178 Seiten, 171 Bilder, 31 Tab.  
2014. ISBN 978-3-87525-358-0.

**Band 245: Anja Neumann**  
Konzept zur Beherrschung der Prozessschwankungen im Presswerk  
LFT, 162 Seiten, 68 Bilder, 15 Tab.  
2014. ISBN 978-3-87525-360-3.

**Band 246: Ulf-Hermann Quentlin**  
Laserbasierte Nanostrukturierung mit optisch positionierten Mikrolinsen  
LPT, 137 Seiten, 89 Bilder, 6 Tab.  
2014. ISBN 978-3-87525-361-0.

**Band 247: Erik Lamprecht**  
Der Einfluss der Fertigungsverfahren auf die Wirbelstromverluste von Stator-Einzelzahnblechpaketen für den Einsatz in Hybrid- und Elektrofahrzeugen  
FAPS, 148 Seiten, 138 Bilder, 4 Tab.  
2014. ISBN 978-3-87525-362-7.

**Band 248: Sebastian Rösel**  
Wirkmedienbasierte Umformung von Blechhalbzeugen unter Anwendung magnetorheologischer Flüssigkeiten als kombiniertes Wirk- und Dichtmedium  
LFT, 148 Seiten, 61 Bilder, 12 Tab.  
2014. ISBN 978-3-87525-363-4.

**Band 249: Paul Hippchen**  
Simulative Prognose der Geometrie indirekt pressgehärteter Karosseriebauteile für die industrielle Anwendung  
LFT, 163 Seiten, 89 Bilder, 12 Tab.  
2014. ISBN 978-3-87525-364-1.

**Band 250: Martin Zubeil**  
Versagensprognose bei der Prozesssimulation von Biegeumform- und Falzverfahren  
LFT, 171 Seiten, 90 Bilder, 5 Tab.  
2014. ISBN 978-3-87525-365-8.

**Band 251: Alexander Kühhl**  
Flexible Automatisierung der Statormontage mit Hilfe einer universellen ambidexteren Kinematik  
FAPS, 142 Seiten, 60 Bilder, 26 Tab.  
2014.  
ISBN 978-3-87525-367-2.

**Band 252: Thomas Albrecht**  
Optimierte Fertigungstechnologien für Rotoren getriebeintegrierter PM-Synchronmotoren von Hybridfahrzeugen  
FAPS, 198 Seiten, 130 Bilder, 38 Tab.  
2014.  
ISBN 978-3-87525-368-9.

**Band 253: Florian Risch**  
Planning and Production Concepts for Contactless Power Transfer Systems for Electric Vehicles  
FAPS, 185 Seiten, 125 Bilder, 13 Tab.  
2014.  
ISBN 978-3-87525-369-6.

**Band 254: Markus Weigl**  
Laserstrahlschweißen von Mischverbindungen aus austenitischen und ferritischen korrosionsbeständigen Stahlwerkstoffen  
LPT, 184 Seiten, 110 Bilder, 6 Tab.  
2014. ISBN 978-3-87525-370-2.

**Band 255: Johannes Noneder**  
Beanspruchungserfassung für die Validierung von FE-Modellen zur Auslegung von Massivumformwerkzeugen  
LFT, 161 Seiten, 65 Bilder, 14 Tab.  
2014. ISBN 978-3-87525-371-9.

**Band 256: Andreas Reinhardt**  
Ressourceneffiziente Prozess- und Produktionstechnologie für flexible Schaltungsträger  
FAPS, 123 Seiten, 69 Bilder, 19 Tab.  
2014. ISBN 978-3-87525-373-3.

**Band 257: Tobias Schmuck**  
Ein Beitrag zur effizienten Gestaltung globaler Produktions- und Logistiknetzwerke mittels Simulation  
FAPS, 151 Seiten, 74 Bilder.  
2014.  
ISBN 978-3-87525-374-0.

**Band 258: Bernd Eichenhüller**  
Untersuchungen der Effekte und Wechselwirkungen charakteristischer Einflussgrößen auf das Umformverhalten bei Mikroumformprozessen  
LFT, 127 Seiten, 29 Bilder, 9 Tab.  
2014. ISBN 978-3-87525-375-7.

**Band 259: Felix Lütteke**  
Vielseitiges autonomes Transportsystem basierend auf Weltmodellerstellung mittels Datenfusion von Deckenkameras und Fahrzeugsensoren  
FAPS, 152 Seiten, 54 Bilder, 20 Tab.  
2014.  
ISBN 978-3-87525-376-4.

**Band 260: Martin Grüner**  
Hochdruck-Blechumformung mit formlos festen Stoffen als Wirkmedium  
LFT, 144 Seiten, 66 Bilder, 29 Tab.  
2014. ISBN 978-3-87525-379-5.

**Band 261: Christian Brock**  
Analyse und Regelung des Laserstrahltiefschweißprozesses durch Detektion der Metaldampffackelposition  
LPT, 126 Seiten, 65 Bilder, 3 Tab.  
2015. ISBN 978-3-87525-380-1.

**Band 262: Peter Vatter**  
Sensitivitätsanalyse des 3-Rollen-Schubbiegens auf Basis der Finite Elemente Methode  
LFT, 145 Seiten, 57 Bilder, 26 Tab.  
2015. ISBN 978-3-87525-381-8.

**Band 263: Florian Klämpfl**  
Planung von Laserbestrahlungen durch simulationsbasierte Optimierung  
LPT, 169 Seiten, 78 Bilder, 32 Tab.  
2015. ISBN 978-3-87525-384-9.

**Band 264: Matthias Domke**

Transiente physikalische Mechanismen bei der Laserablation von dünnen Metallschichten  
LPT, 133 Seiten, 43 Bilder, 3 Tab.  
2015. ISBN 978-3-87525-385-6.

**Band 265: Johannes Götz**

Community-basierte Optimierung des Anlagenengineerings  
FAPS, 177 Seiten, 80 Bilder, 30 Tab.  
2015.  
ISBN 978-3-87525-386-3.

**Band 266: Hung Nguyen**

Qualifizierung des Potentials von Verfestigungseffekten zur Erweiterung des Umformvermögens aus-härtbarer Aluminiumlegierungen  
LFT, 137 Seiten, 57 Bilder, 16 Tab.  
2015. ISBN 978-3-87525-387-0.

**Band 267: Andreas Kuppert**

Erweiterung und Verbesserung von Versuchs- und Auswertetechniken für die Bestimmung von Grenzformänderungskurven  
LFT, 138 Seiten, 82 Bilder, 2 Tab.  
2015. ISBN 978-3-87525-388-7.

**Band 268: Kathleen Klaus**

Erstellung eines Werkstofforientierten Fertigungsprozessfensters zur Steigerung des Formgebungsvermögens von Aluminiumlegierungen unter Anwendung einer zwischengeschalteten Wärmebehandlung  
LFT, 154 Seiten, 70 Bilder, 8 Tab.  
2015. ISBN 978-3-87525-391-7.

**Band 269: Thomas Svec**

Untersuchungen zur Herstellung von funktionsoptimierten Bauteilen im partiellen Presshärtprozess mittels lokal unterschiedlich temperierter Werkzeuge  
LFT, 166 Seiten, 87 Bilder, 15 Tab.  
2015. ISBN 978-3-87525-392-4.

