

Handlungsempfehlungen für die Produktentwicklung nicht-idealer bewegter technischer Systeme

Michael Walter und Sandro Wartzack
*Lehrstuhl für Konstruktionstechnik
Universität Erlangen-Nürnberg*

The success of a product's development is essentially affected by its functionality. So the product developer has to ensure the functionality as early as possible. In the case of a non-ideal system a tolerance analysis is performed to analyze the effect of deviations, deformations etc. on a functional key characteristic. However, the product developer has to draw the right conclusions based on the results of the tolerance analysis. In this paper an approach (using Taguchi's quality loss function) is presented that enables the product developer to analyze these results and to deduce appropriate measures to ensure the functionality by achieving a more robust design.

1 Einleitung

Die Sicherstellung der Funktionsfähigkeit eines Produktes als oberstes Kriterium der Produktentwicklung stellt den Produktentwickler vor die Aufgabe, sämtliche Einflüsse auf diese bereits frühzeitig im Produktentwicklungsprozess zu berücksichtigen. Hierbei steht ihm mit der rechnerunterstützten Toleranzanalyse ein Werkzeug zur Verfügung, um gezielt die Auswirkungen auftretender geometrischer Abweichungen der Einzelbauteile auf die Funktionsfähigkeit des Produktes zu ermitteln. Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse können somit Maßnahmen zum Erreichen bzw. zur verbesserten Sicherstellung der Funktionsfähigkeit (Robustheit) abgeleitet und ergriffen werden.

Jedoch haben neben den geometrischen Bauteilabweichungen in Maß, Form, Lage und Oberfläche auch weitere Effekte Einfluss auf die Funktionserfüllung eines Produktes. Die Toleranzanalyse muss somit neben den bereits genannten geometrischen Abweichungen auch den Einfluss weiterer Effekte, wie beispielsweise der elastischen Bauteilverformung, in ihre die Funktionsbetrachtungen miteinbeziehen.

Im Folgenden soll der Fokus auf der Toleranzanalyse bewegter technischer Systeme liegen. Diese führen auf Grund ihrer Zeitabhängigkeit in ihrem Bewegungsverhalten zu ständigen Änderungen im Einfluss der genannten Abweichungen und Effekte auf die Funktionsfähigkeit. Mit dem Ziel, auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse der Toleranzanalyse eine Systemoptimierung zu erreichen, gilt es den Produktentwickler anhand situationsspezifischer Handlungsempfehlungen geeignet zu unterstützen.

Im Rahmen dieses Beitrags wird hierfür zunächst eine Klassifizierung möglicher Abweichungen des bewegten Systems von dessen Soll-Geometrie, entsprechend ihrer Auswirkungen auf ein definiertes funktionskritisches Maß, vorgenommen. Auf Basis dieser Klassifizierung wird anschließend eine Vorgehensweise zur Ableitung von Handlungsempfehlungen vorgestellt. Diese Handlungsempfehlungen ermöglichen, basierend auf den Ergebnissen einer vorhergehenden Toleranzanalyse, eine Optimierung der Systemdefinition hinsichtlich der Funktionserfüllung des bewegten Systems. Die praktische Anwendung der Vorgehensweise wird in zwei Beispielszenarien anhand des Kurbeltriebs eines 4-Takt-Verbrennungsmotors aufgezeigt. Der Beitrag schließt mit einer Zusammenfassung und nennt zukünftige Forschungstätigkeiten im Rahmen des Toleranzmanagements bewegter technischer Systeme.

2 Klassifizierung möglicher Abweichungen

Die Klassifizierung der Abweichungen, welchen die Komponenten eines bewegten technischen Systems unterliegen, erfordert zunächst eine genaue Betrachtung ihrer Ursachen sowie der Auswirkungen auf ein – im Rahmen der Toleranzanalyse definiertes – funktionsrelevantes Maß. [1] unterteilt die Abweichungen, die aus der Fertigung resultieren, bezüglich der Zeit, ihres Verhaltens (Zufälligkeit), der Ursache sowie deren Einfluss auf die Geometrie. Diese Einteilung berücksichtigt jedoch nur fertigungsbedingte Abweichungen. Abweichungen, die aus dem Betrieb des Systems resultieren, können jedoch ebenfalls entsprechend dieser Kriterien charakterisiert werden.

