

STUTTGARTER BEITRÄGE ZUR PRODUKTIONSFORSCHUNG

ANSELM LORENZONI

# Methodik zur dynamischen Tolerierung am Beispiel einer Welle-Nabe-Verbindung



Universität Stuttgart



Fraunhofer

IPA

**Herausgeber:**

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Thomas Bauernhansl

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Kai Peter Birke

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Marco Huber

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Oliver Riedel

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Kfm. Alexander Sauer

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. mult. Alexander Verl

Univ.-Prof. a.D. Dr.-Ing. Prof. E.h. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. mult. Engelbert Westkämper

Anselm Lorenzoni

**Methodik zur dynamischen Tolerierung am Beispiel  
einer Welle-Nabe-Verbindung**

**Kontaktadresse:**

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA, Stuttgart  
Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart  
Telefon 07 11/9 70-11 01  
info@ipa.fraunhofer.de; www.ipa.fraunhofer.de

**STUTTARTER BEITRÄGE ZUR PRODUKTIONSFORSCHUNG**

Herausgeber:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Thomas Bauernhansl<sup>1,2</sup>

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Kai Peter Birke<sup>1,4</sup>

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Marco Huber<sup>1,2</sup>

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Oliver Riedel<sup>3</sup>

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Kfm. Alexander Sauer<sup>1,5</sup>

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. mult. Alexander Verl<sup>3</sup>

Univ.-Prof. a. D. Dr.-Ing. Prof. E.h. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. mult. Engelbert Westkämper<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA, Stuttgart

<sup>2</sup>Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb (IFF) der Universität Stuttgart

<sup>3</sup>Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen (ISW) der Universität Stuttgart

<sup>4</sup>Institut für Photovoltaik (IPV) der Universität Stuttgart

<sup>5</sup>Institut für Energieeffizienz in der Produktion (EEP) der Universität Stuttgart

Titelbild: Industrie40\_Zahnrad\_©Funtap - stock.adobe.com\_4c

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über [www.dnb.de](http://www.dnb.de) abrufbar.

ISSN: 2195-2892

ISBN (Print): 978-3-8396-1572-0

**D 93**

Zugl.: Stuttgart, Univ., Diss., 2019

Druck: Mediendienstleistungen des Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB, Stuttgart  
Für den Druck des Buches wurde chlor- und säurefreies Papier verwendet.

© by **FRAUNHOFER VERLAG**, 2020

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB

Postfach 80 04 69, 70504 Stuttgart

Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart

Telefon 07 11 9 70-25 00

Telefax 07 11 9 70-25 08

E-Mail [verlag@fraunhofer.de](mailto:verlag@fraunhofer.de)

URL <http://verlag.fraunhofer.de>

Alle Rechte vorbehalten

Dieses Werk ist einschließlich aller seiner Teile urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die über die engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes hinausgeht, ist ohne schriftliche Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen sowie die Speicherung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen und Handelsnamen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass solche Bezeichnungen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und deshalb von jedermann benutzt werden dürften. Soweit in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z.B. DIN, VDI) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden ist, kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen.

**Methodik zur dynamischen Tolerierung am Beispiel einer  
Welle-Nabe-Verbindung**

Der Fakultät Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik  
der Universität Stuttgart  
zur Erlangung der Würde eines Doktor- Ingenieurs (Dr.-Ing.)  
genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von

**Anselm Lorenzoni**  
aus Tübingen

Hauptberichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Thomas Bauernhansl  
Mitberichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Corinna Salander  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Kfm. Alexander Sauer

Tag der mündlichen Prüfung: 07. Oktober 2019

Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb (IFF) der Universität Stuttgart

2019

---

## Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Arbeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA sowie am Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb IFF der Universität Stuttgart. Beide Institutionen vereinen kreativen Innovationsgeist mit weitreichender Erfahrung. Beide stehen für wissenschaftlichen Fortschritt mit dem Anspruch industrieller Applikation.

Für die Möglichkeit der Promotion in diesem anspruchsvollen Umfeld sowie die freundliche Hilfe und vielfältige Ideengebung gilt mein Dank in erster Linie meinem Doktorvater sowie meinen Mitberichtern, Prof. Thomas Bauernhansl, Prof. Corinna Salander und Prof. Alexander Sauer.

Zudem danke ich meinen Vorgesetzten, Dr. Jörg Mandel und Oliver Mannuß, für die umsichtige fachliche Unterstützung in vielen Diskussionsrunden. Herzlichen Dank auch den vielen aktuellen und ehemaligen Kollegen, die mir in den vergangenen vier Jahren mit Rat und Tat zur Seite standen. Hierbei möchte ich mich insbesondere bei Inga Landwehr bedanken für die aufwendige Korrektur der vorliegenden Arbeit, aber auch für ihre freundschaftliche Verbundenheit und dafür, dass sie mich kollegial durch den Büroalltag gebracht hat.

Ein weiterer besonderer Dank geht an meinen Freund, ehemaligen Mitbewohner und ehemaligen studentischen Mitarbeiter Christopher Tielemann, der mich bei der Entwicklung des Grundgedankens dieser Arbeit und bei der Ausarbeitung der entsprechenden Patentanmeldung unterstützte. Ich vermisse unsere gemeinsamen Diskussionsabende auf dem Balkon sehr.

Besonderer Dank für die liebevolle Unterstützung und das Verständnis geht an meine Lebensgefährtin Maria Pawelec. Ohne sie wäre ich niemals auf die Idee gekommen, ein Masterstudium, geschweige denn eine Dissertation in Angriff zu nehmen.

---

Auch für ihre inhaltlichen und sprachlichen Korrekturen und die damit verbundene Geduld möchte ich mich vielmals bedanken.

Zuletzt möchte ich mich bei meinem Sohn Jonathan bedanken, der durch seine Geburt noch den nötigen Druck aufbaute, die Dissertation endlich abzuschließen.

---

## **Kurzinhalt**

Die Einhaltung von Toleranzen ist entscheidend für die technische Qualität eines Produktes. Im Rahmen dieser Arbeit wird eine neue Methodik für Toleranzen entwickelt, welche die Herstellung von Baugruppen ermöglicht, die speziellen Passfunktionen unterliegen. Passfunktionen sind oft mit sehr engen Toleranzen verbunden. Die hier vorgeschlagene Methodik bietet eine Lösung, die nicht in den Konstruktionsprozess eingreift, keine teuren Maschinen oder fehleranfällige Regelkreise benötigt und keine komplexen Montageverfahren verwendet. Durch den Einsatz moderner Messsysteme und der Infrastruktur von Industrie 4.0 ist es möglich, Baugruppen mit hochpräzisen Teilen kostengünstig bei gleicher oder besserer Qualität herzustellen.

Adherence to tolerances is crucial to the technical quality of a manufactured good. This work develops a new approach to tolerances which enables the production of assembly groups that are subject to special fit functions. Fit functions of modules often involve highly precise tolerances. The approach proposed here offers a solution that neither intervenes in the design process, nor requires expensive machines or error-prone control-loops, and does not use complex assembly procedures. By using modern measurement systems and the infrastructure of Industry 4.0, it is possible to produce assembly groups with high precision parts cost-effectively with equal or better quality.

---

# Inhalt

<b>Vorwort</b> .....	<b>II</b>
<b>Kurzzinhalt</b> .....	<b>IV</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b> .....	<b>VIII</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>XI</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>XIV</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>1</b>
1.1 Problemstellung.....	2
1.2 Forschungsfrage und Hypothesen .....	5
1.3 Ziele der Arbeit .....	6
1.4 Wissenschaftstheoretische Einordnung.....	8
1.5 Verortung in der Wissenschaftssystematik .....	10
1.6 Aufbau der Arbeit.....	12
<b>2 Terminologische und wissenschaftliche Grundlagen</b> .....	<b>14</b>
2.1 Terminologie .....	14
2.2 Geschichte der ISO-Toleranzen .....	19
2.3 Zusammenhang zwischen Maßgenauigkeit und Herstellkosten .....	23
2.3.1 Toleranzanforderungen und Herstellkosten.....	24
2.3.2 Toleranzanforderungen und Qualitätsverlust.....	27
2.3.3 Qualitätsverluste, Herstellkosten und Toleranzen .....	31
<b>3 Lösungsansätze für die Problemstellung</b> .....	<b>33</b>
3.1 Konstruktionsbestimmte Ansätze .....	37

3.2	Maschinenseitige Ansätze .....	39
3.3	Montageseitige Ansätze .....	42
3.3.1	Einzel austausch-Methode und statistische Tolerierung.....	43
3.3.2	Gruppen austauschmethode .....	48
3.3.3	Passzugabe .....	50
3.3.4	Einstellmethode.....	52
3.3.5	Verfahren zur Vorbereitung von Baumstämmen für eine Baumstammstruktur .....	53
3.4	Vergleich der einzelnen Lösungsansätze .....	55
<b>4</b>	<b>Voraussetzungen für die Methodik der dynamischen Tolerierung .....</b>	<b>59</b>
4.1	Fertigungsmesstechnik.....	60
4.1.1	Aufgaben und mögliche Systematisierung der Fertigungsmesstechnik .	61
4.1.2	Qualitätskostenrechnung für den Einsatz von Fertigungsmesstechnik ..	64
4.1.3	Automatisierung und Integration der Fertigungsmesstechnik zur Qualitätssicherung.....	67
4.1.4	Entwicklungen der Fertigungsmesstechnik .....	69
4.2	Industrie 4.0.....	71
4.2.1	Geschichte der vierten industriellen Revolution und zentrale Akteure ..	71
4.2.2	Relevante Elemente von Industrie 4.0 für die dynamische Tolerierung	74
4.3	Modularität.....	77
4.4	Zusammenfassung der Voraussetzungen.....	81
<b>5</b>	<b>Die dynamische Tolerierung .....</b>	<b>83</b>
5.1	Die Methodik der dynamischen Tolerierung .....	83
5.1.1	Induktive Herleitung .....	83
5.1.2	Detaillierung der Kernidee.....	87

5.1.3	Potentielle Anwendungsgebiete der dynamischen Tolerierung .....	91
5.2	Verifizierung anhand von Fallbeispielen aus der Literatur .....	93
5.2.1	Welle-Nabe-Verbindung am Beispiel eines Rillenkugellagers .....	94
5.2.2	Lineare Maßkette am Beispiel eines Getriebes.....	114
<b>6</b>	<b>Validierung der Methodik anhand eines Beispiels aus der industriellen Praxis .....</b>	<b>137</b>
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	<b>157</b>
7.1	Zusammenfassung.....	157
7.2	Stärken und Einsatzgrenzen der Methodik .....	161
7.2.1	Einsatzgrenzen .....	162
7.2.2	Stärken.....	164
7.3	Ausblick .....	166
<b>8</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>170</b>

---

## Abkürzungsverzeichnis

### Abkürzungen

BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
CAD	Computer-Aided Design
CNC	Computerized Numerical Control
CPS	Cyber- Physical Systems (Cyberphysische Systeme)
DIN	Deutsches Institut für Normung
e.V.	eingetragener Verein
EN	Europäische Norm
HK	Herstellkosten
IP	Internet Protocol
ISO	International Organization for Standardization
IT	ISO-Toleranz
RFID	Radio-Frequency Identification
S.	Seite
Stk.	Stückzahl

### Indizes

Allg.	Allgemeintoleranzen
aØ	Außendurchmesser
I	Nummer des Bauteils einer Baugruppe
iØ	Innendurchmesser

J	Produktionsschritt (zeitlich Reihenfolge)
	Nabe (wird bei Bohrungen oder Innenringen verwendet)
N	
O	Oberes
Red.	Reduziert
U	Unteres
W	Welle

### Großbuchstaben

$A_0$	[Währung]	qualitätsbezogener Verlust der Gesellschaft (Taguchi)
$B_m$	[mm]	Begrenzungsmaß
$B_t$	[mm]	Bohrungstiefe
$B_t$	[-]	Konstante (Taguchi)
$C$	[mm]	Mittenmaß/Fertigungsmaß
$D$	[mm]	Durchmesser
$E$	[mm]	Abmaß
$E_I$	[mm]	Unteres Grenzabmaß für innere Geometrielemente
$E_S$	[mm]	Oberes Grenzabmaß für innere Geometrielemente
$I$	[mm]	Istmaß
$L$	[Währung]	Verlustfunktion nach Taguchi
$LLS$	[mm]	Mindestmaß
$LLS_{\Sigma j}$	[mm]	Summenmindestmaß
$M$	[mm]	Maß
$MaxA$	[mm]	maximaler Abstand
$M_i$	[mm]	Schließmaß
$MinA$	[mm]	minimaler Abstand
$MP$	[mm]	Messpunkt
$MU$	[mm]	Messunsicherheit

## Abkürzungsverzeichnis

---

N	[mm]	Nennmaß
T	[mm]	Toleranz
T <sub>a</sub>	[mm]	Gesamttoleranz oder auch arithmetische Schließtoleranz
T <sub>i</sub>	[mm]	Toleranzen der einzelnen Bauteile
T <sub>q</sub>	[mm]	quadratische Schließtoleranz
T <sub>r</sub>	[mm]	Rechteckschließtoleranz
T <sub>S</sub>	[mm]	Toleranz des Schließmaßes
T <sub>w</sub>	[mm]	wirkliche Schließtoleranz
ULS	[mm]	Höchstmaß
ULS <sub>∑j</sub>	[mm]	Summenhöchstmaß

### **Kleinbuchstaben**

<i>e</i>	[mm]	Abmaß
<i>ei</i>	[mm]	Unteres Grenzabmaß für äußere Geometrieelemente
<i>es</i>	[mm]	Oberes Grenzabmaß für äußere Geometrieelemente
<i>k</i>	[-]	Konstante (Taguchi)
<i>m</i>	[mm]	Zielwert (Taguchis Verlustfunktion)
<i>y</i>	[mm]	Istwert (Taguchis Verlustfunktion)

### **Griechische Buchstaben**

$\Delta$	[mm]	Abweichung von Mindest- oder Höchstmaß und Zielwert (Taguchi)
$\sigma$	[-]	Varianz
'	[-]	kennzeichnet Zwischenwerte
$\Omega$	[mm]	Überhang

---

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Das Dilemma zwischen Herstellkosten und Produktqualität.....	5
Abbildung 2: Forschungsmethodisches Vorgehen.....	9
Abbildung 3: Idealtypische Wissenschaftssystematik .....	10
Abbildung 4: Struktur der Arbeit .....	12
Abbildung 5: Toleranzbegriffe.....	15
Abbildung 6: Entstehung der DIN EN ISO 286-1:2010-11 .....	21
Abbildung 7: Entstehung der DIN EN ISO 286-2:2010-11 und der DIN 7172:1991-04 .....	22
Abbildung 8: Klassische Beziehung zwischen Toleranzklasse und Herstellkosten ...	24
Abbildung 9: Bohrungsdurchmesser zu Bohrungstiefe versus Kostensteigerung .....	25
Abbildung 10: Toleranzen versus Produktionskosten verschiedener Bearbeitungsverfahren .....	26
Abbildung 11: Qualitätsverständnis Sprungfunktion versus Taguchis Verlustfunktion .....	28
Abbildung 12: Qualitätsverlust nach Taguchi.....	29
Abbildung 13: Beziehung zwischen Herstellkosten, Qualitätsverlustkosten und Toleranzen.....	32
Abbildung 14: Lineare Maßkette am Beispiel eines Getriebes.....	43
Abbildung 15: Praktische Istmaßverteilung.....	46
Abbildung 16: Schematische Darstellung der Gruppenaustauschmethode .....	49
Abbildung 17: Netzdiagramm zum Vergleich der unterschiedlichen Tolerierungsmodelle .....	56
Abbildung 18: Messaufgaben der Fertigungsmesstechnik .....	61
Abbildung 19: Integrationsgrade von Fertigungsmesstechnik.....	63

Abbildung 20: Nonkonformitäts- und Konformitätskosten .....	65
Abbildung 21: Optimale Qualitätskosten entsprechend neueren Überlegungen .....	66
Abbildung 22: Vergleich von fertigungsfernen, - nahen, Inline-, In-Prozess- und maschinenintegrierten Messungen.....	68
Abbildung 23: Notwendige Steuerungslogik für die dynamische Tolerierung .....	76
Abbildung 24: Beispiel für ein Nachbarschaftsnetzwerk aus drei Modulen .....	78
Abbildung 25: Voraussetzungen für die dynamische Tolerierung .....	81
Abbildung 26: Berechnungsbeispiel einer spezifischen Welle-Nabe-Verbindung zur Herstellkostenoptimierung.....	84
Abbildung 27: Berechnungsbeispiel einer spezifischen Welle-Nabe-Verbindung zur Qualitätsoptimierung .....	86
Abbildung 28: Kernidee der "dynamischen Tolerierung" .....	87
Abbildung 29: Methode zur Umsetzung der "dynamischen Tolerierung" .....	89
Abbildung 30: Beispielhafte Darstellung einer Baugruppe bestehend aus einer Welle und einem Rillenkugellager.....	96
Abbildung 31: Schematische Darstellung einer Welle-Nabe-Verbindung.....	97
Abbildung 32: Relative Herstellkosten für Innen- (Bohrung) und Außenbearbeitung (Welle) abhängig von der Toleranzgröße .....	101
Abbildung 33: Logistische und technische Umsetzung.....	103
Abbildung 34: Beispielhafte Darstellung einer Baugruppe bestehend aus einer Welle und einem Rillenkugellager.....	105
Abbildung 35: Passverbindung mit einem Rillenkugellager der Klasse P5 .....	106
Abbildung 36: Passverbindung mit einem Rillenkugellager der Klasse PN und P5.....	107
Abbildung 37: Qualitätsverlustkurve für die Passung des Rillenkugellagers.....	112
Abbildung 38: Ausschnitt aus einem Getriebe mit linearer Maßkette.....	114

Abbildung 39: Maßkette zur Berechnung des Schließmaßes .....	115
Abbildung 40: Lineare Maßkette der Bauteile 3, 4 und 5 .....	116
Abbildung 41: Vergleich der alten und neuen Toleranzfelder.....	133
Abbildung 42: Beispielhafte logistische und technische Umsetzung .....	135
Abbildung 43: Ausschnitt aus der technischen Zeichnung.....	138
Abbildung 44: Schematische Darstellung der Verbindungen der Baugruppe (Bedingungsanalyse).....	139
Abbildung 45: Schematische Darstellung der Verbindungen der Baugruppe (Fokus Stegdicke) .....	146
Abbildung 46: Toleranzanpassungsdiagramm der Passungen nach dem ersten Modell .....	148
Abbildung 47: Toleranzanpassungsdiagramm der Passungen nach dem zweiten Modell .....	150
Abbildung 48: Bestandsaufnahme des aktuellen Bearbeitungs- und Montageablaufs.....	154
Abbildung 49: Prüf- und Beschriftungsergänzungen für Bauteil I.....	155
Abbildung 50: Prüf- und Beschriftungsergänzungen für Bauteil III .....	155
Abbildung 51: Zusammenführen der Bauteile .....	156
Abbildung 52: Netzdiagramm inklusive der dynamischen Tolerierung.....	161
Abbildung 53: Einfluss der dynamischen Tolerierung auf die Qualitätskosten .....	165
Abbildung 54: Die verschiedenen Sichtweisen auf tolerierte Bauteile.....	168

---

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Bewertungsschema zusätzlich anfallende Kosten .....	34
Tabelle 2: Bewertungsschema Risiko für die Funktionalität .....	35
Tabelle 3: Bewertungsschema Komplexität für die Konstruktion.....	35
Tabelle 4: Bewertungsschema Toleranzgewinn.....	35
Tabelle 5: Bewertungsschema Austauschbarkeit der Einzelkomponenten .....	36
Tabelle 6: Bewertungsschema Einsatzmöglichkeit Produktionstyp .....	36
Tabelle 7: Bewertungsübersicht der konstruktionsbestimmten Ansätze .....	39
Tabelle 8: Bewertungsübersicht der maschinenseitigen Ansätze .....	42
Tabelle 9: Bewertungsübersicht der Einzelaustausch-Methode und statistische Tolerierung .....	48
Tabelle 10: Bewertungsübersicht der Gruppenaustauschmethode .....	50
Tabelle 11: Bewertungsübersicht der Passzugabe .....	52
Tabelle 12: Bewertungsübersicht der Einstellmethode.....	53
Tabelle 13: Bewertungsübersicht des Verfahrens zur Vorbereitung von Baumstämmen für eine Baumstammstruktur.....	55
Tabelle 14: Übersichtstabelle aller von der Konstruktion vorgegebenen Toleranzen und der Fertigungsreihenfolge (Iterationsstufe 1) .....	122
Tabelle 15: Übersicht über die berechneten Zwischenwerte nach Iterationsstufe 1 .....	124
Tabelle 16: Berechnungsschritte im Überblick der Mindestmaße für den zweiten Fertigungsschritt $j = 2$ .....	125
Tabelle 17: Berechnungsschritte im Überblick der Höchstmaße für den zweiten Fertigungsschritt $j = 2$ .....	125

Tabelle 18: Übersicht der neuen Mindest- und Höchstmaße nach Iterationsschritt 2.....	126
Tabelle 19: Übersicht über die berechneten Zwischenwerte nach Iterationsstufe 2.....	128
Tabelle 20: Berechnungsschritte im Überblick der Mindest- und Höchstmaße für den dritten Fertigungsschritt.....	129
Tabelle 21: Übersicht der neuen Mindest- und Höchstmaße nach Iterationsschritt 3.....	130
Tabelle 22: Übersicht über die berechneten Zwischenwerte nach Iterationsstufe 3.....	131
Tabelle 23: Übersicht der neuen Mindest- und Höchstmaße nach Iterationsschritt 4.....	132



---

# 1 Einleitung

*„Nicht so exakt wie möglich, sondern so genau wie nötig!“*

Sommerfeld und Banse (Sommerfeld et al. 2010); S. 93

Nach diesem Motto arbeiten alle Konstrukteure<sup>1</sup> und Fertigungsplaner in der Entwicklung und Produktionsplanung. Es ist jedoch nicht immer klar definiert, welche Genauigkeit mindestens erforderlich ist, damit die (Pass-)Funktionalität einer Baugruppe gegeben ist. Leider führt eine zunehmende Genauigkeit zudem oft zu hohen Kosten. „Allzu häufig werden Toleranzen vorgegeben, die so hohe Anforderungen an die Fähigkeit von Fertigungs- und Prüfprozess stellen, dass sie kaum erfüllt werden können, damit unfähige Prozesse hervorrufen und somit unnötige Kosten verursachen“ (Bettenhausen et al. 2011); S. 26

Die vorliegende Arbeit entwickelt daher ein neues Verfahren zur Herstellung eng tolerierter (sehr präziser) Baugruppen oder Module zu reduzierten Kosten bei gleichbleibender Qualität. Dieser Lösungsansatz ermöglicht es dem Konstrukteur, eng zu tolerieren und die Produktion einer funktionellen Baugruppe mit eng tolerierten Bauteilen gleichzeitig kostengünstig zu gestalten. Er basiert auf den Möglichkeiten der digitalisierten Produktion, der so genannten „Industrie 4.0“ (siehe Kapitel 4.2). Die Methodik wurde bereits zum Patent angemeldet und unter der Nummer „DE 10 2016 223 467 A1“ offengelegt (Patentschrift 102016223467 2018). Ebenso wurde der Grundgedanke in (Lorenzoni et al. 2017) veröffentlicht.

---

<sup>1</sup> Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wird auf die gleichzeitige Verwendung männlicher, weiblicher und diverser Sprachformen verzichtet. Sämtliche Personenbezeichnungen gelten dennoch für alle Geschlechtsformen.

### 1.1 Problemstellung

Eine große Herausforderung in fast allen Bereichen der Fertigungstechnik ist die maßliche Abweichung zwischen dem konzipiertem und dem hergestellten Bauteil, also seine stochastische Abweichung vom Nennmaß (Feldmann et al. 2014); S. 458. Diese Abweichung entsteht, da kein Fertigungsverfahren unendlich präzise ist. In der Praxis wird daher eine Grenzpräzision (die Grenzpräzision beschreibt die maximal zulässige Abweichung) für Bauteile festgelegt, die so genannte „Toleranz“. Werkstücke können aufgrund verschiedener Einflüsse wie beispielsweise den Umgebungsbedingungen einer Maschine oder eines Produktionssystems (Schmid et al. 2011) nur innerhalb einer bestimmten Toleranz gefertigt werden.

Bei aufeinander angepassten Bauteilen innerhalb einer Baugruppe stellen Toleranzen eine Herausforderung für die Funktionalität dar, denn die Toleranzen der einzelnen Bauteile addieren sich (Jorden et al. 2014); S. 188. Innerhalb der meisten Baugruppen befinden sich Bauteile, die aufeinander angepasst sind und somit einer Passfunktion unterliegen. Dazu gehören Welle-Nabe-Verbindungen, Lager und andere Bauteile, die entweder eine Bewegung zueinander zulassen oder eine Kraft aufeinander übertragen.

Bei Baugruppen müssen die Toleranzen daher so eng gewählt werden, dass die Passfunktionalität auch mit Grenzmustern gewährleistet ist. Baugruppen und Bauteile in allen Branchen werden dabei immer komplexer. Die Anforderungen an die Genauigkeit nehmen daher kontinuierlich zu; die Bauräume<sup>2</sup> werden dementsprechend kleiner (Liebl 2018), (Dietrich et al. 2017);

---

<sup>2</sup> „Der Bauraum ist der begrenzende Raum, in den das [/die] [...] Bauteil[e] hineinpassen muss [müssen]“ (Hehenberger et al. 2009);

S. 4. Diese Zunahme der Genauigkeitsanforderungen sowie die Zielsetzung „Never Ending Improvement“<sup>3</sup> führen dazu, dass Bauteile (vor allem solche, die einer Passfunktion unterliegen) sehr eng toleriert werden (Lemke 1988), (Bettenhausen et al. 2011), (Artischewski 2014).

Zudem kann der schnell wachsende internationale Wettbewerb zu einer „stark schwankenden Nachfrage an Produkten mit teils hoher Varianz bei gleichzeitigem enormen Kostendruck“ führen (Vogel-Heuser et al. 2017); S. 3. Um dem Kostendruck standzuhalten, ist es wichtig, wettbewerbsfähige Technologien und Methoden einzusetzen, um am Ende bei einer geringen Ausschussquote qualitativ hochwertige Produkte zu einem guten Preis anbieten zu können. Zudem werden die Produktlebenszyklen immer kürzer (Vogel-Heuser et al. 2017); S. 3. Dies führt häufig zu sehr engen Toleranzen („Angsttoleranz“), vor allem bei kritischen Bauteilen, da Entwickler und Konstrukteure weniger Zeit haben, diese genau zu berechnen und auszulegen oder entsprechende Verifizierungstests durchzuführen.

Allerdings gilt: Je geringer die Toleranz, also je kleiner das Toleranzfeld, desto kostenintensiver wird die Fertigung. So beschreiben Guo et al. (Guo et al. 2015) und Liu et al. (Liu et al. 2011), dass die Produktion von engen Toleranzen sich oft als schwierig erweist und mit viel Ausschuss behaftet ist.

Es gibt verschiedene Ansätze, um Bauteile innerhalb der nötigen engen Toleranzen zu fertigen. So können präzisere beziehungsweise hochwertigere Maschinen oder Werkzeuge genutzt werden. Zudem können die Abstände zwischen den Instandhaltungsintervallen reduziert werden, um dem Verschleiß an der Maschine oder dem Werkzeug entgegenzuwirken. Dies wirkt sich wiederum auf die Herstellkosten aus.

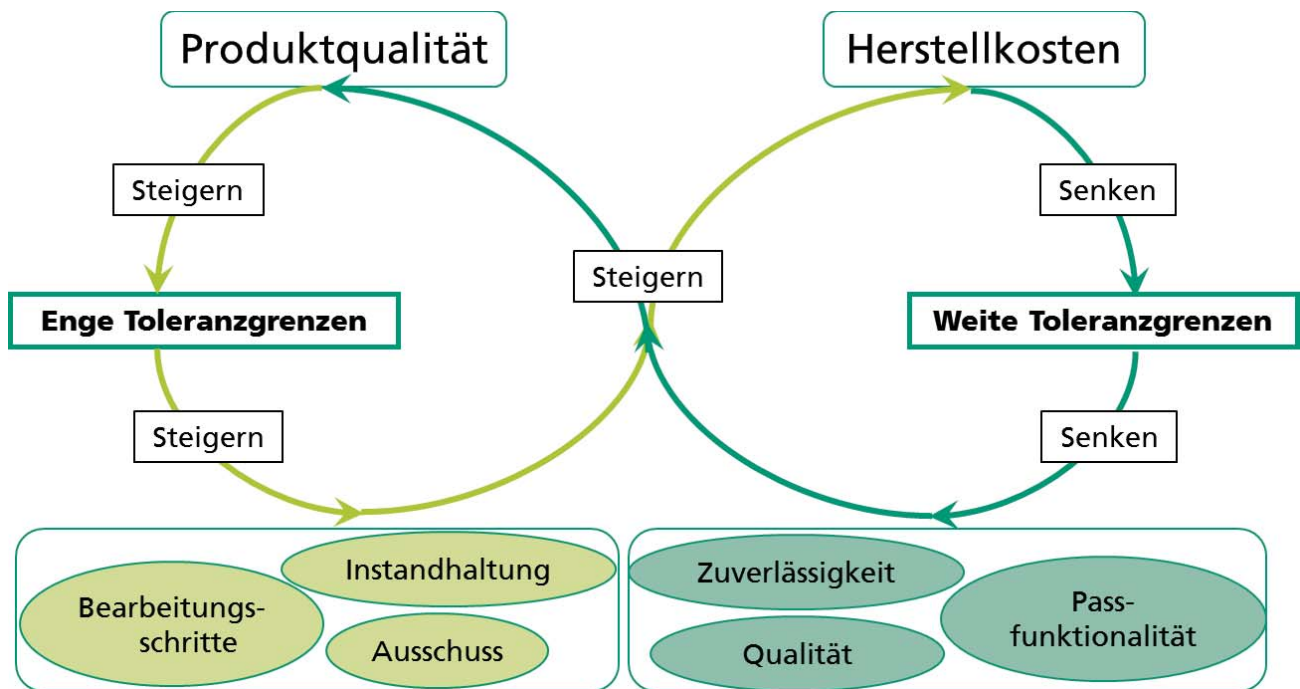
---

S. 206

<sup>3</sup> Never Ending Improvement (Deutsch: ständige Verbesserung) ist einer der wichtigsten Grundsätze des Qualitätsmanagements (Dahl 2016) und „ist für eine Organisation wesentlich, um gegenwärtige Leistungsniveaus aufrecht zu erhalten, auf Änderungen ihrer internen und externen Bedingungen zu reagieren und um neue Chancen zu schaffen.“(Norm DIN EN ISO 9000 2015); S. 18

Weitere mögliche Maßnahmen sind die Einführung komplexer Steuerungs- und Regelungssysteme oder die Steigerung der Anzahl der Bearbeitungsschritte. In manchen Fällen ist auch eine Nachbearbeitung der bereits gefertigten Bauteile möglich (siehe Kapitel 3 für eine genauere Beschreibung und Analyse bestehender Verfahren zur Fertigung enger Toleranzen). All diese Verfahren, verursachen hohe Produktionskosten ((Feldmann et al. 2014); S. 459 (Jordan et al. 2014); S. 252 (Merget 2004); S. 3; (Milberg 1992), (Janakiraman et al. 2010), (Hsieh 2006), (Zhao et al. 2016); siehe Kapitel 2.3.1 Toleranzanforderungen und Herstellkosten). Sie könnten reduziert werden durch weiter tolerierte Bauteile. Allerdings führen weit tolerierte Bauteile häufig zu einem Qualitätsverlust und somit einem Produktrisiko, das sich meist in der Funktionalität oder der Lebensdauer der Baugruppe widerspiegelt.

Aus den genannten Zusammenhängen folgt ein Dilemma (vergleiche Abbildung 1), denn Produktqualität und Herstellkosten verlaufen gegenläufig: Wird die Passfunktionalität erhöht, um das Produktqualität hoch zu halten, müssen die Toleranzen der einzelnen Bauteile enger gewählt werden. Dadurch steigen, wie beschrieben, die Herstellkosten. Die Herstellkosten lassen sich nach dem derzeitigen Stand der Technik bei gleichbleibenden grundlegenden Parametern wie der Wahl des Produktionsstandorts und der verwendeten Materialien nur senken, indem man die Toleranzen aufweitet. Das wiederum senkt die Passfunktionalität und damit die Zuverlässigkeit, Qualität und Robustheit. Es senkt dadurch die Produktqualität und reduziert die Kundenzufriedenheit. Um die Produktqualität wieder zu steigern, müssen die Toleranzen wieder eingeengt werden. Der Zirkelschluss ist somit vollständig und es ist klar, dass heutzutage eine Abwägung zwischen Herstellkosten und Produktqualität zwingend und unumgänglich ist.



**Abbildung 1: Das Dilemma zwischen Herstellkosten und Produktqualität**

*Quelle: Eigene Darstellung*

## 1.2 Forschungsfrage und Hypothesen

Die vorliegende Arbeit geht davon aus, dass das in Kapitel 1.1 dargestellte Dilemma der zwangsläufig einseitigen Optimierung (entweder der Herstellkosten oder der Produktqualität) überwunden werden kann. Daraus leitet sich die Forschungsfrage ab, die auf die mehrdimensionale Optimierung (sowohl die Verbesserung Qualität als auch die Reduktion der Herstellkosten) des Produktionsprozesses abzielt:

*Wie können Herstellkosten und Produktqualität in der digitalisierten Produktion optimiert werden?*

Um diese Forschungsfrage zu beantworten, entwickelt die vorliegende Arbeit eine neue Methodik der „dynamischen Tolerierung“. Die dynamische Tolerierung beinhaltet eine automatisierte Toleranzanpassung während der Produktion. Dies ermöglicht es, die Herstellkosten der Produktion bei gleichbleibender Qualität der Produkte zu senken oder bei gleichbleibenden Herstellkosten die Qualität zu erhöhen. Ebenso

sollen Herstellkosten und Qualität gleichzeitig optimiert werden können. Es lassen sich folgende Hypothesen<sup>4</sup> ableiten:

*H1: Wenn die Toleranzen in der Produktion dynamisch angepasst werden, dann können die Herstellkosten für die Herstellung einer Baugruppe bei gleichbleibender Produktqualität gesenkt werden.*

*H2: Wenn die Toleranzen in der Produktion dynamisch angepasst werden, dann kann die Produktqualität und somit die Zuverlässigkeit einer Baugruppe bei gleichbleibenden Herstellkosten gesteigert werden.*

*H3: Wenn die Toleranzen in der Produktion dynamisch angepasst werden, dann können sowohl die Produktqualität als auch die Kosten der Herstellung einer Baugruppe verbessert werden.*

### **1.3 Ziele der Arbeit**

Die vorliegende Arbeit überprüft die in Kapitel 1.2 aufgestellten Hypothesen und entwickelt dazu die neue Methodik der „dynamischen Tolerierung“, welche die Anforderungen im Hinblick auf die Funktionalität von Baugruppen erhalten, dabei aber deren Produktionskosten senken oder bei gleichbleibenden Kosten die Qualität der Baugruppen erhöhen soll. Dazu identifiziert die vorliegende Arbeit zunächst die relevanten Zusammenhänge zwischen Qualität, Kosten und Toleranzen in der Produktion. Weiterhin untersucht sie anhand von Fallbeispielen einzelner zu optimierender Baugruppen individuelle Passungssysteme und überführt diese jeweils in entsprechende mathematische Modelle. Diese Modelle bilden den Kern der entwickelten Methodik der dynamischen

---

<sup>4</sup> Siehe Kapitel 1.4 zum Begriff und der Bedeutung von „Hypothesen“.

Tolerierung. Um die hier entwickelte Methodik auf weitere Produkte anzuwenden, müssen die mathematischen Modelle in der Zukunft jeweils individuell angepasst werden.

Eines der genannten Fallbeispiele wird an einer spezifischen Welle-Nabe-Verbindung demonstriert, da Welle-Nabe-Verbindungen die bekanntesten Passungsarten sind. Um ihre Passungsfunktion<sup>5</sup> sicherzustellen, wurden diese Verbindungen in den Normen DIN ISO 286-1/-2 (1990) (Norm DIN ISO 286-1 2010), (Norm DIN ISO 286-2 2010) standardisiert, welche die Toleranzfelder einer Welle beziehungsweise Bohrung im Zusammenspiel festhalten und somit eine Passfunktionalität beschreiben.

Ausdrücklich nicht Ziel der vorliegenden mathematisch-konzeptionellen Arbeit sind die arbeitsvorbereitenden Schritte (Maschinenauswahl, Herstellschritte, etc.) zur Umsetzung der Methodik in unterschiedlichen Unternehmen. Diese müssen Gegenstand weiterer Forschung und Anwendung sein.

Die hier entwickelte Methodik vereint bestehende Toleranzsysteme sowie Passungssysteme mit den Möglichkeiten der vierten industriellen Revolution, die eine hochflexible, hochproduktive und ressourcenschonende Produktion ermöglicht (Lichtblau et al. 2015); S. 11. Sie greift auf Fortschritte im Bereich der Messtechnik sowie auf die Digitalisierung der Produktion zurück und entwickelt Algorithmen, um die oben genannten Ziele im Hinblick auf die Funktionalität und Herstellkosten von Baugruppen zu realisieren.

Die hier entwickelte Methodik soll es Unternehmen ermöglichen, komplexe Baugruppen, die einer Passfunktion unterliegen, günstiger zu fertigen, die Qualität der Passfunktion zu erhöhen oder die für das jeweilige Unternehmen optimale Balance von Kosten und Qualität zu identifizieren und umzusetzen. Dadurch können Unternehmen ihre internationale Wettbewerbsfähigkeit erhöhen.

---

<sup>5</sup> Passungsfunktionen sind die „funktionellen Anforderungen [...] der zu paarenden Teile“ (Norm DIN ISO 286-1 2010); S. 34.

### 1.4 Wissenschaftstheoretische Einordnung

Wissenschaft ist der Versuch, „die Welt systematisch und analytisch zu erfassen“ und die gewonnenen Erkenntnisse den am Wissenschaftsprozess Beteiligten als „wahr“ begreiflich zu gestalten (Wenturis et al. 1992); S. 68. Die eigentliche Quintessenz der Wissenschaft ist es, nach dem „Warum?“ oder dem „Wie?“ zu fragen, und sich nicht mit Mythen zufriedenzugeben (Poser 2001); S. 13. Wissenschaft erhebt dabei den Anspruch, für alle am Wissenschaftsprozess Beteiligten klar und nachvollziehbar zu sein (Schnell et al. 2008); S. 49.

