

Messsystemanalyse der Computertomografie zur geometrischen Bestimmung eines Kunststoffscharniers

M. Eng. Dominik Leuwer, dleuwer@outlook.com, M. Eng. Madlen Himmel-Saar, Hochschule Schmalkalden, m.himmel-saar@hs-sm.de, Prof. Dr.-Ing. Stefan Roth, Hochschule Schmalkalden, s.roth@hs-sm.de

Zusammenfassung:

Die Messsystemanalyse (MSA) ist eine systematische Vorgehensweise zur Bestimmung der Ungenauigkeit von Messsystemen. Nacheinander werden die Kennwerte für die Auflösung, die Wiederholgenauigkeit, die Gesamtstreuung, die Linearität und die zeitliche Stabilität ermittelt. In diesem Beitrag wird die MSA bei der Computertomografie (CT) am Beispiel eines Kunststoffscharniers angewendet. Als Ergebnis der Untersuchung wird für den verwendeten Demonstrator eine Ungenauigkeit von $\pm 1,455 \mu\text{m}$ berechnet.

Stichworte: Computertomografie, Messsystemanalyse, Messgenauigkeit, Standardabweichung, Messsystemstreuung

1 Einleitung

Für die Sicherstellung der Funktionsweise einer Baugruppe müssen die einzelnen Bauteile maßliche Anforderungen erfüllen. Funktionskritische Bauteile, die sehr genau gefertigt werden müssen, benötigen kleine Toleranzen, die wiederum ein sehr genaues Messverfahren zum Nachweis der Größenbeständigkeit erforderlich machen. Die Computertomografie (CT) ist ein solches Messverfahren. Eine systematische Vorgehensweise zur Bestimmung der Ungenauigkeit von Messsystemen ist die Messsystemanalyse (MSA). Die MSA besteht aus fünf Schritten, die durchgeführt werden, um die Ungenauigkeit systematisch zu bestimmen. [1] Der Leitfaden im Bosch Heft 10 zeigt ein standardisiertes Vorgehen, das in der Praxis gut angewendet werden kann. [2] Das Vorgehen wird durch weitere Kennwerte aus dem Bereich der Messtechnik ergänzt und in diesem Beitrag für die geometrische Messung eines Kunststoffscharniers mit der CT angewendet.

2 Verfahren und Methode

2.1 Computertomografie

Für die geometrische Bestimmung von Bauteilen können verschiedene Messverfahren angewendet werden. In diesem Beitrag wird die CT betrachtet, die den tomografischen Messverfahren zuzuordnen ist. Kennzeichnend für tomografische Messverfahren ist der Einsatz einer Strahlung, die das Bauteil durchleuchtet und eine oder mehrere Projektionen des Bauteils erzeugt. [3] Die CT ist ein sehr genaues zerstörungsfreies Messverfahren. Im Vergleich zu anderen Messverfahren hat die CT den Vorteil, dass auch innenliegende Bauteilgeometrien oder Fehlstellen im Material erfasst werden können. [4]

Die grundlegenden Bestandteile eines CT sind in der Abbildung 1 dargestellt. Eine Strahlenquelle (1) erzeugt die zur Durchleuchtung des Bauteils notwendige Röntgenstrahlung. Mit einem Filterwechsler (2) können verschiedene Filter zur Bildverbesserung gewählt

werden. Der Drehtisch (3) ist Bestandteil einer Positioniereinheit mit drei translatorischen und einem rotatorischen Freiheitsgrad. Durch diese Freiheitsgrade kann eine vollumfängliche Aufnahme des in der Werkstückaufnahme (4) fixierten Werkstücks (5), auch Demonstrator genannt, erzeugt werden. Die Projektionen des Werkstücks werden auf dem Detektor (6) aufgezeichnet. Die Bestandteile befinden sich innerhalb einer Strahlenschutzkabine. [5]