Hierbei lässt sich sagen, dass reine Fertigungsabweichungen als statische, also zeitunabhängige Größen verstanden werden können. Hingegen unterlie-

gen betriebsbedingte Abweichungen (wie beispielsweise strukturmechanische Effekte) einer zeitlichen Abhängigkeit vom vorliegenden Betriebszustand (dynamisches Verhalten der Abweichungen). Weiterhin zeigen Fertigungsabweichungen ein statistisches Verhalten, d.h. sie unterliegen in ihren Ausprägungen einer Streuung. Die betriebsbedingten Abweichungen resultieren hingegen aus dem Betriebsverhalten und sind somit deterministischer Natur. Die Auswirkungen der möglichen Abweichungen auf ein funktionsrelevantes Maß zeigen sich bei Betrachtung des Verlaufs des Funktionsmaßes über die Zeit (Bild 1). Während die streuenden Fertigungsabweichungen ebenso zu einer Streuung des Funktionsmaßes führen, resultiert aus einer deterministischen betriebsbedingten Abweichung eine Verschiebung (die sog. Mittelwertverschiebung) der vorliegenden Häufigkeitsverteilung des Funktionsmaßes aus der Nominallage. Tabelle 1 stellt die Klassifizierung der Abweichungen eines bewegten technischen Systems nochmals zusammen. [2]

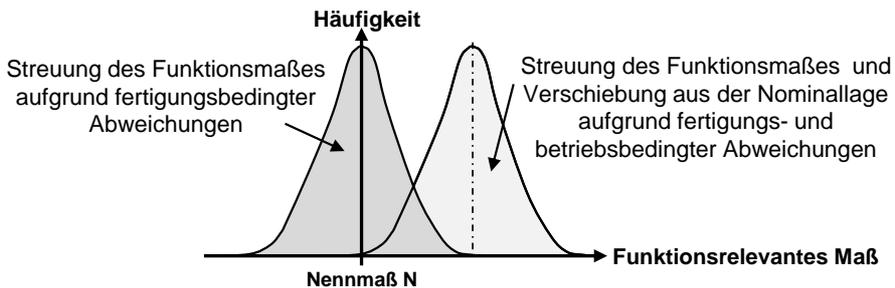


Bild 1: Auswirkungen der unterschiedlichen Abweichungen auf ein funktionsrelevantes Maß zu unterschiedlichen Zeitpunkten

Tabelle 1: Klassifizierung möglicher Abweichungen bewegter Systeme

| Art / Ursache der Abweichungen | Zeit | Zufälligkeit | Auswirkungen auf ein funktionsrelevantes Maß |
|---------------------------------------|---------------------------------|---------------------|---|
| Fertigungsbedingt | Zeitunabhängig (quasi-statisch) | Statisch | Streuung |
| Betriebsbedingt | Zeitabhängig (dynamisch) | Deterministisch | Verschiebung aus der Nominallage |

3 Ableiten des Handlungsbedarfs

Die Toleranzanalyse eines abweichungsbehafteten, bewegten technischen Systems nach [2] ermöglicht die Bestimmung des zeitlichen Verlaufs eines funktionsrelevanten Maßes (sog. Schließmaß) unter Berücksichtigung tolerierter Fertigungsabweichungen sowie betriebsbedingter Abweichungen. Ferner kann mittels einer Sensitivitätsanalyse (auch als Beitragsleisteranalyse bezeichnet) der prozentuale Anteil der Streuungen der jeweiligen Fertigungsabweichungen zur Streuung des funktionsrelevanten Maßes ermittelt werden [3]. Gleiches ist für die Beitragsleister (betriebsbedingte Abweichungen) zu einer möglichen Mittelwertverschiebung des funktionsrelevanten Maßes möglich [4]. Der Produktentwickler hat somit die Möglichkeit ein bestehendes bewegtes System auf Basis der getroffenen Systemdefinition hinsichtlich der Funktionserfüllung zu analysieren.

Jedoch bleibt die Frage unbeantwortet, wie der Produktentwickler auf Basis der gewonnenen Ergebnisse notwendige Änderungen an der Systemdefinition oder mögliche Maßnahmen zur Optimierung des Systems ableiten und umsetzen kann. Somit besteht die Notwendigkeit, den Produktentwickler sowohl bei der Beurteilung der gewonnenen Ergebnisse, als auch bei der Ableitung geeigneter Handlungsempfehlungen zu unterstützen.