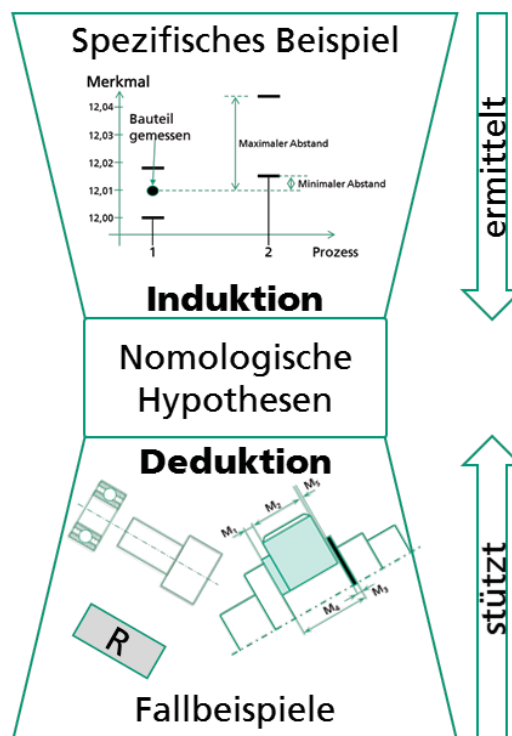
Die vorliegende Arbeit überprüft die in Kapitel 1.2 formulierten Hypothesen. Das Wort „Hypothese“ entstammt dem Griechischen und heißt so viel wie „Unterstellung“ (Töpfer 2012); S. 175. Eine Hypothese beziehungsweise ein Gesetz ist eine allgemeine Aussage über Zusammenhänge zwischen empirischen und logischen Sachverhalten. Eine klassische Hypothese wird entweder über eine „Wenn..., dann...“ oder eine „Je..., desto...“ Aussage formuliert (Opp 1970); S. 198ff. Eine so genannte nomologische Hypothese bezeichnet dabei eine Ursache-Wirkungs-Beziehung (Töpfer 2012); S. 87.

Einzelne oder singuläre Beobachtungsaussagen können genutzt werden, um Hypothesen zu bilden. Die Vorgehensweise, von singulären Beobachtungen auf allgemeingültige Hypothesen zu schließen, nennt man induktive Erkenntnislogik. Demgegenüber steht die deduktive Erkenntnislogik, das heißt die Formulierung allgemeingültiger Gesetze (häufig auf der Grundlage von Theorien) und die daraus folgende Ableitung von Erwartungen über spezifische Situationen, die überprüft werden (Schnell et al. 2008); S. 58-59. Werden nach dieser deduktiven Logik Ursache-Wirkungs-Gesetze formuliert und überprüft, spricht man von einer „deduktiv-nomologischen Erklärung“ (Schnell et al. 2008); S. 59.

Die vorliegende Arbeit arbeitet sowohl induktiv als auch deduktiv. Die Ermittlung der Forschungslücke sowie der erste Erkenntnisgewinn ergeben sich aus dem Rechenbeispiel einer spezifischen Welle-Nabe-Verbindung. Daraus wurden Hypothesen abgeleitet, die in dieser Dissertation leitend sind (siehe Kapitel 1.2). Diese Hypothesen treffen potentiell allgemeingültige Wenn-Dann-Aussagen und sind daher nomologisch. Dies ist eine induktive Herangehensweise (vergleiche (Töpfer 2012); S. 112).

Die Gültigkeit dieser induktiv entwickelten Hypothesen und damit der darin postulierten allgemeingültigen Zusammenhänge (Gesetze) wird in dieser Arbeit dann anhand weiterer Welle-Nabe-Verbindungen und anderer Fallbeispiele überprüft. Hierbei handelt es sich um eine deduktive Vorgehensweise (vgl. (Töpfer 2012); S. 113).

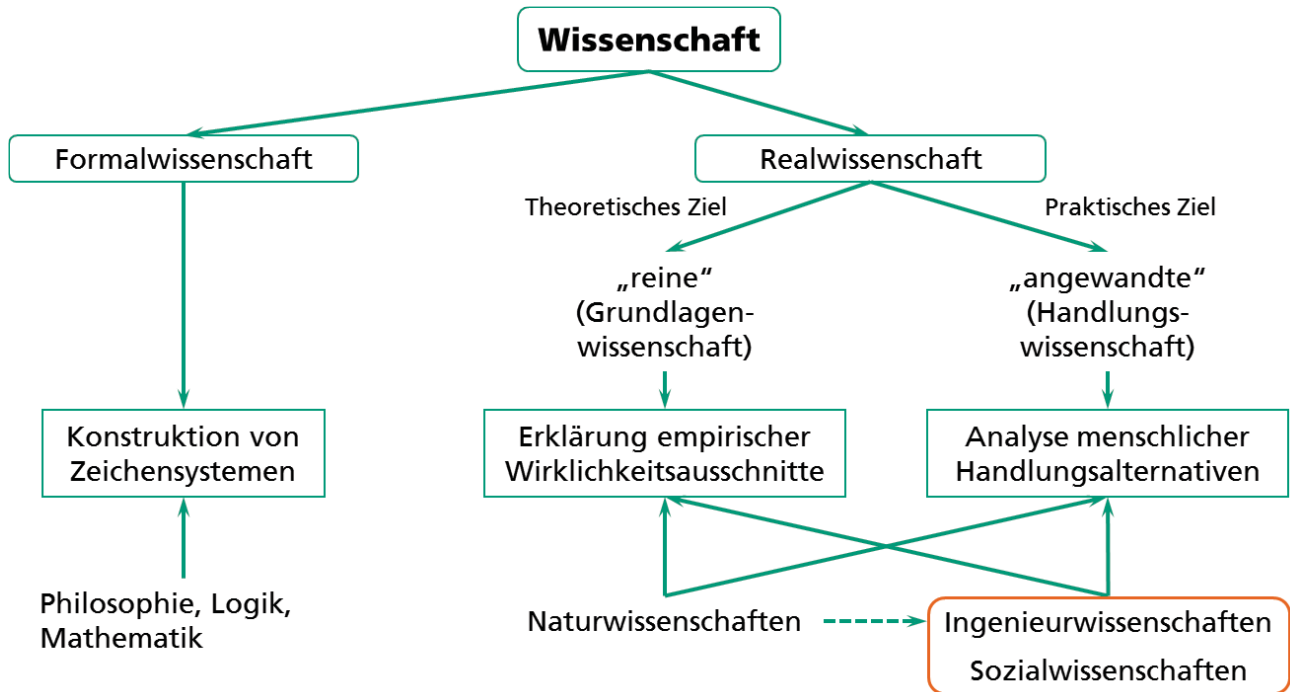
Abbildung 2 stellt das in dieser Arbeit zugrundeliegende forschungsmethodische Vorgehen dar.



**Abbildung 2: Forschungsmethodisches Vorgehen**  
*Quelle: Eigene Darstellung*

## 1.5 Verortung in der Wissenschaftssystematik

Maßgeblich für die wissenschaftstheoretische Einordnung dieser Arbeit ist das von Ulrich und Hill beschriebene System der Wissenschaften (vgl. (Ulrich et al. 1976); siehe Abbildung 3):



**Abbildung 3: Idealtypische Wissenschaftssystematik**

*Quelle: Eigene Darstellung nach (Borner 2005), (Ulrich et al. 1976)*

Nach Ulrich und Hill unterteilen sich die Wissenschaften in Real- und Formalwissenschaften. Die Formalwissenschaften setzen sich mit der Konstruktion von Sprache auseinander, das heißt mit Zeichensystemen und den Regeln der Verwendung dieser Zeichen. Zu diesen Formalwissenschaften gehören beispielsweise die Mathematik, Logik und Philosophie<sup>6</sup>. Die Realwissenschaften beschäftigen sich mit der „Beschreibung, Erklärung und Gestaltung empirisch (sinnlich) wahrnehmbarer Wirklichkeitsausschnitte“ (Ulrich et al. 1976). Ulrich und Hill unterscheiden die Realwissenschaften

<sup>6</sup> Anmerkung des Autors: Ob die Philosophie hier so einfach einzugliedern ist, ist fraglich, da sie sich unter anderem mit Lebensfragen und Entscheidungen beschäftigt und somit eine gestaltende Wirkung auf das menschliche Dasein hat.

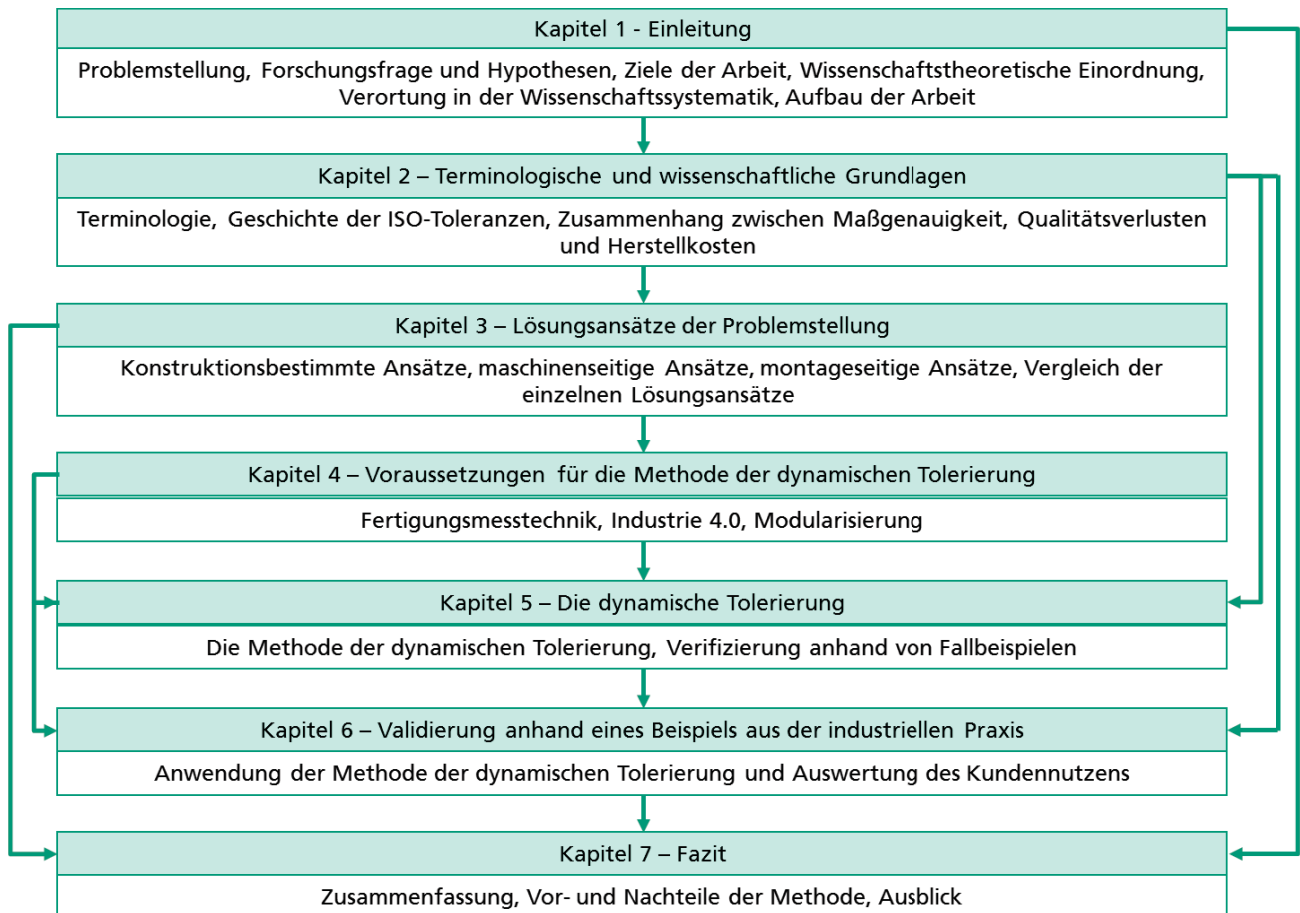
weiterhin in „reine“ Wissenschaften, die sogenannten Grundlagenwissenschaften, und in „angewandte“ Wissenschaften, die sogenannten Handlungswissenschaften. Die „reinen“ Wissenschaften, wie die Naturwissenschaften, beschäftigen sich insbesondere mit theoretischen Zielen und versuchen empirische Wirklichkeitsausschnitte zu erklären. Die angewandten Wissenschaften (beispielsweise die Ingenieurwissenschaften oder die Sozialwissenschaften) versuchen dagegen, menschliche Handlungsalternativen zu analysieren und praktische Ziele zu erreichen. In diesem Bereich der angewandten Handlungswissenschaften lässt sich die vorliegende ingenieurwissenschaftliche Arbeit einordnen.

Die genannten Abgrenzungen müssen nach Ansicht des Autors jedoch als idealtypische Kategorisierungen verstanden werden. Forschung in den einzelnen Disziplinen lässt sich häufig nicht nur einer dieser Kategorien zuordnen. So verfolgen auch viele Naturwissenschaftler, die Grundlagenforschung betreiben, zumindest implizit praktische Ziele, wie etwa die Heilung bestimmter Krankheiten. Auch die Unterscheidung in Real- und Formalwissenschaften ist nicht trennscharf: Beispielsweise steht im Zentrum der Arbeit von Philosophen im Bereich der angewandten Ethik, gesellschaftliche Handlungsalternativen zu analysieren und Orientierungspunkte zu bieten.

Auch die Ingenieurwissenschaften lassen sich in diesem Modell nur idealtypisch als angewandte Wissenschaften verorten. Sie sind in vielen Bereichen auf Grundlagenwissenschaften (insbesondere im naturwissenschaftlichen Bereich) und deren Erkenntnisse angewiesen. Dennoch bietet das Modell einen hilfreichen Rahmen, um wissenschaftliche Arbeiten einzuordnen. Konkret befasst sich die vorliegende ingenieurwissenschaftliche Arbeit mit der Analyse von menschlichen Handlungsalternativen, da Sie sich mit einer Methodik in der Produktion beschäftigt. Naturwissenschaftliche Grundlagen und die Konstruktion von Zeichensystem (in dieser Arbeit die Mathematik) sind jedoch für ihr Gelingen unabdingbar.

## 1.6 Aufbau der Arbeit

Die Arbeit ist in sieben Kapitel strukturiert (vergleiche Abbildung 4).



**Abbildung 4: Struktur der Arbeit**

*Quelle: Eigene Darstellung*

Das erste Kapitel dient der Identifikation der Problemstellung, der Forschungsfrage und der Hypothesen. Außerdem erfolgt in diesem Kapitel eine wissenschaftstheoretische Einordnung der vorliegenden Arbeit.

In Kapitel zwei werden die relevanten Fachbegriffe definiert sowie das Konzept der Toleranzen historisch eingeordnet. Darüber hinaus werden die für diese Arbeit zentralen Zusammenhänge zwischen Maßgenauigkeit, Herstellkosten und Qualitätsverlusten dargestellt.

Anschließend analysiert Kapitel drei die bisher existierenden Lösungsansätze für die Problemstellung dieser Arbeit. Diese werden kategorisiert (in konstruktionsbestimmte, maschinen- und montageseitige Ansätze), anhand bestimmter Kriterien bewertet und miteinander verglichen.

Kapitel vier stellt für diese Arbeit relevante, aktuelle Entwicklungen in der Produktionstechnik dar. Dabei werden die für die Methodik der dynamischen Tolerierung relevanten Voraussetzungen herausgearbeitet.

Kapitel fünf beschreibt aufbauend auf den in Kapitel vier erarbeiteten Voraussetzungen die allgemeine Methodik der dynamischen Tolerierung. Anschließend werden zwei Fallbeispiele aus der Literatur dargestellt, um die Methodik der dynamischen Tolerierung zu verifizieren. Die in Kapitel zwei erarbeiteten Zusammenhänge zwischen Maßgenauigkeit, Qualitätsverlusten und Herstellkosten werden auf die Ergebnisse der Fallbeispiele angewendet, und so anhand dieser Beispiele der Nutzen und Mehrwert der Methodik für potentielle Kunden aufgezeigt.

In Kapitel sechs erfolgt dann die Validierung der Methodik der dynamischen Tolerierung. Dabei wird der Kundennutzen an einem industriellen Beispiel erprobt.

Das siebte und letzte Kapitel fasst die Arbeit zusammen und diskutiert sie. Dabei beantwortet es die eingangs gestellte Forschungsfrage. Des Weiteren werden die Vor- und Nachteile der Methodik erörtert. Zuletzt erfolgt ein Ausblick auf zukünftige Einsatzmöglichkeiten der Methodik in der Produktion.

---

## 2 Terminologische und wissenschaftliche Grundlagen

Ziel dieses Kapitels ist es, die für diese Arbeit notwendigen Begriffe und Grundlagen eindeutig zu erarbeiten und zu definieren. Des Weiteren wird der historische Hintergrund der Toleranzen erläutert, um die Herkunft und den Zweck von Toleranzen beziehungsweise Toleranzsystemen besser nachvollziehen zu können. Darauf aufbauend wird der Zusammenhang zwischen Toleranzanforderung und Herstellkosten sowie der Zusammenhang zwischen Toleranzanforderung und Qualitätsverlusten analysiert.

### 2.1 Terminologie

Das nachfolgende Kapitel dient dazu, die Unterschiede zwischen den verschiedenen Maßangaben aufzuzeigen.

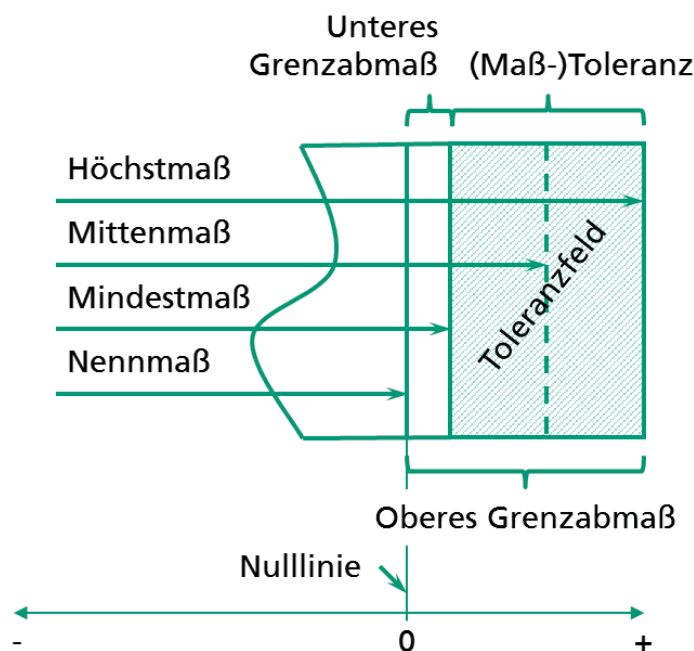
#### **Toleranzen:**

Die Toleranz im technischen Sinne ist die zulässige Differenz zwischen dem angestrebten Soll-Maß, der Soll-Größe oder der Soll-Menge. Sie ist für die Funktionserfüllung unabdingbar, da der vom Konstrukteur oder Entwickler avisierte Idealzustand eines Bauteils (Produktmerkmal) in den wenigsten Fällen besteht. Die Produktion ist immer mit Abweichungen zwischen dem Ist- und dem Soll-Wert behaftet und das Erreichen des „idealen“ Produktmerkmals eines Bauteils ist für die Fertigung praktisch unmöglich (Matek et al. 2001); S. 21. Da Abweichungen vom Idealzustand somit unvermeidlich sind, werden allen Produktmerkmalen von Bauteilen Grenzen gegeben, die sogenannten Toleranzgrenzen (Jorden et al. 2014); S. 15. Diese Toleranzgrenzen sind unabdingbar, um die Zuverlässigkeit eines Produktes oder eines Modules sicherzustellen, Kundenanforderungen zu berücksichtigen oder die Restriktionen der Fertigung oder Montage aufzunehmen (Merget 2004); S. 18. Dabei müssen die Toleranzgrenzen sinnvoll gewählt werden. Weite Toleranzgrenzen sind kostengünstig zu fertigen, während

enge Toleranzgrenzen zu einer hohen Betriebssicherheit führen. Hier gilt das Motto: „So grob wie möglich, so fein wie nötig!“ (Matek et al. 2001); S. 21.

In der Literatur findet man eine Unterteilung in mechanische, chemische, physikalische und nicht zuletzt geometrische Toleranzen (Szyminski 2013); S. 10. Für die vorliegende Arbeit sind nur die geometrischen Toleranzen relevant, da die entwickelte Methodik mit geometrischen Abmessungen verifiziert und validiert wird<sup>7</sup>. In der Entwicklung und in der Konstruktion werden Werkstücke meist so ausgelegt und als Computer-Aided-Design-Anwendung (CAD-System) visualisiert, wie sie sich der Entwickler beziehungsweise Konstrukteur im Idealmaß vorstellt (Jorden et al. 2014); S. 13.

Die wichtigsten Grundbegriffe der geometrisch tolerierten Bemaßung nach (Norm DIN EN ISO 286-1 2010) werden im Folgenden genauer definiert und einige in Abbildung 5 illustriert.



**Abbildung 5: Toleranzbegriffe**

*Quelle: Eigene Darstellung nach (Norm DIN ISO 286-1 2010); S. 12*

<sup>7</sup> Die hier entwickelte Methode kann in der Zukunft jedoch auf alle messbaren Eigenschaften von Bauteilen angewendet werden, siehe Kapitel 5.1.3.

<b>Nennmaß</b>	<i>N</i>	Maß eines Geometrieelementes in perfekter Form, wie durch die Spezifikation der Zeichnung festgelegt (z.B.: 31 mm oder 2,45 mm)
<b>Istmaß</b>	<i>I</i>	Maß des zugeordneten vollständigen Maßelementes, wie durch Messen festgestellt (z.B.: 30,081 mm). Das Istmaß ist immer mit einer Messunsicherheit behaftet (Matek et al. 2001)
<b>Abmaß</b>	<i>E, e</i>	Ist-Wert minus seines tatsächlichen Bezugswertes beziehungsweise Sollwerte. Im Allgemeinen spricht man von der algebraischen Differenz zwischen einem Maß und dem dazugehörigen Nennmaß (Matek et al. 2001); S. 22.
<b>Oberes Grenz- abmaß</b>	<i>ES, es</i>	Höchstmaß minus Nennmaß <i>ES</i> gilt für innere Geometrieelemente <i>es</i> gilt für äußere Geometrieelemente
<b>Unteres Grenz- abmaß</b>	<i>EI, ei</i>	Mindestmaß minus Nennmaß <i>EI</i> gilt für innere Geometrieelemente <i>ei</i> gilt für äußere Geometrieelement
<b>Mindestmaß</b>	<i>LLS</i>	Kleinstes zugelassenes Maß eines Maßelementes [engl.: lower limit of size LLS].. In der DIN EN ISO 14405-1:2014-01 wird das Mindestmaß als untere Größenmaßgrenze bezeichnet (Norm DIN EN ISO 14405-1 2011a); S. 10

$$LLS = \begin{array}{l} N + EI ; \text{für innere Geometrieelemente} \\ N + ei ; \text{für äußere Geometrieelemente} \end{array}$$

**Höchstmaß** *ULS* Größtes zugelassenes Maß eines Maßelementes [engl. Upper limit of size ULS] In der DIN EN ISO 14405-1:2014-01 wird das Höchstmaß als obere Größenmaßgrenze bezeichnet (Norm DIN EN ISO 14405-1 2011a); S. 10

$$ULS = \begin{array}{l} N + ES ; \text{für innere Geometrieelemente} \\ N + es ; \text{für äußere Geometrieelemente} \end{array}$$

Differenz zwischen dem Mindestmaß und dem Höchstmaß (den Toleranzgrenzen).

**Toleranz/Toleranzfeld**

$$T \text{ Allgemein: } T = ULS - LLS$$

$$\text{Bohrung: } T_B = ULS_B - LLS_B = ES - EI$$

$$\text{Welle: } T_W = ULS_W - LLS_W = es - ei$$

**Mittenmaß/  
Fertigungsmaß**

*C* Entspricht dem arithmetischen Mittelwert zwischen Höchstmaß und Mindestmaß (Jorden et al. 2014); S. 21. Dieses Maß wird meist an den Maschinen eingestellt (zum Beispiel: 12H7 entspricht  $LLS=12,000$  mm und  $ULS=12,018$  mm  $\rightarrow$  eingestellt wird  $C=12,009$  mm)

$$C = \frac{ULS + LLS}{2}$$

### Dynamische Tolerierung:

Als dynamische Tolerierung wird in dieser Arbeit eine Methodik bezeichnet, bei der die Toleranzen während der Produktion auf Messwerte des zu paarenden Bauteils

beziehungsweise der zu paarenden Bauteile einer Baugruppe anpasst. Somit erfolgt in jeder Baugruppe eine dynamische Toleranzanpassung.

### **Funktionalität:**

Unter Funktionalität wird verstanden, dass eine Baugruppe oder ein System die ihm zugewiesenen Aufgabe (Funktion) erfüllt. Dies ist eine Hauptanforderung an eine Baugruppe oder ein System (Matek et al. 2001); S. 8.

### **Produktrisiko:**

Das Produktrisiko bezeichnet das Auftreten unerwünschter Produktionsergebnisse und spiegelt sich somit meist negativ in der Funktionalität oder der Lebensdauer der Baugruppe wider (Rogler 2002); S. 145.

### **Passung:**

Die Passung bezeichnet die allgemeine Beziehung zwischen gefügten Bauteilen, die einer Toleranz unterliegen. Ein Passsystem ist auf die Funktion der Bauteile sowie die Austauschbarkeit der einzelnen Bauteile ausgelegt (Matek et al. 2001); S. 26.

### **Grundtoleranzgrad:**

Der Grundtoleranzgrad ist „eine Gruppe von Toleranzen für Längenmaße, die durch einen gemeinsamen Identifizierer gekennzeichnet sind“ (Norm DIN ISO 286-1 2010); S. 9. Dabei entspricht ein Toleranzgrad einem Genauigkeitsniveau. Der Grundtoleranz-Identifizierer besteht immer aus dem IT (ISO Toleranz) plus der Gradnummer (beispielsweise IT7). Dabei gilt: Je größer die Zahl, desto größer die Toleranz (Norm DIN ISO 286-1 2010).

### **Toleranzgewinn:**

Der Toleranzgewinn bezeichnet die Differenz zwischen der konstruktiv vorgegeben Toleranz und der Toleranz, die ein Bauteil einer Baugruppe in der Produktion einhalten muss. Ein Toleranzgewinn ist positiv wenn eine Vergrößerung und negativ wenn eine Verkleinerung der Toleranz vorliegt.

## 2.2 Geschichte der ISO-Toleranzen

Bevor im Folgenden näher auf den Zusammenhang zwischen der Maßgenauigkeit und den Produktionskosten eingegangen wird, ist es für diese Arbeit wichtig, einen Blick auf den geschichtlichen Hintergrund der Verwendung von Toleranzen in der Produktion einzugehen, um die Herkunft und den Hintergrund der Tolerierung zu verstehen.

Die Geschichte der Toleranzen lässt sich bis in das frühe 19. Jahrhundert zurückverfolgen. Ziel dabei war es, die Austauschbarkeit von Einzelteilen zu erreichen. Im Jahre 1830 wurden die ersten Uhren (1848 die ersten Taschenuhren) mit austauschbaren Einzelteilen hergestellt. 1859 wurden in Amerika Nähmaschinen hergestellt, für die passende Ersatzteile ohne Weiteres bestellt werden konnten (Leinweber 1941); S. 5.

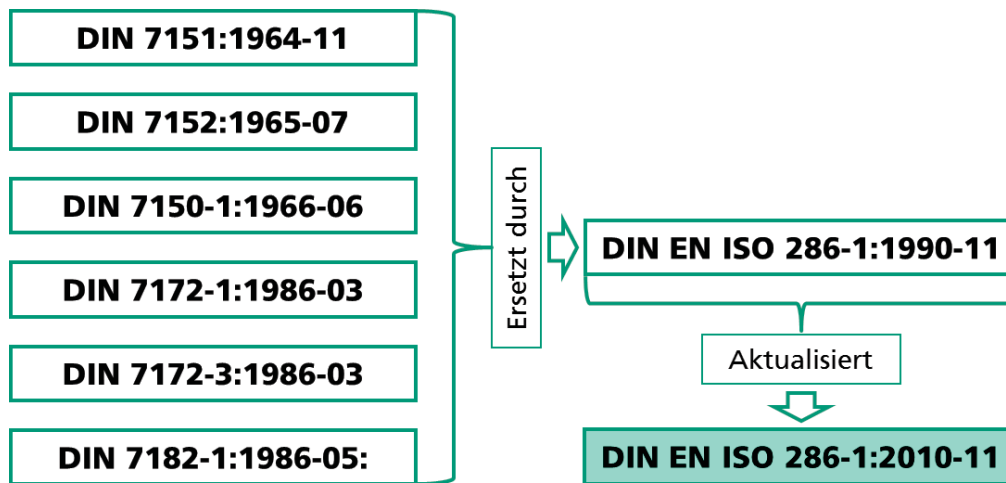
Bis zur Einführung von Toleranzlehren wurde in der deutschen Metallbearbeitung und -fertigung immer noch mit Normallehren gearbeitet. Lediglich das Feilen nach einer Lehre zur Größenbestimmung und das Feilen in einer Feillehre zur Umrissbegrenzung wurde durch Maschinenarbeit ersetzt. Somit war der Fertigungsprozess sehr stark von der Erfahrung und Einschätzung des Arbeiters abhängig. Unter dem Einfluss der US-Amerikaner, Einzelteile austauschbar zu produzieren, wurden dann im Jahr 1870 in der deutschen Waffenfertigung die ersten flachen Toleranzlehren (zur zahlenmäßigen Bestimmung des Größtmaßes) eingeführt; es vollzog sich ein Wandel von der so genannten „Normallehre“ zur „Toleranzlehre“. Durch die Einführung dieser flachen Toleranzlehren konnte durch das Kleinstspiel (der kleinste zulässige beziehungsweise mögliche Abstand zwischen zwei Bauteilen) sichergestellt werden, dass Werkstücke gefügt werden können. Weiterhin konnte das Größtspiel (der größte zulässige beziehungsweise mögliche Abstand zwischen zwei Bauteilen) messtechnisch erfasst werden (Buxbaum 1919); S. 18. Damit wurde der Grundstein für ein Toleranzsystem im Bereich der Maßtoleranzen gelegt, das in dieser Art und Weise bis heute grundsätzlich gleich geblieben ist.

Das 1903 in der US-amerikanischen Armee eingeführte Springfield-Gewehr wurde vor dem ersten Weltkrieg in staatlichen Produktionsstätten hergestellt. Da dort Normallehren im Einsatz waren und die Revisoren über ausreichend Erfahrung bezüglich der Maßtoleranzen verfügten, mussten diese nie konkret benannt werden. Nach dem Ausbruch des Weltkrieges wurden auf Grund von Produktionsengpässen große Aufträge an die Privatindustrie vergeben. Dieser fehlte es jedoch an erfahrenem Personal, das die Springfield-Gewehre nach Normallehren fertigen konnte. Deshalb wurde umgehend dazu übergegangen, alle Waffenzeichnungen mit Toleranzen zu versehen und Grenzlehren zu entwerfen und anzufertigen (McFarland 1924).

Die ersten Grundsteine für die DIN EN ISO 286-1 wurden bereits 1964 gelegt und damit für eine Standardisierung von Grenzmaßen und Passungen. Die damalige DIN 7151:1964-11 beschrieb die Grundtoleranzen für Längenmaße von 1 mm bis 500 mm Nennmaß (Norm DIN 7151 1964). In den folgenden beiden Jahren wurden die Normen „DIN 7152:1965-07: Bildung von Toleranzfeldern aus den ISO-Grundabmaßen für Nennmaße von 1 bis 500 mm“ (Norm DIN 7152 1965) und „DIN 7150-1:1966-06: ISO-Toleranzen und ISO-Passungen für Längenmaße von 1 bis 500 mm; Einführung“ (Norm DIN 7150-1 1966) veröffentlicht. Dabei handelte es sich um die Standardisierung von Toleranzen und Passungen von Längenmaßen.

Erst nach über zwanzig Jahren wurden weitere Normen veröffentlicht, welche die Toleranzen und Grenzabmaße für Längenmaße über 500 mm definierten (Norm DIN 7172-1 1986), (Norm DIN 7172-3 1986). Um die Begrifflichkeiten klar zu definieren wurde kurz darauf die Norm „DIN 7182-1:1986-05: Maße, Abmaße, Toleranzen und Passungen; Grundbegriffe“ veröffentlicht (Norm DIN 7182-1 1986). 1990 wurden die bisher genannten Normen in der heute bekannteren DIN EN ISO 286-1:1990-11 zusammengeführt (Norm DIN EN ISO 286-1 1990). Da das Thema der Toleranz- und Passsysteme bis heute im Ingenieurwesen einen hohen Stellenwert hat, wurde die Norm 2010 aktualisiert (Norm DIN ISO 286-1 2010).

Abbildung 6 stellt die historische Entstehung der DIN EN ISO 286-1:2010–11 dar.

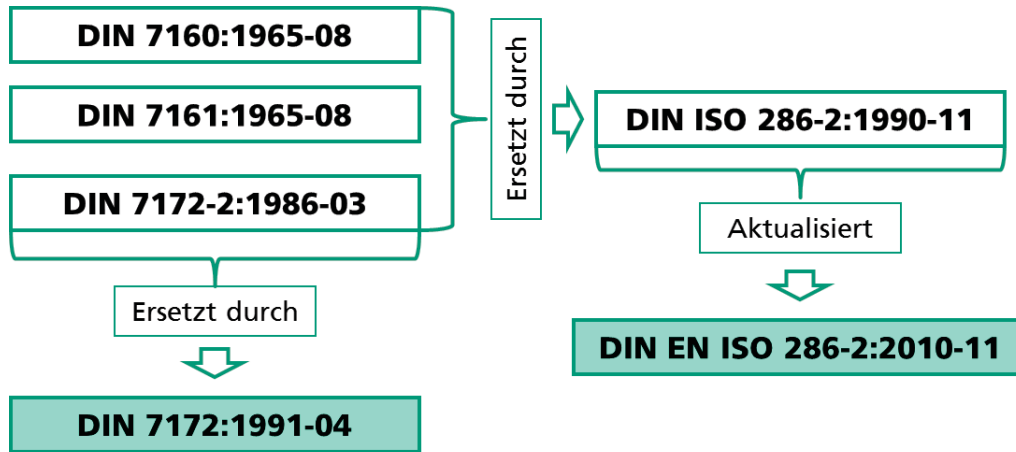


**Abbildung 6: Entstehung der DIN EN ISO 286-1:2010-11**

*Quelle: Eigene Darstellung*

Ebenso wurden 1965 der Grundstein für die heute gültige DIN EN ISO 286-2 gelegt und die Normen „DIN 7160:1965-08: ISO-Abmaße für Außenmaße (Wellen), für Nennmaße von 1 bis 500 mm“ und „DIN 7161:1965-08: ISO-Abmaße für Innenmaße (Bohrungen), für Nennmaße von 1 bis 500 mm“ veröffentlicht (Norm DIN 7160 1965), (Norm DIN 7161 1965). Zusammen mit Teilen der „DIN 7172-2:1986-03: Toleranzen und Grenzabmaße für Längenmaße über 500 bis 10 000 mm; Grenzabmaße“ (Norm DIN 7172-2 1986) wurden die Normen in der „DIN ISO 286-2:1990-11: ISO-System für Grenzmaße und Passungen; Tabellen der Grundtoleranzgrade und Grenzabmaße für Bohrungen und Wellen“ ersetzt und 2010 aktualisiert (Norm DIN ISO 286-2 1990). Andere Teile der DIN 7172-2:1986-03 wurden wiederum in der Norm „DIN 7172:1991-04: Toleranzen und Grenzabmaße für Längenmaße über 3 150 bis 10 000 mm; Grundlagen, Grundtoleranzen, Grenzabmaße“ veröffentlicht.

Abbildung 7 illustriert die historische Entstehung der DIN 7172:1991-04 und der DIN EN ISO 286-2:2010–11.



**Abbildung 7: Entstehung der DIN EN ISO 286-2:2010-11 und der DIN 7172:1991-04**

*Quelle: Eigene Darstellung*

Bedeutend für Toleranzsysteme war auch die Definition der so genannten Allgemeintoleranzen 1991. Die Allgemeintoleranzen dienen der Vereinfachung von Zeichnungen (Norm ISO DIN ISO 2768-2 1991; Norm DIN ISO 2768-1 1991), da eine Zeichnung unübersichtlich wird, wenn alle Maße und Toleranzen eingetragen werden (Klein 2014); S. 95. Allgemeintoleranzen haben nach (Klein 2014) zwei Aufgaben:

1. die Eigenschaften untolerierter Geometrielemente maßlich und geometrisch einzugrenzen und
2. die Sicherung der werkstattüblichen Genauigkeiten

Eine weitere Norm, die eine Reihe von Werkzeugen zur Verfügung stellt, um verschiedene Arten von Größenmaßmerkmalen auszudrücken, ist die „DIN EN ISO 14405-1:2017-07: Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Dimensionelle Tolerierung - Teil 1: Lineare Größenmaße“ (Norm DIN EN ISO 14405-1 2017). Sie basiert auf der vorherigen Norm „DIN EN ISO 14405-1:2011-04: Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Dimensionelle Tolerierung - Teil 1: Längenmaße“ (Norm DIN EN ISO 14405-1 2011).

Wie in diesem Kapitel dargestellt, lässt sich die Entwicklung von Toleranz- und Passsystemen somit bis ins frühe 19. Jahrhundert zurückverfolgen. Die Entstehung und Aktualisierung der dazugehörigen Normen bis zum Juli 2017 verweist gleichzeitig auf die anhaltende Bedeutung der Thematik.

### **2.3 Zusammenhang zwischen Maßgenauigkeit und Herstellkosten**

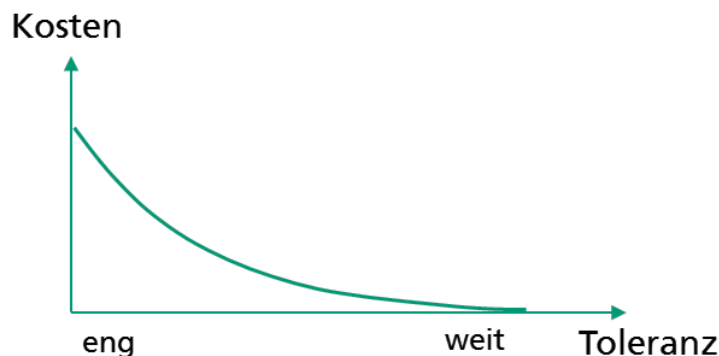
Wie in Kapitel 1.1 gezeigt, stellt die Tolerierung in der Auslegung oder Konstruktion von funktionsrelevanten Bauteilen einer Baugruppe eine große Herausforderung für Konstrukteure und Entwickler dar. Die Herausforderung besteht darin, die Bauteile ausreichend gering zu tolerieren, so dass die Funktionalität sichergestellt, ist aber gleichzeitig die Toleranzen möglichst weit zu definieren, so dass die Herstellkosten möglichst gering gehalten werden („So grob wie möglich, so fein wie nötig!“ (Matek et al. 2001); S.21).

Ziel der (Norm DIN EN ISO 9000 2015) ist es unter anderem, Qualitätseinbußen zu minimieren. Qualitätseinbußen können einerseits zu hohen Produktionskosten in Form eines hohen Anteils an Ausschuss oder Nacharbeit, langen Bearbeitungsdauern oder auch aufwändigen Prüfvorgängen führen. Auf der anderen Seite können Qualitätseinbußen auf Produktebene auch bedeuten, dass die Lebensdauer der Produkte nicht gewährleistet ist oder die Funktionen eingeschränkt sind.