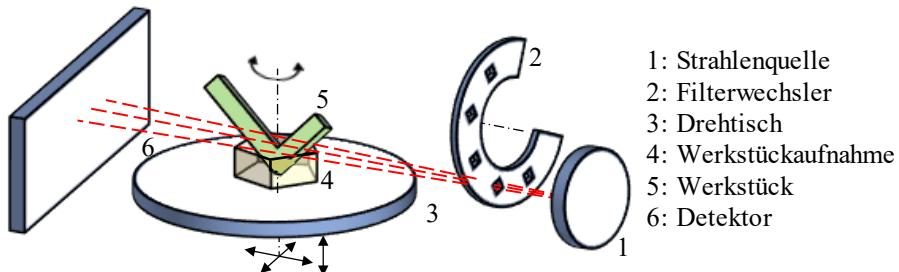


Abbildung 1: Bestandteile eines CT nach [5]

Der Ablauf einer CT-Messung lässt sich in drei Phasen unterteilen: Einrichten, Datenerfassung und Auswertung. Beim Einrichten wird das Werkstück positioniert, ein Filter ausgewählt und die Spannung und der Strom für die Erzeugung der Röntgenstrahlung eingestellt. Darüber hinaus wird eine Integrationszeit beim Detektor für die Bildrekonstruktion ausgewählt. Zudem kann ein Betriebsmodus eingestellt werden, der sich im Wesentlichen zwischen einer kontinuierlichen Bauteildrehung und dem Anhalten des Drehellers zur Projektionserstellung unterscheidet. Für die Eingrenzung der auszuwertenden Geometrie kann anschließend der zu rekonstruierende Bereich auf dem Detektor eingestellt werden. Darauffolgend wird die Datenerfassung gestartet, wodurch die Röntgenstrahlung erzeugt wird. Durch Reflektion und Absorption der Strahlen am Werkstück trifft die Reststrahlung mit verschiedenen Energiegehalten auf den Detektor. Die so erfassten Grauwerte werden für jede Projektion im Detektor gespeichert. Durch die Drehung des Bauteils werden die 2D-Projektionen mittels Algorithmen zu einer 3D-Geometrie, auch Voxelmodell genannt, zusammengefügt. Abschließend wird mittels geeigneter Software die Auswertung des Voxelmodells durchgeführt. Dafür wird aus dem Voxelmodell durch die so genannte Polygonisierung ein messbares Modell erzeugt. [6]

Für die Untersuchungen wird ein Computertomograf ZEISS Metrotom 800 verwendet, der eine Röntgenstrahlung mit einer Spannung von 30 bis 225 kV bei einem Strom von 10 bis 3000 μ A erzeugt. [7]

2.2 Messsystemanalyse

Die MSA wird zur Bestimmung der Ungenauigkeit eines Messsystems verwendet und besteht grundsätzlich aus fünf Schritten, die in der Tabelle 1 aufgeführt sind. [1]

Im ersten Schritt wird die Auflösung des Messsystems bestimmt. Die Auflösung charakterisiert den kleinstmöglichen darstellbaren Unterschied zweier benachbarter Messwerte und wird auch Anzeigegenauigkeit genannt. Bei analogen Anzeigen ist der Wert eindeutig durch die Skala definiert, bei digitalen Anzeigen ist dieser Wert theoretisch unendlich klein und durch die Einstellbarkeit im Messsystem begrenzt. Im Rahmen der MSA ist der

ndc-Faktor (englisch für „number of distinct categories“ [9]), ein Kennwert für die Auflösung des Messsystems, zu bestimmen. Dieser muss nach [1] größer als fünf sein.

