

Der Einfluss der Sortierung auf das statistische Verhalten von Funktionsmaßen

Alexander Aschenbrenner¹, Benjamin Schleich¹, Sandro Wartzack¹

¹ *Lehrstuhl für Konstruktionstechnik
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg*

Abstract

In an automated assembly process, the exchangeability of the components is a necessity. This could imply harsh requirements concerning the geometric definition and tolerancing of components. The classification of components is one way to decrease these requirements. Classification used to be limited to manual assembly and small-scale production. Advances in online measuring technology make the classification of components also applicable for mass fabrication. Employing classification, accuracy and process capability of the production could be increased. Besides these positive effects, classification also poses some challenges for the variation simulation. This contribution addresses approaches on how to tackle these challenges and which effects can arise from classification.

Keywords: Sorting and Classification, Combinatorial Analysis, Variation Simulation, Tolerance Management

1 Sortierung – robuste Montage trotz weiter Toleranzen

Abweichungen an Bauteilen sind aufgrund schwankender Herstellungsparameter sowie Messungenauigkeiten unvermeidbar [1]. Um dennoch die

Funktion, Montage und Ästhetik von Produkten abzusichern, werden Toleranzen vergeben. Diese beschreiben die zulässigen geometrischen Abweichungen eines Bauteils. Gerade bei einer automatisierten Montage muss das Prinzip der bedingten Austauschbarkeit der Einzelteile gewährleistet sein [2], um kostengünstige Fügeprozesse zu ermöglichen. Eine manuelle Montage, in welcher die Bauteile sortiert werden, lässt zwar größere Abweichungen zu, ist für die industrielle Massenfertigung jedoch untauglich. Neue Entwicklungen in der Inline-Messtechnik sowie die fortschreitende Digitalisierung der Fertigung sorgen allerdings dafür, dass die Sortierung auch für die Massenproduktion wirtschaftlich anwendbar wird [3]. Die Sortierung stellt dabei einen Kompromiss zwischen Grobserientauglichkeit und erweiterten Toleranzen dar. Aktuell wird die Sortierung beispielsweise bei der Wiederverwendung rezyklierter Bauteile eingesetzt, um Qualitätsminderungen infolge von Abweichungen entgegenzuwirken [4]. Aber auch in Massenproduktionen wie der Wälzlagerherstellung wird die Sortierung bereits seit mehreren Jahrzehnten erfolgreich zur funktionalen Absicherung eingesetzt.

Die Grundidee der Sortierung ist es, Bauteile in Klassen (oder Sorten) einzuteilen, sodass bei der Montage einer Baugruppe durch gezieltes Kombinieren der Klassen der Erwartungswert sowie die Streuung eines Funktionsmaßes positiv beeinflusst werden. Dadurch ermöglicht die Sortierung ohne zusätzliche konstruktive Anpassungen eine Erhöhung der Prozessfähigkeiten. Allerdings bringt die Sortierung (statistische) Abhängigkeiten mit sich, was sich in bedingten Wahrscheinlichkeiten der einzelnen Bauteile zeigt. Dies führt wiederum zu Herausforderungen in der statistische Toleranzanalyse, welche in der Regel davon ausgeht, dass die „Montage unter Wahrung des Zufalls erfolgt“ [5].

Neben der Entwicklung der kombinatorischen Ansätze stellt insbesondere die Integration der Sortierung in die Sensitivitätsanalyse eine wissenschaftlich anspruchsvolle Herausforderung dar. In diesem Beitrag wird am praxisnahen Beispiel der Wälzkörpersortierung von Zylinderrollenlagern erste Ansätze gezeigt, wie sich die Sortierung in die statistische Toleranzanalyse integrieren lässt und welche Auswirkungen daraus resultieren.

2 Sortierung am Beispiel der Lagerluft von Zylinderrollenlager

Als Anwendungsbeispiel dient im Nachfolgenden die Sortierung der Lagerkomponenten von Zylinderrollenlagern. Diese sind gemäß DIN 620-4 [6] in unterschiedliche Lagerluftklassen eingeteilt. Die radiale Lagerluft beschreibt hierbei die Distanz, um welche sich die beiden Lagerringe für ein assembliertes, aber nicht montiertes Lager relativ zueinander in radialer Richtung ver-

schieben lassen [7]. In Bild 1 ist die Definition der Lagerluft schematisch dargestellt und eine Näherungsgleichung der Lagerluft angegeben.