**Band 270: Tobias Schrader**

Grundlegende Untersuchungen zur Verschleißcharakterisierung beschichteter Kaltmassivumformwerkzeuge  
LFT, 164 Seiten, 55 Bilder, 11 Tab.  
2015. ISBN 978-3-87525-393-1.

**Band 271: Matthäus Brela**

Untersuchung von Magnetfeld-Messmethoden zur ganzheitlichen Wertschöpfungsoptimierung und Fehlerdetektion an magnetischen Aktoren  
FAPS, 170 Seiten, 97 Bilder, 4 Tab.  
2015. ISBN 978-3-87525-394-8.

**Band 272: Michael Wieland**

Entwicklung einer Methode zur Prognose adhäsiven Verschleißes an Werkzeugen für das direkte Presshärten  
LFT, 156 Seiten, 84 Bilder, 9 Tab.  
2015. ISBN 978-3-87525-395-5.

**Band 273: René Schramm**

Strukturierte additive Metallisierung durch kaltaktives Atmosphärendruckplasma  
FAPS, 136 Seiten, 62 Bilder, 15 Tab.  
2015. ISBN 978-3-87525-396-2.

**Band 274: Michael Lechner**

Herstellung beanspruchungsangepasster Aluminiumblechhalbzeuge durch eine maßgeschneiderte Variation der Abkühlgeschwindigkeit nach Lösungsglühen  
LFT, 136 Seiten, 62 Bilder, 15 Tab.  
2015. ISBN 978-3-87525-397-9.

**Band 275: Kolja Andreas**

Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit auf das Werkzeugeinsatzverhalten beim Kaltfließpressen  
LFT, 169 Seiten, 76 Bilder, 4 Tab.  
2015. ISBN 978-3-87525-398-6.

**Band 276: Marcus Baum**

Laser Consolidation of ITO Nanoparticles for the Generation of Thin Conductive Layers on Transparent Substrates  
LPT, 158 Seiten, 75 Bilder, 3 Tab.  
2015. ISBN 978-3-87525-399-3.

**Band 277: Thomas Schneider**

Umformtechnische Herstellung dünnwandiger Funktionsbauteile aus Feinblech durch Verfahren der Blechmassivumformung  
LFT, 188 Seiten, 95 Bilder, 7 Tab.  
2015. ISBN 978-3-87525-401-3.

**Band 278: Jochen Merhof**

Sematische Modellierung automatisierter Produktionssysteme zur Verbesserung der IT-Integration zwischen Anlagen-Engineering und Steuerungsebene  
FAPS, 157 Seiten, 88 Bilder, 8 Tab.  
2015. ISBN 978-3-87525-402-0.

**Band 279: Fabian Zöller**

Erarbeitung von Grundlagen zur Abbildung des tribologischen Systems in der Umformsimulation  
LFT, 126 Seiten, 51 Bilder, 3 Tab.  
2016. ISBN 978-3-87525-403-7.

**Band 280: Christian Hezler**

Einsatz technologischer Versuche zur Erweiterung der Versagensvorhersage bei Karosseriebauteilen aus höchstfesten Stählen  
LFT, 147 Seiten, 63 Bilder, 44 Tab.  
2016. ISBN 978-3-87525-404-4.

**Band 281: Jochen Bönig**

Integration des Systemverhaltens von Automobil-Hochvoltleitungen in die virtuelle Absicherung durch strukturmechanische Simulation  
FAPS, 177 Seiten, 107 Bilder, 17 Tab.  
2016.  
ISBN 978-3-87525-405-1.

**Band 282: Johannes Kohl**

Automatisierte Datenerfassung für diskret ereignisorientierte Simulationen in der energieflexiblen Fabrik  
FAPS, 160 Seiten, 80 Bilder, 27 Tab.  
2016.  
ISBN 978-3-87525-406-8.

**Band 283: Peter Bechtold**

Mikroschockwellenumformung mittels ultrakurzer Laserpulse  
LPT, 155 Seiten, 59 Bilder, 10 Tab.  
2016. ISBN 978-3-87525-407-5.

**Band 284: Stefan Berger**

Laserstrahlschweißen thermoplastischer Kohlenstofffaserverbundwerkstoffe mit spezifischem Zusatzdraht  
LPT, 118 Seiten, 68 Bilder, 9 Tab.  
2016. ISBN 978-3-87525-408-2.

**Band 285: Martin Borschlegl**  
Methods-Energy Measurement -  
Eine Methode zur Energieplanung  
für Fügeverfahren im Karosseriebau  
FAPS, 136 Seiten, 72 Bilder, 46 Tab.  
2016.  
ISBN 978-3-87525-409-9.

**Band 286: Tobias Rackow**  
Erweiterung des Unternehmenscontrollings um die Dimension Energie  
FAPS, 164 Seiten, 82 Bilder, 29 Tab.  
2016.  
ISBN 978-3-87525-410-5.

**Band 287: Johannes Koch**  
Grundlegende Untersuchungen zur Herstellung zyklisch-symmetrischer Bauteile mit Nebenformelementen durch Blechmassivumformung  
LFT, 125 Seiten, 49 Bilder, 17 Tab.  
2016. ISBN 978-3-87525-411-2.

**Band 288: Hans Ulrich Vierzigmann**  
Beitrag zur Untersuchung der tribologischen Bedingungen in der Blechmassivumformung - Bereitstellung von tribologischen Modellsversuchen und Realisierung von Tailored Surfaces  
LFT, 174 Seiten, 102 Bilder, 34 Tab.  
2016. ISBN 978-3-87525-412-9.

**Band 289: Thomas Senner**  
Methodik zur virtuellen Absicherung der formgebenden Operation des Nasspressprozesses von Gelege-Mehrschichtverbunden  
LFT, 156 Seiten, 96 Bilder, 21 Tab.  
2016. ISBN 978-3-87525-414-3.

**Band 290: Sven Kreitlein**  
Der grundoperationsspezifische Mindestenergiebedarf als Referenzwert zur Bewertung der Energieeffizienz in der Produktion  
FAPS, 185 Seiten, 64 Bilder, 30 Tab.  
2016.  
ISBN 978-3-87525-415-0.

**Band 291: Christian Roos**  
Remote-Laserstrahlschweißen verzinkter Stahlbleche in Kehlnahtgeometrie  
LPT, 123 Seiten, 52 Bilder, 0 Tab.  
2016. ISBN 978-3-87525-416-7.

**Band 292: Alexander Kahrmanidis**  
Thermisch unterstützte Umformung von Aluminiumblechen  
LFT, 165 Seiten, 103 Bilder, 18 Tab.  
2016. ISBN 978-3-87525-417-4.

**Band 293: Jan Tremel**  
Flexible Systems for Permanent Magnet Assembly and Magnetic Rotor Measurement / Flexible Systeme zur Montage von Permanentmagneten und zur Messung magnetischer Rotoren  
FAPS, 152 Seiten, 91 Bilder, 12 Tab.  
2016. ISBN 978-3-87525-419-8.