Doch welcher Zusammenhang besteht genau zwischen Toleranzanforderungen beziehungsweise der Maßgenauigkeit und den Herstellkosten? Im Folgenden wird zuerst das Verhältnis zwischen Toleranzanforderungen und Herstellkosten detaillierter betrachtet. Daraufhin werden das Verhältnis zwischen Toleranzen und Qualitätsverlusten und abschließend Modelle betrachtet, die sowohl die Herstellkosten als auch die Qualitätsverluste berücksichtigen.

### 2.3.1 Toleranzanforderungen und Herstellkosten

Wie bereits dargelegt, führen engere Toleranzen zu höheren Kosten (siehe auch (Yeo et al. 1996); (Abdel-Malek et al. 1994)). Ursache hierfür ist beispielsweise die hohe nötige Genauigkeit der Maschine, der Aufnahme oder des Werkzeugs. Weitere Kostentreiber bei engen Toleranzen sind beispielsweise die Genauigkeit der Linearantriebe, der Verschleiß der Werkzeuge sowie Maschinenelemente, aber auch thermische Verformungen, unbekannte prozessrelevante Störgrößen, Materialunreinheiten oder Einstellfehler. All die genannten Ursachen führen zu einer erhöhten stochastischen Abweichung der Maßgenauigkeit. Um diesen Ursachen entgegenzuwirken, werden wiederum teurere und präzisere Komponenten, stabilere Werkzeuge oder Maschinenkomponenten, kürzere Instandhaltungsintervalle, hohes Prozesswissen oder aufwendige Regelungs- und Steuerungstechnik benötigt. In der Literatur wird der Zusammenhang zwischen Toleranzklasse und Kosten meist exponentiell dargestellt ((Yeo et al. 1996), (Sfantsikopoulos 1990), (Hsieh 2006), (Bohn 1998), (Muthu et al. 2009); Zhang et al. 1993). Abbildung 8 illustriert diesen Zusammenhang.

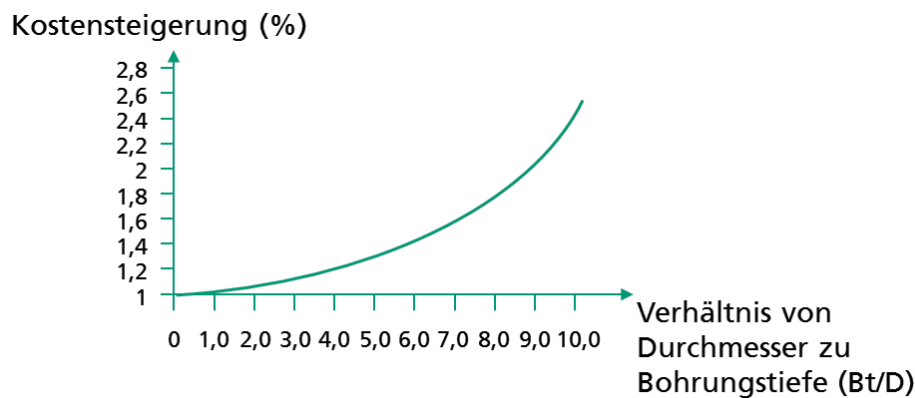


**Abbildung 8: Klassische Beziehung zwischen Toleranzklasse und Herstellkosten**

*Quelle: Eigene Darstellung nach (Sfantsikopoulos 1990); (Zhang et al. 1993)*

Xue (Xue et al. 1993) beschreibt weiterhin, dass die Produktionskosten nicht nur von der Toleranz abhängen, sondern auch die geometrische Beschaffenheit sowie die

Größe eines Bauteils eine erhebliche Rolle spielen. Dabei ist beispielsweise zu beachten, inwieweit ein zu bearbeitendes Werkstück eingespannt werden kann oder ob die Position der zu bearbeitenden Stelle gut erreichbar ist. Um dies empirisch nachzuweisen, nutzte (Xue et al. 1993) die empirischen Daten, die in (Trucks 1987) und (Dieter 1983) zusammengestellt wurden<sup>8</sup>. Hierbei wurde das Beispiel eines Bohrungsdurchmessers im Verhältnis zur Bohrungstiefe genutzt (siehe Abbildung 9).



**Abbildung 9: Bohrungsdurchmesser zu Bohrungstiefe versus Kostensteigerung**  
*Quelle: Eigene Darstellung nach (Xue et al. 1993) basierend auf empirischen Daten von (Trucks 1976) und (Dieter 1983)*

Die Abbildung verdeutlicht, dass bei einem zunehmenden Verhältnis von Bohrungstiefe (Bt) zu Bohrungsdurchmesser (D) die Kosten exponentiell ansteigen. Theoretisch lässt sich das dadurch erklären, dass der Bohrer bei einem hohen Verhältnis von Bohrungstiefe zu Bohrungsdurchmesser sehr lang und dünn ist. Dadurch wird die Torsions- und Schubsteifigkeit stark beeinflusst. Dies kann beispielsweise zu stärkeren Vibrationen oder ungleichmäßigem Materialabtrag führen und somit die Genauigkeit verringern. Um eine Genauigkeit zu erreichen, die gleichwertig mit der Genauigkeit

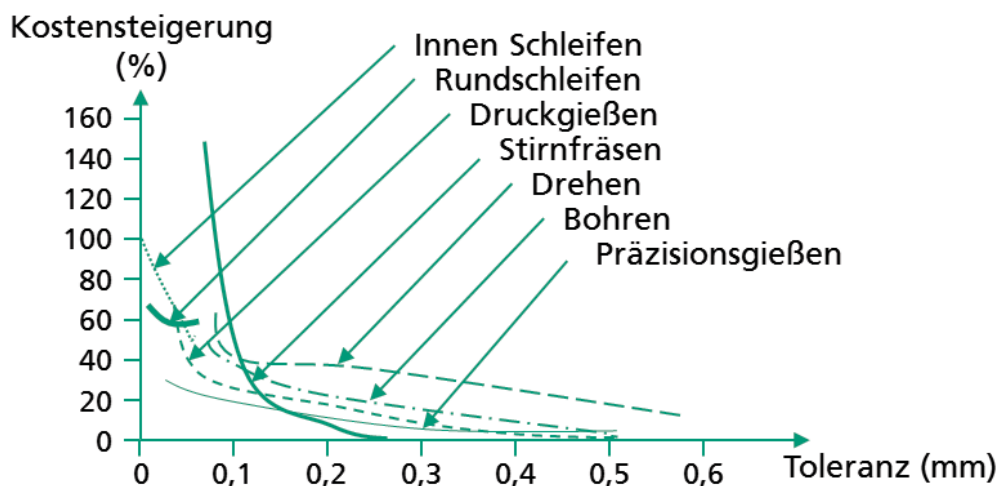
---

<sup>8</sup> Eine weitere gute Zusammenstellung dieser Daten findet sich in (Yeo et al. 1996).

einer Bohrung mit einem geringen Verhältnis von Bohrungstiefe zu Bohrungsdurchmesser ist, muss der Bohrprozess optimiert werden. Dies kann über die Bearbeitungsgeschwindigkeit oder besonderes Werkzeug oder durch den Einsatz von Regelungstechnik erreicht werden, was wiederum zu deutlichen Mehrkosten führt.

Kritisch anzumerken ist, dass das Bild suggeriert, dass selbst bei einer nicht vorhandenen Bohrung eine Kostensteigerung um 1% entsteht (Verhältnis Durchmesser zu Bohrungstiefe = 0).

Nach Xue (Xue et al. 1993) hängen die Bearbeitungskosten zudem nicht nur von der Genauigkeit und der Bauteilgeometrie ab, sondern auch von der jeweiligen Bearbeitungstechnologie. Abbildung 10 zeigt den Zusammenhang zwischen den Toleranzen und Herstellkosten für bestimmte Bearbeitungsverfahren.



**Abbildung 10: Toleranzen versus Produktionskosten verschiedener Bearbeitungsverfahren**

*Quelle: Eigene Darstellung nach (Xue et al. 1993)*

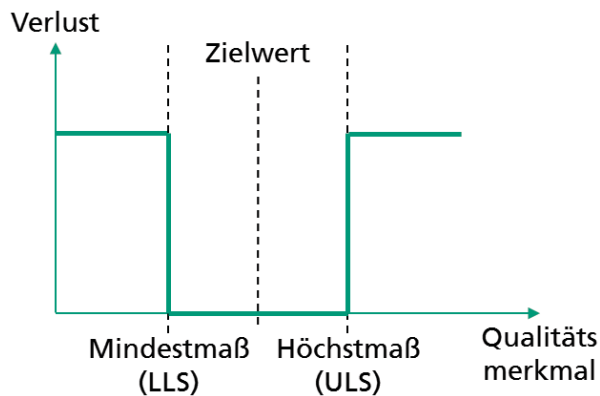
Dabei muss allerdings beachtet werden, dass nicht jedes Verfahren für jedes Material oder jede Geometrie eingesetzt werden kann. Meistens werden Produkte vom „Groben“ ins „Feine“ hergestellt. Dies kann im Idealfall auf einer Maschine mit verschie-

denen Werkzeugen und Einstellungen erfolgen. Kann allerdings eine Genauigkeitsanforderung nicht auf einer einzelnen Maschine erreicht werden, ist der Hersteller gezwungen, das vorbehandelte Werkstück auf eine präzisere Maschine umzuspannen. Dies wiederum spiegelt sich in den Herstellkosten wider.

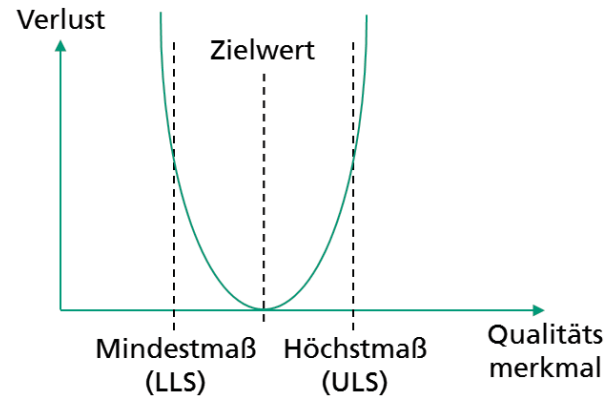
### **2.3.2 Toleranzanforderungen und Qualitätsverlust**

Das wichtigste Konzept zur Beschreibung des Qualitätsverlusts in Abhängigkeit der Abweichung vom Soll-Ziel stammt von Taguchi ((Taguchi 1985), Taguchi et al. 1990). Taguchi geht davon aus, dass jede Abweichung vom Zielwert einen Qualitätsverlust darstellt. Nach seinem Denkansatz verringert schon eine kleine Abweichung vom Zielwert die allgemeine Robustheit und Leistungsfähigkeit eines Produkts. Dies steht im Gegensatz zu den geläufigen und allgemein akzeptierten Ansätzen (die Austauschbarkeit ist gegeben, sobald das gefertigte Produktmerkmal in den Toleranzgrenzen liegt), nach denen ein Qualitätsverlust erst dann eintritt, wenn das Qualitätsmerkmal außerhalb des Toleranzbereichs liegt (siehe Abbildung 11, links). Taguchi hingegen beschreibt eine quadratische Verlustfunktion, nach der schon kleinste Abweichungen vom Zielwert, die immer noch innerhalb des Toleranzbereichs liegen, zu einem Qualitätsverlust führen (siehe Abbildung 11, rechts).

### Sprungfunktion



### Quadratische Verlustfunktion



**Abbildung 11: Qualitätsverständnis Sprungfunktion versus Taguchis Verlustfunktion**

*Quelle: Eigene Darstellung nach (Wagner 2018)*

Um die Verlustfunktion  $L(y)$  mathematisch zu beschreiben, setzt Taguchi eine Taylorreihe ein:

$$L(y) = L(m) + \frac{L'(m)}{1!} * (y - m) + \frac{L''(m)}{2!} * (y - m)^2 + \dots + \frac{L^n(m)}{n!} * (y - m)^n \quad (1)$$

wobei  $m$  der Zielwert ist und  $y$  der Istwert. Da bei Taguchis Ansatz immer gilt, dass kein Qualitätsverlust vorliegt, sobald  $m = y$ , folgt:

$$L(y = m) = 0$$

Zudem beschreibt „kein Qualitätsverlust“ ein absolutes Minimum. Somit ist sein Differentialquotient ebenso 0:

$$L'(y = m) = 0$$

Ferner vernachlässigt Taguchi die Terme höherer Ordnung. Dadurch lässt sich die Taylorreihe wie folgt vereinfachen:

$$L(y) = \frac{L''(m)}{2!} * (y - m)^2 \quad (2)$$

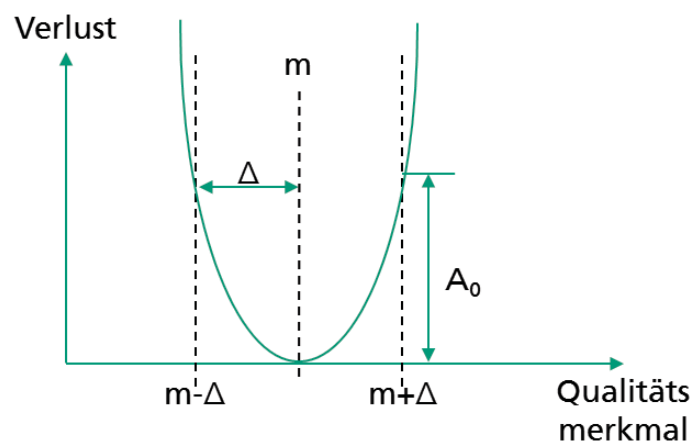
Folgender Term wird als konstant angesehen:

$$\frac{L''(m)}{2!} = konst.$$

daher gilt:

$$L(y) = k * (y - m)^2 \quad (3)$$

Abbildung 12 zeigt den Qualitätsverlust nach Taguchi, um die folgenden Berechnung besser klären zu können.



**Abbildung 12: Qualitätsverlust nach Taguchi**  
*Quelle: Eigene Darstellung nach (Wagner 2018)*

Die zulässige Abweichung von Mindest- oder Höchstmaß zum Zielwert wird als  $\Delta$  bezeichnet. Wird also ein Istwert von  $y = m+\Delta$  oder  $y = m - \Delta$  erreicht, liegt das produzierte Bauteil an der Toleranzgrenze. Taguchi bezeichnet dies als Verlust (in dieser Arbeit auch häufig als Produktrisiko bezeichnet), der sich zum Beispiel in Kundenunzufriedenheit oder anfallenden Reparaturkosten widerspiegelt. Daher definiert Taguchi den qualitätsbezogenen Verlust der Gesellschaft als  $A_0$ , der genau dann auftritt, wenn das Mindestmaß oder das Höchstmaß erreicht wird (Schmitt et al. 2015), S. 605.

Ist eine symmetrische Toleranz gegeben, gilt folgende Gleichung:

$$L(y = m - \Delta) = A_0 \quad (4)$$

Daraus folgt:

$$L(y = m - \Delta) = A_0 = k * (m - \Delta - m)^2$$

und

$$k = \frac{A_0}{\Delta^2}$$

Aus (3) lässt sich daher für eine Baugruppe bzw. ein vollständiges Produkt folgendes ableiten:

$$L(y) = \sum_{i=1}^n k_i * (y_i - m_i)^2 \quad (5)$$

Weiterhin beschreibt Taguchi, dass die Varianz  $\sigma^2$  die durchschnittliche Differenz zwischen dem Ist- und dem Zielwert ist. Die Varianz wird als Kennzeichnung der Genauigkeit einer Grundgesamtheit angenommen (Jarecki et al. 2011) und beschreibt somit die zu erwartende Streuung im Prozess (Voraussetzung ist, dass die Stückzahl größer 1 000 ist).

$$\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - m_i)^2 \quad (6)$$

Liu et al. (Liu et al. 2013) beschreiben in einer Weiterentwicklung des Ansatzes von Taguchi, wie die Standardabweichung unter Zuhilfenahme der Toleranzen der Bauteile ( $T_i$ ) beschrieben werden kann. Dies gilt nur unter der Bedingung, dass der Produktionsprozess einer Normalverteilung unterliegt. Dabei gilt:

$$\sigma = \frac{T_i}{3} \quad (7)$$

Daraus folgt für die Verlustfunktion:

$$L = \sum_{i=1}^n B_i * T_i^2 \quad (8)$$

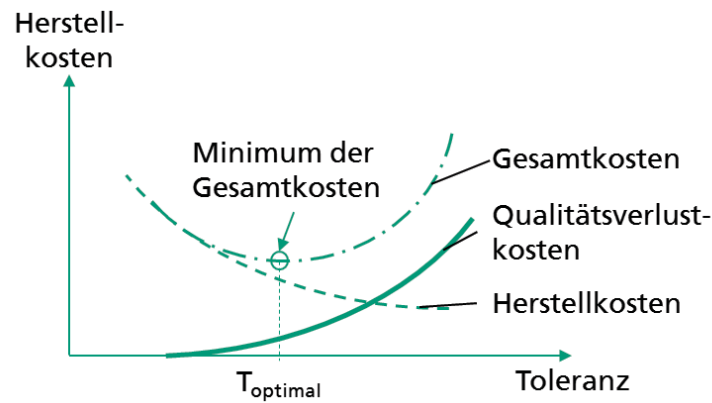
mit

$$B_i = \frac{k_i}{9} \quad (9)$$

Daraus wird ersichtlich, dass mit zunehmender Toleranz (und somit abnehmender Fertigungsgenauigkeit) der einzelnen Bauteile ( $T_i$ ),  $\lim_{T \rightarrow \infty} L = \infty$ , die Kosten für den Verlust quadratisch ansteigen (da  $T_i$  quadratisch in die Formel eingeht). Mit immer enger werdenden Toleranzen (und somit zunehmender Fertigungsgenauigkeit),  $\lim_{T \rightarrow 0} L = 0$ , nehmen die durch den Qualitätsverlust verursachten Kosten ab. Wie bereits durch Taguchi beschrieben, sind die Qualitätsverlustkosten bei Erreichen des Zielwertes nicht vorhanden. Analog dazu sind die Qualitätsverlustkosten bei Bauteilen, die keine Toleranz in ihrem Qualitätsmerkmal zulassen, auch nicht vorhanden.

### 2.3.3 Qualitätsverluste, Herstellkosten und Toleranzen

In der Literatur finden sich einige Modelle, die sowohl die Herstellkosten als auch die Qualitätsverlustkosten berücksichtigen und einen Zusammenhang zwischen diesen herstellen (Jeang 1996), (Hsieh 2006), (Liu et al. 2013). Da die Herstellkosten und die Qualitätsverlustkosten gegenläufig sind, werden die Kosten der Herstellung und des Qualitätsverlustes zu Gesamtkosten addiert. Es entsteht ein parabelförmiger Gesamtkostenverlauf (Abbildung 13).



**Abbildung 13: Beziehung zwischen Herstellkosten, Qualitätsverlustkosten und Toleranzen**

*Quelle: Eigene Darstellung nach (Jeang 1996), (Hsieh 2006), (Liu et al. 2013)*

Zu sehen ist, dass mit abnehmender Toleranz (enger werdender Toleranz) die Qualitätsverlustkosten abnehmen (vergleiche dazu Taguchis Verlustfunktion, Kapitel 2.3.2). Parallel dazu nehmen die Herstellkosten zu. Durch die Addition der Qualitätsverlust- und Herstellkosten entstehen die Gesamtkosten, die in Abbildung 13 parabelförmig dargestellt werden. Ziel der Arbeiten von (Jeang 1996), (Hsieh 2006), (Liu et al. 2013) ist es, das Minimum der Gesamtkosten zu finden und dadurch die wirtschaftlichsten Toleranzgrenzen auf den Lebenszyklus zu bestimmen.

---

### 3 Lösungsansätze für die Problemstellung

Das Problem der engen Toleranzen und der damit einhergehenden geforderten Herstellungspräzision von Bauteilen (und Baugruppen) ist schon seit Langem bekannt. In den letzten Jahrzehnten wurden daher verschiedene Ansätze entwickelt, um die Qualität der Baugruppen bei möglichst geringen Kosten zu erhöhen. Diese Ansätze werden im vorliegenden Kapitel vorgestellt. Dabei werden sie in folgende Kategorien unterteilt:

1. Konstruktionsbestimmte Ansätze (Toleranzverteilung basierend auf einer bestimmten Zielgröße, Veränderungen während der Konstruktion)
2. Maschinenseitige Ansätze (Wartungsintervalle, Regel- und Steuerkreise, Material- und Komponentenwahl)
3. Montageseitige Ansätze (Gruppentauschverfahren, Passzugabe, Einstellverfahren)

Da es zahlreiche Lösungsansätze für das Dilemma zwischen Herstellkosten und Produktrisiko (vergleiche Kapitel 2.1) gibt, werden die beschriebenen Lösungsansätze bewertet und miteinander verglichen. Zur Bewertung werden dabei sechs verschiedene Merkmale herangezogen, die für produzierende Unternehmen eine zentrale Rolle spielen: Wie eingangs dargestellt, streben Unternehmen sowohl niedrige Herstellkosten als auch eine hohe Produktqualität an. Daraus lassen sich drei zentrale Bewertungskriterien für bisherige Lösungsansätze herleiten: Erstens werden die Ansätze nach der **Höhe der zusätzlich anfallenden Kosten** bewertet. Ein zweites Kriterium ist die Produktqualität beziehungsweise das **Risiko für die Funktionalität** (Produktrisiko), das die Umsetzung der jeweiligen Lösungsansätze mit sich bringt. Ein drittes Bewertungskriterium ist der **für die Konstruktion zusätzlich anfallende Aufwand (Komplexität Konstruktion)**, da dieser zum einen zu erhöhten Kosten und zum anderen zu Fehlauflösungen in der Konstruktion und somit wiederum zu einem erhöhten Produktrisiko

führen kann. Damit zusammenhängend stellt der erreichbare **Toleranzgewinn je Bauteil** ein weiteres zentrales Bewertungskriterium dar: Je höher dieser mögliche Toleranzgewinn, desto günstiger die Produktion bei gleichbleibender Produktqualität. Zudem ist die **Austauschbarkeit von Einzelkomponenten** einer Baugruppe relevant. Wie in Kapitel 2.2 dargestellt, ist die Gewährleistung einer solchen Austauschbarkeit eines der Hauptziele der Verwendung von Toleranzen. Das letzte hier berücksichtigte Kriterium betrifft die **Einsatzmöglichkeit der Lösungsansätze in verschiedenen Produktionstypen**. Je flexibler die Lösungsansätze sind, desto mehr Kundenbedarfe können durch sie abgedeckt werden. Von flexibel einsetzbaren Lösungsansätzen profitieren somit mehr Unternehmen.

Die Kriterien werden hier von 1 (unzureichend erfüllt) bis 5 (voll erfüllt) bewertet, wobei die Kriterien „Einsatzmöglichkeit Produktionstyp“ und „Austauschbarkeit der Einzelkomponenten“ nur jeweils drei Ausprägungen haben:

**Tabelle 1: Bewertungsschema zusätzlich anfallende Kosten**

5	Keine zusätzliche Kosten
4	Kosten sind leicht erhöht (Bsp. Einmalig erhöhter Arbeitsaufwand)
3	Zusätzliche Kosten in Form von Lager-, Messmittel- oder Logistikkosten
2	Zusätzliche Kosten in Form von Lager-, Messmittel- und Logistikkosten (mindestens 2 davon)
1	Sehr hohe Kosten auf Grund der Verwendung von Hochpräzisionsmaschinen

**Tabelle 2: Bewertungsschema Risiko für die Funktionalität**

5	Die angewendete Methode hat keinen Einfluss auf das Produktrisiko
4	Statistisch weisen vereinzelte Produkte Mängel auf
3	Auf Grund falscher Auslegung weisen Produkte systematisch Mängel auf
2	Das Produkt hat Mängel
1	Das Produkt kann nicht funktionsfähig sein

**Tabelle 3: Bewertungsschema Komplexität für die Konstruktion**

5	Kein Aufwand für den Konstrukteur/Entwickler
4	Leichter Aufwand für den Konstrukteur/Entwickler
3	Mittlerer Aufwand für den Konstrukteur/Entwickler
2	Hoher Aufwand für den Konstrukteur/Entwickler
1	Sehr hoher Aufwand für den Konstrukteur/Entwickler

**Tabelle 4: Bewertungsschema Toleranzgewinn**

5	Sehr hoher Toleranzgewinn je Bauteil einer Baugruppe
4	Hoher Toleranzgewinn je Bauteil einer Baugruppe
3	Mittlerer Toleranzgewinn je Bauteil einer Baugruppe
2	Kleiner Toleranzgewinn je Bauteil einer Baugruppe
1	Kein Toleranzgewinn je Bauteil einer Baugruppe

**Tabelle 5: Bewertungsschema Austauschbarkeit der Einzelkomponenten**

5	Austauschbarkeit gewährleistet
4	-
3	Austauschbarkeit mit Aufwand gewährleistet
2	-
1	Austauschbarkeit nicht gegeben

**Tabelle 6: Bewertungsschema Einsatzmöglichkeit Produktionstyp**

5	Einsatz sowohl in der Einzel- als auch in der Massenfertigung möglich
4	-
3	Einsatz entweder im Bereich Einzel- bis Kleinserienfertigung oder im Bereich Serien- bis Massenfertigung
2	-
1	Einsatz entweder in der Massen-, Kleinserien- oder in der Einzel-fertigung möglich

Nachfolgend werden nun die verschiedenen bestehenden Lösungsansätze für die Problemstellung der Toleranzverteilung erläutert und nach obenstehendem Schema bewertet.

### 3.1 Konstruktionsbestimmte Ansätze

In der Literatur finden sich einige Ansätze, in denen die Toleranzen einzelner Bauteilen einer Baugruppe auf eine Zielgröße optimiert werden. Diese Zielgröße ist häufig die Produktionskostenreduktion. Ein Beispiel hierfür ist in der Patentschrift von Sato (Patentschrift US 6,665,632 B2 2003) zu finden. In dieser Patentschrift werden die einzelnen Bauteile einer Baugruppe mit verschiedenen Toleranzlagen<sup>9</sup> simuliert und mit unterschiedlichen Toleranzlagen gepaart. Mit Hilfe einer Sensitivitätsanalyse<sup>10</sup> können, durch die Simulation vieler verschiedener Zusammenbaumöglichkeiten, die Bauteile identifiziert werden, bei denen eine Toleranzoptimierung am effektivsten ist (Patentschrift US 6,665,632 B2 2003), S.1.

Ein weiterer Ansatz findet sich in der Dissertation von Michael Merget „Kostenoptimierung durch Toleranzvariation im Simultaneous Engineering“ (Merget 2004). Der Grundgedanke dieser Arbeit ist es, die Toleranzen einzelner Bauteile einer Baugruppe so zu erweitern, dass die Kosten der Baugruppe reduziert werden (Merget 2004), S. 125. Dabei werden Baugruppenkosten für unterschiedliche Toleranzvariationen kalkuliert. Um den Rechenaufwand zu reduzieren, wird in dieser Arbeit die statistische Versuchsplanung (engl. Design of Experiments [DoE]) eingesetzt.

Tornquist und Jevinen stellen darüber hinaus eine Analysemethode vor, mit der die Toleranzen von Stapel- oder Kettentoleranzen automatisch berechnet werden (Pa-

---

<sup>9</sup> Die Toleranzlage beschreibt die Lage des Toleranzfeldes in Bezug auf das Nennmaß (vergleiche Norm DIN EN ISO 286-1 1990)

<sup>10</sup> Im erweiterten Sinne versteht man unter Sensitivitätsanalyse die Untersuchung eines Einflusses von Veränderungen auf den Zielfunktionswert (vergleiche (Gal 2019); S. 80)

tentschrift US20060129259 A1 2009). Sie entwickeln und patentieren dazu ein computerimplementiertes Verfahren, das es ermöglicht, ein minimales und ein maximales Zusammenbaumaß einer Baugruppe zu bestimmen.

Einen ähnlichen Ansatz verfolgen Zhang Yi und Xie Yonghi in der Patentschrift „Optimum design method for assembly tolerances“ (Patentschrift CN103903060 A 2014)<sup>11</sup>. Ihre Methode optimiert die Toleranzen, indem sie einzelne Kostenfunktionen bestimmt und daraus eine Gesamtkostenfunktion errechnet. Mit Hilfe der Gesamtkostenfunktion können die Toleranzen der einzelnen Bauteile hinsichtlich der Kosten optimiert angepasst werden.

### Bewertung

Bei den vorgestellten Ansätzen geht es darum, die Gesamttoleranz der Baugruppe auf die einzelnen Bauteile zu verteilen. Dabei sind die Ansätze immer auf eine oder mehrere Zielgrößen (beispielsweise Kosten, Zuverlässigkeit, etc.) ausgerichtet. Somit entsteht kein Toleranzgewinn in der gesamten Baugruppe. Da die Toleranzen dabei im Zuge der Konstruktion und Entwicklung nach häufig undurchsichtigen und komplizierten Algorithmen und Berechnungen neu verteilt werden, ist hier zum einen der Aufwand für den Konstrukteur deutlich erhöht (Komplexität Konstruktion = 1). Zum anderen steigt das Risiko, eine dysfunktionale Baugruppe zu erhalten, da die verwendeten Ansätze auf Grund komplexer Algorithmen nicht immer ganz verstanden werden (Risiko = 3). Je nach Aufwand der zusätzlichen Berechnungen können ebenso erhöhte Kosten anfallen (Zusätzlich anfallende Kosten = 2). Ein klarer Vorteil dieser Methode ist jedoch, dass die Austauschbarkeit der Einzelteile in der Baugruppe gewährleistet ist (Austauschbarkeit = 5). Ebenso sind die entwickelten Baugruppen sowohl für die Ein-

---

<sup>11</sup> Hinweis des Autors: Da die Patentschrift ausschließlich in chinesischer Schrift und Sprache vorliegt, ist es möglich, dass die Übersetzung nicht immer vollkommen korrekt durchgeführt wurde, da sie mit Hilfe des Internettools: <http://www.linguee.com/> durchgeführt wird.

zelfertigung als auch für die Massenfertigung geeignet (Einsatzmöglichkeit Produktionstyp = 5). Allerdings ist der Toleranzgewinn eher gering, da es sich hierbei nur um eine Neuverteilung der einzelnen Toleranzen handelt (Toleranzgewinn = 2).

**Tabelle 7: Bewertungsübersicht der konstruktionsbestimmten Ansätze**

Komplexität Konstruktion	Risiko	Zusätzlich anfallende Kosten	Einsatzmöglichkeiten Produktionstyp	Austauschbarkeit	Toleranzgewinn
1	3	2	5	5	2

### 3.2 Maschinenseitige Ansätze

Neben konstruktionsbestimmten Ansätzen ist die Optimierung des Fertigungsprozesses selbst ein weiteres Standardvorgehen. Die Prozessstabilität wird dabei durch konstruktive, wartungstechnische sowie steuerungs- und regelungstechnische Maßnahmen erhöht.

Auch hier gibt es einige solcher Ansätze, welche die Genauigkeit einzelner Fertigungsprozesse optimieren. So sind in vielen Bereichen der Wissenschaft und Technik sowie auch in der Fertigung so genannte „Response-Surface-Ansätze“ anwendbar. Response-Surface-Ansätze (zu Deutsch „Wirkungsflächen-Ansätze“) wurden von Box et al. (Box et al. 1951) bereits 1951 entwickelt und dienen der Optimierung von Eingangsgrößen zum Erreichen einer oder mehrerer Zielgrößen. Behera (Behera et al. 2015) nutzt einen solchen Ansatz, um Abweichungsmodelle der Bauteileckpunkte zu generieren. Die Resultate werden zur Vorhersage spezifischer Lastfälle während der Produktion genutzt, so dass sie mit optimierten Werkzeugwegen produziert werden können. Dies führt zu einer Minimierung der Abweichung und somit zu einer erhöhten Fertigungspräzision.

Ein weiterer exemplarischer Ansatz für ein Regelsystem, welches den Bearbeitungsprozess optimiert, ist Feins „modellbasierte Regelung und Optimierung von kontinuierlichen Bandglühöfen“ (Fein et al. 2016). Die Berücksichtigung nichtlinearer Effekte ist eine große Herausforderung bei der Modellierung von Bandglühöfen. Daher basiert dieser Ansatz auf einem nichtlinearen modellprädiktiven Regler<sup>12</sup> für die Bandtemperatur. Feins Beispiel zeigt, dass auch komplexe Systeme mittels Regelstrecken hinsichtlich bestimmter Zielgrößen (hier die Zieltemperatur) optimiert werden können.

Auch kann die Auswahl von bestimmten Maschinenkomponenten die Prozessstabilität erhöhen und somit die Fertigung enger Toleranzfelder ermöglichen (Chen et al. 2012), (Nebeling 2015). Hierfür finden sich etliche Beispiele in der Literatur (Kalveram 2005), (Bach et al. 2006), (Schneider et al. 2006), (Heinrich et al. 2008). Qilin Fu et al. (Fu et al. 2016) entwickeln beispielsweise eine Methode, mit der Werkzeuge so beschichtet werden können, dass die dynamische Steifigkeit erhöht werden kann.

Auch die Wahl der richtigen Maschinenparameter ist essenziell zur Einhaltung beziehungsweise Verbesserung von Toleranzen. Budak (Budak 2006) bestimmt beispielsweise mithilfe analytischer Modelle optimierte Bearbeitungsparameter, unter anderem durch Berücksichtigung der Durchbiegung von Werkzeug und Werkstück während des Fertigungsprozesses.

Eine ebenso prozess- wie maschinenspezifische Verbesserung kann über eine statistische Planung von Versuchen sowie deren statistischer Auswertung realisiert

---

<sup>12</sup> Die nichtlineare modellprädiktive Regelung, in der meist englischsprachigen Fachliteratur als Non-Linear Model-Predictive-Control bezeichnet, ist eine Methode aus dem Teilgebiet der Kontrolltheorie und Regelungstechnik. Diese Art Regler wird speziell dazu verwendet, um nichtlineare Prozesse mit Einschränkungen und ohne Linearisierung behandeln zu können. (Grüne et al. 2016), (Allgöwer et al. 2012)

werden, um so die Ungenauigkeiten des jeweiligen Verfahrens zu minimieren. Selvarajan et al. (Selvarajan et al. 2016) beschreiben eine solche Herangehensweise für ein Funkenerosions-Verfahren<sup>13</sup> für Siliziumnitrid (Keramikverbund). Solche Keramikverbunde sind schwer zu verarbeiten und somit besteht die Herausforderung, hierbei, geometrische Maße in sehr engen Toleranzfenstern herzustellen, wofür die passenden Parameter gesucht werden. Eine klassische Lösung hierfür bietet die statistische Versuchsplanung. Diese ist in der Durchführung und Auswertung jedoch zumeist sehr aufwendig und teuer.

### Bewertung

Durch die Optimierung verschiedener Fertigungsprozesse entsteht kein weiterer Aufwand für den Entwickler beziehungsweise Konstrukteur, da dies nicht in seinem Aufgabenbereich liegt (Komplexität Konstruktion = 5). Zudem bleibt auch das Risiko für die Funktionalität der Baugruppe unverändert (Risiko = 5). Die zusätzlich anfallenden Kosten für die Fertigung können jedoch enorm sein. Ein weiterer wirtschaftlicher Aspekt ist, dass ältere Maschinen nicht immer optimiert werden können und somit an Einsatzmöglichkeiten verlieren und ihre Amortisierung somit unter Umständen nicht erfolgt (Zusätzlich anfallende Kosten = 1).

Zwar ist der Einsatz maschinenseitiger Ansätze in allen Produktionstypen denkbar, de facto aber oft unwirtschaftlich. Es ist eher denkbar, hochpräzise Maschinen in der Kleinserien- bis Einzelfertigung einzusetzen, da die Gewinnmarge bei kleinen Stückzahlen deutlich höher ist und die Amortisierung der teuren Maschinen somit schneller erfolgt (Einsatzmöglichkeiten Produktionstyp = 3).

---

<sup>13</sup> „Beim Funkenerosionsverfahren wird durch elektrische Entladung zwischen Werkstück und Werkzeug Werkstückstoff abgetragen.“ (Greven 2013); S. 416

Die Austauschbarkeit der Einzelkomponenten ist durch den Einsatz hochpräziser Maschinen nicht gefährdet (Austauschbarkeit = 5). Allerdings muss berücksichtigt werden, dass die Bauteile weiterhin in ihrer Toleranz gefertigt werden müssen und somit kein Toleranzgewinn zu erwarten ist (Toleranzgewinn = 1).

**Tabelle 8: Bewertungsübersicht der maschinenseitigen Ansätze**

Komplexität Konstruktion	Risiko	Zusätzlich anfallende Kosten	Einsatzmöglichkeiten Produktionstyp	Austauschbarkeit	Toleranzgewinn
5	5	1	3	5	1

### 3.3 Montageseitige Ansätze

Um die Passungsfunktionalität bei gepaarten Bauteilen sicherzustellen, sind in der Montage grundsätzlich vier Methoden bekannt:

- Die Einzelaustausch-Methode und die statistische Tolerierung,
- die Gruppenaustauschmethode,
- die Passzugabe, und
- die Einstellmethode.

Im Folgenden werden die vier und eine weitere Methode<sup>14</sup> genauer erläutert.

---

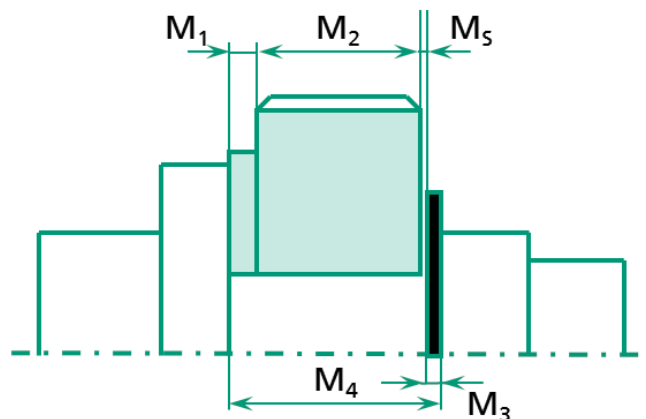
<sup>14</sup> Im Zuge der Patentanmeldung (vergleiche Kapitel 1) wurde auf diese Methode hingewiesen. Diese Methode ist montageseitig und wird daher in diesem Kapitel miterklärt.

### 3.3.1 Einzelaustausch-Methode und statistische Tolerierung

Die verbreitetste Methode ist die so genannte Einzelaustausch-Methode. Bei dieser Methode werden die Bauteile der Baugruppe so eng toleriert, dass die Summentoleranz maximal der Gesamttoleranz ( $T_a$ ) entspricht (Lotter et al. 2013); S. 30. Die Summentoleranz muss somit kleiner oder maximal gleich der Gesamttoleranz sein, wodurch eine absolute Austauschbarkeit gegeben ist. Der ungünstigste Fall wird „arithmetische Schließtoleranz“  $T_a$  genannt (Jorden et al. 2014); S. 188. Die arithmetische Schließtoleranz berechnet sich als Summe aller Einzeltoleranzen ( $T_i$ ) (Toleranzen haben keine Vorzeichen) der Bauteile einer Baugruppe:

$$T_a = \sum_{i=1}^k T_i \quad (10)$$

Anhand des in Abbildung 14 gezeigten Beispiels wird die Berechnung der arithmetischen Toleranz des Schließmaßes  $M_5$  nun gezeigt.