Tabelle 1: Bestandteile einer MSA nach [1, 8]

Auflösung	Wiederholgenauigkeit	Gesamtstreuung	Linearität	Zeitliche Stabilität
Anzeigen-/Skalen-differenz, ndc-Faktor	Systematische Abweichungen, ideale Bedingungen	Wiederhol- und Vergleichspräzision, reale Bedingungen	Größen-abhängigkeit	Zeitlicher Verlauf der Messwerte

Die Wiederholgenauigkeit wird im zweiten Schritt der MSA betrachtet, welche die Wiederholbarkeit einer Messung unter idealen Bedingungen überprüft. Das Resultat dieser Untersuchung ist die Identifizierung der systematischen Abweichung des Messsystems. Damit ideale Messbedingungen erzielt werden, werden Variationen des Werkstücks, des Messsystems und dessen Einstellparameter, sowie des Bedieners ausgeschlossen. Die MSA fordert mindestens zehn Messungen für die Bestimmung der Wiederholgenauigkeit, empfiehlt jedoch eine höhere Anzahl von 30 Messungen. Als Kennwert wird die ideale Messgerätestreuung (EV – equipment variation) berechnet. [1] Darüber hinaus werden in diesem Beitrag die Fähigkeitsindizes C_g und C_{gk} nach [10] berechnet.

Im dritten Schritt der MSA werden Messungen unter realen Bedingungen zur Bestimmung der Gesamtstreuung durchgeführt. Dazu werden verschiedene Bauteile (n) von mehreren Bedienern (k) mit einer festgelegten Anzahl Wiederholungen (r) gemessen. Die MSA fordert im Produkt dieser drei Faktoren (n, k, r) eine Mindestgröße von 30. [1, 11] Mit einer Varianzanalyse werden die Kennwerte Gesamtstreuung (TV – total variation), Bedienerstreuung (AV – appraiser variation), Bauteilstreuung (PV – part variation), die Wechselwirkung zwischen Bediener und Bauteil (I_{AP} – interaction appraiser/part) und final die Messsystemstreuung (GRR – gage repeatability & reproducibility) berechnet. [1] In [2] ist die Durchführung der Varianzanalyse nachvollziehbar beschrieben.

Der vierte Bestandteil der MSA ist die Linearitätsanalyse des Messsystems. Dafür wird in der MSA die Verwendung von fünf verschiedenen Bauteilgrößen empfohlen, mindestens jedoch drei Größen gefordert. Damit auch die Variation innerhalb einer Größe berücksichtigt wird, sollten drei Bauteile einer Größe gemessen werden. Jedes dieser Bauteile ist wiederum mindestens zehnmal zu messen. Zur Auswertung werden die Mittelwerte und die systematischen Messabweichungen der Messreihen berechnet. [1] Anschließend werden verschiedene Kriterien zur Bewertung herangezogen. Zunächst wird überprüft, ob die maximale Messabweichung eines jeden Bauteils geringer als ein Zehntel der Zeichnungstoleranz ist. Zudem können für jedes Bauteil die Fähigkeitsindizes berechnet werden. Insofern beide Kriterien erfüllt werden, wird eine grafische Auswertung durchgeführt. [12] Für die grafische Auswertung werden die Messwerte in einem Diagramm in Bezug zu einem Soll-Referenzwert dargestellt und eine Ausgleichsgerade eingefügt. Mit dem Bestimmtheitsmaß R^2 ist die Qualität der Ausgleichsgerade zu überprüfen, ein Grenzwert wird in der MSA nicht angegeben. [1]

Als letzter Schritt wird die zeitliche Stabilität des Messsystems analysiert. Die MSA fordert mindestens fünf Messintervalle. Damit die Streuung der Messungen zu einem Zeitpunkt ebenfalls berücksichtigt wird, sollen mindestens drei Messungen pro Zeitintervall

unter gleichbleibenden Bedingungen durchgeführt werden. Zur Auswertung werden die Messwerte in der zeitlichen Abfolge in einem Diagramm dargestellt. [1, 2] Darüber hinaus können die Eingriffsgrenzen aus den statistischen Kennwerten nach [12] berechnet werden. Die zeitliche Stabilität des Messsystems ist nachgewiesen, wenn sich die Messwerte innerhalb der Eingriffsgrenzen befinden.