4 Vorgehensweise zur Systemoptimierung

Die gezielte Manipulation der Systemdefinition mit dem Ziel einer Optimierung des Systems erfordert das strukturierte und systematische Vorgehen des Produktentwicklers. Auf Basis der Ergebnisse der vorhergehenden Toleranzanalyse müssen zunächst die Zeitpunkte des Schließmaßverlaufs ermittelt werden, an denen das Schließmaß aus den Spezifikationsgrenzen läuft und somit die Funktionsfähigkeit des technischen Systems nicht mehr gegeben ist. Eine Analyse der jeweils vorliegenden Schließmaßverteilung ermöglicht die Identifizierung der verursachenden Abweichungsart (fertigungs- und/oder betriebsbedingt). Mit Hilfe dieser Erkenntnis können im Folgenden gezielt Handlungsempfehlungen gewählt und unter Berücksichtigung der Beitragsleister zur Streuung und Mittelwertverschiebung des funktionsrelevanten Maßes angewendet werden.

4.1 Analyse der Schließmaßverteilung zu kritischen Zeitpunkten

Wie bereits in Bild 1 dargestellt, wirken sich fertigungsbedingte und betriebsbedingte Abweichungen unterschiedlich auf ein funktionsrelevantes Maß eines bewegten Systems aus. Um dennoch gezielt Maßnahmen zur Optimie-

rung des Systems zu ergreifen, ist zunächst die eindeutige Identifikation der (zu den kritischen Zeitpunkten) vorherrschenden Schließmaßverteilung notwendig. Hierzu soll im Folgenden ein neuer Ansatz vorgestellt werden, der mit Hilfe der Verlustfunktion nach Taguchi eine Identifikation der Abweichungen ermöglicht, die zu einem Überschreiten der Spezifikationsgrenzen führen.

[5] besagt, dass die Abweichung eines Funktionsmaßes von dessen nominalem Sollwert bereits mit einem Qualitätsverlust einhergeht, obwohl sich dieses noch innerhalb der Spezifikationsgrenzen bewegt. Somit weicht Taguchi von der herkömmlichen Auffassung des Toleranzbegriffs und dem reinen Gut/Schlecht-Denken ab und erweitert die Forderung der Einhaltung der Spezifikationsgrenzen um das Bestreben zum Sollwert. Die Verlustfunktion

$$L(Y)=z(Y-N)^2 \tag{GI. 1}$$

beschreibt diese Denkweise [5]. Hierbei beschreibt z den Verlustkoeffizienten (z.B. in €/Teil), Y das funktionsrelevante Maß bzw. Schließmaß (kurz: SM) und N das Nennmaß. Bild 2 zeigt mögliche Schließmaßverteilungen zu zwei funktionskritischen Zeitpunkten und die Verlustfunktion L(SM) nach Gl.1.

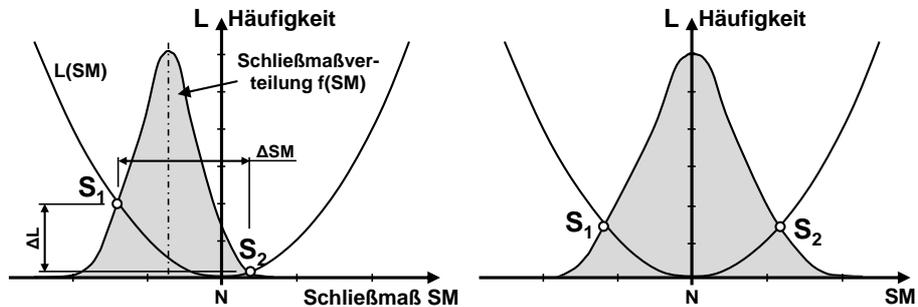


Bild 2: Mögliche Schließmaßverteilungen f(SM) zu funktionskritischen Zeitpunkten sowie Verlustfunktion L(SM) nach Taguchi