**Abbildung 14: Lineare Maßkette am Beispiel eines Getriebes**

*Quelle: Eigene Darstellung nach (Merget 2004); S. 22*

Die Zählrichtung, um das Nenn-Schließmaß zu berechnen erfolgt von rechts nach links.

$$M_4 - M_1 - M_2 - M_3 - M_S = 0 \quad (11)$$

Daraus folgt:  $M_4 - M_1 - M_2 - M_3 = M_S$

Das Mindest-Schließmaß berechnet sich aus den Mindestmaßen (Mindestmaße sind mit dem Index U für unteres Abmaß gekennzeichnet) in positive Richtung (in diesem Beispiel  $M_4$ ) und den Höchstmaßen in negative Richtung (in diesem Beispiel  $M_1$ ,  $M_2$ ,  $M_3$  und  $M_4$ ). Entsprechend lässt sich analog so auch das Höchst-Schließmaß berechnen (Höchstmaße sind mit dem Index O für oberes Abmaß gekennzeichnet):

$$M_{4U} - M_{1O} - M_{2O} - M_{3O} = M_{SU}$$

$$M_{4O} - M_{1U} - M_{2U} - M_{3U} = M_{SO}$$

Die Toleranz des Schließmaßes  $T_S$  beträgt dabei:

$$T_S = M_{SO} - M_{SU} \quad (12)$$

Die arithmetische Schließtoleranz lässt sich somit wie folgt berechnen (vergleiche Formel (10)):

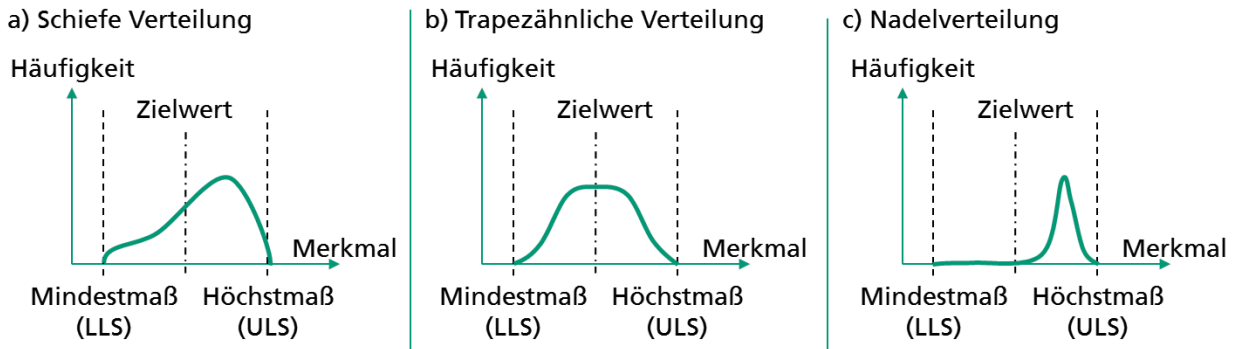
$$T_a = \sum_{i=1}^4 T_i = T_1 + T_2 + T_3 + T_4$$

Die Einzelaustausch-Methode hat den Vorteil, dass die Austauschbarkeit jedes Bauteils gewährleistet ist. Allerdings ist es sehr kostspielig, in so engen Toleranzen zu fertigen. Diese Methode wird daher fast ausschließlich in der Großserien- oder Massenfertigung angewendet (Lotter et al. 2013); S. 30.

Da es in der Realität jedoch recht unwahrscheinlich ist, dass die arithmetische Schließtoleranz an ihre Grenzmaße kommt (Jorden et al. 2014); S. 191, wurde die Einzeltausch-Methode mit Hilfe der Wahrscheinlichkeitsrechnung erweitert. Diese Erwei-

terung wird als „statistische Tolerierung“ bezeichnet. Die statistische Tolerierung berechnet die wirkliche Schließtoleranz ( $T_w$ ). Die wirkliche Schließtoleranz beschreibt die Schwankung des Schließmaßes, die am wahrscheinlichsten ist, und ist damit deutlich kleiner als die Gesamttoleranz  $T_a$ . Dabei wird zum einen angenommen, dass die Maximal- und Minimalmaße nur äußerst selten auftreten, und zum anderen, dass sich die Maßketten in der Regel nicht nur in eine Richtung addieren beziehungsweise subtrahieren, sondern auch kompensieren (Haberhauer 2011); S. 60. Dafür werden alle Einzelmaße als Zufallsgrößen interpretiert und einer entsprechenden statistischen Verteilungsform in Abhängigkeit des Fertigungsprozesses zugeordnet (Merget 2004). S. 23. Um die wirkliche Schließtoleranz zu berechnen, ist in der Regel ein „benutzerfreundliches Berechnungsprogramm“ notwendig, da der Aufwand für die Berechnung groß ist (Haberhauer 2011); S.60.

Um die Häufigkeitsverteilungen eines zu fertigenden Merkmals zu ermitteln, muss eine Prozessfähigkeitsanalyse für den jeweiligen geplanten Herstellungsprozess durchgeführt werden. Diese kann beispielsweise mit dem Einsatz einer statistischen Prozessregelung (englisch statistical process control, SPC genannt) ermittelt werden (Merget 2004); S. 23. Konkret werden die Ist-Maße eines Merkmals (zum Beispiel ein Wellendurchmesser) aufgenommen und daraus eine Verteilungskurve erstellt. Typische Verteilungen, die am häufigsten auftreten, sind die einseitige schiefe Verteilung (a), eine trapezförmige Verteilung (b) oder eine Nadelverteilung (c); (vergleiche Abbildung 15).



**Abbildung 15: Praktische Istmaßverteilung**  
 Quelle: Eigene Darstellung nach (Jordan et al. 2014); S. 193

Wie bereits erwähnt, ist die Berechnung der wahrscheinlichen Schließtoleranz  $T_w$  sehr aufwendig<sup>15</sup>, besonders wenn eine hohe Anzahl zu paarender Bauteile vorliegt. Daher finden sich in der Literatur verschiedene Näherungsverfahren, um eine wahrscheinliche Schließtoleranz zu ermitteln.

Das bekannteste Näherungsverfahren ist die Berechnung der quadratischen Schließtoleranz  $T_q$  (vergleiche Formel (13)). Diese setzt voraus, dass die Merkmale der Bauteile mittig normalverteilt gefertigt werden und die Normalverteilung mittig liegt. Außerdem müssen die Einzeltoleranzen voneinander unabhängig und eine konstante Prozessfähigkeit nachgewiesen sein. Die quadratische Schließtoleranz wird wie folgt berechnet:

$$T_q = \sqrt{T_1^2 + T_2^2 + \dots} = \sqrt{\sum_{i=1}^k T_i^2} \quad (13)$$

<sup>15</sup> Auf die Berechnung der wahrscheinliche Schließtoleranz wird auf Grund ihrer Aufwändigkeit in dieser Dissertation nicht weiter eingegangen.

Die quadratische Schließtoleranz bildet den kleinsten Wert der wahrscheinlichen Schließtoleranz, da sie auf idealisierten Voraussetzungen basiert (mittig normalverteilt und eine unabhängige Istabweichung der einzelnen Toleranzen). Die Wahrscheinlichkeit einer Überschreitung (Überschreitungswahrscheinlichkeit) ist abhängig von der Prozessfähigkeit.

Liegt eine rechteckige beziehungsweise trapezförmige Verteilung (vgl. Abbildung 15, b) vor, wird meist eine Rechteckschließtoleranz berechnet:

$$T_r = \sqrt{3} \sqrt{\sum_{i=1}^k T_i} = \sqrt{3} * T_q \quad (14)$$

Die Voraussetzungen, für die wahrscheinliche Schließtoleranz, sind in der Praxis fast nie vollständig erfüllt. Der Einfluss der Normalverteilung (mittig verteilt) und der Unabhängigkeit bewirken, dass  $T_w$  immer größer als  $T_q$  ist. Der Einfluss des Prozessfähigkeitswertes bewirkt eine Zunahme der Überschreitungswahrscheinlichkeit (Jorden et al. 2014); S. 195.

### Bewertung

Die Vor- und Nachteile der statistischen Tolerierung ähneln denen konstruktionsbestimmter Ansätze. Durch die statistische Tolerierung entsteht ein deutlich erhöhter Aufwand für den Entwickler beziehungsweise Konstrukteur, da er die Toleranzen der einzelnen Bauteile neu verteilen oder ändern muss (Komplexität Konstruktion = 2). Hierfür ist zum einen fundiertes Wissen über die Methode des statistischen Tolerierens notwendig, und zum anderen müssen die Produktionsprozesse im Unternehmen hinsichtlich ihrer Prozessfähigkeit und Stabilität bekannt sein. Um die Prozessfähigkeit festzustellen, muss mit zusätzlichen Kosten gerechnet werden (Zusätzlich anfallende Kosten = 3). Beides führt zu einem erhöhten Produktrisiko, da zum einen der Konstrukteur die Methode falsch anwenden kann, zum anderen sich die Istmaßverteilung eines Prozesses über die Zeit ändern kann und somit die Annahmen der statistischen

Tolerierung nicht mehr zutreffen (Risiko = 3). Außerdem ist bei der statistischen Tolerierung nicht ausgeschlossen, dass bestimmte Bauteile nicht gepaart werden können. Da die Tolerierung der Bauteile von den zu fertigenden Maschinen abhängt, ist Flexibilität bezüglich des Einsatzes verschiedener Maschinen nicht oder kaum gegeben. Daher eignet sich die statistische Tolerierung eher für den Einsatz bei der Serien- bis Massenfertigung (Einsatzmöglichkeiten Produktionstyp = 3). Die Austauschbarkeit der Einzelkomponenten einer Baugruppe im Falle einer Reparatur ist meistens gegeben (auch ungünstige Grenzmuster können gepaart werden) (Austauschbarkeit = 5). Mit Hilfe der statistischen Tolerierung kann ein mittlerer Toleranzgewinn erreicht werden (Toleranzgewinn = 3).

**Tabelle 9: Bewertungsübersicht der Einzelaustausch-Methode und statistische Tolerierung**

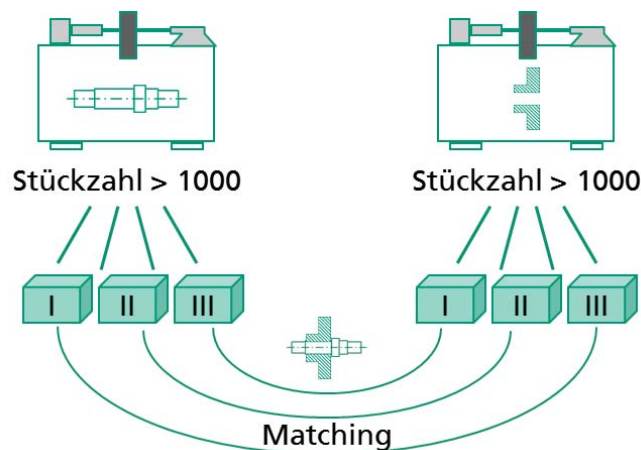
Komplexität Konstruktion	Risiko	Zusätzlich anfallende Kosten	Einsatzmöglichkeiten Produktionstyp	Austauschbarkeit	Toleranzgewinn
2	3	3	3	5	3

### 3.3.2 Gruppenaustauschmethode

Die Gruppenaustauschmethode (Lotter et al. 2013); S. 30, in der Literatur auch „Auslesepaarung“ genannt (Szyminski 2013); S. 168, (Kienzle 1994); S. 10, ist eine weitere montageseitige Methode zur Sicherstellung der Passungsfunktion in Baugruppen. Sie wird meist dann angewandt, wenn die Fertigungsmittel nicht in der Lage sind, die gewünschte Fertigungsgenauigkeit einzuhalten. Nach (Szyminski 2013); S. 168 ist die Gruppenaustauschmethode „eine Methode zur Berechnung von Toleranzen zum Zwecke der Fertigung der Einzelteile in Gesamttoleranzen, die ein Vielfaches der Gruppentoleranzen sind, [welche] die Schlusstoleranz ergeben.“ Dies geschieht durch „nachfolgendes maßliches Sortieren in Gruppentoleranzen und zielgerichtetes Paaren

der Einzelteile der Gruppen“. Außerdem ist eine Großserienfertigung notwendig, damit sie angewandt werden kann.

Bei der Gruppenaustauschmethode wird in die einseitige, beidseitige und mehrseitige Auslese unterschieden. Bei der einseitigen Auslesepaarung genügt es, das Produktmerkmal des einen Bauteils in großen Toleranzen zu fertigen und in Klassen zu sortieren. Jeder Klasse kann dann ein enger toleriertes Gegenstück zugeordnet werden. (Ickert 2013); S. 37. Bei der beidseitigen und mehrseitigen Auslese werden die Toleranzen der einzelnen Bauteile vergrößert und in so genannte Teiltoleranzfelder unterteilt (Kienzle 1994); S.10. Abbildung 16 zeigt den schematischen Ablauf des Gruppenaustauschverfahrens.



**Abbildung 16: Schematische Darstellung der Gruppenaustauschmethode**  
*Quelle: Eigene Darstellung*

### Bewertung

Für die Konstruktion beziehungsweise Entwicklung erzeugt die Gruppenaustauschmethode wesentlich geringeren erhöhten Aufwand als beispielsweise bei der statistischen Tolerierung. Für jeden Konstruktionsprozess muss jedoch geklärt werden, wie weit die Toleranzfelder erweitert werden dürfen und wie die dazugehörigen Toleranzfelder nachher aussehen (Komplexität Konstruktion = 5). Ein erhöhtes Produktrisiko entsteht nicht, da bei dieser Methode nur zusammenpassende Teile gepaart werden (Risiko =

5). Es entstehen jedoch zusätzliche Kosten durch die notwendige Messung jedes Bauteils, die Lager- und Logistikkosten sowie durch Bauteile, die laut Zeichnung zwar in Ordnung sind, aber keine(n) passenden „Partner“ finden (Zusätzlich anfallende Kosten = 1). Die Methode des Gruppenaustauschverfahrens ist daher nur in der Massenfertigung lukrativ (Einsatzmöglichkeit = 1). Die Austauschbarkeit der Einzelkomponenten ist nur bedingt möglich (Austauschbarkeit = 2). Der Toleranzgewinn der zu fertigenden Einzelteile ist jedoch sehr hoch (Toleranzgewinn = 5).

**Tabelle 10: Bewertungsübersicht der Gruppenaustauschmethode**

Komplexität Konstruktion	Risiko	Zusätzlich anfallende Kosten	Einsatzmöglichkei- ten Produktionstyp	Austausch- barkeit	Toleranz- gewinn
4	5	1	1	2	5

### 3.3.3 Passzugabe

Bei der Passzugabe wird ein bestimmtes Teil einer Baugruppe, die einer (Pass-)Funktionalität unterliegt, mit einer Passzugabe (beispielsweise eine Passscheibe) hergestellt (Lotter et al. 2013); S. 30. Die relevanten Produktmerkmale der Bauteile der Baugruppe werden vermessen. Entsprechend der Messwerte kann das Bauteil mit der Passzugabe entweder nachgearbeitet werden (in der Praxis werden die entsprechenden Bauteile oft mit einem Aufmaß hergestellt) oder das zu große Spiel wird mit Passzugaben, wie etwa Passscheiben, ausgeglichen (Spur et al. 2013a); S. 460, (Hoenow et al. 2016); S. 244.

Einen ähnlichen Ansatz findet man auch in (Chouvion et al. 2011). Im Flugzeugbau sind Lücken zwischen den Strukturteilen eine große Herausforderung. Bisherige Ansätze haben die Lücken mit Ausgleichsscheiben nivelliert (Manohar et al. 2018). Der Ansatz von (Chouvion et al. 2011) dagegen vermisst die betreffenden Bauteile,

berechnet die Stellen an denen überflüssiges Material ist, welches die Lücken verursacht und gibt die Daten automatisiert an eine Nachbearbeitungsmaschine weiter.

### Bewertung

Um das Verfahren der Passzugabe anzuwenden, muss dieser Lösungsansatz in der Baugruppe technisch umsetzbar sein (beispielsweise muss genügend Bauraum zur Verfügung stehen oder montagetechnisch umsetzbar sein; bei einem Kugellager können die einzelnen Kugeln nicht durch Passzugaben vergrößert werden). Zudem muss sich der Entwickler oder Konstrukteur überlegen, wie er diese Methode konstruktiv umsetzt. Dies führt zu einem erheblichen Mehraufwand für ihn sowie für den Arbeitsplaner. Damit verursacht diese Methode einen erheblichen technischen (Lotter et al. 2013); S. 30 und zeitlichen Aufwand (Hesse et al. 2013); S. 19, da jedes gefertigte Bauteil vermessen und durch Zugaben von Passteilen oder Nacharbeit „angepasst“ werden muss (Komplexität Konstruktion = 1). Da die Passzugabe darauf ausgelegt ist, die Funktionalität einer Baugruppe sicherzustellen, kann davon ausgegangen werden, dass das Risiko für die Funktionalität verschwindend gering ist (Risiko = 5). Allerdings sind die zusätzlich anfallenden Kosten aufgrund des erwähnten technischen Mehraufwands erheblich. Zudem muss in der Montage mit zusätzlichen Messschritten (inklusive Messwerkzeugen) sowie Nacharbeit oder der Verwendung zusätzlicher Bauteile gerechnet werden (Zusätzlich anfallende Kosten = 1). Da es sich um einen manuellen Montageprozess handelt, der schwer zu automatisieren ist, sind auch die Einsatzmöglichkeiten begrenzt. Die Passzugabe wird daher in der Einzel- bis Kleinserienfertigung eingesetzt (Einsatzmöglichkeiten Produktionstyp = 3). Eine Austauschbarkeit ist nur mit zusätzlichem Messaufwand zu gewährleisten. (Austauschbarkeit = 2). Diese Methode kommt meist dann zum Einsatz, wenn die Toleranzen nicht mehr mit den herkömmlichen Produktionsmitteln gefertigt werden können. Sie bringt somit keinen zusätzlichen Toleranzgewinn einzelner Bauteile mit sich, sondern führt nur zu einem Toleranzausgleich.

Allerdings kann durch den manuellen Ausgleich mit deutlich gröber tolerierten Bauteilen gearbeitet werden, die bei der Montage dann jedoch angepasst werden müssen (Toleranzgewinn = 5)(Hoenow et al. 2016); S. 244.

**Tabelle 11: Bewertungsübersicht der Passzugabe**

Komplexität Konstruktion	Risiko	Zusätzlich anfallende Kosten	Einsatzmöglichkeiten Produktionstyp	Austauschbarkeit	Toleranzgewinn
1	5	1	3	2	5

### 3.3.4 Einstellmethode

Bei der so genannten Einstellmethode ist das letzte Bauteil der zu montierenden Baugruppe einstellbar oder in der Lage, sich selber einzustellen (Lotter et al. 2013); S. 31. Beispiele sind hierfür unter anderem die Einstellung durch ein Gewinde, die Anzahl an Tellerfedern in einem Tellerfederpaket oder der Gesamtwiderstand einer elektrischen Schaltung mit Hilfe eines Potentiometers (Hoenow et al. 2016); S. 245. Im Gegensatz zur Passzugabe ist hierbei eine Messung nicht unbedingt notwendig (Spur et al. 2013b); S. 460. Dies hängt stark von der Art der Einstellmethode ab.

#### Bewertung

Um diesen Lösungsansatz einzusetzen ist es notwendig, dass die zu konstruierende Baugruppe diese Methode zulässt (ist genügend Bauraum dafür vorhanden, gibt es ein technisches Element, um die Toleranz einzustellen, etc...). Ist es möglich, diese Methode anzuwenden, entsteht für den Konstrukteur ein deutlich erhöhter Aufwand, da er die Möglichkeit der Einstellung bereits bei der Konstruktion berücksichtigen muss (Komplexität Konstruktion = 1). Da durch diese Methode das Funktionalitätsrisiko gesenkt wird, ist kein erhöhtes Risiko zu erwarten (Risiko = 5). Je nach konstruktiver

Umsetzung fallen jedoch bereits in der Entwicklung erhöhte Kosten an. Bei der Umsetzung muss dann mit einem deutlich erhöhten manuellen Montageaufwand gerechnet werden (Zusätzlich anfallende Kosten = 1). In der Regel ist auf Grund der im Nachgang durchzuführenden Einstellungen an der Baugruppe maximal eine Kleinserie denkbar (Einsatzmöglichkeiten Produktionstyp = 3). Ein Ausnahmefall ist hier, wenn das Bauteil ein sich selbst einstellendes Glied in der Baugruppe ist (zum Beispiel das Andrücken eines Kugellagers mit Hilfe von Tellerfedern). Eine Austauschbarkeit der Bauteile ist vollständig gegeben (Austauschbarkeit = 5). Da die Methode dem Ausgleich größer tolerierter Bauteile dient, ist hier von einem Toleranzgewinn auszugehen (Toleranzgewinn = 5).

**Tabelle 12: Bewertungsübersicht der Einstellmethode**

Komplexität Konstruktion	Risiko	Zusätzlich anfallende Kosten	Einsatzmöglichkeiten Produktionstyp	Austauschbarkeit	Toleranzgewinn
1	5	1	3	5	5

### 3.3.5 Verfahren zur Vorbereitung von Baumstämmen für eine Baumstammstruktur

Ein weiteres montageseitiges Verfahren zur Toleranzanpassung ist das von Bulmer 2008 für den manuellen Holzbau entwickelte „Verfahren zur Vorbereitung von Baumstämmen für eine Baumstammstruktur“ (engl. „Method for preparing logs for a log structure“ (Patentschrift WO 2010/022493 2008). Diese Methode findet allerdings keinen Einsatz in der industriellen (Serien-)Fertigung, sondern vielmehr im Bauingenieurwesen. Sie sieht vor, Rundhölzer zu scannen und die gescannten Profile an ein CAD-Modell eines Bauwerks zu übertragen, das aus virtuellen Rundhölzern besteht. Dann wird geprüft, an welcher Stelle im CAD-Modell das gescannte Profil, also die

Ist-Geometrie, am besten passt, und das Rundholz wird an der entsprechenden Stelle eingesetzt. Dabei kann die Gestaltabweichung bei Rundhölzern recht groß ausfallen. Überschreitet die Abweichung zwischen gescanntem und virtuellem Rundholz vorher festgelegte Grenzwerte, wird entweder das CAD-Modell an die tatsächliche Gestalt des Rundholzes angepasst oder ein entsprechendes Sägeprofil zur Anpassung des Rundholzes zugeordnet. Auch eine Kombination beider Anpassungen ist möglich

### Bewertung

Diese Methode wurde wie erwähnt bisher nur für den manuellen Holzbau entwickelt und eingesetzt. Auf Grund der durch die Natur gegebenen Differenzen der einzelnen Rundhölzern sind klassische Lösungsansätze des Maschinenbaus nicht möglich. Denkbare Einsatz einer solchen Methode wäre allerdings die biointelligente Wertschöpfung (Miehe et al. 2018), da bei der Herstellung biologisch transformierter Produkte immer häufiger das Problem nicht fester Toleranzgrenzen auftreten wird. Aktuell hat die Methode keinen Einfluss auf den Entwickler oder den Konstrukteur (Komplexität Konstruktion = 5). Das Risiko der Methode lässt sich bisher schwer abschätzen, da sie noch nicht in der Breite zur Anwendung gekommen ist. Abhängig von der Genauigkeit des (Baumstamm-)Scanners könnte jedoch ein gewisses Risiko bestehen, da die Messunsicherheit zu Fehlern in der Zuordnung führen kann (Risiko = 4). Da jeder Baumstamm einzeln gescannt, im CAD erfasst, einem virtuellen Baumstamm zugeordnet und gegebenenfalls noch mit dem neuen Sägeprofil nachbearbeitet werden muss, ist mit erheblichen Mehrkosten zu rechnen (Zusätzlich anfallende Kosten = 1). Da es sich wie erwähnt um einen manuellen Fügeprozess für individuelle Holzbaumstrukturen handelt, wird angenommen, dass diese Methode nur in der Einzelfertigung angewendet werden kann (Einsatzmöglichkeiten Produktionstyp = 1). Eine Austauschbarkeit ist nur nach erneutem Vermessen der umliegenden Baumstämme möglich und somit erschwert (Austauschbarkeit = 2). Eine Automatisierung dieses Fügeprozesses wäre voraussicht-

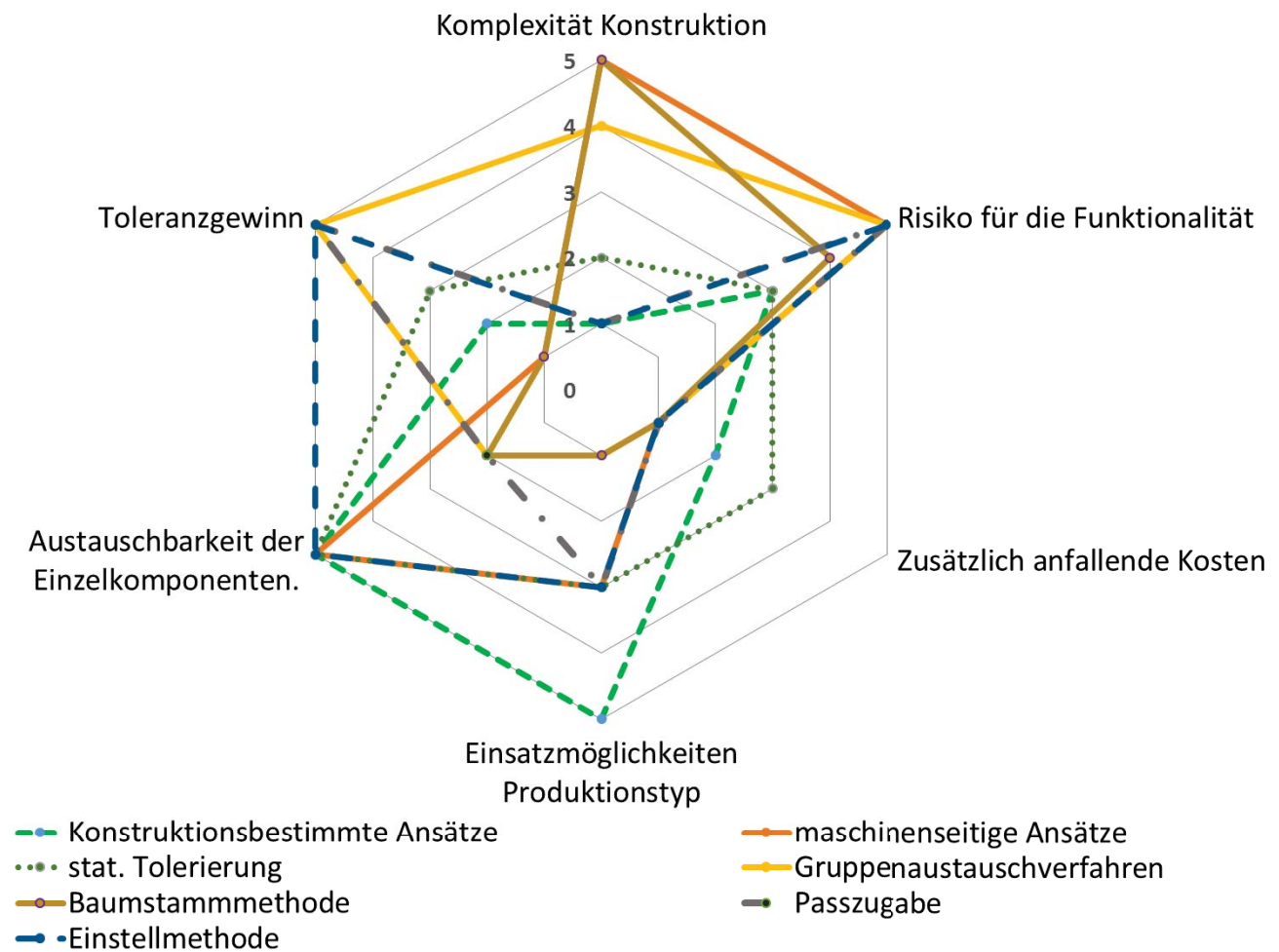
lich unwirtschaftlich, da das Automatisierungssystem stets zum jeweiligen Bauort gebracht werden müsste. Ein Toleranzgewinn ist nicht zu erkennen, da die Rundhölzer keinen spezifischen Toleranzen unterliegen, sondern in ihrer natürlich vorliegenden Form angeliefert werden (Toleranzgewinn = 1).

**Tabelle 13: Bewertungsübersicht des Verfahrens zur Vorbereitung von Baumstämmen für eine Baumstammstruktur**

Komplexität Konstruktion	Risiko	Zusätzlich anfallende Kosten	Einsatzmöglichkeiten Produktionstyp	Austauschbarkeit	Toleranzgewinn
5	4	1	1	2	1

### 3.4 Vergleich der einzelnen Lösungsansätze

Um die verschiedenen Lösungsansätze miteinander zu vergleichen, wird ein Netzdiagramm zur Visualisierung herangezogen. Ein Netzdiagramm ist eine übersichtliche Visualisierungsform für Daten im positiven Wertebereich. „Dabei werden die einzelnen Wertekategorien durch Achsen repräsentiert und die entsprechende Ausprägung des Wertes auf diesen Achsen angetragen“ (Bassler 2010); S. 51. Besonders gut eignet sich dieses Diagramm zum Visualisieren von Evaluationen für zuvor festgelegte Kriterien zweier (oder mehrerer) Serien (Lösungsansätze). Dabei bilden die in Kapitel 3 genannten Bewertungskriterien die „Achsen“ des Netzdiagramms (Abbildung 17).



**Abbildung 17: Netzdiagramm zum Vergleich der unterschiedlichen Tolerierungsmodelle**

*Quelle: Eigene Darstellung*

Das Netzdiagramm verdeutlicht, dass, je nach Lösungsansatz, einige der Bewertungskriterien voll erfüllt sind, andere Bewertungskriterien dafür aber nur hinreichend bis mangelhaft bedient werden. Klar erkennbar ist zudem, dass alle Lösungsmöglichkeiten zusätzliche Kosten (niedrige Bewertungszahl bedeutet hohe zusätzliche Kosten) verursachen.

Die verschiedenen Lösungsmöglichkeiten sind teilweise für jeden Produktionstyp einsetzbar. Allerdings gibt es auch einige Methoden, die nur für spezielle Produktionstypen geeignet sind. Beispielsweise ist das Gruppenaustauschverfahren primär in

der Massenfertigung einsetzbar, während die Baumstammethode nur in der Einzel-  
fertigung ihren Platz findet.

Positiv ist zu vermerken, dass einige Lösungsansätze die Austauschbarkeit von Einzelteilen ermöglichen. Lediglich bei der Passzugabe, dem Gruppenaustauschverfahren und der Baumstammethode ist diese nicht oder nur mit erneutem Messaufwand gegeben.

Je nach Methode kann auch ein Toleranzgewinn erzielt werden. Allerdings verteilen die konstruktionsbestimmten oder maschinenseitigen Ansätze nur die notwendigen Toleranzen hinsichtlich einer bestimmten Zielgröße beziehungsweise erhöhen die Präzision der Produktionsmaschinen. Dies verursacht einen erheblichen Mehraufwand (und somit Mehrkosten) für den Konstrukteur und kann im Zweifelsfall zu einem erhöhten Produktrisiko führen, da die Methoden der Toleranzverteilung oft äußerst komplex sind. Um die Präzision der Maschinen zu erhöhen, müssen meist große Investitionen getätigt werden, welche häufig unwirtschaftlich sind. Montageseitige Ansätze können Toleranzgewinne erzielen (beispielsweise die Passzugabe oder die Einstellmethode). Allerdings führen diese Methoden entweder zu einem Mehraufwand für die Konstruktion (Einstellmethode) oder zu erheblichen technischen und zeitlichen Aufwand (Passzugabe).

Einige der beschriebenen Methoden verursachen darüber hinaus einen erheblichen Mehraufwand für den Konstrukteur oder Entwickler. Eine Entlastung der Konstruktion und Entwicklung ist jedoch zwingend notwendig, da die Komplexität technischer Produkte stetig zunimmt (Ponn et al. 2008); S. 7.

Dem Risiko einer verringerten Funktionalität wirken fast alle Methoden, mit Ausnahme der konstruktionsbestimmten, entgegen. Konstruktionsbestimmte Ansätze erhöhen jedoch dieses Risiko, da sie meist komplexe und somit gewissermaßen undurchsichtige Berechnungen beinhalten, was zu einer falschen Anwendung führen

kann. Dies gilt insbesondere für die Anwendung der statistischen Tolerierung, da die mathematischen Modelle abhängig von der Istmaß-Verteilung der Prozesse sind.

Zusammenfassend sind somit viele der bestehenden Lösungsansätze in der Lage, enge Toleranzen zu fertigen und dabei das Produktrisiko gering zu halten (maschinenseitige Ansätze). Dies verursacht allerdings in den meisten Fällen hohe zusätzliche Kosten. Andere bestehende Lösungsansätze ermöglichen das Erzielen eines Toleranzgewinns (beispielsweise Einstellmethode oder Passzugabe). Auch dabei steigen allerdings die Herstellkosten. Ebenso ist die Funktionalität bei einigen Ansätzen (statistische Tolerierung und Gruppenaustauschmethode) nicht immer garantiert. Keiner der bestehenden Ansätze ermöglicht es, bei gleichbleibender Qualität die Herstellkosten zu senken (vergleiche Hypothese I) oder bei gleichbleibenden Kosten gesteigerten Präzisions- und Qualitätsanforderungen gerecht zu werden (vergleiche Hypothese II). Hier setzt die in dieser Arbeit vorgestellte Methode an. Sie soll sowohl eine Senkung der Herstellkosten als auch eine Qualitätssteigerung ermöglichen. Dabei steht die Funktionalität im Fokus. Darüber hinaus beeinflusst die Methode anders als viele bestehende Ansätze nicht die Konstruktion oder die Entwicklung und ist in allen Produktionstypen einsetzbar.

## 4 Voraussetzungen für die Methodik der dynamischen Tolerierung

Wie in Kapitel 1.1 beschrieben, müssen Toleranzen in der Produktion so eng gewählt werden, dass sie einerseits die Funktionalität einer Baugruppe nicht beeinträchtigen oder sogar gefährden (Produktrisiko), andererseits müssen sie jedoch auch kostengünstig zu fertigen sein (Herstellkosten). Wie in Kapitel 2.3.3 beschrieben, verlaufen Herstellkosten und Qualitätsverluste gegenläufig.

Bisherige Lösungen dieses Dilemmas (siehe Kapitel 3) sind teilweise nur für bestimmte Produktionstypen einsetzbar. Sie greifen zudem oft in den Konstruktionsprozess ein (der zu Zeiten mechatronischer Systeme<sup>16</sup> ohnehin bereits äußerst komplex ist) und es besteht das Risiko einer falschen Anwendung komplexer Methoden und damit ein erhöhtes Produktrisiko. Alternativ wird kein Toleranzgewinn erzielt, sondern nur eine optimale Verteilung der vorhandenen Summentoleranz erreicht (vergleiche dazu Kapitel 3.4).

Die vorliegende Arbeit beschreibt eine Methodik, die es ermöglicht, auf der einen Seite enge Toleranzen gepaarter Bauteile kostengünstig herzustellen, ohne in die Konstruktion einzugreifen. Auf der anderen Seite kann die Methodik auch zur Optimierung der Qualität bereits bestehender Baugruppen und Produktionsanlagen genutzt werden, ohne dabei die Herstellkosten zu beeinflussen. Die Anwendung der Methodik besitzt ein recht niedriges Produktrisiko, da die Funktionalität der Baugruppe im Fokus der Methodik liegt. Ebenso ist die Methodik in der Einzel-, Kleinserien- und Massenfertigung möglich.

Die Methodik der dynamischen Tolerierung wird in Kapitel 5 genau dargelegt. Um die in dieser Arbeit vorgestellte Idee zu realisieren, müssen jedoch einige zentrale

---

<sup>16</sup> „Ein typisches mechatronisches System nimmt Signale auf, verarbeitet sie und gibt Signale aus, die es z.B. in Kräfte und Bewegungen umsetzt“ (Ahrberg et al. 2008); S. 4.

Voraussetzungen erfüllt sein, die durch aktuelle technische Entwicklungen derzeit geschaffen werden. Drei dieser wesentlichen Voraussetzungen für die dynamische Tolerierung werden daher zunächst in Kapitel 4 vorgestellt:

- Fortschritte in der Fertigungsmesstechnik,
- die Umsetzung von Industrie 4.0 und
- Modularisierung.

### **4.1 Fertigungsmesstechnik**

Das Verfahren der dynamischen Tolerierung erfordert, dass die geometrischen, chemischen, physikalischen oder mechanischen Eigenschaften von Produktmerkmalen innerhalb des Fertigungsprozesses erfasst werden und die Messwerte zur Optimierung der Prozesskette weiter genutzt werden können. Dazu greift das Verfahren auf aktuelle Fortschritte und Entwicklungen in der Fertigungsmesstechnik<sup>17</sup> zurück. Die „zentrale Aufgabe“ der Fertigungsmesstechnik ist laut Pfeifer und Schmitt „die messtechnische Erfassung von Qualitätsmerkmalen an einem Messobjekt“ (Pfeifer et al. 2010); S. 1. In den meisten Fällen ist das Messobjekt das Werkstück selbst, es kann jedoch auch das Werkzeug, die Maschine oder, im Rahmen der Prüfmittelüberwachung, ein Messgerät sein. Nach Kieferstein steht die Fertigungsmesstechnik „für alle im Zusammenhang mit dem Messen und Prüfen verbundene Tätigkeiten industriell hergestellter Produkte“ (Kieferstein 2011); S. 1.

Im Folgenden werden zunächst die allgemeinen Aufgaben der Fertigungsmesstechnik und Möglichkeiten zu ihrer Systematisierung beschrieben. Des Weiteren werden die Qualitätskostenrechnung sowie die Automation und Integration von Fertigungsmesstechnik in der Produktion erläutert. Dies dient als Basis, um erwartete

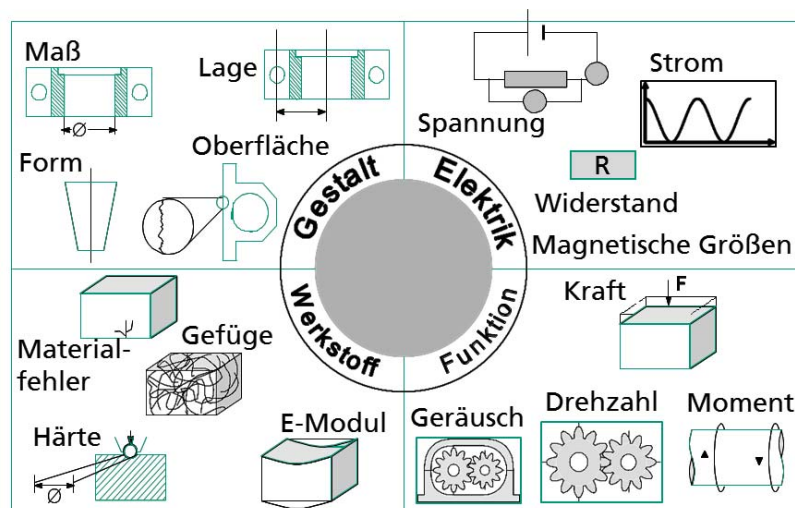
---

<sup>17</sup> Da es sich bei dem hier vorgestellten Verfahren um ein produktionstechnisches Thema handelt und der Begriff „Fertigungsmesstechnik“ spezifischer als der Begriff „Messtechnik“ ist (Kieferstein 2011), (Pfeifer et al. 2010), wird dieser Begriff hier bewusst verwendet.