**Band 294: Ioannis Tsoupis**  
Schädigungs- und Versagensverhalten hochfester Leichtbauwerkstoffe unter Biegebeanspruchung  
LFT, 176 Seiten, 51 Bilder, 6 Tab.  
2017. ISBN 978-3-87525-420-4.

**Band 295: Sven Hildering**  
Grundlegende Untersuchungen zum Prozessverhalten von Silizium als Werkzeugwerkstoff für das Mikroscherschneiden metallischer Folien  
LFT, 177 Seiten, 74 Bilder, 17 Tab.  
2017. ISBN 978-3-87525-422-8.

**Band 296: Sasia Mareike Hertweck**  
Zeitliche Pulsformung in der Lasermikromaterialbearbeitung - Grundlegende Untersuchungen und Anwendungen  
LPT, 146 Seiten, 67 Bilder, 5 Tab.  
2017. ISBN 978-3-87525-423-5.

**Band 297: Paryanto**  
Mechatronic Simulation Approach for the Process Planning of Energy-Efficient Handling Systems  
FAPS, 162 Seiten, 86 Bilder, 13 Tab.  
2017. ISBN 978-3-87525-424-2.

**Band 298: Peer Stenzel**  
Großserientaugliche Nadelwickeltechnik für verteilte Wicklungen im Anwendungsfall der E-Traktionsantriebe  
FAPS, 239 Seiten, 147 Bilder, 20 Tab.  
2017.  
ISBN 978-3-87525-425-9.

**Band 299: Mario Lušić**  
Ein Vorgehensmodell zur Erstellung montagespezifischer Werkerinformati onssysteme simultan zum Produktentstehungsprozess  
FAPS, 174 Seiten, 79 Bilder, 22 Tab.  
2017.  
ISBN 978-3-87525-426-6.

**Band 300: Arnd Buschhaus**  
Hochpräzise adaptive Steuerung und Regelung robotergeführter Prozesse  
FAPS, 202 Seiten, 96 Bilder, 4 Tab.  
2017. ISBN 978-3-87525-427-3.

**Band 301: Tobias Laumer**  
Erzeugung von thermoplastischen Werkstoffverbunden mittels simultanem, intensitätsselektivem Laserstrahlschmelzen  
LPT, 140 Seiten, 82 Bilder, 0 Tab.  
2017. ISBN 978-3-87525-428-0.

**Band 302: Nora Unger**  
Untersuchung einer thermisch unterstützten Fertigungskette zur Herstellung umgeformter Bauteile aus der härtesten Aluminiumlegierung EN AW-7020  
LFT, 142 Seiten, 53 Bilder, 8 Tab.  
2017. ISBN 978-3-87525-429-7.

**Band 303: Tommaso Stellin**  
Design of Manufacturing Processes for the Cold Bulk Forming of Small Metal Components from Metal Strip  
LFT, 146 Seiten, 67 Bilder, 7 Tab.  
2017. ISBN 978-3-87525-430-3.

**Band 304: Bassim Bachy**  
Experimental Investigation, Modeling, Simulation and Optimization of Molded Interconnect Devices (MID) Based on Laser Direct Structuring (LDS) / Experimentelle Untersuchung, Modellierung, Simulation und Optimierung von Molded Interconnect Devices (MID) basierend auf Laser Direktstrukturierung (LDS)  
FAPS, 168 Seiten, 120 Bilder, 26 Tab.  
2017.  
ISBN 978-3-87525-431-0.

**Band 305: Michael Spahr**  
Automatisierte Kontaktierungsverfahren für flachleiterbasierte Pkw-Bordnetzsysteme  
FAPS, 197 Seiten, 98 Bilder, 17 Tab.  
2017. ISBN 978-3-87525-432-7.

**Band 306: Sebastian Suttner**  
Charakterisierung und Modellierung des spannungszustandsabhängigen Werkstoffverhaltens der Magnesiumlegierung AZ31B für die numerische Prozessauslegung LFT, 150 Seiten, 84 Bilder, 19 Tab. 2017. ISBN 978-3-87525-433-4.

**Band 307: Bhargav Potdar**  
A reliable methodology to deduce thermo-mechanical flow behaviour of hot stamping steels LFT, 203 Seiten, 98 Bilder, 27 Tab. 2017. ISBN 978-3-87525-436-5.

**Band 308: Maria Löffler**  
Steuerung von Blechmassivumformprozessen durch maßgeschneiderte tribologische Systeme LFT, viii u. 166 Seiten, 90 Bilder, 5 Tab. 2018. ISBN 978-3-96147-133-1.

**Band 309: Martin Müller**  
Untersuchung des kombinierten Trenn- und Umformprozesses beim Fügen artungleicher Werkstoffe mittels Schneidlinchverfahren LFT, xi u. 149 Seiten, 89 Bilder, 6 Tab. 2018. ISBN: 978-3-96147-135-5.

**Band 310: Christopher Kästle**  
Qualifizierung der Kupfer-Drahtbondtechnologie für integrierte Leistungsmodule in harschen Umgebungsbedingungen FAPS, xii u. 167 Seiten, 70 Bilder, 18 Tab. 2018. ISBN 978-3-96147-145-4.

**Band 311: Daniel Vipavc**  
Eine Simulationsmethode für das 3-Rollen-Schubbiegen LFT, xiii u. 121 Seiten, 56 Bilder, 17 Tab. 2018. ISBN 978-3-96147-147-8.

**Band 312: Christina Ramer**  
Arbeitsraumüberwachung und autonome Bahnplanung für ein sicheres und flexibles Roboter-Assistenzsystem in der Fertigung FAPS, xiv u. 188 Seiten, 57 Bilder, 9 Tab. 2018. ISBN 978-3-96147-153-9.

**Band 313: Miriam Rauer**  
Der Einfluss von Poren auf die Zuverlässigkeit der Lötverbindungen von Hochleistungs-Leuchtdioden FAPS, xii u. 209 Seiten, 108 Bilder, 21 Tab. 2018. ISBN 978-3-96147-157-7.

**Band 314: Felix Tenner**  
Kamerabasierte Untersuchungen der Schmelze und Gasströmungen beim Laserstrahlschweißen verzinkter Stahlbleche LPT, xxiii u. 184 Seiten, 94 Bilder, 7 Tab. 2018. ISBN 978-3-96147-160-7.

**Band 315: Aarief Syed-Khaja**  
Diffusion Soldering for High-temperature Packaging of Power Electronics FAPS, x u. 202 Seiten, 144 Bilder, 32 Tab. 2018. ISBN 978-3-87525-162-1.

**Band 316: Adam Schaub**  
Grundlagenwissenschaftliche Untersuchung der kombinierten Prozesskette aus Umformen und Additive Fertigung LFT, xi u. 192 Seiten, 72 Bilder, 27 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-166-9.

**Band 317: Daniel Gröbel**  
Herstellung von Nebenformelementen unterschiedlicher Geometrie an Blechen mittels Fließpressverfahren der Blechmassivumformung LFT, x u. 165 Seiten, 96 Bilder, 13 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-168-3.

**Band 318: Philipp Hildenbrand**  
Entwicklung einer Methodik zur Herstellung von Tailored Blanks mit definierten Halbzeugeigenschaften durch einen Taumelprozess LFT, ix u. 153 Seiten, 77 Bilder, 4 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-174-4.