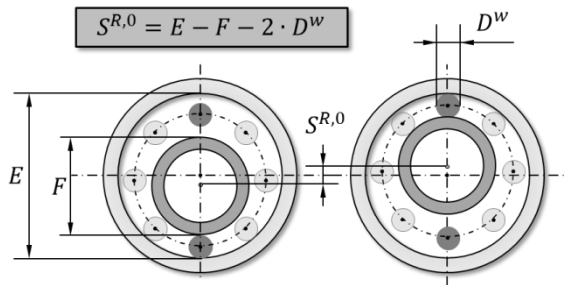


Bild 1: Schematische Darstellung der radialen Lagerluft

Vereinfachend ergibt sich die Lagerluft als die Differenz der beiden Laufbahndurchmesser (E : Außenring, F : Innenring) vermindert um den doppelten Wälzkörperdurchmesser D^W . Die Lagerluft stellt hierbei ein Funktionsmaß eines Wälzlagers dar, da sie unter anderem die Laufruhe und die Lagerlebensdauer beeinflusst. In der Regel versuchen Wälzlagerhersteller die Wälzlagerkomponenten dergestalt zu kombinieren, dass sich jeweils die mittlere Lagerluft einer Lagerluftklasse einstellt. Hierfür werden die Zylinderrollen gemäß DIN 5402-1 [7] in unterschiedliche Durchmesserklassen eingeteilt. Je Zylinderrollenlager wird normalerweise nur eine Durchmesserklasse verwendet, um z. B. eine gleichmäßige Lastverteilung im Lager zu gewährleisten und die Vibrationsanregung des Lagers gering zu halten.

Als Referenzlager für den Anwendungsfall dient ein Zylinderrollenlager vom Typ NU214, welches eine normale Lagerluftklasse (CN) besitzt. Die zulässige Lagerluft liegt im Bereich von $S^R = [40 \mu\text{m}; 75 \mu\text{m}]$ und die Ziellagerluft beträgt $S_{Soll}^R = 57,5 \mu\text{m}$. Es wird davon ausgegangen, dass die aus der Fertigung resultierenden Maßabweichungen der Wälzlagerkomponenten normalverteilt sind. Die Fertigung erfolgt hierbei mittig zentriert und soll einem Prozessfähigkeitsindex von $c_p = 1,33$ entsprechen. Die zugehörigen Wertebereiche und Verteilungsinformationen sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Tabelle 1: Wertebereiche und Verteilungsparameter der Lagerkomponenten

Laufbahndurchmesser des Außenrings	$E = 113,536^{+0,015}_{-0,015}$	Normalverteilt: $\mu_E = 113,536 \text{ mm}; \sigma_E \approx 3,759 \text{ }\mu\text{m}$
Laufbahndurchmesser des Innenrings	$F = 83,487^{+0,012}_{-0,012}$	Normalverteilt: $\mu_F = 83,487 \text{ mm}; \sigma_F \approx 3,008 \text{ }\mu\text{m}$
Durchmesser der Zylinderrollen	$D^W = 15^{+0,002}_{-0,002}$	Normalverteilt: $\mu_{D^W} = 15,000 \text{ mm}; \sigma_{D^W} \approx 0,501 \text{ }\mu\text{m}$

Die Zylinderrollen werden zunächst in zwei Durchmesserklassen unterteilt, wobei die Wertebereiche den Sorten- und Toleranzbereichen einer normalen Güteklasse (GN) gemäß DIN 5402-1 [8] entsprechen (vgl. Tabelle 2).

Tabelle 2: Wertebereiche der Durchmessersorten der Zylinderrollen

$S_1: -1$	$S_2: +1$
$S_1 = 14,999^{+0,001}_{-0,001}$	$S_2 = 15,001^{+0,001}_{-0,001}$

Die aus der Sortierung resultierende Aufteilung der Zylinderrollen ist im Histogramm in Bild 2 dargestellt. Aufgrund des Samplings sind in Durchmessersorte S_2 etwas mehr Zylinderrollen als in der Durchmessersorte S_1 (S_2 : 12 044 Stück vs. S_1 : 11 956 Stück).