Bei den einzelnen Schritten der MSA werden Kennzahlen berechnet, deren prozentuale Größe in Bezug zur Gesamtstreuung TV mit den in der Tabelle 2 dargestellten Grenzwerten verglichen werden. Die jeweiligen Kennzahlen werden im nachfolgenden Kapitel beschrieben. Je nach Ergebnis wird mit dem nächsten Schritt der MSA fortgefahrene oder die MSA unterbrochen und Optimierungsmaßnahmen für das Messsystem definiert. [1]

Tabelle 2: prozentuale Grenzwerte bei der MSA nach [1]

Kennzahlen	Grenzwert	Entscheidung
%EV, %TV,	< 10 %	grundsätzlich akzeptables Messsystem
%AV, %PV,	< 30 %	mit Risikoabschätzung verwendbar
%IAP, %GRR	> 30 %	Messsystem zu ungenau, MSA beendet

3 Durchführung der MSA

3.1 Vorgehensweise

Für die Durchführung der MSA beim CT wird zunächst ein geeigneter Kunststoffdemonstrator ausgewählt. Der Demonstrator muss möglichst genau gefertigt werden, in verschiedenen Größen erhältlich sein und charakteristische Geometrieelemente beinhalten. Es wird ein Normteil eines Kunststoffscharniers (Hersteller Ganter, Art. Nr. GN337.1, Material glasfaserverstärktes Hochleistungspolyamid PA-HP GF, spritzgegossen) mit einer Innenbohrung ausgewählt, welches in der Abbildung 2 in der kleinsten Bauteilgröße dargestellt ist. Damit die Anforderungen der MSA erfüllt werden können, werden drei Bauteilgrößen verwendet (S – Small, M – Medium, L – Large). Die MSA wird für den Bohrungsabstand durchgeführt. Dieser hat für die primär verwendete Größe S ein Nennmaß von 25 mm und eine Toleranz von 0,5 mm. Die weiteren verwendeten Größen haben ein Nennmaß von 30 mm bzw. 36 mm und die gleiche Toleranz. [13] Die angegebene Toleranz ist bei Betrachtung der Allgemeintoleranzen für Kunststoffformteile nach der DIN ISO 20457 für die Größe des Bohrungsabstands mit $\pm 26\mu\text{m}$ (Toleranzgruppe 1) um nahezu Faktor 10 größer, sodass Fertigungsschwankungen stark toleriert werden. [14]

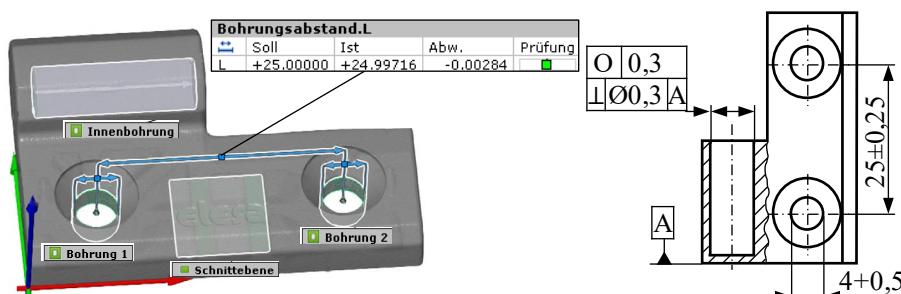


Abbildung 2: Bemaßung und Tolerierung Demonstrator Kunststoffscharnier (rechts) und entsprechende Ansicht in der CT-Auswertesoftware (links)

Der Demonstrator wird bei der CT-Messung zwischen der Röntgenquelle und dem Detektor positioniert. Auf dem Detektor wird während der Durchleuchtung des Demonstrators eine Aufnahme generiert. Durch die Bauteildrehung entsteht eine Vielzahl an Projektionen, die im Gesamten ein Voxelmodell ergeben. Mittels geeigneter Software wird das Voxelmodell anschließend in ein Volumenmodell überführt. Damit dieses auswertbar ist, werden die erforderlichen Formen und Geometrien im CAD in das Modell konstruiert, sowie die zu bewertenden Maße und Zeichnungsvorgaben hinzugefügt.