**Band 319: Tobias Konrad**  
Simulative Auslegung der Spann- und Fixierkonzepte im Karosserierohbau: Bewertung der Baugruppenmaßhaltigkeit unter Berücksichtigung schwankender Einflussgrößen LFT, x u. 203 Seiten, 134 Bilder, 32 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-176-8.

**Band 320: David Meinel**  
Architektur applikationsspezifischer Multi-Physics-Simulationskonfiguratoren am Beispiel modularer Triebzüge FAPS, xii u. 166 Seiten, 82 Bilder, 25 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-184-3.

**Band 321: Andrea Zimmermann**  
Grundlegende Untersuchungen zum Einfluss fertigungsbedingter Eigenschaften auf die Ermüdungsfestigkeit kaltmassivumgeformter Bauteile LFT, ix u. 160 Seiten, 66 Bilder, 5 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-190-4.

**Band 322: Christoph Amann**  
Simulative Prognose der Geometrie nassgepresster Karosseriebauteile aus Gelege-Mehrschichtverbunden LFT, xvi u. 169 Seiten, 80 Bilder, 13 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-194-2.

**Band 323: Jennifer Tenner**  
Realisierung schmierstofffreier Tiefziehprozesse durch maßgeschneiderte Werkzeugoberflächen LFT, x u. 187 Seiten, 68 Bilder, 13 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-196-6.

**Band 324: Susan Zöller**  
Mapping Individual Subjective Values to Product Design KTMfK, xi u. 223 Seiten, 81 Bilder, 25 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-202-4.

**Band 325: Stefan Lutz**  
Erarbeitung einer Methodik zur semiempirischen Ermittlung der Umwandlungskinetik durchhärtender Wälzlagerstähle für die Wärmebehandlungssimulation LFT, xiv u. 189 Seiten, 75 Bilder, 32 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-209-3.

**Band 326: Tobias Gnibl**  
Modellbasierte Prozesskettenabbildung rührreibgeschweißter Aluminiumhalbzeuge zur umformtechnischen Herstellung höchstfester Leichtbau-strukturteile LFT, xii u. 167 Seiten, 68 Bilder, 17 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-217-8.

**Band 327: Johannes Bürner**  
Technisch-wirtschaftliche Optionen zur Lastflexibilisierung durch intelligente elektrische Wärmespeicher  
FAPS, xiv u. 233 Seiten, 89 Bilder, 27 Tab. 2019.  
ISBN 978-3-96147-219-2.

**Band 328: Wolfgang Böhm**  
Verbesserung des Umformverhaltens von mehrlagigen Aluminiumblechwerkstoffen mit ultrafeinkörnigem Gefüge  
LFT, ix u. 160 Seiten, 88 Bilder, 14 Tab. 2019.  
ISBN 978-3-96147-227-7.

**Band 329: Stefan Landkammer**  
Grundsatzuntersuchungen, mathematische Modellierung und Ableitung einer Auslegungsmethodik für Gelenkantriebe nach dem Spinnenbeinprinzip  
LFT, xii u. 200 Seiten, 83 Bilder, 13 Tab. 2019.  
ISBN 978-3-96147-229-1.

**Band 330: Stephan Rapp**  
Pump-Probe-Ellipsometrie zur Messung transients optischer Materialeigenschaften bei der Ultrakurzpuls-Lasermaterialbearbeitung  
LPT, xi u. 143 Seiten, 49 Bilder, 2 Tab. 2019.  
ISBN 978-3-96147-235-2.

**Band 331: Michael Scholz**  
Intralogs Execution System mit integrierten autonomen, servicebasierten Transportentitäten  
FAPS, xi u. 195 Seiten, 55 Bilder, 11 Tab. 2019.  
ISBN 978-3-96147-237-6.

**Band 332: Eva Bogner**  
Strategien der Produktindividualisierung in der produzierenden Industrie im Kontext der Digitalisierung  
FAPS, ix u. 201 Seiten, 55 Bilder, 28 Tab. 2019.  
ISBN 978-3-96147-246-8.

**Band 333: Daniel Benjamin Krüger**  
Ein Ansatz zur CAD-integrierten muskuloskelettalen Analyse der Mensch-Maschine-Interaktion  
KTmfk, x u. 217 Seiten, 102 Bilder, 7 Tab. 2019.  
ISBN 978-3-96147-250-5.

**Band 334: Thomas Kuhn**  
Qualität und Zuverlässigkeit laserdirektstrukturierter mechatronisch integrierter Baugruppen (LDS-MID)  
FAPS, ix u. 152 Seiten, 69 Bilder, 12 Tab. 2019.  
ISBN: 978-3-96147-252-9.

**Band 335: Hans Fleischmann**  
Modellbasierte Zustands- und Prozessüberwachung auf Basis sozio-cyber-physischer Systeme  
FAPS, xi u. 214 Seiten, 111 Bilder, 18 Tab. 2019.  
ISBN: 978-3-96147-256-7.

**Band 336: Markus Michalski**  
Grundlegende Untersuchungen zum Prozess- und Werkstoffverhalten bei schwingungsüberlagerter Umformung  
LFT, xii u. 197 Seiten, 93 Bilder, 11 Tab. 2019.  
ISBN: 978-3-96147-270-3.

**Band 337: Markus Brandmeier**  
Ganzheitliches ontologiebasiertes Wissensmanagement im Umfeld der industriellen Produktion  
FAPS, xi u. 255 Seiten, 77 Bilder, 33 Tab. 2020.  
ISBN: 978-3-96147-275-8.

**Band 338: Stephan Purr**  
Datenerfassung für die Anwendung lernender Algorithmen bei der Herstellung von Blechformteilen  
LFT, ix u. 165 Seiten, 48 Bilder, 4 Tab. 2020.  
ISBN: 978-3-96147-281-9.

**Band 339: Christoph Kiener**  
Kaltfließpressen von gerad- und schrägverzahnten Zahnrädern  
LFT, viii u. 151 Seiten, 81 Bilder, 3 Tab. 2020.  
ISBN 978-3-96147-287-1.

**Band 340: Simon Spreng**  
Numerische, analytische und empirische Modellierung des Heißformprozesses  
FAPS, xix u. 204 Seiten, 91 Bilder, 27 Tab. 2020.  
ISBN 978-3-96147-293-2.

**Band 341: Patrik Schwingenschlögl**  
Erarbeitung eines Prozessverständnisses zur Verbesserung der tribologischen Bedingungen beim Presshärten  
LFT, x u. 177 Seiten, 81 Bilder, 8 Tab. 2020.  
ISBN 978-3-96147-297-0.

**Band 342: Emanuela Affronti**  
Evaluation of failure behaviour of sheet metals  
LFT, ix u. 136 Seiten, 57 Bilder, 20 Tab. 2020.  
ISBN 978-3-96147-303-8.

**Band 343: Julia Degner**  
Grundlegende Untersuchungen zur Herstellung hochfester Aluminiumblechbauteile in einem kombinierten Umform- und Abschreckprozess  
LFT, x u. 172 Seiten, 61 Bilder, 9 Tab. 2020.  
ISBN 978-3-96147-307-6.