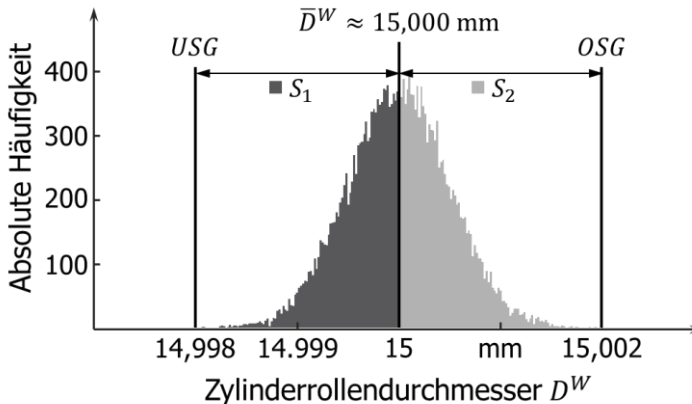


Bild 2: Häufigkeitsverteilung des Zylinderrollendurchmessers

Als Referenz für die weiteren Betrachtungen wird angenommen, dass keine Sortierung der Wälzkörper erfolgt, sondern diese zufällig mit den Lagerringen kombiniert werden. Die Ergebnisse sind in Bild 3 abgebildet:

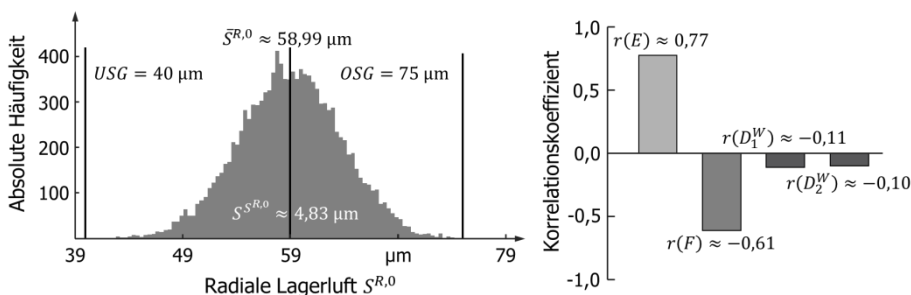


Bild 3: Häufigkeitsverteilung und Korrelationskoeffizienten der radialen Lagerluft, wenn keine Sortierung der Wälzkörper durchgeführt wird

Der Mittelwert der resultierenden Lagerluft liegt mit $\bar{S}^{R,0} \approx 58,99 \mu\text{m}$ etwas über dem Zielwert $S_{Soll}^R = 57,5 \mu\text{m}$. Die Standardabweichung beträgt $S^{S^{R,0}} \approx 4,83 \mu\text{m}$. Der Einfluss, welchen die einzelnen Eingangsgrößen auf die Zielgröße ausüben, kann mithilfe von Sensitivitätsanalysen ermittelt werden. Ein relativ einfacher Ansatz ist hierbei der Korrelationskoeffizient nach Pearson, welcher die Linearität eines Zusammenhangs ausdrückt [9]. Hierbei zeigt sich, dass die beiden Lagerringe mit $r(E) \approx 0,77$ und $r(F) \approx -0,61$ eine stark lineare Korrelation und damit großen Einfluss besitzen. Das Vorzeichen eines Korrelationskoeffizienten gibt die Richtung der Korrelation an. So nimmt die Lagerluft mit steigendem Durchmesser der Außenringlaufbahn zu, wohingegen die Lagerluft mit steigendem Durchmesser der Innenringlaufbahn abnimmt (vgl. Bild 1). Der Einfluss der beiden Wälzkörper ist mit $r(D_1^W) \approx -0,11$ bzw. $r(D_2^W) \approx -0,10$ eher gering.