Der Fokus bei der Durchführung der MSA liegt in dieser Ausarbeitung auf der Auswertung des Bohrungsabstands. Im Rahmen einer Voruntersuchung werden die optimalen Betriebsparameter des CT für die für die Messungen primär verwendete Bauteilgröße S ermittelt. Dazu werden Wiederholmessungen mit unterschiedlichsten Kombinationen der Einstellparameter durchgeführt. Die präzisesten Messergebnisse werden im Demonstrator bei Verwendung einer Spannung von 140 kV, einem Abstand des Demonstrators zur Röntgenquelle mit 275 mm, und einer Detektorintegrationszeit von 276 ms bei kontinuierlicher Bauteildrehung erzielt.

Für den ersten Schritt der MSA, die Bestimmung der Auflösung, wird die Kalibrierungsgenauigkeit aus der Messgerätekalibrierung herangezogen sowie der ndc-Faktor berechnet. Zur Bestimmung der Wiederholgenauigkeit werden 30 Messungen eines Bauteils der Größe S mit den zuvor ermittelten optimalen Einstellparametern durchgeführt, dies entspricht der empfohlenen Messanzahl. Nachfolgend werden drei Bauteile der Größe S von drei Bedienern jeweils viermal gemessen. Das Produkt dieser drei Variablen liegt mit 36 oberhalb der von der MSA geforderten 30 Messungen. Zur Bestimmung der Linearität des Messsystems werden jeweils drei verschiedene Bauteile der drei Bauteilgrößen zehnmal gemessen. Die Ergebnisse werden grafisch ausgewertet und statistische Kennzahlen für die Bewertung werden berechnet. Abschließend werden für die Bestimmung der Langzeitstabilität über den Zeitraum der Ausarbeitung verteilt zu sechs verschiedenen Zeitpunkten jeweils drei Messungen eines Bauteils durchgeführt.

3.2 Ergebnisse und Diskussion

Die ermittelten Kennzahlen zu den fünf Schritten der MSA für den Bohrungsabstand des verwendeten Demonstrators sind in der Tabelle 3 dargestellt und den Grenzwerten gegenübergestellt.

Tabelle 3: Kennzahlen der durchgeführten MSA

Bestandteil MSA	Einheit		Grenzwert	Ergebnis	
Auflösung	AU ndc	μm -	< 50 ≥ 5	$u_{\text{cal}} = 0,87$ 95	✓ ✓
Wiederholgenauigkeit	%EV	-	< 10 %	0,38 %	✓
Gesamtstreuung	%GRR %PV %AV	- - -	< 10 % - -	0,58 % 39,43 % 0,34 %	✓ - -
Linearität	Trendlinie C_g C_{gk}	- - -	Linear $> 1,33$ $> 1,33$	s. Abbildung 3 $C_{g(\min)} = 32,50$ $C_{gk(\min)} = 32,24$	✓ ✓ ✓
Stabilität	UEG OEG	mm mm	> 24,9966 $< 24,9977$	$x_{(\min)} = 24,9969$ $x_{(\max)} = 25,0028$	✓ ✗

Im ersten Schritt der MSA wird die Auflösung (AU) des Messgerätes betrachtet. Das CT besitzt eine digitale Anzeige, die bis zu 100 Nachkommastellen anzeigen kann. Da dieser Anzeigewert nur eine theoretische Genauigkeit der Anzeige beschreibt, wird an dieser Stelle die vom Hersteller angegebene Kalibrierungsgenauigkeit (u_{cal}) von $0,87 \mu\text{m}$ [15] herangezogen. Diese ist kleiner als ein Zehntel der Bauteiltoleranz, sodass das CT grundsätzlich für den gewählten Demonstrator geeignet ist. Zudem ist der im Rahmen der Gesamtstreuung berechnete ndc-Faktor deutlich größer als der geforderte Mindestwert.