Trends im Bereich der Fertigungsmesstechnik sowie deren Bedeutung für die vorliegende Arbeit genauer zu betrachten.

#### 4.1.1 Aufgaben und mögliche Systematisierung der Fertigungsmesstechnik

„Der Begriff Fertigungsmesstechnik steht im Zusammenhang mit dem Messen und Prüfen verbundene Tätigkeiten industriell hergestellter Produkte“ (Whitehouse 2011). Dabei werden sogenannte Messgrößen ermittelt, welche die physikalische Größe der Eigenschaft eines Messobjektes ist (Norm DIN 1319-1 1995). Die Messgrößen der Fertigungsmesstechnik lassen sich in vier Bereiche unterteilen (siehe Abbildung 18):

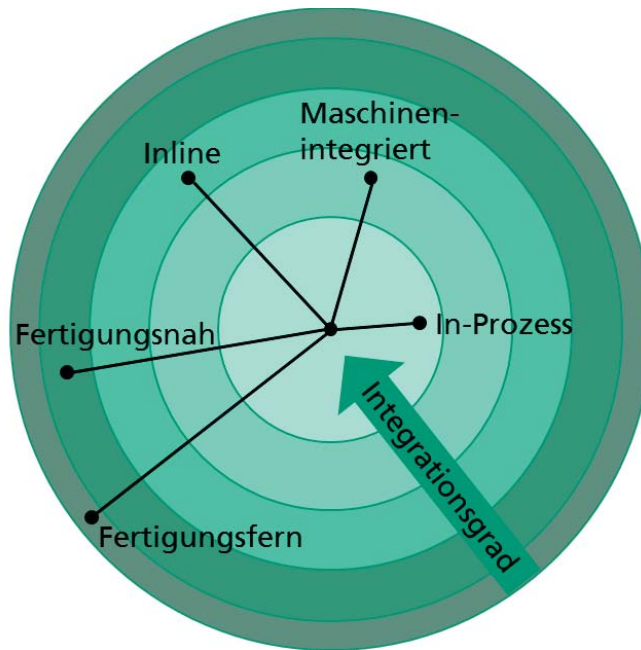


**Abbildung 18: Messaufgaben der Fertigungsmesstechnik**  
 Quelle: Eigene Darstellung nach (Bettenhausen et al. 2011); S. 10

1. **Gestalt:** Die Gestalt eines Werkstückes ist durch seine begrenzenden Flächen gegeben. Sie kann in eine Grobgestalt (Form, Lage und Maß) und eine Feingestalt (Oberflächenbeschaffenheit) unterteilt werden. Die Norm DIN 4760 (Norm DIN 4760 1982) unterteilt die Gestaltabweichungen (Abweichungen von der Gestalt wie sich der Entwickler oder Konstrukteur sie im Ideal vorstellt) in sechs Ordnungen: 1. Formabweichungen, 2. Welligkeit, 3. Rauheit (Rillen), 4. Rauheit

- (Riefen), 5. Rauheit (Gefügestruktur) und 6. Rauheit (Gitteraufbau des Werkstoffes).
2. **Elektrik:** Elektrische Größen können ebenso gemessen werden, klassischerweise etwa Widerstände, elektromagnetische Verträglichkeit (EMV), Ströme und Spannungen.
  3. **Werkstoff:** Werkstoffe werden hinsichtlich ihrer Proportionalitätskonstanten (beispielsweise Elastizitätsmodul), ihrem Gefüge, ihrer Härte oder Materialfehlern charakterisiert.
  4. **Funktion:** Die Funktionalität einer Baugruppe wird in vielen industriellen Anwendungen direkt gemessen. Beispiele hierfür sind die Momentübertragung, Drehzahl oder das Geräusch eines Getriebes sowie die Feder- und Dämpferkraft.

Fertigungsmesstechnik wird, meist zur Qualitätssicherung, an verschiedenen Orten eingesetzt. Schmitt und Damm (Schmitt et al. 2008) unterteilen die Fertigungsmesstechnik je nach Integrationsgrad in der Fertigung in fertigungsferne Messungen (Messung in einem angrenzenden Messraum), fertigungsnahe Messungen (Messung in der Nähe der Fertigungslinie), Inline-Messungen (Messung innerhalb der Linie im Fertigungstakt), maschinenintegrierte Messungen (Messung während des Prozesses oder in der Nebenzeit) und In-Prozess-Messungen (Messung während des Fertigungsprozesses) (Schmitt et al. 2008); S: 58. Diese Definition findet sich auch in der aktuellen Literatur (Schönberg 2018), S. 238. Sie wird in Abbildung 19 illustriert.



**Abbildung 19: Integrationsgrade von Fertigungsmesstechnik**

*Quelle: Eigene Darstellung nach (Schmitt et al. 2008)*

Auch (Bettenhausen et al. 2011) zieht diese Unterteilung heran. Lediglich das maschinenintegrierte Messen wird hier als Post-Prozess-Messung definiert.

Innerhalb der Fertigungsmesssysteme kann zwischen optischen und taktilen Fertigungsmesssystemen unterschieden werden. Vorteile taktiler Fertigungsmesssysteme sind unter anderem die hohe Präzision, ihre Flexibilität und ihre Fähigkeit, komplexe Geometrien präzise zu vermessen. Die optischen Messsysteme hingegen zeichnen sich durch hohe Messgeschwindigkeiten und durch ihre berührungs- und somit beschädigungsfreie Messung aus (Skladnikewitz 2011).

#### **4.1.2 Qualitätskostenrechnung für den Einsatz von Fertigungsmesstechnik**

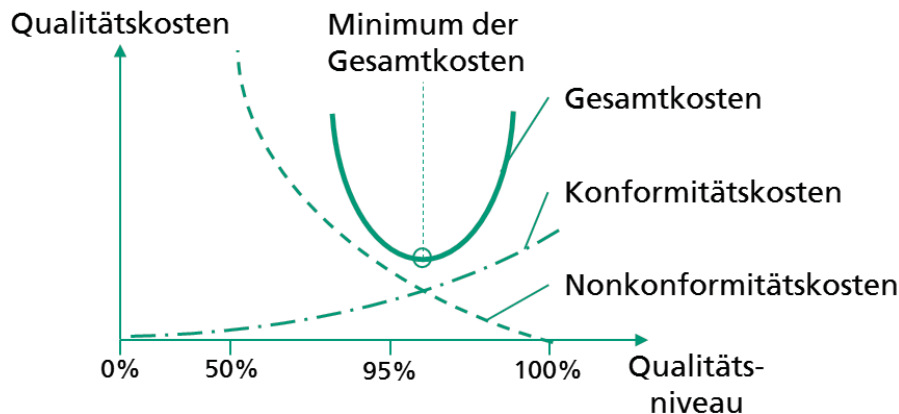
Die klassische Qualitätskostenrechnung setzt die Kosten und Erlöse des Einsatzes von Fertigungsmesstechnik im Unternehmen in Relation (Fritsch 2013), (Bettenhausen et al. 2011), (Feigenbaum 2009). Ihr Ziel ist es dabei, ein Optimum zwischen Fehlerverhütungskosten (präventive Verhinderung beispielsweise durch Instandhaltung), Prüfkosten (Auswertung bereits gefertigter Qualitätsmerkmale) und Fehlerkosten (Kosten, die durch Fehlproduktion entstehen) zu ermitteln (Schmitt et al. 2015). Diese Definition und Betrachtung der qualitätsbezogenen Kosten hat Feigenbaum (Feigenbaum 2009) bereits 1956 festgelegt. Dabei liegt der Qualitätskostenrechnung die Annahme zugrunde, dass fehlerhafte Produkte unmittelbar Fehlerkosten verursachen. Diese sind allerdings nur schwer abzuschätzen und werden meist durch Wahrscheinlichkeitsrechnungen ermittelt (Weckenmann et al. 2009). Vermeidungsstrategien führen jedoch zu den sogenannten Fehlerverhütungs- und Prüfkosten.

Die traditionelle Qualitätskostenrechnung die rein tätigkeitsorientiert eingeteilt ist, führt dazu, dass sämtliche Kostenbeiträge zu den Qualitätskosten aufsummiert werden. Diese Sicht trägt im Wesentlichen dazu bei, dass das Qualitätsmanagement und die Fertigungsmesstechnik als reine Kostenverursacher gesehen werden. Zudem wird der Wettbewerbsvorteil durch hohe Qualität in der traditionellen Qualitätskostenrechnung nicht berücksichtigt. Um Entscheidungsträgern in Unternehmen die Auswirkung von Maßnahmen zur Fehlervermeidung zu verdeutlichen, wurde die Qualitätskostenrechnung wirkungsorientiert unterteilt (Brüggemann et al. 2015); S. 210. Hierbei existieren nur zwei Kostenarten (Bruhn 2016); S. 582:

1. Konformitätskosten (oder auch Übereinstimmungskosten) sind die Kosten, die aufgewendet werden, um die Fähigkeit zur Erzeugung fehlerfreier Produkte zu schaffen und zu erhalten.

2. Nonkonformitätskosten (oder auch Abweichungskosten) sind die Kosten, die durch interne oder externe Fehler verursacht werden (beispielsweise Nacharbeit).

Abbildung 20 zeigt die Nonkonformitäts- und Konformitätskosten Bezug auf Höhe und Qualitätsniveau:



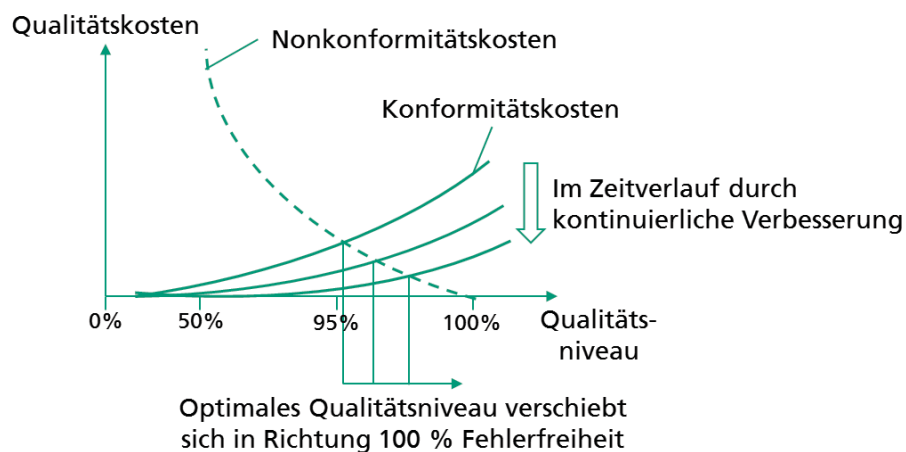
**Abbildung 20: Nonkonformitäts- und Konformitätskosten**

Quelle: Eigene Darstellung nach (Bettenhausen et al. 2011); S. 23

In Abbildung 20 ist zu erkennen, dass mit steigendem Qualitätsniveau (100% bedeutet Kundenerwartung voll erfüllt) die Nonkonformitätskosten abnehmen, da die auftretenden Fehler, die behoben werden müssen, abnehmen. Um jedoch ein fehlerfreies Produkt zu kommissionieren, muss mit hohen Konformitätskosten (beispielsweise Prüfkosten) gerechnet werden. Diese verlaufen gegenläufig zu den Nonkonformitätskosten. Die Summe der Nonkonformitäts- und Konformitätskosten entspricht den Gesamtkosten. Es wird das Minimum der Summenfunktion gesucht, um das Optimum zwischen Übereinstimmungs- und Abweichungskosten zu erreichen. Da die Methodik der dynamischen Tolerierung besagt, die Herstellkosten (Teil der Konformitätskosten) bei gleichbleibender Qualität zu reduzieren (vergleiche Kapitel 1.2, Hypothese I), können so die Gesamtkosten (Qualitätskosten) reduziert werden. Die zweite Hypothese ver-

spricht, (vergleiche Kapitel 1.2, Hypothese II), dass bei gleichbleibenden Herstellkosten die Qualität verbessert werden kann. Durch eine verbesserte Qualität kann angenommen werden, dass die Nonkonformitätskosten reduziert sind und dadurch auch die Gesamtkosten (Qualitätskosten). Durch die Methodik können bestehende produzierende Unternehmen die Qualitätskosten reduzieren.

Weiterhin findet man in der Literatur eine „neuere“ Interpretation des Qualitätskostenmodells. Dabei wird angenommen, dass das Optimum der Qualitätskosten bei 100% Fehlerfreiheit mit vertretbarem Aufwand möglich ist. Durch kontinuierliche Verbesserung kann ein schrittweiser Abbau möglicher Fehlerquellen erreicht werden. Dadurch verschiebt sich die Kurve der Konformitätskosten im Zeitverlauf (vergleiche Abbildung 21) (Schwarze 2013), S.66.



**Abbildung 21: Optimale Qualitätskosten entsprechend neueren Überlegungen**  
*Quelle: Eigene Darstellung nach (Schwarze 2013); S.66*

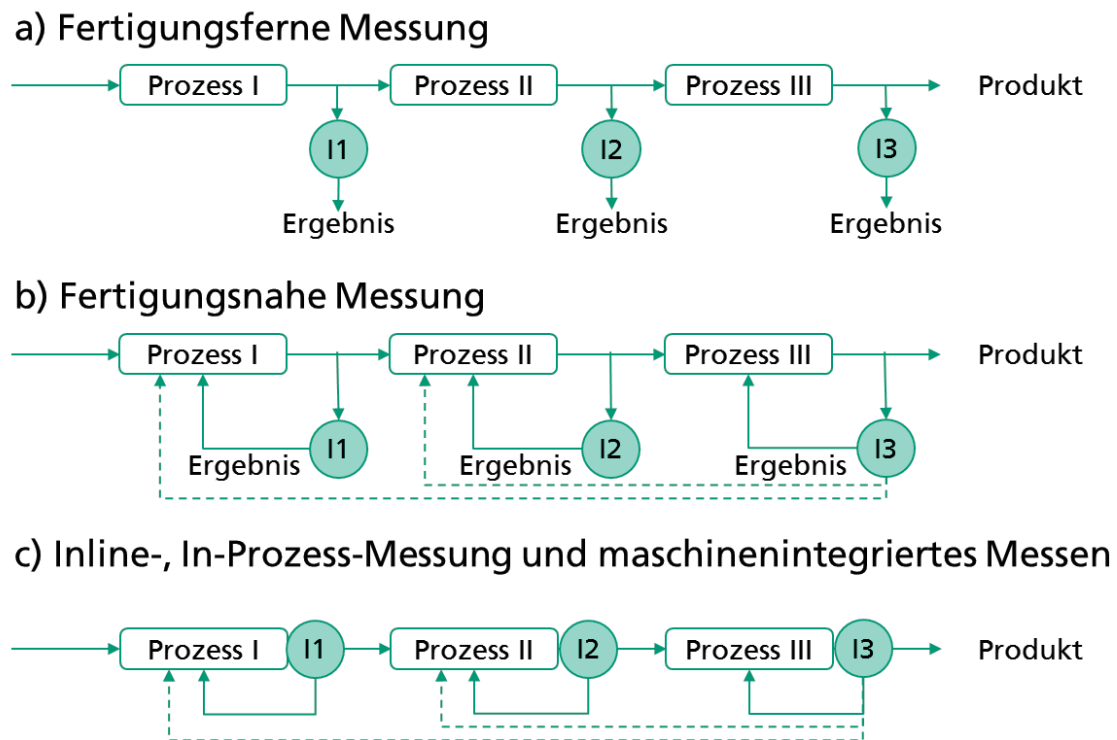
Das neuere Qualitätskostenmodell findet in dieser Arbeit allerdings keine weitere Verwendung, da es die kontinuierliche Verbesserung von Produkten sowie Prozessen voraussetzt. Davon kann allerdings bei der Anwendung der Methodik der dynamischen Tolerierung in unbekanntem Betrieben nicht ausgegangen werden.

### **4.1.3 Automatisierung und Integration der Fertigungsmesstechnik zur Qualitätssicherung**

Die Fertigungsmesstechnik ist, wie ihr Name sagt, stets in die industrielle Fertigung integriert. Sie wird eingesetzt, um den Fertigungsprozess oder die Produktqualität zu bewerten. Dadurch kann sichergestellt werden, dass die Qualitätsanforderungen erfüllt sind. Dies entspricht nach DIN EN ISO 9000:2015 (Norm DIN EN ISO 9000 2015) der Qualitätssicherung.

Die Qualitätssicherung kann produkt- oder prozessbezogen erfolgen (Bettenhausen et al. 2011). Während das Ziel der produktbezogenen Qualitätssicherung fehlerfrei erzeugte Werkstücke, Baugruppen oder Produkte sind und diese somit Folgekosten verhindert (vgl. Kapitel 4.1.2 bzw. Abbildung 20), wird die prozessbezogene Qualitätssicherung zur Sicherstellung bestmöglicher Fertigungsprozesse eingesetzt. „Der Schwerpunkt der Fertigungsmesstechnik wird sich dabei in Zukunft [...] von der eher produktbezogenen hin zur stärker prozessbezogenen Qualitätssicherung verlagern“ (Bettenhausen et al. 2011); S. 28.

Wie bereits erwähnt, kann die Einbindung der Fertigungsmesstechnik in unterschiedlichen Integrationsgraden erfolgen (siehe Abbildung 19). Abbildung 22 zeigt einen Vergleich von fertigungsfernen, - nahen, Inline-, In-Prozess- und maschinenintegrierten Messungen und inwieweit die Messergebnisse weiter genutzt werden können. Dabei kennzeichnen I1, I2 und I3 jeweils die Prüfungen (Inspektionen).



**Abbildung 22: Vergleich von fertigungsfernen, - nahen, Inline-, In-Prozess- und maschinenintegrierten Messungen**

*Quelle: Eigene Darstellung nach (Bettenhausen et al. 2011); S. 29*

Beim fertigungsfernen Messen (Messung in einem angrenzenden Messraum) erfolgt die Inspektion meist stichprobenartig und asynchron zur Fertigung. Daher ist die Rückkopplung der Prüfergebnisse auf den Fertigungsprozess meist schwierig. Daher dienen die erzeugten Prüfergebnisse meist der produktbezogenen Qualitätssicherung (vergleiche Abbildung 22, a)). Beim fertigungsnahen Messen (Messung in der Nähe der Fertigungslinie) kann die Rückkopplung der Prüfergebnisse an den Fertigungsprozess leichter erfolgen (vergleiche Abbildung 22, b)). Diese Rückkopplung kann beispielsweise für die statistische Prozessregelung<sup>18</sup> (SPC) (Gerboth 2002) eingesetzt werden. Die Inline-Messungen (innerhalb der Linie im Fertigungstakt), das maschinenintegrierte

---

<sup>18</sup> „Statistische Prozesskontrolle (englisch statistical process control – SPC) ist ein Werkzeug des Qualitätsmanagements“ (Faes 2013); S. 10

Messen (während des Prozesses oder in der Nebenzeit) und die In-Prozess-Messungen (Messung während des Prozesses) laufen synchron zur Fertigung. Dadurch können die Messergebnisse sofort zurückspielt werden und ein (Prozess-)Qualitätsregelkreis<sup>19</sup> ist möglich (vergleiche Abbildung 22, c)).

#### 4.1.4 Entwicklungen der Fertigungsmesstechnik

Ein Trend in der Fertigungstechnik, der in den vergangenen Jahrzehnten eindeutig zu beobachten war, sind die ständig wachsenden Qualitäts- und Präzisionsanforderungen. Dabei werden die Toleranzen, besonders bei seriengefertigten Bauteilen, immer enger (Lemke 1988); S. 162, (Bettenhausen et al. 2011); S. 12. Messsysteme müssen daher in der Lage sein, „trotz Umwelteinflüsse[n] in der Produktionsumgebung eine große Bandbreite von Messbereichen bei immer geringeren Toleranzen ab[zu]decken“ (Artischewski 2014); S. 5. Thomas Kreidel<sup>20</sup> behauptet sogar: „Ohne verbesserte Messgeräte kein Drei-Liter-Auto“ (Kreidel 1997).

Daraus lassen sich wesentliche Anforderungen an die zukünftige Messtechnik ableiten: Sie muss schneller, genauer, sicherer und flexibler werden (siehe auch (Bettenhausen et al. 2011); S. 11, (Artischewski 2014); S. 5).

Messsysteme lassen sich besser direkt in die Fertigung integrieren. Daher zeigt „der Trend in der Fertigungsmesstechnik [...] eindeutig in Richtung Inline-Prüfung.“ (Bettenhausen et al. 2011); S. 29, (Imkamp et al. 2016). Durch integrierte Fertigungsmesstechnik wird die Überprüfung von Bauteilen, Baugruppen oder Produkten deutlich einfacher. „Ziel der Inline-Messtechnik ist [dabei] eine 100%-Prüfung“ (Bettenhausen et al. 2011); S. 18. Eine solche 100%-Prüfung setzen derzeit immer mehr pro-

---

<sup>19</sup> „Der Prozessqualitätsregelkreis ist ein Qualitätsregelkreis, der produktorientiert (erzeugnis-/leistungsorientiert) anhand der Qualitätsmerkmale des Prozesses arbeitet“ (Linß 2018); S. 46.

<sup>20</sup> geschäftsführender Gesellschafter von Mahr in Göttingen

duzierende Unternehmen ein, um den gestiegenen Toleranz- und Qualitätsanforderungen gerecht zu werden (Bettenhausen et al. 2011). Ebenso wird die qualitative Prüfung ersetzt durch eine quantitative Prüfung (Bettenhausen et al. 2011); S. 31. Zu den qualitativen Prüfungen zählen Schablonen und Lehren. Dabei liefert qualitative Prüftechnik die Information, ob ein Produktmerkmal in Ordnung oder nicht in Ordnung hergestellt wurde. Bei einer quantitativen Prüfung werden diskrete Messwerte generiert (Oetzmann 2005); S. 31ff. Bei der in die Fertigung integrierten 100%-Prüfung können die vorhandenen Daten „durch deren automatisierte Verarbeitung und Rückführung in den Produktionsprozess“ (Bettenhausen et al. 2011); S. 19 verstärkt genutzt werden. „Der Qualitätsgewinn ergibt sich hauptsächlich aus der kontinuierlichen Datenrückführung in Echtzeit.“ (Artischewski 2014); S. 6. Das Ziel der Richtlinie VDI/VDE 2600 (Norm VDI/VDE 2600-2 2018) „Prüfprozessmanagement“ ist es, das Produktionssystem transparent zu gestalten, um mit den ermittelten Mess- und Prüfdaten eine optimale Abstimmung zu erhalten (Bettenhausen et al. 2011); S. 24.

Eine Herausforderung für die Fertigungsmesstechnik ist zudem die langfristige Archivierung der gesammelten Messergebnisse. Die Forderung nach der Sicherung aller Messdaten zu einzelnen Produkten oder Fertigungsprozessen wird immer häufiger, um einen Qualitätsnachweis<sup>21</sup> erbringen zu können (Bettenhausen et al. 2011); S. 34.

Diese aktuellen Entwicklungen in der Fertigungsmesstechnik sind für die Umsetzung der in dieser Arbeit entwickelten Methodik der dynamischen Tolerierung unerlässlich. Zentral sind insbesondere die Trends der **100%-Prüfung**, des **zunehmenden Integrationsgrads** der Fertigungsmesstechnik in die Produktion, sowie die **Rückführung der gewonnenen Mess- und Prüfdaten in Echtzeit**.

---

<sup>21</sup> Ein Qualitätsnachweis „dient als Nachweis darüber, dass die Forderung an die Beschaffenheit einer bezeichneten Einheit erfüllt ist.“ (Geiger et al. 2007); S.97

## 4.2 Industrie 4.0

Die digitale Vernetzung durch moderne Informations- und Kommunikationstechnologien verändert die Welt, in der wir heute leben. Innerhalb von zwanzig Jahren haben wir Menschen gelernt, trotz großer räumlicher Distanz in Echtzeit zu kommunizieren. Die Kommunikationskanäle, welche dies ermöglichen, nehmen derzeit weiter zu. Diese epochale Innovation hat massive Auswirkungen auf unser tägliches Leben, verändert die Märkte disruptiv und schafft neue Sozialstrukturen. Sie kann zudem zur so genannten vierten industriellen Revolution führen: Die umfassende Digitalisierung der industriellen Produktion. Gerade sind wir noch dabei, die Auswirkungen der dritten industriellen Revolution zu verstehen, schon bahnt sich laut Beobachtern eine neue, vierte industrielle Revolution an (siehe etwa (Barner et al. 2013); S 55, (Kagermann et al. 2011), Vogel-Heuser et al. 2017).

Diese vierte industrielle Revolution, auch „Industrie 4.0“ genannt, muss zunächst vor dem historischen Hintergrund gesehen werden, um deren Bedeutung und Auswirkungen auf die in dieser Arbeit vorgestellte Methode der dynamischen Tolerierung herausarbeiten zu können. Im Folgenden wird daher zunächst kurz dieser Hintergrund beleuchtet, bevor die relevanten Elemente der vierten industriellen Revolution für die in dieser Arbeit vorgestellte Methode der dynamischen Tolerierung herausgearbeitet werden.

### 4.2.1 Geschichte der vierten industriellen Revolution und zentrale Akteure

„Industrie 4.0“ gehen drei revolutionäre Umwälzungen in der Produktion voraus. Die erste industrielle Revolution begann um 1750 zunächst in England mit der Entwicklung der Dampfmaschine als Arbeits- und Kraftmaschine (Mechanisierung; siehe Kagermann et al. 2013). Fabriksysteme in der Stahl-, Eisen- und Textilindustrie wurden zentralisiert, die Produktion erfolgte arbeitsteilig und teilmechanisch. Diese erste industrielle Revolution zog neben einer stark beschleunigten Entwicklung von Technik,

Produktivität und Wissenschaft auch eine Bevölkerungsexplosion nach sich, die sich durch die Zunahme von Arbeit und Nahrung sowie verbesserte Hygiene und medizinischen Fortschritt erklären lässt (Kagermann et al. 2013), (Mirow 1996). Um 1870 begann die zweite industrielle Revolution, geprägt durch die arbeitsteilige, großindustrielle Massenproduktion mit Hilfe elektrischer Energie (Elektrifizierung) in der Elektro-, Chemie- und Automobilindustrie. Durch diese neue Art der Produktion wuchs die europäische Bevölkerung weiter und es kam der Wunsch nach Wohlstand für alle auf. Um 1960 begann die dritte industrielle Revolution, auch „digitale Revolution“ genannt. Diese zeichnete sich durch den Einsatz von Elektronik und Informationstechnologie in der Produktion aus (Digitalisierung). Sie ermöglichte eine automatisierungsgetriebene Erhöhung der Arbeitsproduktivität (Rationalisierung) sowie variantenreiche Serienproduktion vgl. (Kagermann et al. 2013).

Die vierte industrielle Revolution, „Industrie 4.0“, wurde 2011 dann durch Henning Kagermann, Wolf-Dieter Lukas und Wolfgang Wahlster auf der Hannover-Messe proklamiert (Kagermann et al. 2011). Anders als bei den vorhergehenden industriellen Revolutionen wurde diese vierte Revolution somit im Voraus und nicht im Nachhinein benannt. Den Kern bildet die Verzahnung der Produktion durch modernste Informations- und Kommunikationstechnologien (Barner et al. 2013); S. 56, (BMWi 2018). Laut Kagermann läutet „nach Mechanisierung, Elektrifizierung und Informatisierung der Industrie [...] der Einzug des Internets der Dinge und Dienste in die Fabrik eine vierte industrielle Revolution ein. Unternehmen werden zukünftig ihre Maschinen, Lagersysteme und Betriebsmittel als Cyber- Physical Systems (CPS) weltweit vernetzen.“ (Kagermann et al. 2013); S. 5; (zu CPS siehe auch Kapitel 4.2.2). Ein zentrales Element von Industrie 4.0 ist dabei die „Vernetzung von autonomen, sich situativ selbst steuernden, sich selbst konfigurierenden, wissensbasierten, sensorgestützten und räumlich verteilten Produktionsressourcen (Produktionsmaschinen, Roboter, Förder- und Lagersysteme, Betriebsmittel) inklusive deren Planungs- und Steuerungssysteme“ (Kagermann et al. 2013). 2013 legte die Bundesregierung dann eine Forschungsagenda

sowie Umsetzungsempfehlungen zu Industrie 4.0 vor (BMBF 2018). Der Begriff „Industrie 4.0“ wurde dabei von der so genannten „Forschungsunion Wirtschaft – Wissenschaft“<sup>22</sup>, einem Beratergremium der deutschen Bundesregierung, geprägt (Barner et al. 2013); S. 10.

Die Produktionsphilosophie nach Industrie 4.0 beschreibt ein Verschmelzen der realen und virtuellen Welten. Industrie 4.0 zeichnet sich dabei nicht nur durch die Kommunikation von Maschinen und integrierten Systemen untereinander aus, sondern vielmehr auch dadurch, dass alle Systeme intelligent vernetzt sind und mit dem zu fertigenden Produkt nahezu in Echtzeit Informationen austauschen (Vogel-Heuser et al. 2017); S. 15. Dadurch ist es möglich, auf einem individuellen Produkt Informationen über die eigenen Spezifikationen zu speichern. Vogel-Heuser et al. beschreiben einen massiven Umbruch des gesamten industriellen Sektors, der durch die zunehmende Vernetzung und das Internet geprägt ist (Vogel-Heuser et al. 2017); S. 14.

Die vierte industrielle Revolution bringt viele Chancen und Möglichkeiten mit sich: Sie kann eine hochflexible, hochproduktive und ressourcenschonende Produktion ermöglichen (Lichtblau et al. 2015); S. 11, (Kagermann et al. 2013). Gleichzeitig birgt sie zahlreiche Risiken und Herausforderungen, vor allem für kleinere und mittlere Unternehmen, wie zum Beispiel hohe Investitionskosten mit teils unklaren Wirtschaftlichkeitsrechnungen, mangelnder Qualifizierung von Mitarbeitern, das Fehlen von Standards zu Schnittstellen, oder Mängel in der Sicherheit der verwendeten Informationstechnologien (Koch et al. 2014); S. 9.

---

<sup>22</sup> „Die Forschungsunion hat von 2006 bis 2013 als das zentrale innovationspolitische Beratungsgremium die Umsetzung und Weiterentwicklung der Hightech-Strategie 2020 für Deutschland begleitet.“ (Forschungsunion 2006).

#### 4.2.2 Relevante Elemente von Industrie 4.0 für die dynamische Tolerierung

Um das in dieser Arbeit entwickelte Modell der dynamischen Tolerierung anwenden zu können, ist es notwendig, dass das Fertigungsmesssystem beziehungsweise Fertigungsmessmittel den genauen Messwert eines Produktmerkmals an die entsprechende Fertigungsmaschine weitergibt. Darüber hinaus muss dieser Wert auf dem betreffenden Produkt abgespeichert werden können.

Derzeit stellt die Vernetzung von Produktionsanlagen für viele Unternehmen eine große Herausforderung dar. Fehlende Standards führen hierbei oft zu großen Schwierigkeiten (Hofmann et al. 2017); S.2, (Schröder 2016); S.12. Um produktionsrelevante Informationen zu speichern und in Echtzeit miteinander auszutauschen, werden im Rahmen von Industrie 4.0 so genannte „Cyberphysische Systeme“ (CPS) in der Produktion eingesetzt (Artischewski 2014); S. 2. CPS bestehen aus einem physischen Teil, der Hardware, und einem digitalen Teil, also Software. Der physische Teil besteht beispielsweise aus Sensoren, Aktoren und Benutzerschnittstellen (Lucke et al. 2014). Auf der digitalen Ebene finden sich beispielsweise IP-Kommunikationstechnologien<sup>23</sup> oder Software Services<sup>24</sup>. Diese ermöglichen eine Vernetzung der CPS in zwei Richtungen:

1. Vertikal: ausgehend von einem technischen Prozess einer Maschine über Maschinen, Arbeitsplätze bis zum gesamten Produktionsnetzwerk,
2. Horizontal: zwischen zwei unterschiedlichen CPS der gleichen Ebene wie zum Beispiel zwischen zwei Fertigungsprozessen (Lucke et al. 2014).

Vor allem die horizontale Vernetzungsmöglichkeit, also zwischen zwei oder mehreren Fertigungsprozessen, spielt für die dynamische Tolerierung eine wesentliche Rolle. Dadurch ist es möglich, die exakten Ist-Daten eines Produktmerkmals an ein CPS

---

<sup>23</sup> IP steht für „Internet Protocol“ und ist ein weit verbreitetes Netzwerkprotokoll.

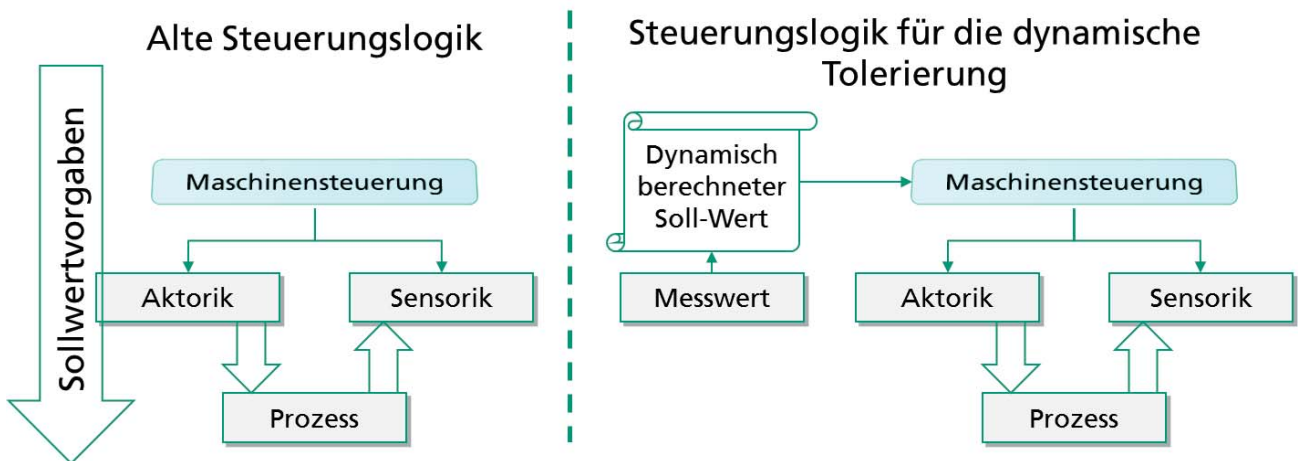
<sup>24</sup> Bei einem Software Service (oder auch Software as a Service) können Kunden über das Internet auf Angebote zugreifen, die von einem Service-Provider gehostet werden.

weiterzugeben, diese Informationen mittels eines Algorithmus zu verarbeiten und die neuen Fertigungsmaße an den nächsten Fertigungsprozess weiterzugeben.

Eine weitere Voraussetzung für die hier vorgestellte Methodik der „dynamischen Tolerierung“ ist die Umsetzung einer Steuerungslogik, die „bottom-up“ Befehle verarbeiten kann. Um die Produktion in den heutigen turbulenten Märkten zu ermöglichen, muss diese durch Rekonfiguration und Selbstoptimierung ständig angepasst werden (Bullinger et al. 2003). Dazu ist eine immer stärkere Integration von intelligenten Systemen mit Hilfe komplexer Algorithmen notwendig (Keinert et al. 2012). Leider haben heutige Steuerungssysteme einige Defizite, die im Zuge der vierten industriellen Revolution aber angepasst werden sollen. Die meisten Maschinensteuerungen können derzeit nur statisch konfiguriert werden. Dies verhindert einen wandelbaren Einsatz des Produktionssystems sowie eine Selbstoptimierung (Keinert et al. 2012); S. 62. Zudem herrscht in heutigen Produktionsanlagen eine strikte hierarchische Trennung zwischen einzelnen Steuerungsebenen (Pritschow 2006). Dies führt dazu, dass, ausgehend von der Maschinensteuerungsebene, ein Zielwert vorgegeben wird und das Produktionssystem selbst nur versucht, diesen Zielwert zu erreichen. Eine Selbstoptimierung der Produktionen kann somit nicht stattfinden, da Steuerbefehle nicht „bottom-up“ kommuniziert und verarbeitet werden können. Informationen können nicht automatisch und ohne manuelle Konfiguration an die Steuerung weitergegeben werden (Vogel-Heuser et al. 2017); S. 63. Ein weiteres Defizit bisheriger „starrer“ Steuerungssysteme ist, dass Informationen nur lokal und somit an einzelnen Stellen gespeichert werden. Dadurch kann keine durchgängige, lückenlose Dokumentation zur Nachverfolgung von Produktionsverläufen und Qualitätskontrollen gewährleistet werden (Vogel-Heuser et al. 2017); S. 64.