2.1 Grundsätzlicher Einfluss der Sortierung

Bei der Sortierung wird versucht, eine Paarung der Lagerkomponenten zu erzielen, welche sich positiv auf das Funktionsmaß auswirkt, d. h. die Distanz zwischen der Ziellagerluft und der zu erwartenden Lagerluft soll für eine gewählte Lagersorte S_k minimal werden. Aus dieser Beschreibung resultiert folgendes Sortierkriterium:

$$\min_k |E - F - 2 \cdot E(S_k) - S_{Soll}^R|$$

Für jedes Lager wird die jeweilige Paarung separat bestimmt. Wie bereits erwähnt, gilt dabei, dass je Lager nur eine Durchmessergröße verwendet wird. $E(S_k)$ beschreibt den Erwartungswert der jeweiligen Durchmessergröße. Aufgrund der Klassifizierung der Wälzkörper resultieren abgeschnittene, asym-

metrische Häufigkeitsverteilungen (vgl. Bild 2). Daher wird als Erwartungswert der Median der jeweiligen Sorte verwendet. Dieser besitzt gegenüber dem Mittelwert auch bei asymmetrischen Verteilungen (wie der abgeschnittenen Normalverteilung) ein stabiles Verhalten [10].

Mithilfe des Sortierkriteriums wird das zu sortierende Bauteil (hier: Wälzkörper) sowie das Funktionsmaß, welches durch die Sortierung positiv beeinflusst werden soll (hier: Radiale Lagerluft), festgelegt. Anschließend erfolgt die (virtuelle) Montage mit Sortierung. Die resultierende Häufigkeitsverteilung der radialen Lagerluft ist in Bild 4 dargestellt.

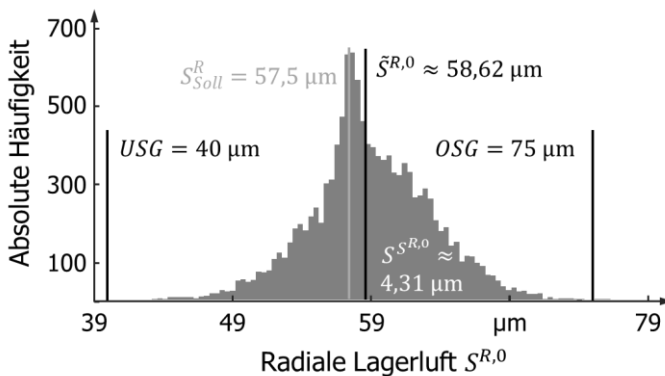


Bild 4: Häufigkeitsverteilung der radialen Lagerluft für zwei Wälzkörpersorten

Für die sortierten Lagerkomponenten folgt die Häufigkeitsverteilung der Lagerluft nun keiner Normalverteilung mehr. Stattdessen ist eine ausgeprägte Spitze nahe der Ziellagerluft $S_{Soll}^R = 57,5 \mu\text{m}$ erkennbar, weshalb sich der Erwartungswert (hier: Median $\tilde{S}^{R,0} \approx 58,62 \mu\text{m}$) etwas näher an der Ziellagerluft befindet. Die Standardabweichung der Häufigkeitsverteilung ist gegenüber dem unsortierten Fall ebenfalls etwas gesunken. Bereits hier zeigt sich, dass mithilfe der Sortierung ein stabileres Verhalten eines Funktionsmaßes erzielt werden kann.

In Bild 5 sind die Korrelationskoeffizienten für die sortierten Wälzlagerkomponenten dargestellt. Erfolgt die Berechnung des Korrelationskoeffizienten sortenübergreifend für alle Wälzlager, ergibt sich für die Zylinderrollen ein positiver Korrelationskoeffizient ($r(D_1^W \approx 0,35)$ und $r(D_2^W \approx 0,34)$). Dies würde bedeuten, dass die Lagerluft mit steigenden Wälzkörperdurchmessern zunehmen würde. Die Korrelationskoeffizienten widersprechen aber nicht nur dem zu erwartenden Systemverhalten, sondern überschätzen auch den Ein-

fluss der Wälzkörper, deren Standardabweichung relativ gering ist. Der Grund hierfür sind die aus der Sortierung resultierenden statistischen Abhängigkeiten, welche zu sogenannten verdeckten Korrelationen führen. Verdeckte Korrelationen treten auf, wenn sich eine Grundgesamtheit hinsichtlich einer Größe in Teilpopulationen zerlegen lässt [11]. Dies trifft auf das vorliegende Beispiel zu. So lassen sich im Streudiagramm in Bild 5 zwei Gruppen identifizieren, für welche der Zusammenhang zwischen der Lagerluft und dem Wälzkörperdurchmesser ein anderes Muster zeigt. Die beiden Gruppen entsprechen hierbei den beiden Durchmesserarten. Um den korrekten Einfluss der Eingangsgrößen auf ein Funktionsmaß abschätzen zu können, sollte im Fall der Sortierung eine sortenreine Betrachtung aller Eingangsgrößen erfolgen.