Der Ansatz zur Identifikation der ursächlichen Abweichungen basiert auf der Bestimmung der Schnittpunkte S₁ und S₂ zwischen der Verlustfunktion L(SM) und der Funktion f(SM), welche die Häufigkeitsverteilung des Schließmaßes beschreibt. Als Analyse Kriterien dienen im Folgenden der horizontale (ΔSM) und vertikale Abstand (ΔL) der beiden Schnittpunkte:

$$\Delta SM=SM(S_2)-SM(S_1) \tag{GI. 2}$$

$$\Delta L = L(S_1) - L(S_2)$$

Gl. 3

Der somit aufgespannte zweidimensionale Parameterraum kann nun zur Beurteilung der vorliegenden Schließmaßsituation herangezogen werden. Entsprechend der Denkweise nach Taguchi sind somit möglichst minimale Werte für ΔL und ΔSM anzustreben. Bild 3 zeigt den Parameterraum und kennzeichnet den Punkt P (0/0) der optimalen Schließmaßsituation.

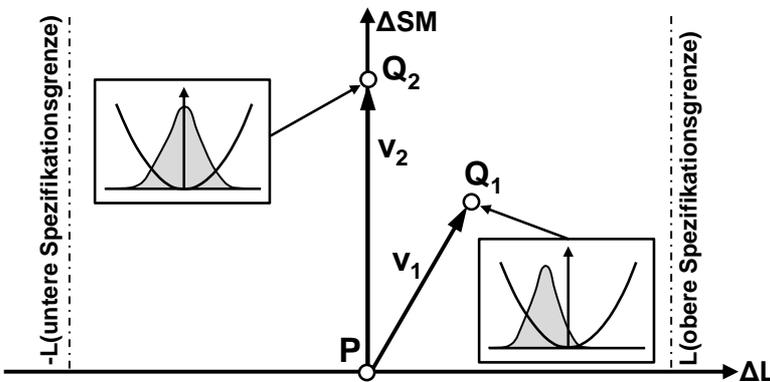


Bild 3: Parameterraum (ΔSM über ΔL) zur Beurteilung der vorliegenden Schließmaßverteilung zu kritischen Zeitpunkten

4.2 Identifikation der Abweichungsarten

Die endliche Genauigkeit von Fertigungsprozessen verhindert die Erreichung des optimalen Punktes P. Jeder Schließmaßsituation kann jedoch ein Punkt Q im Parameterraum zugeordnet werden.

In der Regel ist eine Schließmaßverteilung zu erwarten, die sowohl aus fertigungs- als auch aus betriebsbedingten Abweichungen resultiert. Eine Gewichtung des Beitrags dieser Abweichungen zur Abweichung des Schließmaßes vom Sollwert ist somit für die gezielte Ergreifung von Handlungsempfehlungen zwingend von Nöten. Hierzu wird zwischen den Punkten P und Q des Parameterraumes ein Vektor v definiert. Der Quotient V (Gl. 4) aus der vertikalen (ΔSM) und horizontalen Komponente (ΔL) des Vektors setzt somit die fertigungs- und die betriebsbedingten Abweichungen ins Verhältnis.

$$V = \Delta SM / \Delta L$$

Gl. 4

4.3 Ableiten geeigneter Handlungsempfehlungen

Die fertigungsbedingten und betriebsbedingten Abweichungen können anhand der statistischen Beitragsleister und der Beitragsleister zur Mittelwertverschiebung auf die einzelnen Beiträge aller auftretenden Einzelabweichungen heruntergebrochen werden. Somit ist fortan die eindeutige Beurteilung des quantitativen Beitrags jeder einzelnen fertigungs- und betriebsbedingten Abweichung zur gegebenen Schließmaßverteilung möglich. Die Auswahl geeigneter Handlungsempfehlungen, mit dem Ziel der Systemoptimierung, kann somit sinnvoll erfolgen.

Mit zunehmendem Beitragsleister-Wert ist eine Reduzierung des Einflusses der jeweiligen Abweichung zielführend. Im Fall der fertigungsbedingten Abweichungen kann dies durch höhere Qualitätsanforderungen an die Fertigung realisiert werden. Hierbei sind u.a. die Einengung vergebener Toleranzen, die gezielte Änderung der auftretenden Häufigkeitsverteilungen als auch die Forderung nach niedrigeren Ausschussquoten im Rahmen der Einzelteilfertigung zu nennen. Hingegen bietet ein vergleichsweise geringer Beitragsleister-Wert Potentiale zur Kostenreduzierung sowie zur Vereinfachung von Fertigung und Montage durch geringere Qualitätsanforderungen wie beispielsweise anhand der Aufweitung bzw. der geringeren Limitierung auftretender Abweichungen.