Die Steuerungslogik, die für die dynamische Tolerierung vorausgesetzt wird, ist die Verarbeitung von bottom-up Befehlen, die im Rahmen der vierten industriellen Revolution entwickelt werden (Vogel-Heuser et al. 2017). Konkret bedeutet dies, dass

die Steuerung in der Lage ist, auf Grund berechneter Werte ihre Einstellparameter anzupassen und nicht mit einem „starrten“ Wert zu arbeiten, der von einer höheren Hierarchie-Ebene vorgegeben wurde. Dadurch können die vorgegebenen Parameter, wie der Zielwert, einer Maschinensteuerung während der Produktion verändert werden. Abbildung 23 visualisiert beide Steuerungslogiken:



**Abbildung 23: Notwendige Steuerungslogik für die dynamische Tolerierung**  
*Quelle: Eigene Darstellung*

Eine weitere Voraussetzung für die Umsetzung der hier entwickelten Methodik ist es, dass Einzelteile in der Produktion über verschiedene Identifikationstechnologien verfolgt und identifiziert werden können. Auch die Rückverfolgbarkeit wird im Rahmen von Industrie 4.0 umgesetzt. Ziel ist dabei eine Produktion, in der Menschen, Maschinen und Ressourcen miteinander kommunizieren. Diese wird als intelligente Fabrik (Smart Factory) bezeichnet. In diesem Zusammenhang findet sich auch der Begriff des intelligenten Produkts (Smart Product): „Smart Products verfügen über das Wissen ihres Herstellungsprozesses und künftigen Einsatzes („wann wurde ich gefertigt, mit welchen Parametern muss ich bearbeitet werden, wohin soll ich ausgeliefert werden etc.“)“. Sie unterstützen somit aktiv den Fertigungsprozess (Kagermann et al. 2013); S. 23, vergleiche auch (Mühlhäuser et al. 2008); S. 40, (Fortino et al. 2014); S. 13. Sie können jedoch nicht nur „Informationen über ihre Identität, sondern auch über ihre

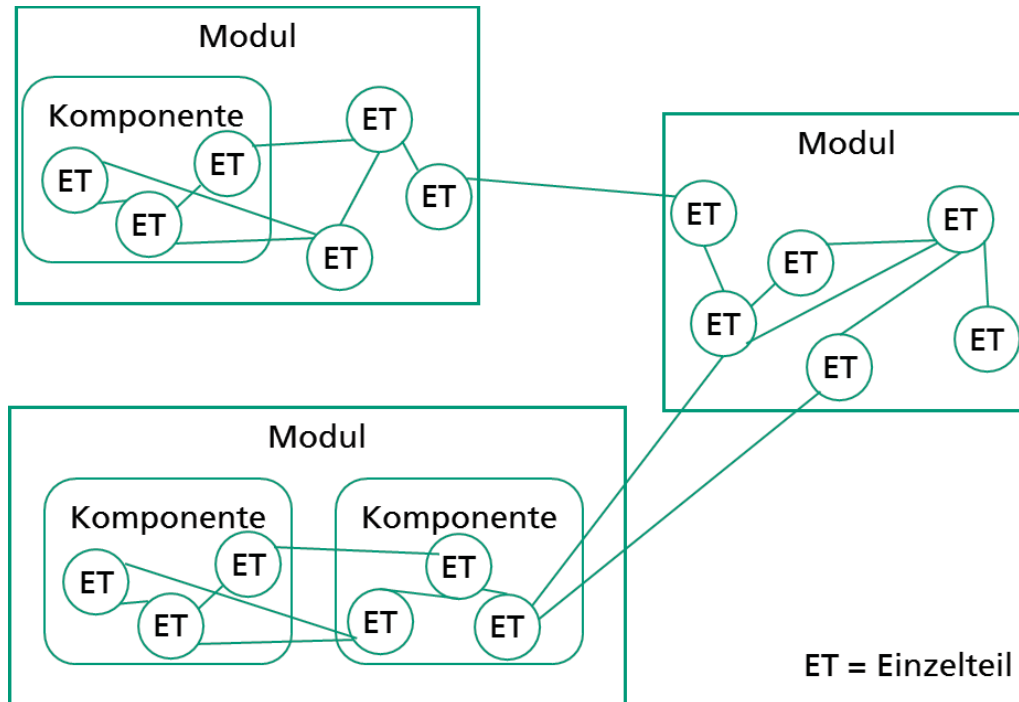
Eigenschaften, ihren Status und ihre Vergangenheit zur Verfügung“ stellen (Borgmeier et al. 2017); S. 40. Ashton schlug bereits 2009 vor, die Identifikation von Produkten über RFID-Chips (RFID: Englisch radio-frequency identification) zu ermöglichen (Ashton 2009). Die Identifikation eines jeden Bauteils in der Fertigung ist für die Qualitätssicherung unerlässlich (BMBF 2017); S. 90 Ein weiteres wichtiges Ziel von Industrie 4.0 ist es, Einzelteile markierungsfrei verfolgen zu können (BMBF 2017); S. 91.

Industrie 4.0 schafft zwei zentrale Voraussetzungen für die erfolgreiche Umsetzung der dynamischen Tolerierung. Hierzu gehören die **Vernetzung** beziehungsweise die **Verkettung** zwischen Produktionsanlagen (Cyberphysische Systeme), einzelnen Werkstückträgern oder Produkten, die Möglichkeit, **einzelne Bauteile zu identifizieren und ihnen Informationen** mitzugeben (Smart Products) sowie die Umsetzung von **Steuerungslogiken**, die es erlauben, Befehle **bottom-up** zu verarbeiten.

### 4.3 Modularität

Die dritte für die dynamische Tolerierung wichtige Veränderung und Voraussetzung in der Produktentwicklung und Fertigung ist die so genannte Modularisierung von Produkten. Als Modul gilt in der Regel eine vormontierte Baugruppe, die aus mehreren Einzelteilen oder Komponenten besteht. Komponenten wiederum bestehen aus mehreren Einzelteilen (Göpfert 2016); S. 181. Diese zunehmende Modularisierung ist für die Methodik der dynamischen Tolerierung bedeutsam, da sie die Notwendigkeit der Austauschbarkeit von Einzelteilen in Frage stellt.

Abbildung 24 zeigt ein Beispiel für ein Nachbarschaftsnetzwerk aus drei Modulen. Dabei repräsentieren die Verbindungslinien die Schnittstellen beziehungsweise die Wechselwirkungen.



**Abbildung 24: Beispiel für ein Nachbarschaftsnetzwerk aus drei Modulen**  
*Quelle: Eigene Darstellung*

Salvador (Salvador 2007) nimmt eine Metaanalyse zur Modularität von etwa 100 Literaturquellen vor und arbeitet dabei fünf Eigenschaften der Modularität heraus (vergleiche auch (Lindemann 2016); S. 122):

1. *Entkopplung*: Die Wechselwirkungen der Komponenten beziehungsweise der Einzelteile sind deutlich ausgeprägter als die der Module untereinander.
2. *Kommunalität*: Werden Module standardisiert, können diese vielfach eingesetzt werden.
3. *Kombinierbarkeit*: Durch die Kombination mehrerer Module können verschiedene Produktvarianten erzeugt werden.
4. *Schnittstellenstandardisierung*: Die Schnittstellen unter Modulen sind zueinander standardisiert.
5. *Funktionsbindung*: Die Zuordnung zwischen Modul und den Teilfunktionen eines Produkts sind klar definiert.

Derzeit besteht laut Experten ein Trend zum sogenannten „Modular Sourcing“ (Göpfert 2016); S. 186: Beim Modular Sourcing wird „die Fertigung größerer und umfassender Bedarfsmodule an den Zulieferer vergeben. Die angelieferten Teile sind nun einbaufertige Module“ (Kober 2018); S. 49. In der Vergangenheit wurden Abnehmer meist mit Einzelteilen beliefert. Im Rahmen des Modular Sourcing werden jedoch Module, bestehend aus Einzelteilen und Komponenten, bereitgestellt (vergleiche auch (Hofbauer et al. 2009); S. 369).

Die Implementierung von Modularität in Unternehmen bringt einige Vorteile: Da die Module beliebig kombinierbar sind und zu neuen Produktvarianten führen, können einzelne Module auch produktübergreifend eingesetzt werden. Dies führt zu positiven Skaleneffekten<sup>25</sup>. Da die Schnittstellen zwischen den Modulen klar definiert sind, wird die Produktpflege deutlich vereinfacht. Durch die klare Zuordnung von Teilfunktionen eines Moduls können die Design- und Testphase erleichtert werden, da auf modularer Ebene und nicht auf Produktebene getestet werden kann. Ebenso können die Auftragsdurchlaufzeiten individueller Kundenwünsche mit leicht kombinierbaren Modulen, deren Teilfunktionen bekannt sind, verkürzt werden (vergleiche hierzu (Galsworth 1994), (Sharon 1991), (Gershenson et al. 2003), Kamrani 2014). Ruppert (Ruppert 2007); S. 157 beschreibt weitere Vorteile der Modularisierung aus Sicht des Automobilbaus. Diese Vorteile sind größtenteils auch auf andere Branchen übertragbar. Die Vorteile sind die „Reduzierung von Bauteilen, niedrigere Montagekosten durch montagefertige Module, [die] Verringerung der konstruktiven und logistischen Schnittstellen sowie die Reduzierung von Entwicklungszeiten und -kosten“.

---

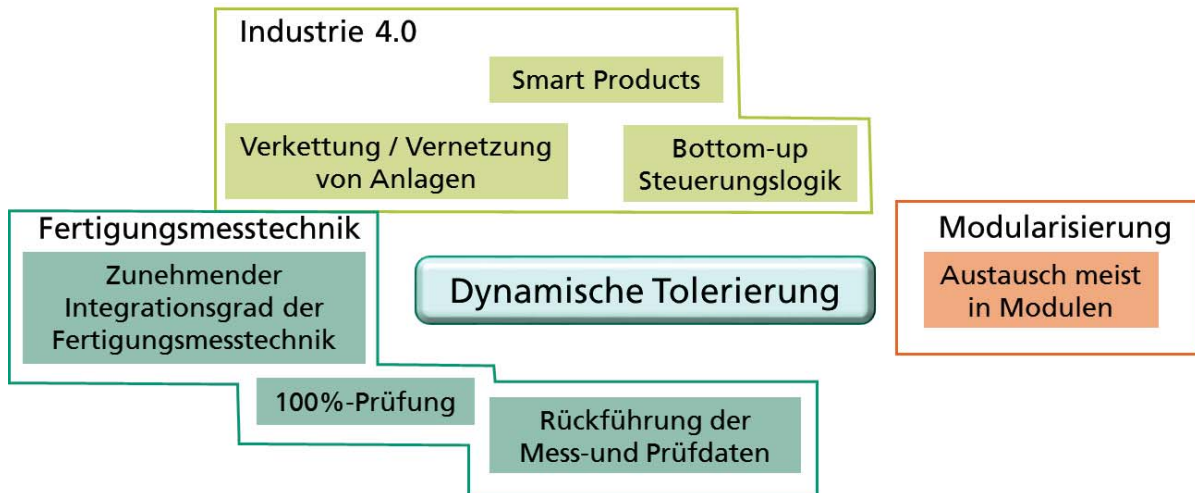
<sup>25</sup> „Bei einem Produktionssystem [ist] der positive Skaleneffekt klassischer Weise [...], dass einmal getätigte Investitionen (z.B. für die Fabrikhalle oder in Forschung und Entwicklung) sich nun über mehr produzierte Einheiten verteilen“ (Herzog 2017); S. 240

Die Austauschbarkeit beim Modular Sourcing begrenzt sich „auf die kompletten Module, während ein Austausch von einzelnen Teilkomponenten innerhalb der Module nicht vorgesehen ist“ (Skirde 2015); S. 34. Durch den Austausch von Modulen ergeben sich für den Kunden Vorteile. Beispielsweise kann ein Produkt durch hochwertige Einzelmodule aufgewertet werden oder an neue Einsatz- und Umgebungsbedingungen angepasst werden. Zudem unterstützt die Modularisierung von Produkten die Instandhaltung, da Wartungstätigkeiten durch das Zusammenfassen von Verschießtätigkeiten oder Verbrauchsmaterial vereinfacht werden. Somit sind durch das Austauschen defekter Module auch Reparaturen deutlich einfacher (vergleiche (Rieg et al. 2018); S. 724).

Dank einer Vielzahl von Vorteilen für das Unternehmen selbst sowie für den Kunden nimmt die Modularisierung von Produkten immer stärker zu. Sie ist für die dynamische Tolerierung von Bedeutung, da sie dazu führt, dass die Austauschbarkeit einzelner Bauteile, wie beispielsweise in (Norm DIN ISO 286-1 2010); S. 4 beschrieben, nicht mehr gewährleistet sein muss. Stattdessen findet der **Austausch** bei Reparaturen von Produkten hauptsächlich auf **Modulebene** statt. Dies ist für die dynamische Tolerierung bedeutsam, da hier die Austauschbarkeit von Einzelteilen je nach Einsatzfall nicht immer gewährleistet werden kann.

#### 4.4 Zusammenfassung der Voraussetzungen

In Kapitel 4 wurden die wichtigsten Voraussetzungen für die Umsetzung der Methodik der dynamischen Tolerierung erörtert. Diese werden in Abbildung 25 noch einmal zusammenfassend illustriert.



**Abbildung 25: Voraussetzungen für die dynamische Tolerierung**

*Quelle: Eigene Darstellung*

Es wurde gezeigt, dass die oben genannten Voraussetzungen dank aktueller Entwicklungen in der Produktion bereits erfüllt sind oder dass ihre Erfüllung im Zuge der vierten industriellen Revolution erfolgen wird: Fortschritte im Bereich der Fertigungsmesstechnik (vergleiche Kapitel 4.1) beinhalten eine zunehmende Integration in die Produktion und ermöglichen die damit verbundene 100%-Prüfung. Zudem werden die erhobenen Mess- und Prüfdaten vermehrt in die Fertigung zurückgeführt. Dies ist für die vorliegende Arbeit bedeutsam, da die Methodik darauf angewiesen ist, schnell Messwerte von Produktmerkmalen zu generieren und weiter zu verarbeiten.

Im Zuge der vierten industriellen Revolution (vergleiche Kapitel 4.2) werden Produktionsanlagen zudem vermehrt vernetzt und verkettet. Steuerungslogiken sind in der Lage, „bottom-up“ zu kommunizieren, und sogenannte „Smart Products“ verfügen über das Wissen ihres Herstellungsprozesses und künftigen Einsatzes. Die Methodik

der dynamischen Tolerierung baut darauf auf, dass bestimmte Einstellparameter der Steuerung auf Grundlage neu berechneter Maße und Toleranzen, dynamisch während der Produktion angepasst werden. Da die Methodik individuell Bauteile aneinander anpasst, ist es aus logistischer Sicht von Vorteil, wenn einzelne Bauteile schnell identifiziert werden können und ihre Verwendung sowie die relevanten Messdaten zur Verfügung stehen. Ebenso können die Herstelldaten, im Falle eines Austausches auf Einzelteilebene, genutzt werden. Auch der derzeitige Trend zur Modularisierung (vergleiche Kapitel 4.3) ist zentral: Er ermöglicht den Austausch einzelner Module statt eines Austausches auf Einzelteilebene. Dies ist für die dynamische Tolerierung wichtig, denn die Austauschbarkeit auf Einzelteilebene ist bei Nutzung der Methodik mit erheblichem Mehraufwand verbunden.

## 5 Die dynamische Tolerierung

Im Folgenden wird nun die neue Methodik der „dynamischen Tolerierung“ beschrieben, die trotz Vorgaben und Einhaltung der engen Toleranzen bei Baugruppen aus der Entwicklung, eine kostengünstige Produktion vor Ort ermöglichen soll. Alternativ kann die Methodik dazu genutzt werden, bei gleichbleibenden Herstellkosten die Qualität der Baugruppe anzuheben. Zunächst wird die Methodik in Kapitel 5.1.1 am Beispiel einer spezifischen Welle-Nabe-Verbindung induktiv hergeleitet. Kapitel 5.1.2 beschreibt dann genauer die Methodik der dynamischen Tolerierung. Die Anwendbarkeit der Methodik wird dann in Kapitel 5.1.3 anhand mehrerer Beispiele überprüft und deduktiv gestützt.

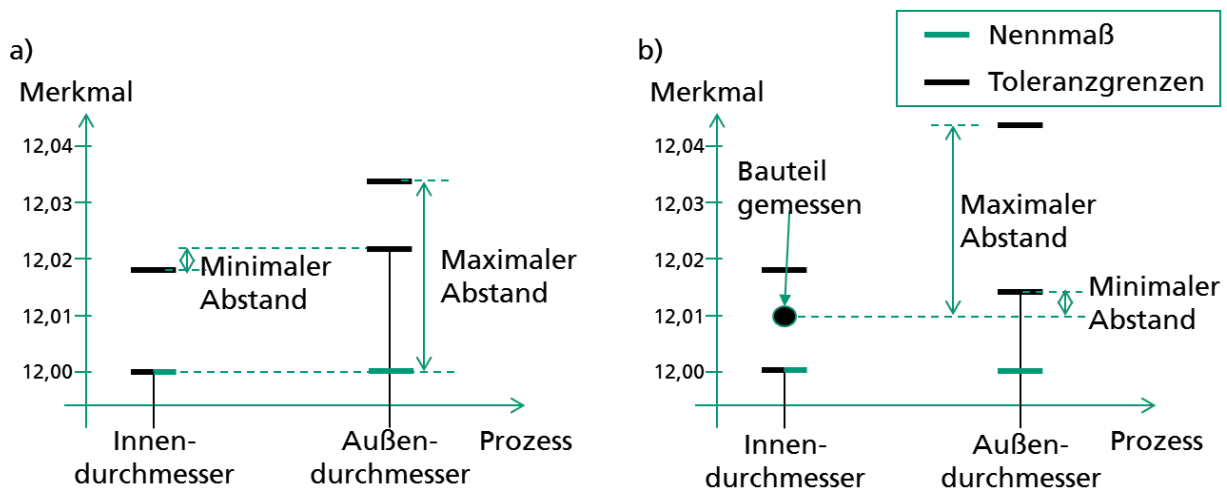
### 5.1 Die Methodik der dynamischen Tolerierung

#### 5.1.1 Induktive Herleitung

Der Kerngedanke der dynamischen Tolerierung wird hier nun induktiv (vergleiche Kapitel 1.4) anhand eines einfachen Beispiels einer Welle-Nabe-Verbindung hergeleitet. Bei dieser Welle-Nabe-Verbindung handelt es sich um eine Übermaßpassung 12 H7/r6 nach (Norm DIN ISO 286-1 2010). Die Funktion der Passung wird wie folgt definiert: „Die Passung hat ein kleines Übermaß. Fügen mit Kraftaufwand möglich.“

Dabei ist das Nennmaß der Bohrung und der Welle 12,000 mm. Das Mindestmaß der Bohrung beträgt 12,000 mm und das Höchstmaß beträgt 12,018 mm. Die daraus resultierende Toleranz beträgt somit 0,018 mm. Für die Welle beträgt das Mindestmaß 12,023 mm und das Höchstmaß 12,034 mm und besitzt somit eine Toleranz von 0,011 mm (vergleiche Abbildung 26, a)). Abbildung 26 zeigt die Toleranzen der Bohrung und der Welle. Auf der Abszisse sind die Prozesse dargestellt und auf der Ordinate das

(Produkt-)Merkmal. Das Produktmerkmal ist in diesem Fall ein Innen- und ein Außendurchmesser.

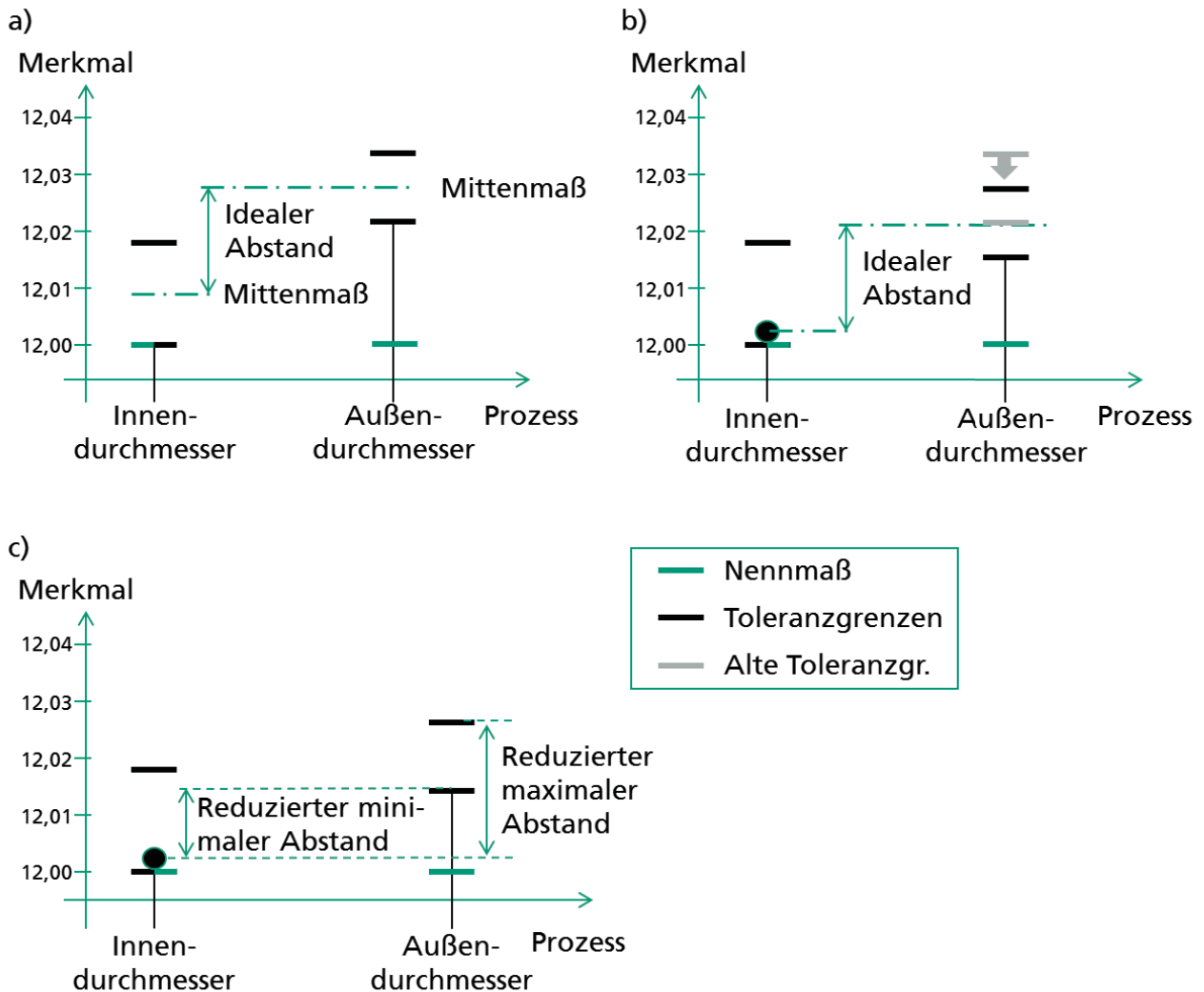


**Abbildung 26: Berechnungsbeispiel einer spezifischen Welle-Nabe-Verbindung zur Herstellkostenoptimierung**  
*Quelle: Eigene Darstellung*

Eine der wichtigsten Bedingungen für die Funktion („Fügen mit Kraftaufwand möglich“) der Passung sicherzustellen, ist die Einhaltung der maximal und minimal zulässigen Abstände zwischen dem Außendurchmesser und dem Innendurchmesser. Ist die Bohrung zu dem Zeitpunkt, an dem die Welle gedreht werden soll, bereits gesetzt, kann die Ist-Geometrie durch Messen festgestellt werden. Wird die Bedingung der maximal und minimal zulässigen Abstände nun auf die Ist-Geometrie angewendet und nicht mehr auf die Toleranzgrenzen, so kann die Toleranz der Welle deutlich geweitet werden (vergleiche Abbildung 26, b)), ohne die ursprüngliche Konstruktion maßgeblich zu verändern. Die Toleranz beträgt nun 0,029 mm und der Toleranzgewinn somit 0,018 mm. Lediglich das Mittenmaß (Fertigungsmaß) und die Toleranz werden im Mikrometerbereich angepasst. Durch die erweiterte Toleranz lassen sich die Herstellkosten der Welle-Nabe-Verbindung reduzieren (vergleiche dazu Kapitel 2.3.1). Dies stützt die Annahme, dass „die Kosten der Herstellung einer Baugruppe bei gleichbleibender

Qualität gesenkt werden“ können, „wenn die Toleranzen in der Produktion dynamisch angepasst werden“ (siehe Hypothese 1, Kapitel 1.2).

Eine weitere Einsatzmöglichkeit der dynamischen Tolerierung ist die Qualitätsverbesserung bei gleichbleibenden Toleranzgrenzen und somit Herstellkosten. Im Beispiel der Welle-Nabe-Verbindung wäre die Funktion ideal umgesetzt, wenn das Mittenmaß oder auch Fertigungsmaß beider Bauteile exakt erreicht wird. Daraus lässt sich schließen, dass es einen Abstand zwischen beiden Bauteilen gibt, der die Funktion der beiden Bauteile „ideal“ umsetzt (vergleiche Abbildung 27, a)). Es kann also angenommen werden, dass die Funktionalität und Qualität der Passung steigen, je mehr der reale Abstand sich dem „idealen“ Abstand (sprich Mittenmaß zu Mittenmaß) annähert (vergleiche hierzu auch Kapitel 2.3.2). Abbildung 26 a) zeigt den idealen Abstand zwischen Innen- und Außendurchmesser abhängig vom Mittenmaß. Abbildung 26 b) zeigt den idealen Abstand zwischen Innen- und Außendurchmesser abhängig vom Messwert des Innendurchmessers. Dadurch verschieben sich die Toleranzgrenzen des Außendurchmessers. Abbildung 27 c) zeigt, dass bei gleichbleibend genauen Prozessen der maximale und minimale Abstand zwischen dem Außen- und Innendurchmesser reduziert werden kann, wenn der Ist-Durchmesser der Bohrung ermittelt wurde.



**Abbildung 27: Berechnungsbeispiel einer spezifischen Welle-Nabe-Verbindung zur Qualitätsoptimierung**  
*Quelle: Eigene Darstellung*

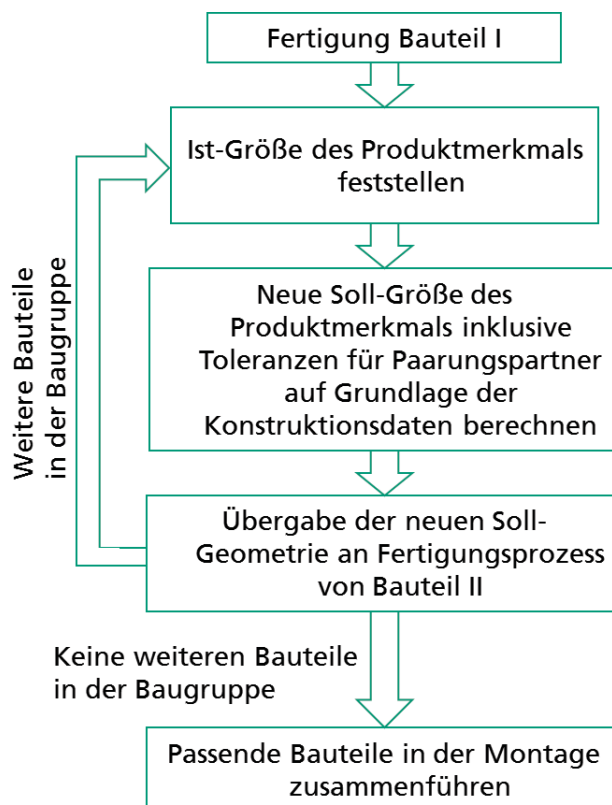
Wenn also der minimal und maximal zulässige Abstand reduziert werden, wird der „ideale“ Abstand eher erreicht (vergleiche Abbildung 27, b)), ohne dass die Präzision der Fertigung zunimmt. Somit kann die Qualität nach Taguchi (vergleiche Kapitel 2.3.2) einer Baugruppe bei gleichbleibenden Herstellkosten gesteigert werden (vergleiche Hypothese II, Kapitel 1.2).

Also können durch die dynamische Tolerierung auf der einen Seite Herstellkosten bei gleichbleibender Qualität reduziert werden und auf der anderen Seite kann die

Qualität bei gleichbleibenden Herstellkosten verbessert werden. Sollte weder die Minimierung der Kosten noch die Maximierung der Qualität das jeweils alleinige Ziel sein, sondern eine Verbesserung beider Faktoren angestrebt werden, können diese auch gleichzeitig optimiert werden (vergleiche Hypothese III, Kapitel 1.2).

### 5.1.2 Detaillierung der Kernidee

Das Ziel der dynamischen Tolerierung ist es, eng tolerierte Bauteile, die einer Funktion in einer Baugruppe unterliegen, kostengünstig zu produzieren oder die Qualität bei gleichbleibenden Kosten zu erhöhen. Die Kernidee ist, Bauteile in der Fertigung automatisiert aufeinander abzustimmen. Dies geschieht konsekutiv und wird schematisch in Abbildung 28 dargestellt sowie im Folgenden näher erläutert.

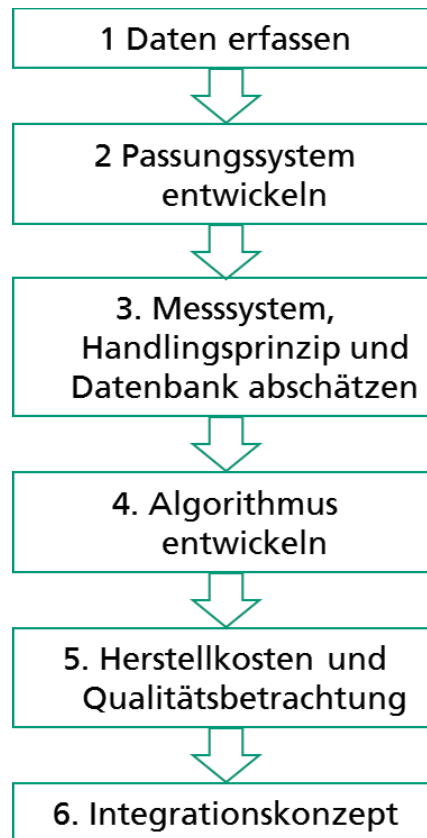


**Abbildung 28: Kernidee der "dynamischen Tolerierung"**  
*Quelle: Eigene Darstellung*

Eine wichtige Voraussetzung für den Einsatz der „dynamischen Tolerierung“ ist, dass die Bauteile konsekutiv gefertigt und die passenden Bauteile in der Montage logistisch zusammengeführt werden. Nach der Methodik der „dynamischen Tolerierung“ kann somit eines der Bauteile auf herkömmliche Weise eher grob gefertigt werden. Anschließend werden die gefertigten Produktmerkmale vermessen. Danach kann das Produktmerkmal des entsprechend gepaarten Bauteils gemäß neuer Toleranzgrenzen und Mitten- beziehungsweise Fertigungsmaß angepasst werden. Die Anpassung des Mitten- beziehungsweise Fertigungsmaßes inklusive der Toleranzen muss dabei immer nach den Vorgaben der Konstruktion erfolgen. Hierfür müssen im Vorfeld Bedingungen festgelegt werden, so dass die konstruktiven Vorgaben und somit die Funktion der Baugruppe nicht beeinträchtigt werden.

Eine allgemeine Austauschbarkeit im Falle einer Reparatur einzelner Bauteile in einer Baugruppe ist somit zunächst nicht gegeben. Erst durch die Identifizierung der Baugruppe und somit der enthaltenen Bauteile (siehe „Smart Products“, Kapitel 4.2.2) kann auf Basis der hinterlegten Informationen das defekte Bauteil neu gefertigt und anschließend ausgetauscht werden. Es stellt sich im Zuge der Modularisierung die Frage, ob die Austauschbarkeit einzelner Bauteile notwendig ist (siehe Kapitel 4.3).

Wie kann die dynamische Tolerierung auf beliebige Baugruppen konkret angewendet werden? Dazu dienen sechs zentrale Schritte (vergleiche Abbildung 29).



**Abbildung 29: Methodik zur Umsetzung der "dynamischen Tolerierung"**  
*Quelle: Eigene Darstellung*

Schritt 1: Daten erfassen:

Im ersten Schritt müssen die Konstruktions- und Produktionsdaten einer Baugruppe erfasst werden. Dazu gehören die Funktionalität, die geometrischen Abmaße, die erwartete Stückzahl pro Jahr und die Fertigungsreihenfolge (sowie die vorhandenen Fertigungsmaschinen).

Schritt 2: Passungssystem entwickeln:

Um das Passungssystem zu entwickeln, müssen die vorhandenen Daten analysiert und anschließend die Bedingungen für die spezifischen Bauteile abgeleitet werden. Bei der Analyse muss darauf geachtet werden, dass die geometrischen und mechanischen Ei-

enschaften nicht verletzt werden. Zudem müssen die Worst-Case-Paarungen betrachtet werden, da dadurch die notwendigen Grenzwerte einer Paarung ermittelt werden können. Hierbei ist auf die Funktionalität der Baugruppe zu achten.

### Schritt 3: Messsystem, Handlingsprinzip und Datenbank abschätzen:

Um abschätzen zu können, wann sich die Implementierung der dynamischen Tolerierung amortisiert, müssen die Mehrkosten zur Integration der Methodik ermittelt werden. Daher können aus der Analyse der Daten (Schritt 2) erste Spezifikationen (Geometrie und Erreichbarkeit der Messstelle) an das Messsystem abgeleitet werden. Mit Hilfe der Spezifikationen können gezielt mögliche Messsysteme recherchiert werden. Dadurch können die ungefähr benötigte Messgenauigkeit und die anfallenden Beschaffungs- und Integrationskosten für das Messsystem ermittelt werden. Ebenfalls muss abgeschätzt werden, wie hoch der logistische Aufwand in der Fertigung vor Ort ist. Dafür sollten die zusätzlichen Beschaffungs- und Integrationskosten für die notwendigen Handlingsprinzipien, um die passenden Teile in der Montage zusammenzuführen, und die notwendige Datenbank, um dem Bauteil Eigenschaften zuzuordnen zu können, abgeschätzt werden.

### Schritt 4: Algorithmus entwickeln:

Aus den Bedingungen, die in Schritt 1.2 abgeleitet wurden, und der geschätzten Messgenauigkeit des Messsystems beziehungsweise der Messsysteme, können in Schritt 4 mathematische Beschreibungen abgeleitet werden. Mittels der entwickelten Algorithmen können der Toleranzgewinn je Bauteil berechnet und in Schritt 5 die Einsparungen der Herstellkosten pro Bauteil abgeschätzt werden.

Schritt 5: Herstellkosten- und Qualitätsbetrachtung:

In diesem Schritt wird unter Verwendung der erwarteten Stückzahl pro Jahr, der Beschaffungs- und Integrationskosten (für das Messsystem, das Handlingsprinzip und die Datenbank) aus Schritt 3 sowie dem Toleranzgewinn aus Schritt 4 die Amortisation berechnet. Dabei gilt:

$$Amortisation = \frac{Invest_{Beschaffungs- und Integrationskosten}}{Ersparnis_{Herstellkosten/Bauteil} * Stk./Jahr} \quad (15)$$

Im Falle einer Qualitätsbetrachtung müssen noch die potentiell reduzierten Reklamationskosten berücksichtigt werden. Es gilt dann:

$$Amortisation = \frac{Invest_{Beschaffungs- und Integrationskosten}}{Ersparnis_{Herstellkosten/Bauteil} * Stk./Jahr + Einsparung_{Reklamationskost}} \quad (16)$$

Schritt 6: Integrationskonzept

In einem letzten Schritt muss überlegt werden, wie die Methodik in die vorhandenen Produktion integriert werden kann.<sup>26</sup>

### 5.1.3 Potentielle Anwendungsgebiete der dynamischen Tolerierung

Die Methodik der dynamischen Tolerierung kann auf Baugruppen mit einer bestimmten Funktionalität, bestehend aus einzelnen Bauteilen mit Produktmerkmalen, angewendet werden. Die Funktionalität ergibt sich durch die Kombination zweier oder mehrerer Produktmerkmale (beispielsweise hat eine Mutter als Produktmerkmal ein Innengewinde und eine Schraube ein Außengewinde. Nur in Kombination haben Schraube

---

<sup>26</sup> Die Integration der Methode in einem Unternehmen ist nicht Teil dieser Dissertation.

und Mutter die Funktion, eine Schraubverbindung herzustellen). Sobald die Produktmerkmale gefertigt und messbar sind, ist die Anwendung der dynamischen Tolerierung möglich.

Wie bereits in Kapitel 4.1.1 beschrieben, lässt sich die Fertigungsmesstechnik dabei in vier Bereiche aufteilen: die Gestalt, die Elektrik, den Werkstoff und die Funktion des Bauteils beziehungsweise der Baugruppe. Denkbar ist eine Anwendung der Methodik in drei der vier Bereiche.

Im Bereich der Gestalt werden hauptsächlich geometrische Größen gemessen. Beispiele hierfür sind Welle-Nabe-Verbindungen (vergleiche hierzu Kapitel 5.2.1), Baugruppen mit Kettentoleranzen (beispielsweise Getriebe, vergleiche Kapitel 5.2.2), oder Spindeln. Da die nachfolgenden Kapitel sich intensiv mit der Anwendung der dynamischen Tolerierung mit geometrischen Größen befassen, wird in diesem Kapitel nicht weiter darauf eingegangen.

Im Bereich der Elektrik ist eine Anwendung der Methodik ebenso denkbar. Beispielsweise könnte die Methodik zur Optimierung von Magnetfeldern von induktiven Sensoren eingesetzt werden: Grundsätzlich arbeiten induktive Sensoren mit einem Magnetfeld. Kommt ein Objekt in das vom Sensor erzeugte Magnetfeld, verändert sich dieses und der Sensor kann das (Vorhandensein eines) Objekt(s) erkennen. Das Magnetfeld wird in vielen Anwendungen durch Induktivität (elektrische Spulen) erzeugt. Durch die immer höheren Anforderungen an die Messtechnik ist ein konstantes Magnetfeld unter allen Einsatzbedingungen zwingend notwendig. Da allerdings elektrische Spulen bei der Herstellung erheblichen Stressfaktoren (Drahtbeanspruchung) ausgesetzt sind (Fleischer et al. 2017); S. 11, kann eine konstante Induktivität nicht immer gewährleistet werden. Hier könnte die Methodik der dynamischen Tolerierung zur Stabilisierung des Magnetfeldes eingesetzt werden. In einem ersten Schritt würde dazu die Induktivität der Spule gemessen, in einem zweiten Schritt kann dann auf Grund des

gewünschten Magnetfelds und der vorhandenen Induktivität die notwendige Spannungs- und Stromversorgung berechnet werden. Daraus kann wiederum eine individuelle Platinenbestückung abgeleitet werden.

Die vorliegende Arbeit demonstriert die potentielle Anwendung der Methodik der dynamischen Tolerierung im Bereich der geometrischen Größen. Im folgenden Kapitel wird die Methodik am Beispiel einer Welle-Nabe-Verbindung sowie am Beispiel einer linearen Maßkette genauer ausgeführt, einschließlich der schrittweisen Algorithmenentwicklung.

### **5.2 Verifizierung anhand von Fallbeispielen aus der Literatur**

Das vorliegende Kapitel demonstriert die Machbarkeit der Methodik der dynamischen Tolerierung sowie die erreichbare Kostenreduktion oder Qualitätserhöhung anhand von Beispielen aus der Literatur. In den Beispielen wird immer nach dem in Kapitel 5.1.2 beschriebenen Vorgehen gehandelt (vergleiche Abbildung 29). In einem ersten Schritt werden die für die Methodik relevanten Daten gesammelt. In einem darauf aufbauenden Schritt werden die Passungen und Schnittstellen untersucht und notwendige Bedingungen für die Funktionalität der Baugruppe abgeleitet. Um eine Kosten- und Qualitätsbetrachtung durchführen zu können, müssen im Vorfeld ein Messsystem, ein Handlingsprinzip, ein Datenbankprinzip und die entsprechenden Kosten dafür abgeschätzt werden. Daraufhin wird der Algorithmus für die Berechnung der angepassten Nennmaße und Toleranzgrenzen entwickelt. Mit den gewonnenen Erkenntnissen aus den vorherigen Schritten können nun, je nach Zielstellung, die möglichen Kosteneinsparungen oder die Qualitätsoptimierung überprüft und abgeschätzt werden. Bei einer lohnenden Amortisation kann ein mögliches Integrationsschema in die Produktion entwickelt werden. Als erstes Beispiel dient eine klassische Welle-Nabe-Verbindung.