Aus den Messungen zur Wiederholgenauigkeit (%EV) unter idealen Bedingungen resultiert eine prozentuale Messgerätestreuung von 0,38%. Die Spannweite der Messungen liegt bei $1,26 \mu\text{m}$ und ist deutlich geringer als die Bauteiltoleranz.

Für die Messungen zur Messsystemstreuung (%GRR) werden drei Bauteile einer Demonstratorgröße von drei Bedienern jeweils viermal im CT gemessen. Die Ergebnisse für diesen Kennwert resultieren aus einer Standardabweichung (GRR) von $0,485 \mu\text{m}$ unter realen, variierenden Messbedingungen. Diese Streuung wird im Rahmen einer generellen Aussage zur Ungenauigkeit des betrachteten CT für das 6σ -Intervall verwendet. Für das Intervall von $\pm 3\sigma$ zum Mittelwert ergibt sich für das verwendete CT eine Ungenauigkeit von $\pm 1,455 \mu\text{m}$. Informativ sind in der Tabelle 3 ebenfalls die Bauteilstreuung (%PV) und Bedienerstreuung (%AV) angegeben, die jedoch nicht als Entscheidungskriterium im Rahmen der MSA bewertet werden. Eine Interaktion zwischen Bauteil und Bediener wurde mit den Vorgaben der Berechnungsvorschrift als insignifikant eliminiert.

Im vierten Schritt werden die Messungen von drei Bauteilgrößen zur Bestimmung der Linearität des CT ausgewertet. Als Kennzahlen werden in der Tabelle 3 zunächst die minimal berechneten Fähigkeitsindizes aufgeführt, die deutlich oberhalb der Grenzwerte liegen. Zudem sind links in der Abbildung 3 die Abweichungen der Einzelmessungen zum Bauteilmittelwert aufgeführt, die eine maximale Spannweite von $1,61 \mu\text{m}$ aufzeigen. Ebenso ist im rechten Teil der Abbildung die von der MSA geforderte grafische Darstellung der verschiedenen Bauteilgrößen zu sehen. Als Referenzwert wird der jeweils kleinste gemessene Wert eines Bauteils herangezogen und die Mittelwerte diesem gegenübergestellt. Die Ausgleichsfunktion lässt sich sehr gut mit einer Geraden beschreiben, wie dies auch das Bestimmtheitsmaß R^2 aufzeigt.

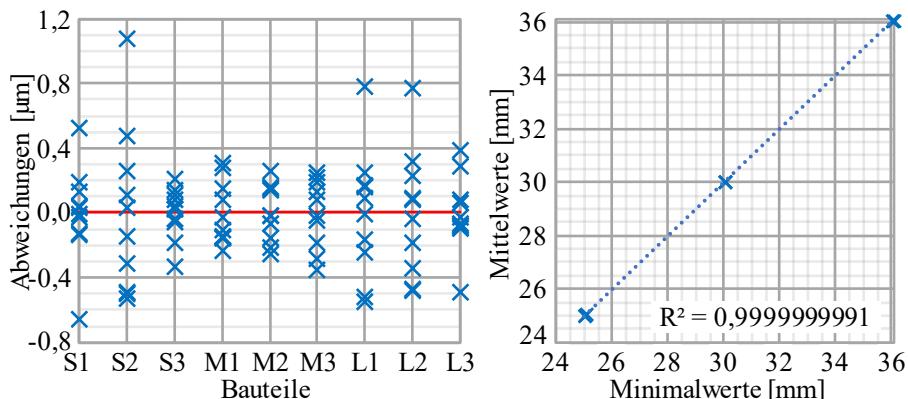


Abbildung 3: Ergebnisse zur Linearität des CT (1-3: Nummer des Demonstrators einer der jeweiligen Größe Small, Medium, Large)

In der Tabelle 3 sind die minimalen und maximalen Messwerte zur zeitlichen Stabilität im Zeitraum Februar bis Mai 2024 dargestellt. Die untere Eingriffsgrenze (UEG) wird nicht unterschritten, während die obere Eingriffsgrenze (OEG) überschritten wird. Dies ist ebenfalls in der grafischen Darstellung in der Abbildung 4 zu sehen.