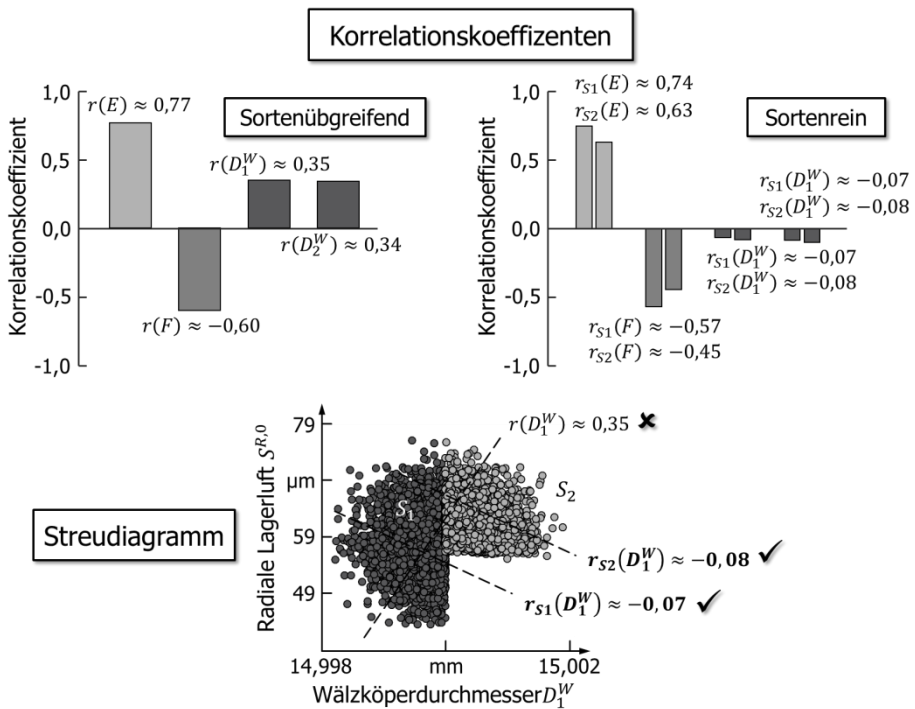


Bild 5: Korrelationskoeffizienten für sortenübergreifende und sortenreine Betrachtung

2.2 Einfluss der Anzahl der Sorten

Um den Einfluss der Sortenanzahl zu zeigen, wird das Eingangsbeispiel in Abschnitt 2.1 um zwei zusätzliche Sorten erweitert. Die Wertebereiche der Sorten sind in Tabelle 3 angegeben.

Tabelle 3: Erweiterter Wertebereich der Durchmesserarten der Zylinderrollen

$S_1: -3$	$S_2: -1$	$S_3: +1$	$S_4: +3$
$S_2 = 14,997_{-0,001}^{+0,001}$	$S_2 = 14,999_{-0,001}^{+0,001}$	$S_3 = 15,001_{-0,001}^{+0,001}$	$S_2 = 15,003_{-0,001}^{+0,001}$

Die Toleranzzone des Zylinderrollendurchmessers wurde verdoppelt, so dass der zulässige Bereich der Wälzkörper nun $D^W = 15_{-0,004}^{+0,004}$ beträgt. Wird die Prämisse eines Prozessfähigkeitsindex von $c_p = 1,33$ beibehalten, wird die Standardabweichung ebenfalls verdoppelt und beträgt $\sigma_{D^W} \approx 1,003 \mu\text{m}$. Für diese geänderten Parameter ergibt sich bei einer Assemblierung der Wälzagerkomponenten ohne Sortierung ein Mittelwert von $\bar{S}^{R,0} \approx 59,02 \mu\text{m}$ und eine Standardabweichung von $S^{S^{R,0}} \approx 5 \mu\text{m}$.