### 5.2.1 Welle-Nabe-Verbindung am Beispiel eines Rillenkugellagers

Die Welle-Nabe-Verbindung ist in der DIN EN ISO 286-1 und -2 genormt (Norm DIN ISO 286-1 2010), (Norm DIN ISO 286-2 2010) und unterliegt meist einer Passungsart. Eine Passung (vergleiche hierzu Kapitel 2.1) beschreibt den „Zusammenhang zwischen einem äußeren und einem inneren Maßelement, die zusammengeführt werden“ (Norm DIN EN ISO 286-1 2010); S. 10. Hierbei unterscheidet man im Wesentlichen drei Passungsarten: die Spielpassung, die Übermaßpassung und die Übergangspassung. Bei der Spielpassung (früher „Spieltoleranzfeld“) entsteht beim Zusammenbau von Bohrung und Welle immer ein Spiel, da das Mindestmaß der Bohrung mindestens gleich, meist aber größer ist, als das Höchstmaß der Welle. Der umgekehrte Fall tritt bei einer Übermaßpassung (früher „Übermaßtoleranzfeld“) ein. Das Mindestmaß der Welle ist hier gleich oder größer dem Höchstmaß der Bohrung. Bei der Übergangspassung (früher „Übergangstoleranzfeld“) sind die Toleranzen von Bohrung und Welle so gewählt, dass entweder ein Spiel oder ein Übermaß entstehen kann (vergleiche (Labisch et al. 2017); S. 159).

Um eine rotierende Welle zu lagern, werden Radiallager eingesetzt. Damit die Welle nicht im Innenring des Wälzlagers rotiert, muss der Innenring kraftschlüssig oder formschlüssig mit der Welle verbunden sein. Um diesen Kraftschluss sicherzustellen, wird in der Regel auf eine Übermaßpassung zurückgegriffen.

### **5.2.1.1 Reduktion der Herstellkosten durch den Einsatz der dynamischen Tolerierung**

Die Methodik der dynamischen Tolerierung ermöglicht es, die Herstellkosten der rotierenden Welle zu reduzieren, indem ihre Toleranz erweitert wird. Die Möglichkeiten und die sich daraus ergebenden Vorteile werden an folgendem Beispiel verdeutlicht: Eine Welle mit einem Außendurchmesser von 60 mm soll mit Hilfe eines Rillenkugellagers rotierend gelagert werden. Es werden keine Besonderheiten in Bezug auf die Betriebsverhältnisse erwartet, daher kann ein Rillenkugellager mit der Toleranzklasse PN<sup>27</sup> verwendet werden. Laut (Norm DIN 620-2 1988) beträgt das obere Abmaß 0,000 mm und das untere Abmaß -0,015 mm. Es wird eine normale Belastung des Rillenkugellagers angenommen. Die empfohlene Passung für diese Standardbedingung ist k5.

Im Folgenden wird nun die Passung zwischen Innenring (Maße des Innenrings werden mit dem Index N gekennzeichnet) und Welle (Maße der Welle werden mit dem Index W gekennzeichnet) berechnet.

---

<sup>27</sup> Kugellager werden in Toleranzklassen unterteilt, wobei PN für die Toleranzklasse „normal“ (früher P0) steht. Für Lager mit höherer Genauigkeit können die Toleranzklassen P6, P5, P4, P3 und P2 eingesetzt werden, wobei P5 genauer als P6 ist.

### Schritt 1: Daten erfassen:

#### Konstruktionsdaten:

Innendurchmesser Rillenkugellager (Toleranzklasse PN)

Mindestmaß  $LLS_N = 59,985 \text{ mm}$

Höchstmaß  $ULS_N = 60,000 \text{ mm}$

Toleranz  $T_N = 0,015 \text{ mm}$

Welle 60k5

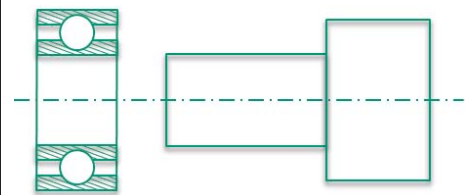
Mindestmaß  $LLS_W = 60,002 \text{ mm}$

Höchstmaß  $ULS_W = 60,015 \text{ mm}$

Toleranz  $T_W = 0,013 \text{ mm}$

#### Produktionsablauf:

Es wird angenommen, dass der Rillenkugellager-Lieferant im Zuge seiner Qualitätskontrolle eine **100 %-Prüfung** der Innendurchmesser durchführt. Die ermittelten Messwerte sind auf jedem Rillenkugellager hinterlegt. Die Wellen werden an einer CNC-Maschine gefertigt. Es wird mit einer Stückzahl von **10 000 Passungen pro Monat** gerechnet.



**Abbildung 30: Beispielhafte Darstellung einer Baugruppe bestehend aus einer Welle und einem Rillenkugellager**

*Quelle: eigene Darstellung*

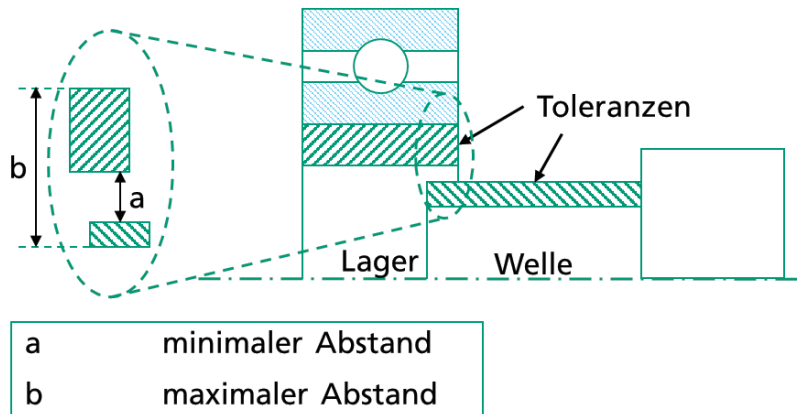
### Schritt 2: Passungssystem entwickeln

#### Analyse der Daten:

Die Funktionalität dieser Passung ist eine kraftschlüssige Verbindung.

#### Bedingungen ableiten:

Abbildung 31 zeigt die schematische Darstellung einer Welle-Nabe-Verbindung. Diese hilft, das Zusammenspiel der Toleranzen besser zu verstehen.



**Abbildung 31: Schematische Darstellung einer Welle-Nabe-Verbindung**  
*Quelle: Eigene Darstellung*

Um die Funktionalität zu gewährleisten, müssen folgende Bedingungen eingehalten werden:

- Bedingung I: *Die Passfunktion ist nur dann gewährleistet, wenn der minimale und der maximale Abstand eingehalten werden.*
- Bedingung II: *Der Toleranzgewinn darf das Bauteil weder in seiner mechanischen noch in seiner geometrischen Eigenschaft beeinträchtigen.*

### **Schritt 3: Messsystem, Handlingsprinzip und Datenbank abschätzen**

Es wird angenommen, dass der Rillenkugellager-Lieferant ein Messsystem mit einer Messunsicherheit von  $\pm 4 \mu\text{m}$  hat und den Wert entsprechend angibt.

Beim Handling muss darauf geachtet werden, dass die vermessenen Bauteile mit den dafür produzierten Gegenstücken gepaart und die jeweiligen Datensätze in einer Datenbank hinterlegt werden.

### **Schritt 4: Algorithmus entwickeln**

Im Folgenden wird ein Algorithmus entwickelt, der auf Grundlage des Messergebnisses das neue Mitten-/Fertigungsmaß und die dazugehörigen Toleranzen für das Gegenstück berechnet.

In einem ersten Schritt werden der maximale Abstand (MaxA) und der minimale Abstand (MinA) der Welle-Nabe-Verbindung berechnet.

Maximaler Abstand:

$$MaxA = ULS_W - LLS_N \quad (17)$$

$$MaxA = 60,015 \text{ mm} - 59,985 \text{ mm} = 0,030 \text{ mm}$$

Minimaler Abstand:

$$MinA = LLS_W - ULS_N \quad (18)$$

$$MinA = 60,002 \text{ mm} - 60,000 \text{ mm} = 0,002 \text{ mm}$$

Am Wareneingang wird das Rillenkugellager identifiziert, um den Messwert des Innendurchmessers zu erhalten. Das mitgelieferte Messergebnis (MP = Messpunkt) muss innerhalb der Toleranzgrenzen liegen:

$$MP_N \in [LLS_N; ULS_N]$$

Um die Messungenauigkeit des Messsystems im Algorithmus zu berücksichtigen, werden zwei hypothetische Messpunkte eingeführt, die mit einer Messunsicherheit (MU) beaufschlagt sind. Der untere reale Wert wird auf Grundlage des Messergebnisses ( $MP_{UN}$ ), und der obere reale Wert auf Grundlage des Messergebnisses ( $MP_{ON}$ ) berechnet:

$$MP_{UN} = MP_N - MU \quad (19)$$

$$MP_{ON} = MP_N + MU \quad (20)$$

Die Messunsicherheit (siehe Schritt 2) wird in diesem Beispiel vom Lieferanten mit  $MU=0,004$  mm angegeben. Zudem wird der Innendurchmesser des Rillenkugellagers in diesem hypothetischen Beispiel mit einem Durchmesser von  $MP_N = 59,990$  mm angegeben:

$$MP_{UN} = 59,990 \text{ mm} - 0,004 \text{ mm} = 59,986 \text{ mm}$$

$$MP_{ON} = 59,990 \text{ mm} + 0,004 \text{ mm} = 59,994 \text{ mm}$$

Um Bedingung I, also den minimalen und maximalen Abstand, einzuhalten, kann nun auf Grundlage des maximalen Abstands und des unteren realen Werts der Bohrung das neue Höchstmaß der Welle berechnet werden<sup>28</sup>:

$$ULS'_{w_{neu}} = MP_{UN} + MaxA \quad (21)$$

$$ULS'_{w_{neu}} = 59,986 \text{ mm} + 0,030 \text{ mm} = 60,016 \text{ mm}$$

Parallel dazu kann das Mindestmaß der Welle neu berechnet werden:

$$LLS'_{w_{neu}} = MP_{ON} + MinA \quad (22)$$

$$LLS'_{w_{neu}} = 59,994 \text{ mm} + 0,002 \text{ mm} = 59,996 \text{ mm}$$

Um Bedingung II (keine Beeinträchtigung der geometrischen und mechanischen Eigenschaften) einzuhalten, werden Grenzen eingeführt, inwieweit die neuen Maße von den ursprünglichen geometrisch zulässigen Angaben der Welle abweichen dürfen. Als sinnvolle Grenzen können hierbei die Allgmeintoleranzen nach (Norm DIN ISO 2768-1 1991) mit der Toleranzklasse mittel dienen. Für eine Welle mit einem Nenn-durchmesser von 60,000 mm gilt das Toleranzfeld von  $LLS_{Allg} = 59,700$  mm bis  $ULS_{Allg} = 60,300$  mm.

---

<sup>28</sup> Die berechneten Werte sind Zwischenwerte und werden daher mit „' „ gekennzeichnet

Daraus folgt:

$$ULS_{W_{neu}} = \begin{cases} ULS_{W_{neu}} = ULS'_{W_{neu}} & , \text{wenn } ULS'_{W_{neu}} \leq ULS_{Allg} \\ ULS_{W_{neu}} = ULS_{Allg} & , \text{wenn } ULS'_{W_{neu}} > ULS_{Allg} \end{cases} \quad (23)$$

$$ULS_{W_{neu}} = 60,016 \text{ mm} \quad , \text{da } 60,016 \text{ mm} \leq 60,300 \text{ mm}$$

$$LLS_{W_{neu}} = \begin{cases} LLS_{W_{neu}} = LLS'_{W_{neu}} & , \text{wenn } LLS'_{W_{neu}} \geq LLS_{Allg} \\ LLS_{W_{neu}} = LLS_{Allg} & , \text{wenn } LLS'_{W_{neu}} < LLS_{Allg} \end{cases} \quad (24)$$

$$LLS_{W_{neu}} = 59,996 \text{ mm} \quad , \text{da } 59,996 \text{ mm} \geq 59,700 \text{ mm}$$

Aus den ermittelten Werten kann nun zum einen die neue Toleranz berechnet werden:

$$T_{W_{neu}} = ULS_{W_{neu}} - LLS_{W_{neu}} \quad (25)$$

$$T_{W_{neu}} = 60,016 \text{ mm} - 59,996 \text{ mm} = 0,020 \text{ mm}$$

Zum anderen kann nun einfach das neue Mittenmaß, in dieser Arbeit auch „Fertigungsmaß“ genannt, berechnet werden:

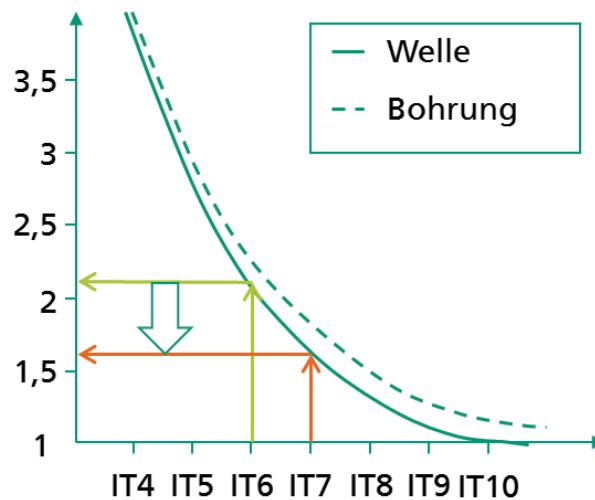
$$C_{W_{neu}} = \frac{ULS_{W_{neu}} + LLS_{W_{neu}}}{2} \quad (26)$$

$$C_{W_{neu}} = \frac{60,016 \text{ mm} + 59,996 \text{ mm}}{2} = 60,006 \text{ mm}$$

Für das ursprüngliche System wurde eine Welle mit der Fertigungsgenauigkeit von 13  $\mu\text{m}$  (siehe Schritt 1: Daten erfassen) benötigt (entspricht nach (Norm DIN ISO 286-1 2010) einem Grundtoleranzgrad IT6). Durch Anwendung der dynamischen Tolerierung ist es nun in dem oben gezeigten Beispiel zulässig, die Welle mit einer Genauigkeit von 20  $\mu\text{m}$  zu fertigen (entspricht nach (Norm DIN ISO 286-1 2010) einem Grundtoleranzgrad IT7). Dies entspricht einem Toleranzgewinn von 7  $\mu\text{m}$  und somit um 53% vergrößert. Das Mittenmaß und die Toleranz der Welle werden für jedes Lager neu berechnet.

### Schritt 5: Herstellkosten und Qualitätsbetrachtung

Da es sich hierbei um ein hypothetisches Beispiel handelt, liegen keine tatsächlichen Herstellkosten vor. Meins (Meins 2013); S. 11 nimmt jedoch für die Herstellung von Wellen und Bohrungen an, dass die Herstellkosten mit steigenden Toleranzklassen parabol­förmig abnehmen (siehe Abbildung 32; vergleiche hierzu auch Kapitel 2.3.1 Toleranzanforderungen und Herstellkosten):



**Abbildung 32: Relative Herstellkosten für Innen- (Bohrung) und Außenbearbeitung (Welle) abhängig von der Toleranzgröße**

*Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an (Meins 2013); S. 11*

Bei einem Grundtoleranzgrad IT6 liegt der Faktor für die relativen Herstellkosten bei ca. 2,1. Für den Grundtoleranzgrad IT7 reduziert sich der Faktor auf 1,6. Unter der hypothetischen Annahme, dass die aktuellen Kosten der Herstellung der Welle für den Grundtoleranzgrad IT6 5,00 € betragen (erfahrungsgemäß gibt es keine fixen Werte, daher wird an dieser Stelle mit einem Schätzwert von 5,00 € weitergearbeitet), kann eine Reduktion der Herstellkosten ( $HK_{Red.}$ ) wie folgt abgeleitet werden:

$$HK_{Red.} = \frac{5,00 \text{ €}}{2,1} * 1,6 = 3,81 \text{ €}$$

## Die dynamische Tolerierung

---

Daraus ergibt sich eine Ersparnis von 1,19 € pro hergestellter Welle. Somit können durch die Anwendung der Methodik der dynamischen Tolerierung 23,8 % der Herstellkosten eingespart werden.

Die Amortisationsdauer hängt von der jährlichen Stückzahl und den notwendigen Investitionen ab. Für die Investitionen werden für dieses hypothetische Beispiel folgende Werte angenommen:

Einkaufspreis und Integration eines Scanners, für die Identifikation der Rillenkugellager: 60 000,00 €

Aufwand für die angepasste Logistik: 65 000,00 €

Gesamtinvest: 125 000,00 €

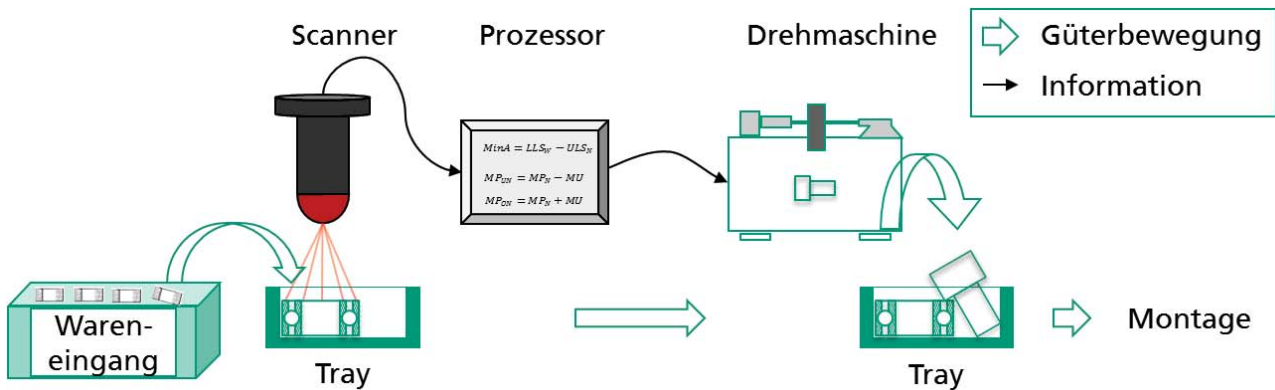
Bei einer Ersparnis von 1,19 € pro Stück und einer Stückzahl von 10 000 Stück pro Monat können somit 142 800,00 € pro Jahr eingespart werden. Die Amortisation berechnet sich wie folgt:

$$Amortisation = \frac{Gesamtinvest}{Ersparnis} = \frac{125\,000,00\ \text{€}}{142\,800,00\ \frac{\text{€}}{\text{Jahr}}} = 0,88\ \text{Jahre}$$

In diesem hypothetischen Beispiel amortisiert sich der durch die Methodik der dynamischen Tolerierung optimierte Prozess nach weniger als einem Jahr.

### Schritt 6: Integrationskonzept

Die logistische und technische Umsetzung könnte wie folgt durchgeführt werden (vergleiche Abbildung 33):



**Abbildung 33: Logistische und technische Umsetzung**

*Quelle: Eigene Darstellung*

Die Rillenkugellager werden am Wareneingang angeliefert. Es werden einzelne Rillenkugellager entnommen und jeweils in einem Transport-Tray so positioniert, dass sie von einem Scanner erfasst werden können. Der Scanner erfasst dabei die Identität des Rillenkugellagers und somit auch den angegebenen Messwert des Innendurchmessers<sup>29</sup>. Der Scanner gibt das Maß an einen Prozessor weiter. Auf Grundlage des Messwertes kann nun der in Schritt 3 entwickelte Algorithmus das neue Mitten- oder auch Fertigungsmaß sowie die dazugehörigen Toleranzen berechnen. Diese werden dann an die Drehmaschine, welche die Wellen fertigt, weitergegeben. Die gefertigte Welle muss dann zusammen mit dem dazugehörigen Kugellager in einem Tray an die Montage weitergegeben werden.

<sup>29</sup> Der Innendurchmesser muss nicht weiter vermessen werden, da er bereits durch den Lieferanten vermessen wurde. Lediglich die Information muss dem Kugellager entnommen werden.

### 5.2.1.2 Betrachtung der Qualitätsoptimierung

Es wurde gezeigt, wie die Methodik der dynamischen Tolerierung auf eine Welle-Nabe-Verbindung angewendet werden kann, und dass dadurch erhebliche Kosteneinsparungen realisiert werden können. Mit Hilfe dieser Methodik können jedoch auch Qualitätsgewinne in der Produktion erzielt werden. Dies wird im Folgenden demonstriert:

In dem hypothetischen Beispiel des Rillenkugellagers wird nun angenommen, dass nach Auslieferung der Jahresmenge an Rillenkugellagern festgestellt wurde, dass sich der Konstrukteur mit seiner Einstufung der normalen Betriebsverhältnisse getäuscht hat. Es hat sich während der Kundennutzung herausgestellt, dass die Laufruhe der Rillenkugellager nach bisherigen Auslegungen nicht ausreicht. Um den höheren Ansprüchen, also einer höheren Laufruhe, gerecht zu werden, sollten laut Lieferant bessere Lager mit einer höheren Toleranzklasse eingesetzt werden (vergleiche (Niemann et al. 2013); S. 586). In diesem Falle ist eine Toleranzklasse P5 notwendig. Die neuen Abmessungen für den Innendurchmesser eines Rillenkugellagers mit der Toleranzklasse P5 würden einem unteren Abmaß von 0,000mm und einem oberen Abmaß von -0,009mm entsprechen.

Da die Rillenkugellager allerdings schon in großer Stückzahl bestellt wurden, stellt sich die Frage, ob die bereits eingekauften Rillenkugellager unter Einsatz der dynamischen Tolerierung auch für die neuen Einsatzbedingungen genutzt werden können.

### Schritt 1: Daten erfassen

#### Konstruktionsdaten:

Innendurchmesser Rillenkugellager (Toleranzklasse P5)

Mindestmaß  $LLS_N = 59,991\text{mm}$

Höchstmaß  $ULS_N = 60,000\text{mm}$

Toleranz  $T_N = 0,009\text{mm}$

Welle 60k5

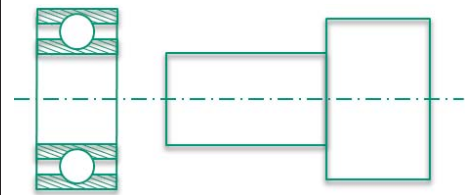
Mindestmaß  $LLS_W = 60,002\text{mm}$

Höchstmaß  $ULS_W = 60,015\text{mm}$

Toleranz  $T_W = 0,013\text{mm}$

#### Produktionsablauf:

Es wird angenommen, dass der Rillenkugellager-Lieferant eine **100 %-Prüfung** der Innendurchmesser im Zuge seiner Qualitätskontrolle durchführt. Die ermittelten Messwerte sind auf jedem Rillenkugellager hinterlegt. Die Wellen werden an einer CNC-Maschine gefertigt. Es wird mit einer Stückzahl von **10 000 Passungen pro Monat** gerechnet.

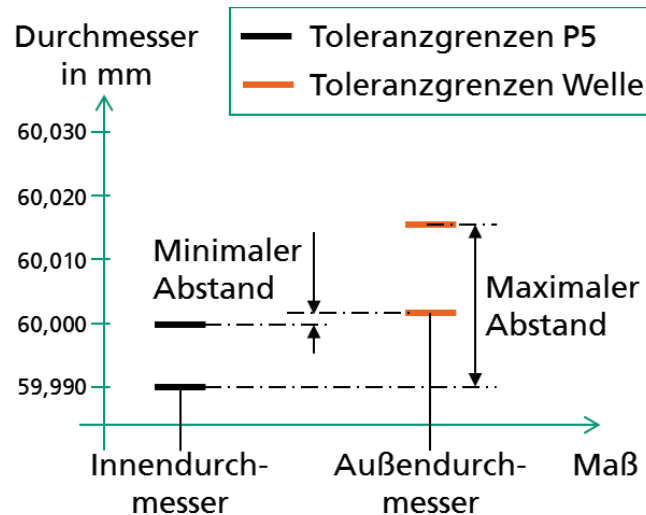


**Abbildung 34: Beispielhafte Darstellung einer Baugruppe bestehend aus einer Welle und einem Rillenkugellager**

*Quelle: eigene Darstellung*

## Schritt 2: Passungssystem entwickeln

Es ist eine kraftschlüssige Verbindung notwendig. Um eine höhere Laufruhe zu gewährleisten, müssen die Toleranzgrenzen des Kugellagers eingengt werden. Die neue Passung zwischen Rillenkugellager und Welle wird in Abbildung 35 dargestellt:



**Abbildung 35: Passverbindung mit einem Rillenkugellager der Klasse P5**

*Quelle: Eigene Darstellung*

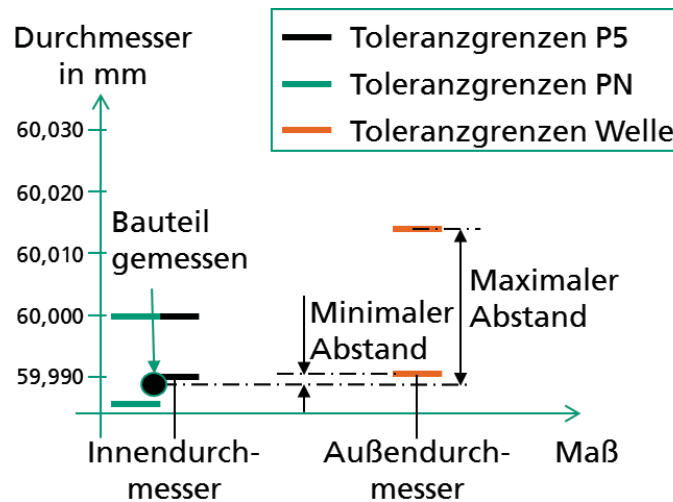
Es gelten wieder folgende Bedingungen für die Passung:

Bedingung I: „Die Passfunktion ist nur dann gewährleistet, wenn der minimale und der maximale Abstand eingehalten werden.“

Bedingung II: „Der Toleranzgewinn darf das Bauteil weder in seiner mechanischen noch in seiner geometrischen Eigenschaft beeinträchtigen.“

Es wird angenommen, dass ein Rillenkugellager, dessen Innendurchmesser außerhalb der Toleranzgrenzen liegt, auch verwendet werden kann, wenn der minimale und maximale Abstand eingehalten wird. Obwohl ein gewisser Anteil der vorhandenen Rillenkugellager (mit Toleranzklasse PN) außerhalb der Toleranzgrenzen der Rillenkugellager

gellager der Toleranzklasse P5 liegt, können dennoch durch das Anpassen der Fertigungsmaße und Toleranzen der Wellen der minimale und maximale Abstand eingehalten und somit die gewünschte Laufruhe erreicht werden (vergleiche Abbildung 36):



**Abbildung 36: Passverbindung mit einem Rillenkugellager der Klasse PN und P5**

*Quelle: Eigene Darstellung*

### **Schritt 3: Messsystem, Handlingsprinzip und Datenbank abschätzen**

Für dieses Beispiel gibt der Rillenkugellager-Lieferant wie erwähnt an, dass sein Messsystem eine Messgenauigkeit von  $\pm 4\mu\text{m}$  hat. Bei der Auswahl des Handlingsprinzips muss wiederum darauf geachtet werden, dass die vermessenen Bauteile mit den dafür produzierten Gegenstücken gepaart werden. Außerdem ist es relevant, die vermessenen Bauteile zu kennzeichnen und das Ergebnis der Messung in einer Datenbank zu hinterlegen.

### **Schritt 4: Algorithmus entwickeln**

Um das Passsystem und seine Funktionalität zu gewährleisten, müssen auch hier wieder der minimale und maximale Abstand berechnet werden.

Maximaler Abstand:

$$MaxA = ULS_W - LLS_N \quad (27)$$

$$MaxA = 60,015 \text{ mm} - 59,991 \text{ mm} = 0,024 \text{ mm}$$

Minimaler Abstand:

$$MinA = LLS_W - ULS_N \quad (28)$$

$$MinA = 60,002 \text{ mm} - 60,000 \text{ mm} = 0,002 \text{ mm}$$

Wie in der vorherigen Berechnung wird der Innendurchmesser des Kugellagers vermessen. Da die Kugellager nicht der Tolerierung der gewünschten axialen Lagerluft entsprechen, kann der Messwert außerhalb der geforderten Toleranzen liegen. Wichtig ist hierbei, dass Bedingung I („Die Passfunktion ist nur dann gewährleistet, wenn der minimale und der maximale Abstand eingehalten werden.“) eingehalten wird. Daher muss der Messpunkt ( $MP_N$ ) innerhalb der vom Lieferanten angegebenen Toleranzgrenzen liegen. Diese entsprechen hierbei der Toleranzklasse PN.

$$MP_N \in [59,985 \text{ mm}; 60,000 \text{ mm}]$$

Um die Messungenauigkeit des Messsystems in dem Algorithmus zu berücksichtigen, werden wieder zwei hypothetische Messpunkte eingeführt, der untere reale Wert auf Grundlage des Messergebnisses ( $MP_{UN}$ ) und der obere reale Wert auf Grundlage des Messergebnisses ( $MP_{ON}$ ):

$$MP_{UN} = MP_N - MU \quad (29)$$

$$MP_{ON} = MP_N + MU \quad (30)$$

MU stellt hier die Messunsicherheit dar. Die Messgenauigkeit (siehe Schritt 2) wurde in diesem Beispiel mit  $MU=0,004 \text{ mm}$  gewählt. Der Innendurchmesser des Rillenkugellagers wurde mit einem Durchmesser von  $MP_N = 59,990 \text{ mm}$  bestimmt:

$$MP_{UN} = 59,990 \text{ mm} - 0,004 \text{ mm} = 59,986 \text{ mm}$$

$$MP_{ON} = 59,990 \text{ mm} + 0,004 \text{ mm} = 59,994 \text{ mm}$$

Wie im vorherigen Beispiel (Kapitel 5.2.1.1) muss die Bedingung I, der minimale und maximale Abstand, eingehalten werden. Nun kann auf Grundlage des maximalen Abstandes und des unteren realen Werts der Bohrung das neue Höchstmaß der Welle berechnet werden:

$$ULS_{W_{neu}} = MP_{UN} + MaxA \quad (31)$$

$$ULS_{W_{neu}} = 59,986 \text{ mm} + 0,024 \text{ mm} = 60,010 \text{ mm}$$

Parallel dazu kann das Mindestmaß der Welle neu berechnet werden:

$$LLS_{W_{neu}} = MP_{ON} + MinA \quad (32)$$

$$LLS_{W_{neu}} = 59,994 \text{ mm} + 0,002 \text{ mm} = 59,996 \text{ mm}$$

Auch in diesem Beispiel muss die Bedingung II (keine Beeinflussung der geometrischen und mechanischen Eigenschaften) eingehalten werden. Dafür werden Grenzen eingeführt, inwieweit die neuen Maße von den ursprünglichen geometrisch zulässigen Angaben der Welle abweichen dürfen. Als sinnvolle Grenzen dienen hierbei die Allgemeintoleranzen nach (Norm DIN ISO 2768-1 1991) mit der Toleranzklasse mittel. Für eine Welle mit einem Nenndurchmesser von 60,000 mm gilt das Toleranzfeld von  $LLS_{Alg} = 59,700 \text{ mm}$  bis  $ULS_{Alg} = 60,300 \text{ mm}$ . Daraus folgt:

$$LLS_{W_{neu}} = \begin{cases} LLS_{W_{neu}} = LLS'_{W_{neu}} & , \text{wenn } LLS'_{W_{neu}} \geq LLS_{Alg} \\ LLS_{W_{neu}} = LLS_{Alg} & , \text{wenn } LLS'_{W_{neu}} < LLS_{Alg} \end{cases} \quad (33)$$

$$LLS_{W_{neu}} = 59,996 \text{ mm} \quad , \text{da } 59,996 \text{ mm} \geq 59,700 \text{ mm}$$

$$ULS_{W_{neu}} = \begin{cases} ULS_{W_{neu}} = ULS'_{W_{neu}} & , \text{wenn } ULS'_{W_{neu}} \leq ULS_{Alg} \\ ULS_{W_{neu}} = ULS_{Alg} & , \text{wenn } ULS'_{W_{neu}} > ULS_{Alg} \end{cases} \quad (34)$$

$$ULS_{W_{neu}} = 60,010 \text{ mm} \quad , \text{da } 60,010 \text{ mm} \leq 60,300 \text{ mm}$$

Aus den ermittelten Werten kann nun zum einen die neue Toleranz berechnet werden:

$$T_{W_{neu}} = ULS_{W_{neu}} - LLS_{W_{neu}} \quad (35)$$

$$T_{W_{neu}} = 60,010 \text{ mm} - 59,996 \text{ mm} = 0,014 \text{ mm}$$

Zum anderen kann nun das neue Mitten- beziehungsweise Fertigungsmaß berechnet werden:

$$C_{W_{neu}} = \frac{ULS_{W_{neu}} + LLS_{W_{neu}}}{2} \quad (36)$$

$$C_{W_{neu}} = \frac{60,010 \text{ mm} + 59,996 \text{ mm}}{2} = 60,003 \text{ mm}$$

Durch die dynamische Anpassung der Toleranzen der Wellen ist es möglich, ein Rillenkugellager der Toleranzklasse PN auf eine Passung der Toleranzklasse P5 zu optimieren. Allerdings muss hierbei darauf geachtet werden, dass der Toleranzgewinn der Welle nur sehr gering ausfällt (0,001 mm). Dafür sind die gekauften Lager in der PN-Ausführung allerdings deutlich günstiger als in der P5-Ausführung. Die Qualität der Verbindung zwischen Kugellager und Welle kann durch die Methodik der dynamischen Tolerierung somit bei günstigeren Herstellkosten erhöht werden.

**Schritt 5: Herstellkosten und Qualitätsbetrachtung**

Da in diesem Beispiel das Ziel eine Qualitätsoptimierung war, wird der Qualitätsverlust nach Taguchi beurteilt (vergleiche Kapitel 2.3.2). Dafür wird zuerst die Verlustfunktion nach Taguchi herangezogen (vergleiche Formel (3)):

$$L(y) = k * (y - m)^2$$

mit

$$k = \frac{A_0}{\Delta^2}$$

folgt:

$$L(y) = \frac{A_0}{\Delta^2} * (y - m)^2$$

Da sich der Qualitätsverlust auf die zulässigen Abstände zwischen dem Innendurchmesser des Rillenkugellagers und dem Außendurchmesser der Welle bezieht, kann der Idealabstand und somit der Zielwert wie folgt definiert werden:

$$m = \frac{\min A + \max A}{2} \tag{37}$$

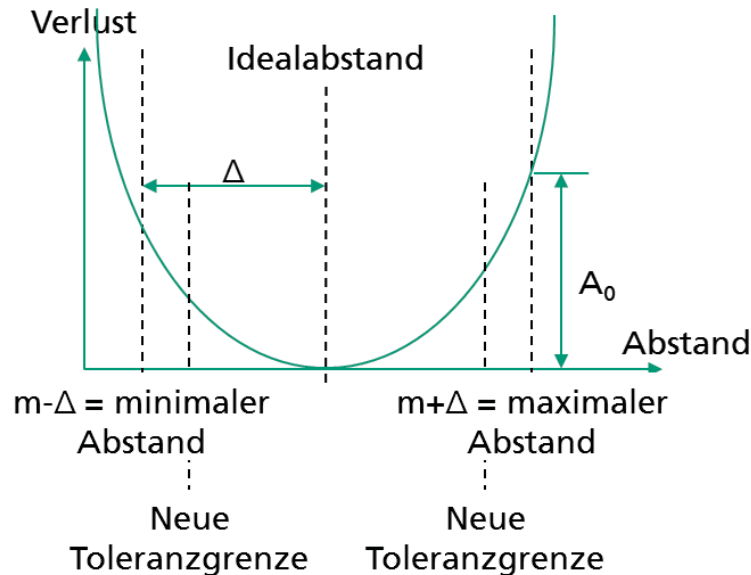
Die Abweichung von Höchst- beziehungsweise Mindestmaß und Zielwert kann folgendermaßen beschrieben werden:

$$\Delta = \frac{\max A - \min A}{2} \tag{38}$$

Da es sich um ein hypothetisches Beispiel handelt, kann der qualitätsbezogene Verlust der Gesellschaft  $A_0$  nur als konstant angenommen werden. Daraus kann Taguchis Qualitätsverlustkurve wie folgt abgeleitet werden:

$$L(y) = \frac{A_0}{\left(\frac{\max A - \min A}{2}\right)^2} * \left(y - \frac{\min A + \max A}{2}\right)^2 \tag{39}$$

Die allgemeingültige Qualitätsverlustfunktion wird mit den Werten der ursprüngliche Passung dargestellt (vergleiche Abbildung 37), da die alte Passung mit der neuen verglichen wird. Lediglich die neuen maximal zulässigen Grenzwerte werden für die Istwerte  $y$  eingesetzt.



**Abbildung 37: Qualitätsverlustkurve für die Passung des Rillenkugellagers**  
*Quelle: Eigene Darstellung*

Für den alten Fall (vergleiche Kapitel 5.2.1.1) lässt sich  $y_{Fall1}$  wie folgt berechnen:

$$y_{Fall1} = \Delta_{Fall1} = \frac{\max A_{Fall1} - \min A_{Fall1}}{2}$$

$$y_{Fall1} = \frac{0,030 \text{ mm} - 0,002 \text{ mm}}{2} = 0,014 \text{ mm}$$

Für den aktuellen Fall (hier Fall 2 genannt) lässt es sich wie folgt berechnen:

$$y_{Fall2} = \Delta_{Fall2} = \frac{\max A_{Fall2} - \min A_{Fall2}}{2}$$

$$y_{Fall2} = \frac{0,024 \text{ mm} - 0,002 \text{ mm}}{2} = 0,011 \text{ mm}$$

Für den Grenzwert in Fall 1 muss  $L(y_{Fall1}) = 1 \cdot A_0$ , da Taguchis Qualitätsverlustfunktion so definiert ist, dass an den Grenzwerten genau  $A_0$  erreicht wird. Für den zweiten

Fall ergibt sich für  $L(y_{\text{Fall}2}) = 0,617 \cdot A_0$ . (dies entspricht ca. 62% des zu Beginn vorhandenen qualitätsbezogenen Verlustes). Durch die Anpassung der Wellentoleranzen an die Rillenkugellager konnte eine Qualitätsverbesserung somit von ca. 38 % erzielt werden.

### **Schritt 6: Integrationskonzept**

Die logistische und technische Umsetzung entspricht dem alten Fall (vergleiche Kapitel 5.1.2, Schritt 6).

#### **5.2.1.3 Zusammenfassung**

Anhand dieses Beispiels eines Rillenkugellagers konnte gezeigt werden, dass durch die dynamische Toleranzanpassung zum einen die Herstellkosten reduziert werden können, zum anderen aber auch die Qualität verbessert werden kann. Durch das dynamische Anpassen der Nennmaße und Toleranzen konnte eine Toleranzerweiterung der Welle um mehr als das Eineinhalbfache (153%) erreicht werden. Lag der Schwerpunkt auf der Qualitätsoptimierung, konnte darüber hinaus ein Rillenkugellager, das bei normalen Betriebsverhältnissen eingesetzt werden soll, zu einem Rillenkugellager mit optimierter Laufruhe umfunktioniert werden. Es sind somit hohe Qualitätsgewinne (bei gleichbleibenden oder niedrigeren Kosten) zu verzeichnen.

## 5.2.2 Lineare Maßkette am Beispiel eines Getriebes

Ein weiteres Beispiel, an dem die dynamische Tolerierung angewendet werden kann, sind Maßketten. Eine Maßkette ist „eine lückenlose Aneinanderreihung von Maßen, deren End- beziehungsweise Schlußglied zum Anfangspunkt zurückführt“ (Klein et al. 2013); S.32. Im hier verwendeten Beispiel geht es um ein Getriebe mit linearer Maßkette (vergleiche Abbildung 38). Sowohl das Beispiel als auch die Maßangaben sind (Kirschling 2013); S. 102 entnommen und wurden nicht verändert.