Im rechten Teil der Abbildung ist zudem der Verlauf der mittleren Außentemperatur nach [16] und eine Trendlinie dargestellt. Diese zeigt einen Anstieg der Außentemperatur im Messzeitraum. Während der Messreihe wurde der Demonstrator nicht explizit konditioniert, sondern lediglich unter konstanten Laborbedingungen gelagert, sodass ein Einfluss aufgrund schwankender Konditionierungszustände auf die Geometrie weitestgehend ausgeschlossen werden kann. Ein Einfluss der Umgebungstemperatur im Labor auf die Bauteilgröße ist aber möglich. Der Hersteller gibt den thermischen Ausdehnungskoeffizienten α_{th} für das Material PA-HP GF von $1,5 \text{ bis } 3,6 \cdot 10^{-5} \text{ 1/K}$ an. Die thermische Dehnung ϵ_{th} berechnet sich aus dem Produkt aus Ausdehnungskoeffizient, der Ausgangslänge (l_0) und dem Temperaturanstieg. [17] Mit dem Mittelwert des Bohrungsabstands der Wiederholgenauigkeit 24,99716 mm (l_0) und der Gesamtspannweite aller Messungen zur Stabilität von $5,89 \mu\text{m}$ (ϵ_{th}) entspricht dies einem äquivalenten, rechnerischen Temperaturanstieg für die Spanne des Ausdehnungskoeffizienten zwischen 6,5 K und 15,7 K. Im Vergleich dazu, steigt die Außentemperatur im Messzeitraum um 8,5 K an. Die Raum- und Bauteiltemperatur wurden während der Messreihe nicht vollständig erfasst – von der Mitte des Messzeitraums bis zum Ende ist die Raumtemperatur jedoch bereits um 2 K angestiegen. Demnach ist davon auszugehen, dass der Temperaturanstieg den Temperaturanstieg im Außenbereich folgt. Die Temperaturabhängigkeit der Messungen ist somit prinzipiell erkläbar, sollte aber in weiterführenden durch eine fortlaufende Erfassung der Labortemperaturen eingehender betrachtet werden.

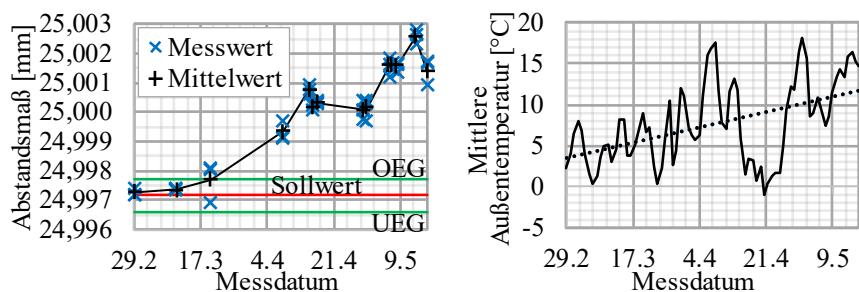


Abbildung 4: Messergebnisse und Analyse der Langzeitmessungen

4 Zusammenfassung und Ausblick

Dieser Beitrag zeigt die Anwendung der MSA am Beispiel der Messung des Kunststoffscharniers mit einem CT. Die MSA besteht aus fünf Bestandteilen: Auflösung, Wiederholgenauigkeit, Gesamtstreuung, Linearität und Stabilität. Für das verwendete CT kann eine grundsätzliche Eignung zur Messung des Kunststoffscharniers festgestellt werden. Für das Intervall von $\pm 3\sigma$ zum Mittelwert resultiert aus den durchgeföhrten Messungen eine Ungenauigkeit von $\pm 1,455 \mu\text{m}$.

In den Messungen zur Stabilität wird ein Zusammenhang zwischen der Temperatur und der Größe des Demonstrators ersichtlich. Um diesen Zusammenhang näher zu analysieren, sollte eine temperaturbezogene Messreihe durchgeführt werden.