Nach der Sortierung zeigt sich, dass die beiden Randsorten S_1 und S_4 aufgrund des Samplings mittels einer Normalverteilung gegenüber den ursprünglichen Sorten S_2 und S_3 unterrepräsentiert sind. Zudem entsprechen die Stückzahlen in den einzelnen Sorten für das vorliegende Sampling nicht dem Bedarf (vgl. Tabelle 4).

Tabelle 4: Differenz zwischen den vorhandenen Stückzahlen und den benötigten Stückzahlen je Durchmesserorte

Sorte	S_1	S_2	S_3	S_4
Vorhanden Stückzahl	573	11 559	11 381	487
Bedarf	4 260	4 634	5 910	9 196
Differenz	-3 687	+6 925	+5 471	-8 709

Der enorme Unterschied zwischen den vorhandenen und benötigten Stückzahlen je Sorte kann dazu führen, dass ein Großteil der Lager nicht mit einer idealen Sorte assembliert werden kann. Um diesen Missstand zu vermeiden, sind unterschiedliche Ansätze denkbar.

So könnten theoretisch Zylinderrollen nachgezogen werden, d. h. es werden zusätzliche Chargen gefertigt. Dies führt langfristig aber zu einer noch

stärkeren Überrepräsentation der Sorten S_2 und S_3 . Aus betriebswirtschaftlicher Sicht sind dadurch negative Auswirkungen zu befürchten, da z. B. Material verschwendet wird, höhere Lagerkosten entstehen oder eine Wert- und Qualitätsminderung der noch nicht verbauten Teile (z. B. infolge von Korrosion, Schwund etc.) auftreten kann.

Kurzfristig können die verbleibenden Lagerkomponenten so kombiniert werden, dass für jedes Lager die nächstbeste Sorte verwendet wird. Falls die ideale Sorte nicht mehr verfügbar ist, wird diejenige Sorte verwendet, für welche das zweitbeste Ergebnis zu erwarten ist. Sollte diese Sorte ebenfalls nicht mehr vorhanden sein, wird die drittbeste Sorte verwendet usw. Je Lager sollte dabei jedoch weiterhin nur eine Sorte verwendet werden. Die resultierende Häufigkeitsverteilung ist im Histogramm in Bild 6 dargestellt.

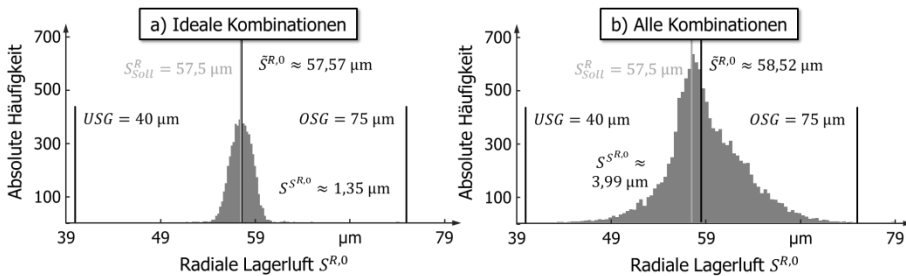


Bild 6: Häufigkeitsverteilung der radialen Lagerluft für vier Wälzkörpersorte a) mit idealer Wälzkörpersorte und b) aller Zylinderrollenlager

Insgesamt konnte nur bei 5 801 Zylinderrollenlagern die ideale Durchmessersorte verwendet werden (Bild 6 a)). Für diese Kombinationen zeigt sich der positive Einfluss der Sortierung allerdings deutlich. So liegt der Erwartungswert mit $\bar{S}^{R,0} \approx 57,57 \mu\text{m}$ nahe an der Ziellagerluft. Auch die Standardabweichung ist mit $S^{S^{R,0}} \approx 1,35 \mu\text{m}$ sehr gering. Werden auch Kombinationen zugelassen, für die eine nicht-ideale Wälzkörpersorte verwendet wird (Bild 6 b)), verschlechtert sich das Ergebnis; liegt mit $\bar{S}^{R,0} \approx 58,52 \mu\text{m}$ und $S^{S^{R,0}} \approx 3,99 \mu\text{m}$ aber weiterhin unter den Ergebnissen der rein zufälligen Kombination. Dennoch lässt sich festhalten, dass eine gestiegene Sortenanzahl nicht zwangsweise zu einer Verbesserung der Maßhaltigkeit des Funktionsmaßes führt.