Im Unterschied zu fertigungsbedingten Abweichungen resultieren betriebsbedingte Abweichungen aus dem Betriebsverhalten des Systems. Sie folgen somit deterministisch aus Merkmalen (wie Bauteilabmessungen) und Eigenschaften (z.B. Flächenträgheitsmoment) der Einzelbauteile sowie aus den vorherrschenden Betriebsrandbedingungen (Bsp: Temperatur, äußere Kräfte). Somit kann der Einfluss dieser betriebsbedingten Abweichungen vom Produktentwickler auf das Schließmaß nur indirekt über die Merkmale und die Betriebsrandbedingungen beeinflusst werden. Die Umsetzung einer Handlungsempfehlung erfordert somit die Kenntnis der Abhängigkeiten zwischen diesen und der jeweiligen betriebsbedingten Abweichung. Anschließend können geeignete Handlungsempfehlungen abgeleitet und umgesetzt werden. Mit zunehmendem Beitragsleister-Wert ist die Reduzierung sowohl der betriebsbedingten Abweichungen an sich, als auch ihres Einflusses auf das Schließmaß zu reduzieren. Dies kann z.B. durch die Modifikation der Betriebsrandbedingungen (Reduzierung der Abweichung) oder durch ihre Kompensation durch gezielte Änderung der Lage der Toleranzfelder der fertigungsbedingten Abweichungen (Reduzierung des Einflusses) erreicht werden. Tabelle 2 stellt ausgewählte Gesichtspunkte zusammen, die zur Ableitung von Handlungsempfehlungen herangezogen werden können.

Tabelle 2: Gesichtspunkte zur Ableitung von Handlungsempfehlungen

| Art / Ursache der Abweichungen | Gesichtspunkte zur Ableitung von Handlungsempfehlungen (für eine Systemoptimierung) |
|---------------------------------------|--|
| Fertigungsbedingte Abweichungen | <ul style="list-style-type: none"> • Toleranzbreiten ändern (Aufweiten/Einengen) • Häufigkeitsverteilungen (und somit die zugehörigen Standardabweichungen) ändern • Forderung höherer/niedrigerer Ausschussquoten |
| Betriebsbedingte Abweichungen | <ul style="list-style-type: none"> • Lage der Toleranzfelder der fertigungsbedingten Abweichungen ändern (Asymmetrische Toleranzfelder) • Merkmale (und somit Eigenschaften) der Einzelbauteile des technischen Systems anpassen • Betriebsrandbedingungen des bewegten technischen Systems anpassen • Kontinuierlicher Ausgleich durch die gezielte Berücksichtigung von Werkzeugverschleiß [6] |

5 Anwendungsszenario: Kurbeltrieb

Die praktische Anwendung der gezeigten Vorgehensweise soll anhand von zwei Anwendungsszenarien am Beispiel des Kurbeltriebs eines 4-Takt-Verbrennungsmotors gezeigt werden.

Im Folgenden kann bereits auf die Ergebnisse einer statistischen Toleranzanalyse des Kurbeltriebs aus [2] zurückgegriffen werden. Als funktionsrelevantes Maß ist hierbei die aktuelle Position des Kolbens in Richtung der X-Achse definiert (Bild 4, links). Aufgrund von Fertigungsabweichungen des Kurbelradius r ($45 \pm 0,02$ mm) und der Pleuellänge L ($138 \pm 0,05$ mm) sowie der elastischen Verformung der Kurbelwelle (betriebsbedingte Abweichung) wird der Kolben während des Betriebs von seiner Soll-Position abweichen. Um die Funktion des Kurbeltriebs während des Betriebs sicherzustellen, ist eine maximale Abweichung der Ist-Position des Kolbens von dessen Soll-Position einzuhalten. Die definierten oberen und unteren Spezifikationsgrenzen liegen bei $\pm 0,2$ mm (Szenario 1) bzw. bei $+0,07$ mm und $-0,33$ mm (Szenario 2).