**Band 344: Maximilian Wagner**  
Automatische Bahnplanung für die Aufteilung von Prozessbewegungen in synchrone Werkstück- und Werkzeugbewegungen mittels Multi-Roboter-Systemen  
FAPS, xxi u. 181 Seiten, 111 Bilder, 15 Tab. 2020.  
ISBN 978-3-96147-309-0.

**Band 345: Stefan Härter**  
Qualifizierung des Montageprozesses hochminiaturisierter elektronischer Bauelemente  
FAPS, ix u. 194 Seiten, 97 Bilder, 28 Tab. 2020.  
ISBN 978-3-96147-314-4.

**Band 346: Toni Donhauser**  
Ressourcenorientierte Auftragsregelung in einer hybriden Produktion mittels betriebsbegleitender Simulation  
FAPS, xix u. 242 Seiten, 97 Bilder, 17 Tab. 2020.  
ISBN 978-3-96147-316-8.

**Band 347: Philipp Amend**

Laserbasiertes Schmelzkleben von Thermoplasten mit Metallen LPT, xv u. 154 Seiten, 67 Bilder. 2020. ISBN 978-3-96147-326-7.

**Band 348: Matthias Ehlert**

Simulationsunterstützte funktionale Grenzlagenabsicherung KTmfk, xvi u. 300 Seiten, 101 Bilder, 73 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-328-1.

**Band 349: Thomas Sander**

Ein Beitrag zur Charakterisierung und Auslegung des Verbundes von Kunststoffsubstraten mit harten Dünnschichten KTmfk, xiv u. 178 Seiten, 88 Bilder, 21 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-330-4.

**Band 350: Florian Pilz**

Fließpressen von Verzahnungselementen an Blechen LFT, x u. 170 Seiten, 103 Bilder, 4 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-332-8.

**Band 351: Sebastian Josef Katona**

Evaluation und Aufbereitung von Produktsimulationen mittels abweichungsbehafteter Geometrie-Modelle KTmfk, ix u. 147 Seiten, 73 Bilder, 11 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-336-6.

**Band 352: Jürgen Herrmann**

Kumulatives Walzplattieren. Bewertung der Umformeigenschaften mehrlagiger Blechwerkstoffe der ausscheidungshärtbaren Legierung AA6014 LFT, x u. 157 Seiten, 64 Bilder, 5 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-344-1.

**Band 353: Christof Küstner**

Assistenzsystem zur Unterstützung der datengetriebenen Produktentwicklung KTmfk, xii u. 219 Seiten, 63 Bilder, 14 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-348-9.

**Band 354: Tobias Gläfel**

Prozessketten zum Laserstrahlschweißen von flachleiterbasierten Formspulenwicklungen für automobiler Traktionsantriebe FAPS, xiv u. 206 Seiten, 89 Bilder, 11 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-356-4.

**Band 355: Andreas Meinel**

Experimentelle Untersuchung der Auswirkungen von Axialschwingungen auf Reibung und Verschleiß in Zylinderrollenlagern KTmfk, xii u. 162 Seiten, 56 Bilder, 7 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-358-8.

**Band 356: Hannah Riedle**

Haptische, generische Modelle weicher anatomischer Strukturen für die chirurgische Simulation FAPS, xxx u. 179 Seiten, 82 Bilder, 35 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-367-0.

**Band 357: Maximilian Landgraf**

Leistungselektronik für den Einsatz dielektrischer Elastomere in aktorischen, sensorischen und integrierten sensomotorischen Systemen FAPS, xxiii u. 166 Seiten, 71 Bilder, 10 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-380-9.

**Band 358: Alireza Esfandiyari**

Multi-Objective Process Optimization for Overpressure Reflow Soldering in Electronics Production FAPS, xviii u. 175 Seiten, 57 Bilder, 23 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-382-3.

**Band 359: Christian Sand**

Prozessübergreifende Analyse komplexer Montageprozessketten mittels Data Mining FAPS, XV u. 168 Seiten, 61 Bilder, 12 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-398-4.

**Band 360: Ralf Merkl**

Closed-Loop Control of a Storage-Supported Hybrid Compensation System for Improving the Power Quality in Medium Voltage Networks FAPS, xxvii u. 200 Seiten, 102 Bilder, 2 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-402-8.

**Band 361: Thomas Reitberger**

Additive Fertigung polymerer optischer Wellenleiter im Aerosol-Jet-Verfahren FAPS, xix u. 141 Seiten, 65 Bilder, 11 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-400-4.

**Band 362: Marius Christian****Fechter**

Modellierung von Vorentwürfen in der virtuellen Realität mit natürlicher Fingerinteraktion KTmfk, x u. 188 Seiten, 67 Bilder, 19 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-404-2.

**Band 363: Franziska Neubauer**

Oberflächenmodifizierung und Entwicklung einer Auswertemethodik zur Verschleißcharakterisierung im Presshärteprozess LFT, ix u. 177 Seiten, 42 Bilder, 6 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-406-6.

**Band 364: Eike Wolfram Schäffer**

Web- und wissensbasierter Engineering-Konfigurator für roboterzentrierte Automatisierungslösungen FAPS, xxiv u. 195 Seiten, 108 Bilder, 25 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-410-3.

**Band 365: Daniel Gross**

Untersuchungen zur kohlenstoffdioxidbasierten kryogenen Minimalmengenschmierung REP, xii u. 184 Seiten, 56 Bilder, 18 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-412-7.

**Band 366: Daniel Junker**

Qualifizierung laser-additiv gefertigter Komponenten für den Einsatz im Werkzeugbau der Massivumformung LFT, vii u. 142 Seiten, 62 Bilder, 5 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-416-5.

**Band 367: Tallal Javied**

Totally Integrated Ecology Management for Resource Efficient and Eco-Friendly Production FAPS, xv u. 160 Seiten, 60 Bilder, 13 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-418-9.

**Band 368: David Marco Hochrein**

Wälzlager im Beschleunigungsfeld – Eine Analysestrategie zur Bestimmung des Reibungs-, Axial-schub- und Temperaturverhaltens von Nadelkränzen – KTmfk, xiii u. 279 Seiten, 108 Bilder, 39 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-420-2.

**Band 369: Daniel Gräf**

Funktionalisierung technischer Oberflächen mittels prozessüberwachter aerosolbasierter Drucktechnologie FAPS, xxii u. 175 Seiten, 97 Bilder, 6 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-433-2.

**Band 370: Andreas Gröschl**

Hochfrequent fokusabstandsmodierte Konfokalsensoren für die Nanokoordinatenmesstechnik FMT, x u. 144 Seiten, 98 Bilder, 6 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-435-6.

**Band 371: Johann Tüchsen**

Konzeption, Entwicklung und Einführung des Assistenzsystems D-DAS für die Produktentwicklung elektrischer Motoren KTmfk, xii u. 178 Seiten, 92 Bilder, 12 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-437-0.

**Band 372: Max Marian**

Numerische Auslegung von Oberflächenmikrotexturen für geschmierte tribologische Kontakte KTmfk, xviii u. 276 Seiten, 85 Bilder, 45 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-439-4.