Literatur

- [1] Automotive Industry Action Group; Measurement System Analysis: Reference Manual, 2010, <https://www.aiag.org/training-and-resources/manuals/details/MSA-4>
- [2] Robert Bosch GmbH: Qualitätsmanagement in der Bosch-Gruppe – Heft 10: Fähigkeit von Mess- und Prüfprozessen, 2019, https://assets.bosch.com/media/global/bosch_group/purchasing_and_logistics/information_for_business_partners/downloads/quality_docs/general_regulations/bosch_publications/booklet-no10-faehigkeit-von-mess-und-pruefprozessen_DE.pdf
- [3] Norm VDI/VDE 2630-1.4: Computertomografie in der dimensionellen Messtechnik – Blatt 1.4: Gegenüberstellung verschiedener dimensioneller Messverfahren, 2010, <https://www.dinmedia.de/de/technische-regel/vdi-vde-2630-blatt-1-4/125250205>
- [4] Keferstein, C.P.; Marxer, M.: Fertigungsmesstechnik: Praxisorientierte Grundlagen, moderne Messverfahren, Springer Vieweg Verlag, 2015, <https://doi.org/10.1007/978-3-8348-2583-4>
- [5] Norm VDI/VDE 2630-1.1: Computertomografie in der dimensionellen Messtechnik – Blatt 1.1: Grundlagen und Definition, 2016, <https://www.dinmedia.de/de/technische-regel/vdi-vde-2630-blatt-1-1/252837007>
- [6] Carl Zeiss Industrielle Messtechnik GmbH: METROTOM OS – Bediensoftware für Computertomographen, 2021
- [7] Carl Zeiss Industrielle Messtechnik GmbH: METROTOM 800 G3 Computertomograf 220kV / 500W / MF – Betriebsanleitung, 2021
- [8] Winz, G.: Einführung in das Qualitätsmanagement: Qualitätsmethoden, Projektplanung, Kommunikation, Carl Hanser Verlag, 2023, <https://doi.org/10.3139/9783446477391.fm>
- [9] Pfeifer, T.; Schmitt, R.: Masing Handbuch Qualitätsmanagement, Carl Hanser Verlag, 2021, <https://doi.org/10.3139/9783446466210>
- [10] Kistner, A.; Schäfer, B.: Prüfmittelmanagement, Carl Hanser Verlag, 2015, <https://doi.org/10.3139/9783446442641>
- [11] Wälder, K.; Wälder, O.: Statistische Methoden der Qualitätssicherung: Praktische Anwendung mit MINITAB und JMP, Carl Hanser Verlag, 2013, <https://doi.org/10.3139/9783446436688.fm>
- [12] Dietrich, E., Conrad, S.: Eignungsnachweis von Messsystemen, Carl Hanser Verlag, 2015, <https://doi.org/10.3139/9783446443785.fm>
- [13] Ganter Norm: Normelemente Katalog, Otto Ganter GmbH, 2021, <https://www.ganternorm.com/de/service/downloads/kataloge>
- [14] Norm DIN ISO 20457: Kunststoff-Normteile – Toleranzen und Abnahmeverbedingungen, 2021, <https://www.dinmedia.de/de/norm/din-iso-20457/339198594>

- [15] Carl Zeiss Industrielle Messtechnik GmbH: Kalibrierschein METROTOM 800 G3 – Computertomograf Hochschule Schmalkalden, 2024
- [16] Wetter.com GmbH: Wettermöglichkeit der Region Schmalkalden – Daten der Station Kleiner Inselsberg, 2024, https://www.wetter.com/wetter_aktuell/rueckblick/deutschland/schmalkalden/DE0009539.html?sid=M620&timeframe=1y
- [17] Cerbe, G., Wilhelms, G.: Technische Thermodynamik, Hanser Verlag, 2013, <https://www.hanser-fachbuch.de/fachbuch/artikel/9783446465190>