Die Fertigungsabweichungen sind nach Tabelle 1 statische, also zeitunabhängige Größen. Hingegen unterliegt die betriebsbedingte elastische Verformung der Kurbelwelle einer zeitlichen Abhängigkeit vom Betriebszustand. Bild 4 (rechts) zeigt den ermittelten zeitlichen Verlauf der Abweichung des Kol-

bens aus dessen Soll-Position sowie die Spezifikationsgrenzen beider Szenarien. Während die streuenden Fertigungsabweichungen zu einer Streuung der Kolbenposition (charakterisiert durch die unteren und oberen Quantile bei $\pm 3\sigma$) führen, resultiert aus der deterministischen betriebsbedingten Abweichung die Verschiebung der Schließmaßverteilung aus deren Nominallage.

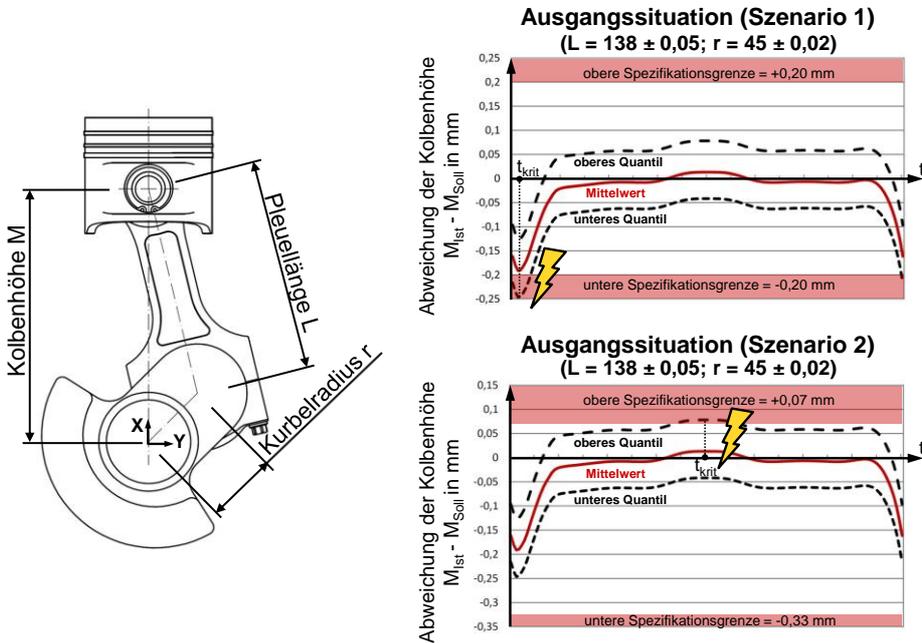


Bild 4: Kurbeltrieb (links) sowie zeitlicher Verlauf der Abweichung der Kolbenhöhe (Häufigkeitsverteilung) beider Szenarien vor der Optimierung

5.1 Systemoptimierung der Anwendungsszenarios

Die Funktionsfähigkeit des Kurbeltriebs ist, wie in Bild 4 zu erkennen, bei beiden Szenarien nicht sichergestellt, da die zulässigen Abweichungen des Kolbens gegenüber seiner Soll-Position überschritten werden. Somit ist zunächst, entsprechend der vorgestellten Vorgehensweise zur Systemoptimierung, für jedes Szenario die Analyse der vorliegenden Schließmaßverteilung an den jeweiligen kritischen Zeitpunkten notwendig. Die kritischen Zeitpunkte beider Szenarien (t_{krit}) sind in Bild 4 gekennzeichnet.

Die Analyse erfordert zunächst die Definition relevanter Kennwerte. Im Folgenden wird der Verlustkoeffizient z als der Kehrwert des halben Abstan-

des der Spezifikationsgrenzen definiert. Die Skalierung der relativen Häufigkeit der Schließmaßklassen ist so gewählt, dass die relative Häufigkeit an den Wendepunkten (Standardabweichung bei $\pm 1\sigma$) einer 6σ -Normalverteilung (innerhalb der Spezifikationsgrenzen) mit dem Wert der Verlustfunktion an den Spezifikationsgrenzen L (untere/obere Spezifikationsgrenze) des Szenarios 1 übereinstimmt. Die jeweiligen Schnittpunkte S_1 und S_2 beider Szenarien können bestimmt und deren horizontale und vertikale Abstände ins Verhältnis gesetzt werden. Tabelle 3 stellt die gewonnenen Ergebnisse zusammen. Bild 5 (links) zeigt die Schließmaßsituationen zu den kritischen Zeitpunkten.