**Band 373: Johannes Strauß**

Die akustooptische Strahlformung in der Lasermaterialbearbeitung LPT, xvi u. 113 Seiten, 48 Bilder. 2021. ISBN 978-3-96147-441-7.

**Band 374: Martin Hohmann**

Machine learning and hyper spectral imaging: Multi Spectral Endoscopy in the Gastro Intestinal Tract towards Hyper Spectral Endoscopy LPT, x u. 137 Seiten, 62 Bilder, 29 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-445-5.

**Band 375: Timo Kordaß**

Lasergestütztes Verfahren zur selektiven Metallisierung von epoxidharzbasierten Duromeren zur Steigerung der Integrationsdichte für dreidimensionale mechatronische Package-Baugruppen FAPS, xviii u. 198 Seiten, 92 Bilder, 24 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-443-1.

**Band 376: Philipp Kestel**

Assistenzsystem für den wissensbasierten Aufbau konstruktionsbegleitender Finite-Elemente-Analysen KTmfk, xviii u. 209 Seiten, 57 Bilder, 17 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-457-8.

**Band 377: Martin Lerchen**

Messverfahren für die pulverbettbasierte additive Fertigung zur Sicherstellung der Konformität mit geometrischen Produktspezifikationen FMT, x u. 150 Seiten, 60 Bilder, 9 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-463-9.

**Band 378: Michael Schneider**

Inline-Prüfung der Permeabilität in weichmagnetischen Komponenten FAPS, xxii u. 189 Seiten, 79 Bilder, 14 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-465-3.

**Band 379: Tobias Sprügel**

Sphärische Detektorflächen als Unterstützung der Produktentwicklung zur Datenanalyse im Rahmen des Digital Engineering KTmfk, xiii u. 213 Seiten, 84 Bilder, 33 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-475-2.

**Band 380: Tom Häfner**

Multipulseffekte beim Mikro-Materialabtrag von Stahllegierungen mit Pikosekunden-Laserpulsen LPT, xxviii u. 159 Seiten, 57 Bilder, 13 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-479-0.

**Band 381: Björn Heling**

Einsatz und Validierung virtueller Absicherungsmethoden für abweichungs-behaftete Mechanismen im Kontext des Robust Design KTmfk, xi u. 169 Seiten, 63 Bilder, 27 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-487-5.

**Band 382: Tobias Kolb**

Laserstrahl-Schmelzen von Metallen mit einer Serienanlage – Prozesscharakterisierung und Erweiterung eines Überwachungssystems LPT, xv u. 170 Seiten, 128 Bilder, 16 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-491-2.

**Band 383: Mario Meinhardt**

Widerstandselementenschweißen mit gestauchten Hilfsfügeelementen - Umformtechnische Wirkzusammenhänge zur Beeinflussung der Verbindungsfestigkeit LFT, xii u. 189 Seiten, 87 Bilder, 4 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-473-8.

**Band 384: Felix Bauer**

Ein Beitrag zur digitalen Auslegung von Fügeprozessen im Karosseriebau mit Fokus auf das Remote-Laserstrahlschweißen unter Einsatz flexibler Spanntechnik LFT, xi u. 185 Seiten, 74 Bilder, 12 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-498-1.

**Band 385: Jochen Zeitler**

Konzeption eines rechnergestützten Konstruktionssystems für optomechatronische Baugruppen FAPS, xix u. 172 Seiten, 88 Bilder, 11 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-499-8.

**Band 386: Vincent Mann**

Einfluss von Strahloszillation auf das Laserstrahlschweißen hochfester Stähle LPT, xiii u. 172 Seiten, 103 Bilder, 18 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-503-2.

**Band 387: Chen Chen**

Skin-equivalent opto-/elastofluidic in-vitro microphysiological vascular models for translational studies of optical biopsies

LPT, xx u. 126 Seiten, 60 Bilder, 10 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-505-6.

**Band 388: Stefan Stein**

Laser drop on demand joining as bonding method for electronics assembly and packaging with high thermal requirements

LPT, x u. 112 Seiten, 54 Bilder, 10 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-507-0

**Band 389: Nikolaus Urban**

Untersuchung des Laserstrahlschmelzens von Neodym-Eisen-Bor zur additiven Herstellung von Permanentmagneten

FAPS, x u. 174 Seiten, 88 Bilder, 18 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-501-8.

**Band 390: Yiting Wu**

Großflächige Topographiemessungen mit einem Weißlichtinterferenzmikroskop und einem metrologischen Rasterkraftmikroskop FMT, xii u. 142 Seiten, 68 Bilder, 11 Tab. 2022.

ISBN: 978-3-96147-513-1.

**Band 391: Thomas Papke**

Untersuchungen zur Umformbarkeit hybrider Bauteile aus Blechgrundkörper und additiv gefertigter Struktur

LFT, xii u. 194 Seiten, 71 Bilder, 16 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-515-5.

**Band 392: Bastian Zimmermann**

Einfluss des Vormaterials auf die mehrstufige Kaltumformung vom Draht

LFT, xi u. 182 Seiten, 36 Bilder, 6 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-519-3.

**Band 393: Harald Völk**

Ein simulationsbasierter Ansatz zur Auslegung additiv gefertigter FLM-Faserverbundstrukturen

KTmfk, xx u. 204 Seiten, 95 Bilder, 22 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-523-0.

**Band 394: Robert Schulte**

Auslegung und Anwendung prozessangepasster Halbzeuge für Verfahren der Blechmassivumformung

LFT, x u. 163 Seiten, 93 Bilder, 5 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-525-4.

**Band 395: Philipp Frey**

Umformtechnische Strukturierung metallischer Einleger im Folgeverbund für mediendichte Kunststoff-Metall-Hybridbauteile

LFT, ix u. 180 Seiten, 83 Bilder, 7 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-534-6.

**Band 396: Thomas Johann Luft**

Komplexitätsmanagement in der Produktentwicklung - Holistische Modellierung, Analyse, Visualisierung und Bewertung komplexer Systeme

KTmfk, xiii u. 510 Seiten, 166 Bilder, 16 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-540-7.

**Band 397: Li Wang**

Evaluierung der Einsetzbarkeit des lasergestützten Verfahrens zur selektiven Metallisierung für die Verbesserung passiver Intermodulation in Hochfrequenzanwendungen

FAPS, xxii u. 151 Seiten, 72 Bilder, 22 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-542-1.

**Band 398: Sebastian Reitelshöfer**

Der Aerosol-Jet-Druck Dielektrischer Elastomere als additives Fertigungsverfahren für elastische mechatronische Komponenten

FAPS, xxv u. 206 Seiten, 87 Bilder, 13 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-547-6.

**Band 399: Alexander Meyer**

Selektive Magnetmontage zur Verringerung des Rastmomentes permanenterregter Synchronmotoren

FAPS, xv u. 164 Seiten, 90 Bilder, 18 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-555-1.

**Band 400: Rong Zhao**

Design verschleißreduzierender amorpher Kohlenstoffschichtsysteme für trockene tribologische Gleitkontakte

KTmfk, x u. 148 Seiten, 69 Bilder, 14 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-557-5.

**Band 401: Christian P. J. Schwarzer**

Kupfersintern als Fügetechnologie für Leistungselektronik

FAPS, xxvii u. 234 Seiten, 125 Bilder, 24 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-566-7.