Damit die Sortierung ihr volles Potential entfalten kann, müssen die Stückzahlen mit dem Bedarf der einzelnen Klassen zur Deckung gebracht werden. Da der Bedarf jedoch ebenfalls Schwankungen unterliegt, sind ge-

naue Stückzahlen nur schwer zu antizipieren. Eine Veränderung der Tolerierung der Bauteile und/oder der Klassengrenzen zusammen mit einer entsprechenden Anpassung der Fertigung kann zu einem robusteren Verhalten der Sortierung führen. Die genannten Schritte sollten jedoch in enger Kooperation mit der Fertigungstechnik sowie Qualitätssicherung erfolgen.

3 Weiterführende Aspekte der Sortierung

Neben den bereits aufgeführten Punkten können bei der Sortierung noch weitere Aspekte berücksichtigt werden. So muss beispielsweise sichergestellt sein, dass die Granularität der Klassen auch messtechnisch erfasst werden kann. Gemäß dem Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen [12] kann jede Messung systematische und zufällige Messabweichungen aufweisen. Eine systematische Messabweichung bedeutet, dass der gemessene Wert gegenüber dem wahren Wert verschoben ist (Mittelwertverschiebung des gemessenen Objekts). Sind bei der Sortierung die Klassen zu feingranular gewählt, kann dies dazu führen, dass Bauteile einer Klasse fälschlicherweise in einer benachbarten Klasse eingeordnet werden. Zufällige Messabweichung bewirken hingegen, dass die Messwerte um den Schätzwert der Messung schwanken. Der Schätzwert der Messung entspricht hierbei dem realen Wert eines Messobjekts, welcher gegebenenfalls um die systematische Messabweichung verschoben ist. Die systematische Messabweichung kann an den Klassengrenzen zu einer fehlerhaften Einsortierung führen. Bei der Festlegung der Klassengrenzen sollte daher Rücksprache mit der Messtechnik über die einzusetzenden Messmittel sowie deren Fähigkeit gehalten werden. So kann beispielsweise vereinbart werden, dass an den Klassengrenzen durch zusätzliche Messungen das Messergebnis abgesichert wird.

Neben der Messtechnik können auch weitere montagetechnische Aspekte mit berücksichtigt werden. Im Beispiel der Wälzlager können auch die Lageringe mit sortiert werden, indem sie in einem Revolversystem zwischengespeichert werden. Bei der Entnahme eines Lagerringpärchens wird der Revolver dann kontinuierlich mit einem weiteren Pärchen versorgt. Innerhalb des Revolversystems können die Lagerringe sowie Wälzkörper so miteinander assembliert werden, dass eine ideale Kombination entsteht. Hierbei erscheint es sinnvoll aus allen möglichen Kombinationen stets diejenige auszuwählen, die das beste Resultat erzielt. Die Problemstellung erinnert dabei an ein sogenanntes Rucksack-Problem (auch Greedy Bag oder Knapsack genannt), bei welchem aus einer gegebenen Menge an Kombinationen jene ausgewählt wird, die den größten Nutzwert liefert. Für diese Art von Problemstellungen existieren bereits mehrere verschiedene Ansätze (siehe z. B. [13]). Eine Herausforderung bleibt allerdings die Formulierung eines geeigneten Sortierkrite-

riums. Prinzipiell ist hier eine Vorsortierung der Lagerringe oder die simultane Sortierung mehrerer Komponenten möglich. Auch sollte untersucht werden, wie sich die Größe des Revolvermagazins auf die Sortierung und das Ergebnis auswirkt.

Bisher wurde nur die Sortierung auf Basis eines Sortierkriteriums betrachtet. Zylinderrollen werden aber nicht nur nach dem Durchmesser sondern auch nach ihrer Länge klassifiziert. Durch solch eine bi- bzw. multikriterielle Sortierung erhöht sich die Komplexität der Sortierung. In weiterführenden Arbeiten sollen daher u. a. folgende Fragestellungen untersucht werden: Wie kann die Sortierung bei mehreren geometrischen Funktionsmerkmalen eingesetzt werden? Welche Wechselwirkungen resultieren aus der multikriteriellen Sortierung? Welche Methoden und Werkzeuge lassen sich einsetzen, um den Produktentwickler bei der Gestaltung seiner Klassen zu unterstützen?