Tabelle 3: Identifikation der Abweichungsarten der Szenarios

| Szenario | ΔSM | ΔL | Verhältnis V |
|----------|-------------|------------|-------------------------------|
| #1 | 40 | 72 | 40 : 72 (bzw. 35,7% zu 64,3%) |
| #2 | 92 | 10 | 92 : 10 (bzw. 9,8% zu 90,2%) |

Somit können für beide Szenarios geeignete Handlungsempfehlungen abgeleitet werden. Die kritische Schließmaßverteilung bei Szenario 1 folgt vor allem aus der betriebsbedingten Abweichung (zu 64,3%), wobei die fertigungsbedingten Abweichungen mit 35,7% weder einen vernachlässigbaren noch einen dominanten Einfluss haben. Deshalb ist zur Optimierung des Systems die Reduzierung des Einflusses der betriebsbedingten Abweichung (el. Verformung der Kurbelwelle) zu empfehlen. Hierfür soll die Handlungsempfehlung „Lage der Toleranzfelder der Fertigungsabweichungen ändern“ angewendet werden. Auf eine Änderung der Toleranzbreiten der fertigungsbedingten Abweichungen soll vorerst verzichtet werden.

Im Fall des Szenarios 2 dominiert der Einfluss der fertigungsbedingten Abweichungen die resultierende Schließmaßverteilung zum kritischen Zeitpunkt. Eine Reduzierung des Einflusses ist somit empfehlenswert. Die Ergebnisse einer statistischen Beitragsleistanalyse erlauben eine weitere Differenzierung der einzelnen Fertigungsabweichungen. Hier zeigt sich, dass an die Tolerierung der Pleuellänge L mit einem statistischen Beitragsleister-Wert von ca. 87% höhere Anforderungen (Toleranz einengen) zu stellen sind. In einem weiteren Schritt kann, aufgrund des geringen Beitragsleister-Wertes von 13%, die Toleranzaufweitung des Kurbelradius r in Betracht gezogen werden. Trotz des geringen Einflusses der betriebsbedingten Abweichung von 9,8%, wäre die Handlungsempfehlung „Lage der Toleranzfelder der Fertigungsabweichungen ändern“ geeignet, da diese keine erhöhten Anforderungen an die Fertigung stellt und somit auch bei geringem Einfluss der jeweiligen Abwei-

chung angewendet werden kann. Bild 5 (rechts) nennt die ergriffenen Maßnahmen und zeigt die optimierten Schließmaßverteilungen der Szenarien.