**Band 402: Alexander Horn**

Grundlegende Untersuchungen zur Gradierung der mechanischen Eigenschaften pressgehärteter Bauteile durch eine örtlich begrenzte Aufkohlung

LFT, xii u. 204 Seiten, 58 Bilder, 6 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-568-1.

**Band 403: Artur Klos**

Werkstoff- und umformtechnische Bewertung von hochfesten Aluminiumblechwerkstoffen für den Karosseriebau

LFT, x u. 192 Seiten, 73 Bilder, 12 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-572-8.

**Band 404: Harald Schmid**

Ganzheitliche Erarbeitung eines Prozessverständnisses von Tiefziehprozessen mit Ziehstücken auf Basis mechanischer und tribologischer Analysen

LFT, xiii u. 211 Seiten, 78 Bilder, 5 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-577-3.

**Band 405: Johannes Henneberg**

Blechmassivumformung von Funktionsbauteilen aus Bandmaterial

LFT, viii u. 176 Seiten, 101 Bilder, 2 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-579-7.

**Band 406: Anton Schmailzl**

Festigkeits- und zeitoptimierte Prozessführung beim quasi-simultanen Laser-Durchstrahlschweißen

LPT, xiii u. 157 Seiten, 84 Bilder, 7 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-583-4.

**Band 407: Alexander Wolf**  
Modellierung und Vorhersage menschlichen Interaktionsverhaltens zur Analyse der Mensch-Produkt Interaktion  
KTmfk, x u. 207 Seiten, 69 Bilder, 10 Tab. 2022.  
ISBN 978-3-96147-585-8.

**Band 408: Tim Weikert**  
Modifikationen amorpher Kohlenstoffschichten zur Anpassung der Reibungsbedingungen und zur Erhöhung des Verschleißschutzes  
KTmfk, xvii u. 258 Seiten, 91 Bilder, 9 Tab. 2022.  
ISBN 978-3-96147-589-6.

**Band 409: Stefan Götz**  
Frühzeitiges konstruktionsbegleitendes Toleranzmanagement  
KTmfk, xv u. 276 Seiten, 127 Bilder, 13 Tab. 2022.  
ISBN 978-3-96147-593-3.

**Band 410: Markus Hubert**  
Einsatzpotenziale der Rotationsschneidtechnologie in der Verarbeitung von metallischen Funktionsfolien für mechatronische Produkte  
FAPS, xviii u. 139 Seiten, 86 Bilder, 7 Tab. 2022.  
ISBN 978-3-96147-603-9.

**Band 411: Manfred Vogel**  
Grundlagenuntersuchungen und Erarbeitung einer Methodik zur Herstellung maßgeschneiderter Halbzeuge auf Basis eines neuartigen flexiblen Walzprozesses  
LFT, ix u. 176 Seiten, 61 Bilder, 11 Tab. 2022.  
ISBN 978-3-96147-605-3.

**Band 412: Michael Weigelt**  
Multidimensionale Optionenanalyse alternativer Antriebskonzepte für die individuelle Langstreckenmobilität  
FAPS, xv u. 222 Seiten, 89 Bilder, 38 Tab. 2022.  
ISBN 978-3-96147-607-7.

**Band 413: Frank Bodendorf**  
Machine Learning im Cost Engineering des Supply Managements  
FAPS, xiii u. 165 Seiten, 75 Bilder, 13 Tab. 2023.  
ISBN 978-3-96147-609-1.

**Band 414: Maximilian Metzner**  
Planung und Simulation taktiler, intelligenter und kollaborativer Roboterfähigkeiten in der Montage  
FAPS, xix u. 174 Seiten, 72 Bilder, 3 Tab. 2023.  
ISBN 978-3-96147-611-4.

**Band 415: Tina Buker**  
Ein Ansatz zur Reduktion produktinduzierter Nutzerstigmatisierung durch Förderung einer gleichermaßen gebrauchstauglichen wie emotionalen Produktgestalt  
KTmfk, x u. 236 Seiten, 54 Bilder, 44 Tab. 2022.  
ISBN 978-3-96147-613-8.

**Band 416: Marlene Kuhn**  
Model-based Traceability System Development for Complex Manufacturing Applying Blockchain and Graphs  
FAPS, xv u. 167 Seiten, 63 Bilder, 10 Tab. 2022.  
ISBN 978-3-96147-615-2.

**Band 417: Benjamin Lengfelder**  
Remote photoacoustic sensing using speckle-analysis for biomedical imaging  
LPT, xv u. 124 Seiten, 86 Bilder, 10 Tab. 2023.  
ISBN 978-3-96147-617-6.

**Band 418: Benjamin Pohrer**  
Analyse des Zusammenhangs zwischen dem tribochemischen Aufbau von Grenzschichten und der Ausbildung von White Etching Crack-Schäden  
KTmfk, xv u. 258 Seiten, 103 Bilder, 10 Tab. 2023.  
ISBN 978-3-96147-621-3.

**Band 419: Matthias Friedlein**  
Zuverlässigkeitsmethoden zur Beschleunigung von Qualifizierungsuntersuchungen für Steckkontakte  
FAPS, xxv u. 162 Seiten, 98 Bilder, 7 Tab. 2023.  
ISBN 978-3-96147-625-1.

**Band 420: Thomas Stoll**  
Laser Powder Bed Fusion von Kupfer auf Aluminiumoxid-Keramiken  
FAPS, xxvii u. 236 Seiten, 103 Bilder, 11 Tab. 2023.  
ISBN 978-3-96147-631-2.

**Band 421: Eric Eschner**  
Relation of Particle Motion and Process Zone Formation as a Basis for Sensing Approaches within PBF-LB/M  
LPT, xiv u. 143 Seiten, 87 Bilder, 0 Tab. 2023.  
ISBN 978-3-96147-633-6.

**Band 422: Fanuel Mehari**  
Laser-induced Breakdown Spectroscopy (LIBS) as a diagnostics tool for biological tissue analysis.  
LPT, xv u. 145 Seiten, 68 Bilder, 12 Tab. 2023.  
ISBN 978-3-96147-641-1.

**Band 423: Uwe Leicht**  
Ultraschallüberlagertes Umformen und Verstemmen von Stahlwerkstoffen  
LFT, xi u. 165 Seiten, 65 Bilder, 6 Tab. 2023.  
ISBN 978-3-96147-643-5.

**Band 424: Thomas Braun**  
Potenzialanalyse der plasmabasierten, strukturierten Metallisierung thermoaktiver Oberflächen im industriellen Hausbau  
FAPS, xvii u. 152 Seiten, 72 Bilder, 11 Tab. 2023.  
ISBN 978-3-96147-653-4.

**Band 425: Reinhardt Seidel**  
Modellbasierte Optimierung des Selektivwellenlötprozesses  
FAPS, xxii u. 167 Seiten, 73 Bilder, 23 Tab. 2023.  
ISBN: 978-3-96147-651-0.

**Band 426: Matthias Lenzen**  
Maßgeschneiderte Werkstoffcharakterisierung für die numerische Auslegung von Blechumformprozessen  
LFT, xi u. 187 Seiten, 77 Bilder, 13 Tab. 2023.  
ISBN: 978-3-96147-663-3.