4 Zusammenfassung

Um eine Sortierung durchführen zu können, müssen Bauteile anhand eines bestimmten geometrischen Merkmals (z. B. Zylinderrollendurchmesser) klassifiziert werden. Anschließend können mithilfe eines Sortierkriteriums Bauteile so kombiniert werden, dass sich ein positiver Effekt für die gewünschten Funktionsmaße (z. B. Lagerluft) einstellt. Hierbei wird in der Regel versucht die Maßhaltigkeit des jeweiligen Funktionsmaßes zu erhöhen, d. h. der Erwartungswert sollte möglichst nahe beim Zielwert liegen und die Streuung des Funktionswertes soll reduziert werden. Prinzipiell kann die Sortierung aber auch dafür eingesetzt werden, durch die Klassifizierung die Spezifikationsgrenzen eines geometrischen Merkmals eines Bauteils aufzuweiten. Dies ist allerdings nur sinnvoll, falls die daraus resultierende Fertigungskostensenkung den messtechnischen Mehraufwand überwiegt. Generell betrifft die Sortierung mehrere unterschiedliche Unternehmensbereiche. So kann die Klassifizierung der Komponenten geänderte Anforderung an die Fertigung und Montage mit sich bringen, wie etwa die Speicherung und Handhabung der unterschiedlichen Sorten. Auch muss die Messtechnik eine Klassifizierung der Bauteile ermöglichen und geeignete Betriebsmittel zur Verfügung stellen. Der Beitrag will daher auch die Wichtigkeit der innerbetrieblichen, bereichsübergreifenden Kommunikation unterstreichen.

Literatur

- [1] Stockinger, A. et. al: „Virtual Assembly Analysis: Standard Tolerance Analysis compared to Manufacturing Simulation and Relative Positioning“, 11th International Design Conference, 2010, S. 1421-1430.

-
- [2] Klein, B.: „Prozessorientierte statistische Tolerierung“, Renningen: expert-Verlag, 2007.
- [3] Wartzack, S. et al.: „Toleranzmanagement im Kontext von Industrie 4.0“, Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, 03/2017, S. 170-172.
- [4] Liu, M.; Liu, C.; Zhu, Q.: „Optional Classification for reassembly methods with different precision remanufactured parts“, Assembly Automation, 34 (2014) 4, S. 315-322.
- [5] Klein, B.: „Montagesimulation in der virtuellen Produktentwicklung“, ATZ Automobiltechnische Zeitschrift, 101 (1999) 7/8, S. 492-499.
- [6] DIN 620-4: „Wälzlager – Wälzlagertoleranzen – Teil 4: Radiale Lagerluft“, Beuth Verlag, 2004.
- [7] Schaeffler Technologies AG & Co KG: „Wälzlagerpraxis – Handbuch zur Gestaltung und Berechnung von Wälzlagerungen“, Mainz: Vereinigte Fachverlage GmbH, 2015.
- [8] DIN 5402-1: „Wälzlager – Wälzlagerteile – Teil 1: Zylinderrollen“, Beuth Verlag, 2014.
- [9] Saltelli, A.; Chan, K.; Scott, E. M.: „Mathematical and statistical methods for sensitivity analysis“, Chichester: John Wiley & Sons Ltd., 2000.
- [10] Wilker, H.: Systemoptimierung in der Praxis – Teil 1: „Leitfaden zur statistischen Versuchsauswertung“, Bd. 1, Norderstedt: Books on Demand GmbH, 2006.
- [11] Fahrmeier, L. et al.: „Statistik – der Weg zur Datenanalyse“, Berlin/Heidelberg: Springer Spektrum, 2016.
- [12] Bureau International des poids et Mesures (BIPM) – Joint Committee for Gudes in Metrology (JCGM) – Working Group 1 (WG1): „JCGM 100:2008 – Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM)“, 2008.
- [13] Martello S.; Toth, P.: „Knapsack Problems“, Chichester: John Wiley & Sons Ltd., 1990.