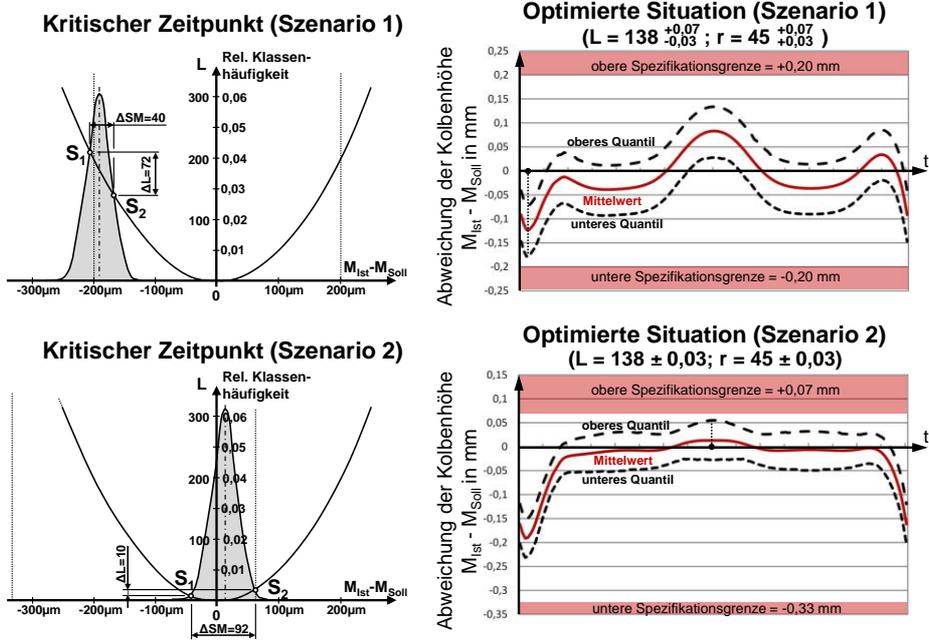


Bild 1: Szenarien 1 und 2: Schließmaßverteilungen (vorher) zu den kritischen Zeitpunkten (links) sowie optimierte zeitliche Schließmaßverläufe (rechts)

6 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurde ein Ansatz vorgestellt, der die Optimierung eines abweichungsbehafteten bewegten technischen Systems hinsichtlich der Funktionserfüllung ermöglicht. Auf Basis der Ergebnisse einer vorhergehenden Toleranzanalyse des bewegten Systems können die, in ihren Auswirkungen auf ein funktionsrelevantes Maß unterschiedlichen, fertigungs- und betriebsbedingten Abweichungen in Relation zueinander gesetzt werden. Der Produktentwickler ist somit in der Lage, den genauen Beitrag jeder auftretenden Abweichung zu ermitteln und geeignete Handlungsmaßnahmen abzuleiten und zu ergreifen. Anhand von zwei Beispielszenarien eines Demonstrators (Kurbeltrieb) wurde die Vorgehensweise verdeutlicht.

Die Optimierung wird lediglich auf Basis der Analyse eines kritischen Zeitpunktes des bewegten Systems getroffen. Weißt ein Schließmaßverlauf je-

doch mehrere kritische Zeitpunkte während seines Betriebs auf, so folgen daraus unter Umständen unterschiedliche oder sogar konkurrierende Handlungsempfehlungen für das System. Somit ist die Optimierung des bewegten Systems über die gesamte Betriebszeit erforderlich, was auf Grund der damit verbundenen hohen Komplexität nur mit Hilfe rechnerunterstützter Optimierungsansätze sinnvoll erreicht werden kann. Weiterhin resultieren aus dem Bewegungsverhalten Wechselwirkungen zwischen den fertigungs- und den betriebsbedingten Abweichungen. So führen betriebsbedingte Abweichungen zu einer Änderung der Systemstellung und somit zu variierenden statistischen Beitragsleistungswerten der fertigungsbedingten Abweichungen. Zudem führen die Streuungen der fertigungsbedingten Abweichungen ebenfalls zu streuenden betriebsbedingten Abweichungen. Die Berücksichtigung dieser Wechselwirkungen, sowohl im Rahmen der Toleranzanalyse als auch bei der anschließenden rechnerunterstützten Optimierung, ist somit notwendig.

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Förderung im Rahmen des Forschungsvorhabens ME1029/16-1 "Funktionale Produktabsicherung und -optimierung von bewegten technischen Systemen im produktlebenszyklusübergreifenden Toleranzmanagement".

Literatur

- [1] Musa, R.: "Simulation-Based Tolerance Stackup Analysis in Machining", University of Cincinnati, Department of Mechanical, Industrial and Nuclear Engineering, Dissertation, 2003.
- [2] Stuppy, J.: "Methodische und rechnerunterstützte Toleranzanalyse für bewegte technische Systeme", Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Dissertation, 2011.
- [3] Siebertz, K.; van Bebbber, D.; Hochkirchen, T.: "Statistische Versuchsplanung, Design of Experiments (DoE)", Springer-Verlag, Berlin, 2010.
- [4] Chase, K.W.; Greenwood, W.H.: "Design Issues in Mechanical Tolerance Analysis". In ADCATS Report No. 87-5, Reprinted from Manufacturing Review, ASME, 1988, 1(1), S. 50/59.
- [5] Taguchi, G.; Chowdhury, S.; Wu, Y.: "Taguchi's Quality Engineering Handbook", John Wiley & Sons, New York, 2004.
- [6] Klein, B.: "Montagesimulation in der virtuellen Produktentwicklung". In: ATZ Automobiltechnische Zeitschrift, 101 (1999), S. 492/499.