**Band 427: Matthias Graser**  
Analyse lokaler Kurzzeitwärmebehandlungsmethoden zur Verbesserung des Umformverhaltens und der Bauteileigenschaften von Aluminiumstrangpresshohlprofilen  
LFT, xi u. 169 Seiten, 81 Bilder, 1 Tab. 2023.  
ISBN: 978-3-96147-666-4.

**Band 428: Markus Lieret**

Sicheres autonomes Flugroboter-system für den Einsatz im Produktions- und Logistikumfeld  
FAPS, xix u. 198 Seiten, 54 Bilder, 7 Tab. 2023.  
ISBN 978-3-96147-668-8.

**Band 429: Petar Vukovic**

Simulation komplexer Kommunikationssysteme in der Fertigungs-automatisierung  
FAPS, xiv u. 163 Seiten, 57 Bilder, 21 Tab. 2023.  
ISBN 978-3-96147-673-2.

**Band 430: Fabian Knieps**

Finite Elemente Simulation dünns-ter Verpackungsstähle: Entwick- lung einer geeigneten Charakteri- sierungs- und Validierungsstrate- gie  
LFT, xix, 189 Seiten, 122 Bilder, 17 Tab. 2023.  
ISBN 978-3-96147-689-3

**Band 431: Julian Seßner**

Multimodale Bildsegmentierung gering strukturierter Umgebungen für die Navigation am Beispiel eines Assistenzsystems für sehbe- einträchtige Personen  
FAPS, xxv, 203 Seiten, 57 Bilder, 25 Tab. 2023.  
ISBN 978-3-96147-697-8

**Band 432: Benjamin Samuel Lutz**

Smart Manufacturing System for Process Optimization Regarding Deviations among Material Batches  
FAPS, xix, 208 Seiten, 77 Bilder, 14 Tab. 2023.  
ISBN 978-3-96147-703-6

**Band 433: Michael Jüttner**

Bewertung von Kantenpressungen auf Basis von Simulationen mehr- fach überrollter elasto-plastischer Kontakte  
KTmfk, xii, 162 Seiten, 59 Bilder, 7 Tab. 2024.  
ISBN 978-3-96147-713-5.

**Band 434: Sebastian Wiesener**

Untersuchungen zur Stofffluss- steuerung beim Fügen durch Um- formen von hochfesten Alumini- umlegierungen mittels lokaler Kurzzeitwärmebehandlung  
LFT, xii u. 197 Seiten, 81 Bilder, 19 Tab. 2024.  
ISBN 978-3-96147-715-9.

**Band 435: Clara-Maria Kuball**

Grundlegende Untersuchungen zur umformtechnischen Herstel- lung von Halbhohlstanzen aus hochverfestigenden Werkstoffen  
LFT, viii u. 180 Seiten, 64 Bilder, 13 Tab. 2024.  
ISBN 978-3-96147-717-3.

**Band 436: Martin Roth**

Sampling-based Tolerance-Cost Optimization: The Key to Optimal Tolerance Allocation  
KTmfk, xxxvii u. 337 Seiten, 97 Bilder, 56 Tab. 2024.  
ISBN 978-3-96147-719-7.

**Band 437: Stephan Schirdewahn**

Verbesserung des tribologischen Einsatzverhaltens im Presshärte- prozess durch Verwendung maß- geschneiderter laserimplantierter Werkzeuge  
LFT, viii u. 177 Seiten, 63 Bilder, 7 Tab. 2024.  
ISBN 978-3-96147-721-0.

**Band 438: Andreas Rohrmoser**

Erarbeitung eines grundlegenden Verständnisses zum Fließpressen betriebsangepasster Verzahnungen für den Einsatz in der Materialpaa- rung Metall-Kunststoff  
LFT, x u. 166 Seiten, 94 Bilder, 6 Tab. 2024.  
ISBN: 978-3-96147-723-4.

**Band 439: Andreas Selmaier**

DMAICS-Zyklus zur Digitalisie- rung in produzierenden Unternehmen  
FAPS, xv u. 185 Seiten, 73 Bilder, 19 Tab. 2024.  
ISBN: 978-3-96147-733-3.

**Band 440: Thomas Kistner**

Entwicklung von Modellen der Oberflächenform für die Messunsicherheitsbestimmung von taktilen Koordinatenmessungen durch Si- mulation  
FMT, xiii u. 130 Seiten, 64 Bilder, 9 Tab. 2024.  
ISBN 978-3-96147-735-7.

**Band 441: Fabian Dworschak**

Selbstverstärkendes Lernen als Beitrag zur Automatisierung der Anpassungskonstruktion  
KTmfk, x, 205 Seiten, 87 Bilder, 16 Tab. 2024.  
ISBN 978-3-96147-739-5.

**Band 442: Martin Killmann**

Vorspannung und Ermüdung von Kaltmassivumformwerkzeugen für unrunde Bauteilgeometrien  
LFT, ix u. 160 Seiten, 85 Bilder, 6 Tab. 2024.  
ISBN 978-3-96147-741-8.

**Band 443: Ann-Kathrin Wiermann**

Beitrag zur Messunsicherheitser- mittlung für die Messung großer Zahnräder zur Erweiterung des vir- tuellen Koordinatenmessgerätes der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt  
FMT, xxiv u. 133 Seiten, 41 Bilder, 22 Tab. 2024.  
ISBN 978-3-96147-747-0.

# Abstract

In this work, influences on the measurement process regarding a large gear are investigated. Therefore the large coordinate measuring machine (CMM) of the German national metrology institute (Physikalisch-Technische Bundesanstalt) and a large gear ring measurement standard are used. The examinations lead to the detection and definition of present influences on the measurement process and the determination of resulting measurement deviations and uncertainties. This enables to model the influences so that it can be considered in the virtual CMM, a software tool named *VCMM*. This tool represents the whole measurement process in mathematical functions to determine virtual measurement samples of the complex measurement process of a specific measurement task. By means of one actual measurement and a major amount of simulations the regarding measurement uncertainty can statistically be determined. The software tool is used by CMM with measurement volumes up to  $1 \text{ m}^3$ . Investigations of specific influences for a large dimensional measurement task are used for the adaption and expansion of the models implemented in the *VCMM* so that the virtual measurement process can be used for measurements at the large CMM.

For modelling the relations it is necessary to know the impact of the machine- and workpiece-specific influences on measurement results in detail. Therefore, systematic and random shares of the measurement deviations can be identified. In the scope of this work, firstly, the measuring machine regarding the parameters of a geometrical definition of the large CMM's structure is considered. The strategy of the determination of the statical geometrical deviations of the bridge-type CMM and the influences on this determination method are investigated. Furthermore, the thermal influences on the machine are simulated and discussed. Lastly, the focus for the considerations of the workpiece lies on the behaviour of the large ring gear measurement standard due to thermal and gravitational influences. The impact of different temperatures and clamping situations regarding the deformations of the workpiece are investigated theoretically and practically.

The findings on the behaviour of the machine geometry and the behaviour of the workpiece provide an important contribution to the extension of the virtual measurement process of a large CMM and the determination of the resulting measurement uncertainty for measurements of large workpieces.