### Schritt 1: Daten erfassen:

#### Konstruktionsdaten:

Gehäusetoleranz  $M_1$ :

$LLS_{M_1} = 29,950 \text{ mm}$ ;  $ULS_{M_1} = 30,100 \text{ mm}$ ;  $N = 30,000 \text{ mm}$

Gehäusetoleranz  $M_2$ :

$LLS_{M_2} = 39,900 \text{ mm}$ ;  $ULS_{M_2} = 40,100 \text{ mm}$ ;  $N = 40,000 \text{ mm}$

Hülstoleranz  $M_3$ :

$LLS_{M_3} = 4,080 \text{ mm}$ ;  $ULS_{M_3} = 4,150 \text{ mm}$ ;  $N = 4,100 \text{ mm}$

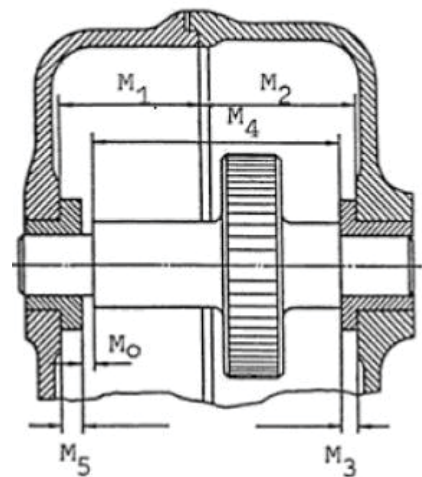
Wellentoleranz  $M_4$ :

$LLS_{M_4} = 59,700 \text{ mm}$ ;  $ULS_{M_4} = 59,950 \text{ mm}$ ;  $N = 60,000 \text{ mm}$

Hülstoleranz  $M_5$ :

$LLS_{M_5} = 5,060 \text{ mm}$ ;  $ULS_{M_5} = 5,150 \text{ mm}$ ;  $N = 5,100 \text{ mm}$

Schließtoleranz  $M_0$



**Abbildung 38: Ausschnitt aus einem Getriebe mit linearer Maßkette**

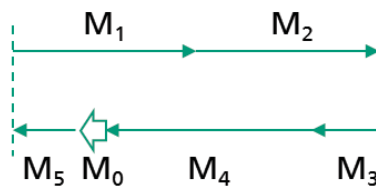
*Quelle: (Kirschling 2013); S. 102*

Produktionsablauf:

Es wird angenommen, dass die beiden Gehäuseteile eingekauft werden. Der Produktionsablauf findet konsekutiv statt. In welcher **Reihenfolge** die einzelnen Bauteile gefertigt werden, ist vorerst **nicht relevant**. Es wird mit einer Stückzahl von **1 000 Getrieben pro Monat** gerechnet.

**Schritt 2: Passungssystem entwickeln:**

Um die lineare Maßkette besser nachvollziehen zu können, wird in einem ersten Schritt die lineare Maßkette des Getriebes vereinfacht (vergleiche Abbildung 39) dargestellt und das Schließmaß  $[M_0]$  des Getriebes berechnet (vergleiche hierzu Kapitel 3.3.1):



**Abbildung 39: Maßkette zur Berechnung des Schließmaßes**

*Quelle: eigene Darstellung*

Nennschließmaß  $[M_{0N}]$ :

$$M_{0N} = M_1 + M_2 - M_3 - M_4 - M_5 = (30,00 + 40,00 - 4,00 - 60,00 - 5,00) \text{ mm} \\ = 1,00 \text{ mm}$$

Unteres Schließmaß  $[M_{0U}]$ :

$$M_{0U} = M_{U1} + M_{U2} - M_{U3} - M_{U4} - M_{U5} \\ = (29,95 + 39,90 - 4,08 - 59,70 - 5,06) \text{ mm} = 0,60 \text{ mm}$$

Oberes Schließmaß [ $M_{00}$ ]:

$$\begin{aligned} M_{00} &= M_{01} + M_{02} - M_{03} - M_{04} - M_{05} \\ &= (30,10 + 40,10 - 4,15 - 59,95 - 5,15) \text{ mm} = 1,36 \text{ mm} \end{aligned}$$

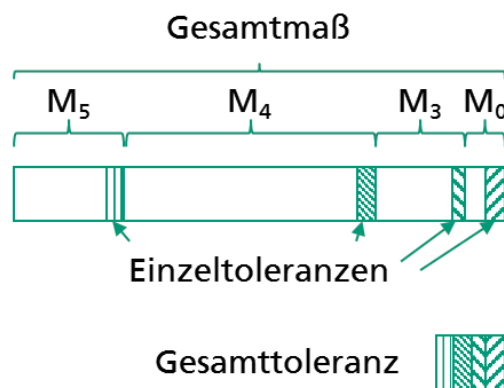
Toleranz Schließmaß [ $T_{M0}$ ]:

$$T_{M0} = M_{00} - M_{0U} = 1,36 \text{ mm} - 0,60 \text{ mm} = 0,76 \text{ mm}$$

Kontrolle (die Toleranz des Schließmaßes muss der Summe aller Toleranzen entsprechen):

$$\begin{aligned} T_{M0} &= T_1 + T_2 + T_3 + T_4 + T_5 = (0,15 + 0,20 + 0,07 + 0,25 + 0,09) \text{ mm} \\ &= 0,76 \text{ mm} \end{aligned}$$

Da die Gehäuseteile Zukaufteile sind, kann die dynamische Tolerierung keinen Einfluss auf sie nehmen. Sie kann daher nur für die Bauteile 3, 4 und 5 genutzt werden. In einem nächsten Schritt werden die Toleranzkette betrachtet und Bedingungen abgeleitet. Abbildung 39 zeigt eine schematische Darstellung der linearen Maßkette der Bauteile drei, vier und fünf.



**Abbildung 40: Lineare Maßkette der Bauteile 3, 4 und 5**  
*Quelle: Eigene Darstellung*

In einer linearen Maßkette werden mehrere Bauteile aneinandergereiht. Jedes der einzelnen Bauteile hat seine eigene Toleranz. Die Gesamttoleranz ergibt sich aus der Summe der Einzeltoleranzen. Daraus leiten sich für die dynamische Tolerierung folgende Bedingungen ab:

Bedingung I: *„Das Gesamtmaß darf nicht verändert werden“.*

Bedingung II: *„Die Gesamttoleranz darf nicht verändert werden“.*

Allerdings muss zudem vermieden werden, dass die Bauteile im Falle eines hohen Toleranzgewinns durch die Anwendung dieses Modells zu stark verändert werden:

Bedingung III: *„Der Toleranzgewinn darf das Bauteil weder in seiner mechanischen noch in seiner geometrischen Eigenschaft beeinträchtigen“.*

Eine Möglichkeit, den Toleranzgewinn so zu begrenzen, dass die Bedingung III eingehalten werden, basiert auf Allgmeintoleranzen (Norm ISO DIN ISO 2768-2 1991).

Das Schließmaß kann in diesem Fall als ein fiktives Bauteil betrachtet werden. Da ein fiktives Bauteil nicht messbar ist, kann hierfür ein idealer Messwert angenommen werden. Dieser Messwert entspricht dem Nennmaß.

### **Schritt 3: Messsystem, Handlingsprinzip und Datenbank abschätzen**

In diesem Beispiel haben alle gewählten Messsysteme eine Messgenauigkeit  $M = \pm 0,010$  mm. Genau wie bei dem Anwendungsbeispiel der Welle-Nabe-Verbindung muss hier bei der Auswahl des Handlingsprinzips darauf geachtet werden, dass die vermessenen Bauteile mit den dafür produzierten Gegenstücken gepaart werden. Außerdem ist es relevant, die vermessenen Bauteile zu kennzeichnen und die Ergebnisse der Messung in einer Datenbank zu hinterlegen.

### **Schritt 4: Algorithmus entwickeln**

Im Folgenden wird der Algorithmus nun hergeleitet und nachfolgend auf das konkreten Verifizierungsbeispiel (siehe Schritt 1.1) angewendet.

Die Variable  $i$  ist der Index für die verschiedenen Bauteile der Baugruppe die in aufeinanderfolgenden Produktionsschritten  $j$  hergestellt werden. In jedem Produktionsschritt können dabei die Toleranzmaße aller folgenden Produktionsschritte, die noch nicht produzierte Bauteile der Baugruppe enthalten, verändert werden.

$LLS_{\Sigma_j}$  entspricht der Summe der Mindestmaße und  $ULS_{\Sigma_j}$  der Summe der oberen Höchstmaße der Bauteile. Es ist darauf zu achten, dass die Toleranzen die geforderten Allgemeintoleranzen auch einhalten. Bevor diese jedoch berechnet werden können, müssen diverse Prüfungen und Fallunterscheidungen vorgenommen werden.

Als Grenzen der Veränderung dienen die gegebenen Summenmindest- und Summenhöchstmaße  $LLS_{\Sigma_j}$  und  $ULS_{\Sigma_j}$ . Sie bleiben stets konstant, solange die gewählte Begrenzung der maximalen Toleranzerweiterung zur Einhaltung von Bedingung III (in diesem Beispiel werden Allgemeintoleranzen benutzt) für das Bauteil nicht erreicht wird. Sobald die gewählte Begrenzung an einem Bauteil erreicht wird, wird die Toleranz des Bauteils an die Begrenzung angepasst. Dadurch können sich Summenmindest- und Summenhöchstmaße verringern.  $LLS_{\Sigma_j}$  beziehungsweise  $ULS_{\Sigma_j}$  werden jedoch in keinem Fall größer als die Werte im ersten Produktionsschritt  $j = 1$ , da diese durch die Konstruktion so vorgegeben werden und nicht vergrößert werden dürfen.

In einem ersten Schritt sollte die Produktionsreihenfolge der Bauteile festgelegt werden. Diese ist stark von den Gegebenheiten vor Ort abhängig. Allgemein empfiehlt es sich jedoch, immer mit den Bauteilen anzufangen, die prozesstechnisch am unkritischsten und günstigsten gefertigt werden können. Dies entspricht meist den Bauteilen mit der größten Toleranz. Dadurch können nachfolgend die kritischen und kostenintensiven Bauteile nun von dem durch diese Methodik generierten Toleranzgewinn profitieren.

Im ersten Produktionsschritt kann die Toleranz noch nicht verändert werden. Daher gilt  $j = 1$  als für sich zu betrachtender Fall.

**Schritt 1/3:**

$$LLS_{ij} = \begin{cases} LLS_{ij} = LLS_{ij} & \text{wenn } j = 1 \\ LLS_{ij} = LLS'_{i(j-1)} & \text{wenn } j \neq 1 \quad j \neq i \\ LLS_{ij} = LLS'_{i(j-1)} + \Omega_{U(j-1)} & \text{wenn } j \neq 1 \quad j = i \end{cases} \quad (40)$$

$$ULS_{ij} = \begin{cases} ULS_{ij} = ULS_{ij} & \text{wenn } j = 1 \\ ULS_{ij} = ULS'_{i(j-1)} & \text{wenn } j \neq 1 \quad j \neq i \\ ULS_{ij} = ULS'_{i(j-1)} + \Omega_{O(j-1)} & \text{wenn } j \neq 1 \quad j = i \end{cases} \quad (41)$$

Ist  $j > 1$  und  $i < j$ , handelt es sich um ein Bauteil, welches bereits produziert wurde. Ist  $j > 1$  und  $i > j$  handelt es sich um ein Bauteil, das erst in einem nächsten Schritt noch gefertigt wird. Entsprechend können die Grenzwerte aus der vorhergehenden Iterationsstufe ( $j-1$ ) übernommen werden.

Ist  $j > 1$  und  $i = j$ , setzt das Modell im eigentlichen Sinne an und modifiziert die Grenzen entsprechend des Toleranzgewinns.

Die eingegebenen Werte werden nun lediglich sämtlich, das heißt für alle  $i$  des Iterationsschrittes  $j$ , auf die Einhaltung der vorgegebenen Begrenzung (Begrenzungsmaß wird im Folgenden als  $Bm$  abgekürzt) geprüft und falls notwendig angepasst (siehe Bedingung III).

$$LLS_{ij} = \begin{cases} LLS_{ij} = Bm_{U_i} & \text{wenn } LLS_{ij} < Bm_{U_i} \quad j \neq 1 \\ LLS_{ij} = LLS_{ij} & \text{wenn } LLS_{ij} \geq Bm_{U_i} \quad j \neq 1 \end{cases} \quad (42)$$

$$ULS_{ij} = \begin{cases} ULS_{ij} = Bm_{O_i} & \text{wenn } ULS_{ij} > Bm_{O_i} \quad j \neq 1 \\ ULS_{ij} = ULS_{ij} & \text{wenn } ULS_{ij} \leq Bm_{O_i} \quad j \neq 1 \end{cases} \quad (43)$$

Nun können die Toleranzgrenzfeldsummen gebildet werden. Sie dienen, wie oben beschrieben, als Richtmaß der Toleranzfeldaufweitung und in Iteration  $j > 1$  als Überprüfungssumme, so dass die Gesamttoleranz  $T_a$  nicht überschritten wird (siehe Bedingung II) und somit die Abmaße der Baugruppe erhalten bleiben.

$$LLS_{\Sigma j} = \sum_{i=1}^m LLS_i \quad (44)$$

$$ULS_{\Sigma j} = \sum_{i=1}^m ULS_i \quad (45)$$

Um Bedingung I + II einzuhalten, kann über das Gesamtmindestmaß und Gesamthöchstmaß geprüft werden:

$$LLS_{\Sigma j} \geq LLS_{\Sigma 1} \quad (46)$$

$$ULS_{\Sigma j} \leq ULS_{\Sigma 1} \quad (47)$$

Dadurch kann für jeden Produktionsschritt die Gesamttoleranz  $T_a$  berechnet werden

$$T_{aj} = ULS_{\Sigma j} - LLS_{\Sigma j} \quad (48)$$

### Schritt 2/3:

Ist das erste Bauteil produziert, ergibt sich der Messwert für den Messpunkt:

$$MP_j \in [LLS_{ij}; ULS_{ij}], \text{ wobei } i = j \quad (49)$$

Um die Messunsicherheit ( $MU_j$ ) zu berücksichtigen, werden die beiden nachfolgenden Werte bestimmt, jeweils für die obere und untere Grenze:

$$MP_{ju} = MP_j - MU_j \quad (50)$$

$$MP_{jo} = MP_j + MU_j \quad (51)$$

**Schritt 3/3:**

Im Folgenden werden neue Zwischenmaße eingeführt. Die Zwischenmindest- und Zwischenhöchstmaße  $LLS'_{ij}$  und  $ULS'_{ij}$  dienen als Zwischenrechnung, um die Veränderung und die Messungsgenauigkeit zu berücksichtigen. Ihre Bestimmung erfolgt nach folgender Berechnung:

$$LLS'_{ij} = \begin{cases} LLS'_{ij} = MP_{jU} & \text{wenn } i = j \\ LLS'_{ij} = LLS_{ij} & \text{wenn } i \neq j \end{cases} \quad (52)$$

$$ULS'_{ij} = \begin{cases} ULS'_{ij} = MP_{jO} & \text{wenn } i = j \\ ULS'_{ij} = ULS_{ij} & \text{wenn } i \neq j \end{cases} \quad (53)$$

Im Anschluss wird auch hier die Summe der Zwischenmindest- und Zwischenhöchstmaße  $LLS'_{ij}$  und  $ULS'_{ij}$  gebildet. Daraus ergibt sich:

$$LLS'_{\Sigma j} = \sum_{i=1}^m LLS'_{ij} \quad (54)$$

$$ULS'_{\Sigma j} = \sum_{i=1}^m ULS'_{ij} \quad (55)$$

Nun kann der Überhang  $\Omega$  zwischen der Summe der Summenmindest- und Summenhöchstmaße und der Zwischenmindest- und Zwischenhöchstmaße gebildet werden. Diese Differenz wird als Überhang  $\Omega$  bezeichnet und wie folgt berechnet:

$$\Omega_{U_j} = LLS_{\Sigma j} - LLS'_{\Sigma j} \quad (56)$$

$$\Omega_{O_j} = ULS_{\Sigma j} - ULS'_{\Sigma j} \quad (57)$$

**Schritt 3/3 und Schritt 1/3:**

Der gewonnene Überhang kann auf das darauf folgende Bauteil verteilt werden. Es folgt die Iteration  $j := j+1$ , und die Berechnung wird durchgeführt bis inklusive  $j = n$ .

Der Algorithmus wird auf das Verifizierungsbeispiel, das oben beschriebene Getriebe mit linearer Maßkette aus (Kirschling 2013), angewendet. Da das Schließmaß als fiktives Bauteil gelten kann, wird es hier als erstes Bauteil betrachtet. Im Weiteren wird es wie ein echtes Bauteil behandelt. Das erste Bauteil in der Fertigungsreihenfolge wäre die Welle (Bauteil 4), da sie das größte Toleranzfeld aufweist. Ausgehend von der Größe der Toleranzfelder wird zunächst die Hülse links (Bauteil 5) gefertigt und als letztes Bauteil in der Fertigungsreihenfolge die Hülse rechts (Bauteil 3). Tabelle 14 zeigt die Fertigungsreihenfolge (diese entspricht in diesem Beispiel der Bauteilnummer) sowie die Mindest- und Höchstmaße der einzelnen Bauteile:

**Tabelle 14: Übersichtstabelle aller von der Konstruktion vorgegebenen Toleranzen und der Fertigungsreihenfolge (Iterationsstufe 1)**

Bauteilnr.	Bauteil	Mindestmaß LLS (mm)	Höchstmaß ULS (mm)
1	Schließmaß	0,600	1,360
2	Welle (Bauteil 4)	59,700	59,950
3	Hülse links (Bauteil 5)	5,060	5,150
4	Hülse rechts (Bauteil 3)	4,080	4,150

**Schritt 1/3 (j=1):**

Für Produktionsschritt 1, also  $j = 1$  sowie Bauteil 1, also  $i = 1$ , leitet sich  $LLS_{ij}$  sowie  $ULS_{ij}$  wie folgt ab ((40) und (41)):

$$LLS_{11} = LLS_1 = 0,600 \text{ mm} \quad , da i = j$$

$$ULS_{11} = ULS_1 = 1,360 \text{ mm} \quad , da i = j$$

Eine Prüfung, ob das Begrenzungsmaß erreicht wurde, ist im ersten Schritt nicht notwendig. Als nächstes müssen die Toleranzgrenzfeldsummen gebildet werden ((45) und (46)):

$$LLS_{\Sigma 1} = (0,600 + 59,700 + 5,060 + 4,080) \text{ mm} = 69,440 \text{ mm}$$

$$ULS_{\Sigma 1} = (1,360 + 59,950 + 5,150 + 4,150) \text{ mm} = 70,610 \text{ mm}$$

Aus den Toleranzgrenzfeldsummen kann nun die Gesamttoleranz  $T_a$  berechnet werden (48):

$$T_{a1} = (70,610 - 69,440) \text{ mm} = 1,170 \text{ mm}$$

**Schritt 2/3 (j=1):**

Da es sich bei dem ersten Bauteil „Schließmaß“ um ein fiktives Bauteil handelt, kann dieses nicht vermessen werden. Das fiktive Bauteil bietet den Vorteil, dass ihm ein fiktiver Messwert zugeordnet werden kann. Für dieses Beispiel wird der fiktive Messwert  $MP_1 = 1,000 \text{ mm}$  zugeordnet. Da dieser keiner Messunsicherheit unterliegt, folgt für die Messgenauigkeit  $MU_1 = 0,000 \text{ mm}$  ((50) und (51)).

$$MP_{1U} = MP_{1O} = 1,000 \text{ mm}$$

**Schritt 3/3 (j=1):**

Nun können die Zwischenmaße nach Formel (52) und (53) bestimmt werden:

$$LLS'_{11} = MP_{1U} = 1,000 \text{ mm} \quad , da i = j$$

$$ULS'_{11} = MP_{1O} = 1,000 \text{ mm} \quad , da i = j$$

$$LLS'_{21} = LLS_{21} = 59,700 \text{ mm} \quad , da i \neq j$$

$$ULS'_{21} = ULS_{21} = 59,950 \text{ mm} \quad , da i \neq j$$

Usw...

In der nachfolgenden Tabelle sind alle Zwischenmaße aufgeführt:

**Tabelle 15: Übersicht über die berechneten Zwischenwerte nach Iterationsstufe 1**

<b>i</b>	<b>j</b>	<b>Bauteil</b>	<b>LLS' (mm)</b>	<b>ULS' (mm)</b>
1	1	Schließmaß	1,000	1,000
2	1	Welle (Bauteil 4)	59,700	59,950
3	1	Hülse links (Bauteil 5)	5,060	5,150
4	1	Hülse rechts (Bauteil 3)	4,080	4,150

Nun können die Zwischenmindest- und Zwischenhöchstmaße berechnet werden ((54) und (55)):

$$LLS'_{\Sigma 1} = (1,000 + 59,700 + 5,060 + 4,080) \text{ mm} = 69,840 \text{ mm}$$

$$ULS'_{\Sigma 1} = (1,000 + 59,950 + 5,150 + 4,150) \text{ mm} = 70,250 \text{ mm}$$

Im Folgenden kann der Überhang  $\Omega$  und damit das zu verteilende Toleranzfeld berechnet werden ((56) und (57)):

$$\Omega_{U_1} = LLS_{\Sigma 1} - LLS'_{\Sigma 1} = (69,440 - 69,840) \text{ mm} = -0,400 \text{ mm}$$

$$\Omega_{O_1} = ULS_{\Sigma 1} - ULS'_{\Sigma 1} = (70,610 - 70,250) \text{ mm} = 0,360 \text{ mm}$$

Da der Algorithmus einmal durchgelaufen ist, folgt der nächste Iterationsschritt und somit auch Produktionsschritt  $j=2$ .

**Schritt 1/3 (j=2)**

Da das erste Bauteil produziert und das genaue Maß des Merkmals bekannt ist, können nun die Toleranzwerte der einzelnen Bauteile nach Formel (40) und (41) berechnet werden. Die folgende Tabelle zeigt die Berechnung anhand der Mindestmaße:

**Tabelle 16: Berechnungsschritte im Überblick der Mindestmaße für den zweiten Fertigungsschritt j = 2**

i	j	Berechnungsschritt	Fall
1	2	$LLS_{12} = LLS_{11} = 1,000 \text{ mm}$	$j \neq 1 \text{ und } i \neq j$
2	2	$LLS_{22} = LLS_{21} + \Omega_{U_1} = 59,300 \text{ mm}$	$j \neq 1 \text{ und } i = j$
3	2	$LLS_{32} = LLS_{32} = 5,060 \text{ mm}$	$j \neq 1 \text{ und } i \neq j$
4	2	$LLS_{42} = LLS_{42} = 4,080 \text{ mm}$	$j \neq 1 \text{ und } i \neq j$

Die in Tabelle 16 dargestellten Berechnungsschritte müssen parallel für die Höchstmaße durchgeführt werden.

**Tabelle 17: Berechnungsschritte im Überblick der Höchstmaße für den zweiten Fertigungsschritt j = 2**

i	j	Berechnungsschritt	Fall
1	2	$ULS_{12} = ULS_{11} = 1,000 \text{ mm}$	$j \neq 1 \text{ und } i \neq j$
2	2	$ULS_{22} = ULS_{21} + \Omega_{O_1} = 60,310 \text{ mm}$	$j \neq 1 \text{ und } i = j$
3	2	$LLS_{32} = LLS_{32} = 5,150 \text{ mm}$	$j \neq 1 \text{ und } i \neq j$
4	2	$LLS_{42} = LLS_{42} = 4,150 \text{ mm}$	$j \neq 1 \text{ und } i \neq j$

Die berechneten Werte müssen nun gemäß (42) und (43) auf die vorgegebene Begrenzung geprüft werden. Da es in diesem Schritt nur eine Toleranzaufweitung an Bauteil 2 gab, reicht es, die Werte dieses Bauteils auf die Bedingung III („Der Toleranzgewinn

darf das Bauteil weder in seiner mechanischen noch in seiner geometrischen Eigenschaft beeinträchtigen“) zu prüfen. Als Begrenzungswerte werden die Allgmeintoleranzen nach (Norm DIN ISO 2768-1 1991) der Toleranzklasse mittel genutzt. Um Bedingung III einzuhalten, werden für dieses Beispiel Allgmeintoleranzen als Begrenzung eingesetzt. Die Allgmeintoleranz bezieht sich in der Regel immer auf das Nennmaß. Das zu betrachtende Maß des Bauteils 2 beträgt 60,000 mm und hat somit eine Allgmeintoleranz von  $\pm 0,300$  mm.

$$LLS_{22} = Bm_{U_2} = 59,700 \text{ mm} \quad , \text{ da } 59,300 \text{ mm} < 59,700 \text{ mm}$$

$$ULS_{22} = Bm_{O_2} = 60,300 \text{ mm} \quad , \text{ da } 60,310 \text{ mm} > 60,300 \text{ mm}$$

Leider konnte auf Grund der Allgmeintoleranzen zur Einhaltung von Bedingung III nur ein Toleranzgewinn von 0,350 mm (240 %) erreicht werden. Allerdings hat sich das Toleranzfeld durch die Methodik der dynamischen Tolerierung schon vor dem eigentlichen Produktionsbeginn mehr als verdoppelt. Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über die bis zu diesem Punkt berechneten Werte:

**Tabelle 18: Übersicht der neuen Mindest- und Höchstmaße nach Iterationsschritt 2**

i	j	Bauteil	Mindestmaß LLS (mm)	Höchstmaß ULS (mm)
1	2	Schließmaß	1,000	1,000
2	2	Welle (Bauteil 4)	59,700	60,300
3	2	Hülse links (Bauteil 5)	5,060	5,150
4	2	Hülse rechts (Bauteil 3)	4,080	4,150

Um sicherzustellen, dass die Bedingungen I und II (Einhaltung des Gesamtmaßes und der Gesamttoleranz) eingehalten werden, werden die Gesamtmindest- und Gesamthöchstmaße aus Produktionsschritt 1 mit dem Gesamtmindest- beziehungsweise Gesamthöchstmaß aus Produktionsschritt 2 verglichen. Zuerst werden die Gesamtmaße von Produktionsschritt 2 berechnet ((45) und (46)):

$$LLS_{\Sigma 2} = \sum_{i=1}^m LLS_i = (1,000 + 59,700 + 5,060 + 4,080) \text{ mm} = 69,840 \text{ mm}$$

$$ULS_{\Sigma 2} = \sum_{i=1}^m ULS_i = (1,000 + 60,300 + 5,150 + 4,150) \text{ mm} = 70,600 \text{ mm}$$

Um Bedingungen I und II einzuhalten, kann das Gesamtmindestmaß und Gesamthöchstmaß geprüft werden ((46) und (47)):

$$LLS_{\Sigma 2} \geq LLS_{\Sigma 1} \rightarrow 69,840 \text{ mm} \geq 69,440 \text{ mm} \rightarrow i. O.$$

$$ULS_{\Sigma 2} \leq ULS_{\Sigma 1} \rightarrow 70,600 \text{ mm} \leq 70,610 \text{ mm} \rightarrow i. O.$$

Außerdem lässt sich die Toleranz der gesamten Baugruppe nun neu berechnen (48):

$$T_{a2} = ULS_{\Sigma 2} - LLS_{\Sigma 2} = 70,600 \text{ mm} - 69,840 \text{ mm} = 0,760 \text{ mm}$$

Auffällig ist an dieser Stelle, dass trotz eines Toleranzgewinns (230 %) des einzelnen Bauteils die Gesamttoleranz ( $T_{a1} = 1,170 \text{ mm}$ ) der Baugruppe deutlich geringer ist. Dies liegt an dem sehr großen Toleranzgewinn des einzelnen Bauteils (Welle, Bauteil 4), welcher auf Grund der Bedingung III auf die Allgemeintoleranzen verringert werden musste.

### Schritt 2/3 (j=2):

Nun ist die Welle (Bauteil 4) bereits innerhalb der neu berechneten Toleranzen gefertigt und mittels eines inline-fähigen Messsystems vermessen. Das Messergebnis betrug in diesem Fall  $MP_2 = 59,850 \text{ mm}$ . Um die Messunsicherheit ( $MU = \pm 0,010 \mu\text{m}$ ) des Messsystems zu berücksichtigen, muss noch die Messgenauigkeit berücksichtigt werden ((50) und (51)):

$$MP_{2U} = MP_2 - MU_U = 59,850 \text{ mm} - 0,010 \text{ mm} = 59,840 \text{ mm}$$

$$MP_{2O} = MP_2 + MU_O = 59,850 \text{ mm} + 0,010 \text{ mm} = 59,860 \text{ mm}$$

**Schritt 3/3 (j=2):**

Nun können die Zwischenmaße nach Formel (52) und (53) bestimmt werden:

**Tabelle 19: Übersicht über die berechneten Zwischenwerte nach Iterationsstufe 2**

i	j	Bauteil	LLS' (mm)	ULS' (mm)
1	2	Schließmaß	1,000	1,000
2	2	Welle (Bauteil 4)	59,840	59,860
3	2	Hülse links (Bauteil 5)	5,060	5,150
4	2	Hülse rechts (Bauteil 3)	4,080	4,150

Als letzter Teilschritt muss nur noch der gewonnene Überhang berechnet werden. Der Überhang kann dann auf das Bauteil Hülse links (Bauteil 5) verteilt werden. Dies geschieht wie folgt durch Bestimmen des Zwischenmindest- und Zwischenhöchstmaß nach Formel ((54) und (55)):

$$LLS'_{\Sigma 2} = (1,000 + 59,840 + 5,060 + 4,080) \text{ mm} = 69,980 \text{ mm}$$

$$ULS'_{\Sigma 2} = (1,000 + 59,860 + 5,150 + 4,150) \text{ mm} = 70,160 \text{ mm}$$

Im Folgenden kann der Überhang und damit das zu verteilende Toleranzfeld berechnet werden ((56) und (57)):

$$\Omega_{U_2} = LLS_{\Sigma 1} - LLS'_{\Sigma 2} = (69,440 - 69,980) \text{ mm} = -0,540 \text{ mm}$$

$$\Omega_{O_2} = ULS_{\Sigma 1} - ULS'_{\Sigma 2} = (70,610 - 70,160) \text{ mm} = 0,450 \text{ mm}$$

Da der Algorithmus einmal durchgelaufen ist, folgt der nächste Iterationsschritt und somit auch Produktionsschritt j = 3.

**Schritt 1/3 (j = 3):**

Im Folgenden beginnt der Algorithmus wieder von vorne. Die neuen Toleranzfelder der Welle (Bauteil 4) sind bekannt und der neu zu verteilende Überhang ist bereits

berechnet. In den folgenden Tabellen sind die neuen Mindest- und Höchstmaße der Bauteile.

**Tabelle 20: Berechnungsschritte im Überblick der Mindest- und Höchstmaße für den dritten Fertigungsschritt**

<b>i</b>	<b>j</b>	<b>Berechnungsschritt</b>	<b>Fall</b>
1	3	$LLS_{13} = LLS_{11} = 1,000 \text{ mm}$	$j \neq 1 \text{ und } i \neq j$
2	3	$LLS_{23} = LLS_{22} = 59,840 \text{ mm}$	$j \neq 1 \text{ und } i \neq j$
3	3	$LLS_{33} = LLS_{32} + \Omega_{U_2} = 4,052 \text{ mm}$	$j \neq 1 \text{ und } i = j$
4	3	$LLS_{43} = LLS_{42} = 4,080 \text{ mm}$	$j \neq 1 \text{ und } i \neq j$
1	3	$ULS_{13} = ULS_{11} = 1,000 \text{ mm}$	$j \neq 1 \text{ und } i \neq j$
2	3	$ULS_{23} = ULS_{21} = 59,860 \text{ mm}$	$j \neq 1 \text{ und } i \neq j$
3	3	$ULS_{33} = ULS_{32} + \Omega_{O_2} = 5,600 \text{ mm}$	$j \neq 1 \text{ und } i = j$
4	3	$ULS_{43} = ULS_{42} = 4,150 \text{ mm}$	$j \neq 1 \text{ und } i \neq j$

Im dritten Iterationsschritt werden letztendlich nur die Toleranzen des dritten Bauteils verändert. Doch auch an dieser Stelle müssen die ausgeweiteten Toleranzen auf Bedingung III geprüft werden. Um das Verifizierungsbeispiel möglichst einfach zu halten, werden für die Begrenzung des Bauteils auch wieder die Allgmeintoleranzen eingesetzt (Norm DIN ISO 2768-1 1991). Da das Nennmaß der Hülse links (Bauteil 5) bei der Toleranzklasse „mittel“ 5,100 mm beträgt, lässt sich der Norm eine Allgmeintoleranz von  $\pm 0,100 \text{ mm}$  entnehmen. Damit folgt nach den Formeln (42) und (43):

$$LLS_{33} = Bm_{U_3} = 5,000 \text{ mm} \quad , \text{ da } 4,052 \text{ mm} < 5,000 \text{ mm}$$

$$ULS_{33} = Bm_{O_3} = 5,200 \text{ mm} \quad , \text{ da } 5,600 \text{ mm} > 5,200 \text{ mm}$$

Leider wird auch in diesem Iterationsschritt die mögliche Toleranzaufweitung durch die Bedingung III drastisch reduziert. Allerdings kann dennoch ein Toleranzgewinn

von ca. 220% erreicht werden (die Toleranz konnte von 0,090 mm auf 0,200 mm erweitert werden). Tabelle 21 zeigt die berechneten Zwischenmindest- und Zwischenhöchstmaße.

**Tabelle 21: Übersicht der neuen Mindest- und Höchstmaße nach Iterationsschritt 3**

<b>i</b>	<b>j</b>	<b>Bauteil</b>	<b>Mindestmaß LLS (mm)</b>	<b>Höchstmaß ULS (mm)</b>
1	3	Schließmaß	1,000	1,000
2	3	Welle (Bauteil 4)	59,840	59,860
3	3	Hülse links (Bauteil 5)	5,000	5,200
4	3	Hülse rechts (Bauteil 3)	4,080	4,150

Es ist wichtig, in jeder Iterationsschleife ebenso die in Schritt 1.2 aufgestellten Bedingungen I und II (Einhaltung des Gesamtmaßes und der Gesamttoleranz) zu überprüfen. Dies erfolgt wiederum nach den Formeln (45), (46), (47) und (48):

Berechnung der Gesamtmindestmaße:

$$LLS_{\Sigma 3} = \sum_{i=1}^m LLS_i = (1,000 + 59,840 + 5,000 + 4,080) \text{ mm} = 69,920 \text{ mm}$$

$$ULS_{\Sigma 3} = \sum_{i=1}^m ULS_i = (1,000 + 59,860 + 5,200 + 4,150) \text{ mm} = 70,210 \text{ mm}$$

Überprüfung der Bedingungen I und II:

$$LLS_{\Sigma 3} \geq LLS_{\Sigma 1} \rightarrow 69,920 \text{ mm} \geq 69,440 \text{ mm} \rightarrow i. O.$$

$$ULS_{\Sigma 3} \leq ULS_{\Sigma 1} \rightarrow 70,210 \text{ mm} \leq 70,610 \text{ mm} \rightarrow i. O.$$

Da alle Bedingungen eingehalten werden, kann die Hülse links (Bauteil 5) nun innerhalb der neuen Toleranzen hergestellt und in einem anschließenden Schritt vermessen

werden.

**Schritt 2/3 (j=3):**

Das hypothetische Messergebnis für die Messung der Hülse links (Bauteil 5) beträgt  $MP_3 = 5,153 \text{ mm}$ . Daraus folgt:

$$MP_{3U} = MP_3 - MU_U = 5,153 \text{ mm} - 0,010 \text{ mm} = 5,143 \text{ mm}$$

$$MP_{3O} = MP_3 - MU_O = 5,153 \text{ mm} + 0,010 \text{ mm} = 5,163 \text{ mm}$$

**Schritt 3/3 (j=3):**

Im Folgenden kann der Überhang berechnet werden. Tabelle 22 bietet eine Übersicht der bisher errechneten Bauteilmaße inklusive ihrer Toleranzen:

**Tabelle 22: Übersicht über die berechneten Zwischenwerte nach Iterationsstufe 3**

i	j	Bauteil	LLS' (mm)	ULS' (mm)
1	3	Schließmaß	1,000	1,000
2	3	Welle (Bauteil 4)	59,840	59,860
3	3	Hülse links (Bauteil 5)	5,143	5,163
4	3	Hülse rechts (Bauteil 3)	4,080	4,150

Mit Hilfe der Formeln (54), (55) und (56), (57) ergibt sich für den Überhang:

$$\Omega_{U_3} = LLS_{\Sigma 1} - LLS'_{\Sigma 3} = (69,440 - 70,063) \text{ mm} = -0,623 \text{ mm}$$

$$\Omega_{O_3} = ULS_{\Sigma 1} - ULS'_{\Sigma 3} = (70,610 - 70,173) \text{ mm} = 0,437 \text{ mm}$$

Mit dem errechneten Überhang kann nun Iterationsschritt 4 begonnen werden.

**Schritt 1/3 (j = 4):**

Nun kann der gewonnene Überhang aus Iterationsstufe 3 auf die Hülse rechts (Bauteil 3) aufgeschlagen werden:

$$LLS_{44} = LLS_{43} + \Omega_{U_3} = 3,457 \text{ mm}$$

$$ULS_{44} = ULS_{43} + \Omega_{O_3} = 4,587 \text{ mm}$$

Allerdings muss zuerst die Einhaltung von Bedingung III geprüft werden. Um die Allgemeintoleranzen einzuhalten, müssen die obere und untere Toleranzgrenze angepasst werden:

$$LLS_{44} = Bm_{U_4} = 4,000 \text{ mm} \quad , \text{ da } 3,457 \text{ mm} < 4,000 \text{ mm}$$

$$ULS_{44} = Bm_{O_4} = 4,200 \text{ mm} \quad , \text{ da } 4,587 \text{ mm} > 4,200 \text{ mm}$$

Die Toleranz konnte von 0,070 mm auf 0,200 mm angehoben werden. Dies entspricht einem Toleranzgewinn von 286 %.

Tabelle 23 zeigt die berechneten Zwischenmindest- und Zwischenhöchstmaße.

**Tabelle 23: Übersicht der neuen Mindest- und Höchstmaße nach Iterationsschritt 4**

<b>i</b>	<b>j</b>	<b>Bauteil</b>	<b>Mindestmaß LLS (mm)</b>	<b>Höchstmaß ULS (mm)</b>
1	4	Schließmaß	1,000	1,000
2	4	Welle (Bauteil 4)	59,840	59,860
3	4	Hülse links (Bauteil 5)	5,000	5,200
4	4	Hülse rechts (Bauteil 3)	4,000	4,200

Um zu überprüfen ob das Gesamtmaß sowie die dazugehörige Gesamttoleranz unverändert bleiben, (siehe Bedingung I und II) müssen zuerst die Gesamtmindestmaße berechnet werden:

$$LLS_{\Sigma 4} = \sum_{i=1}^m LLS_i = (1,000 + 59,840 + 5,000 + 4,000) \text{ mm} = 69,840 \text{ mm}$$

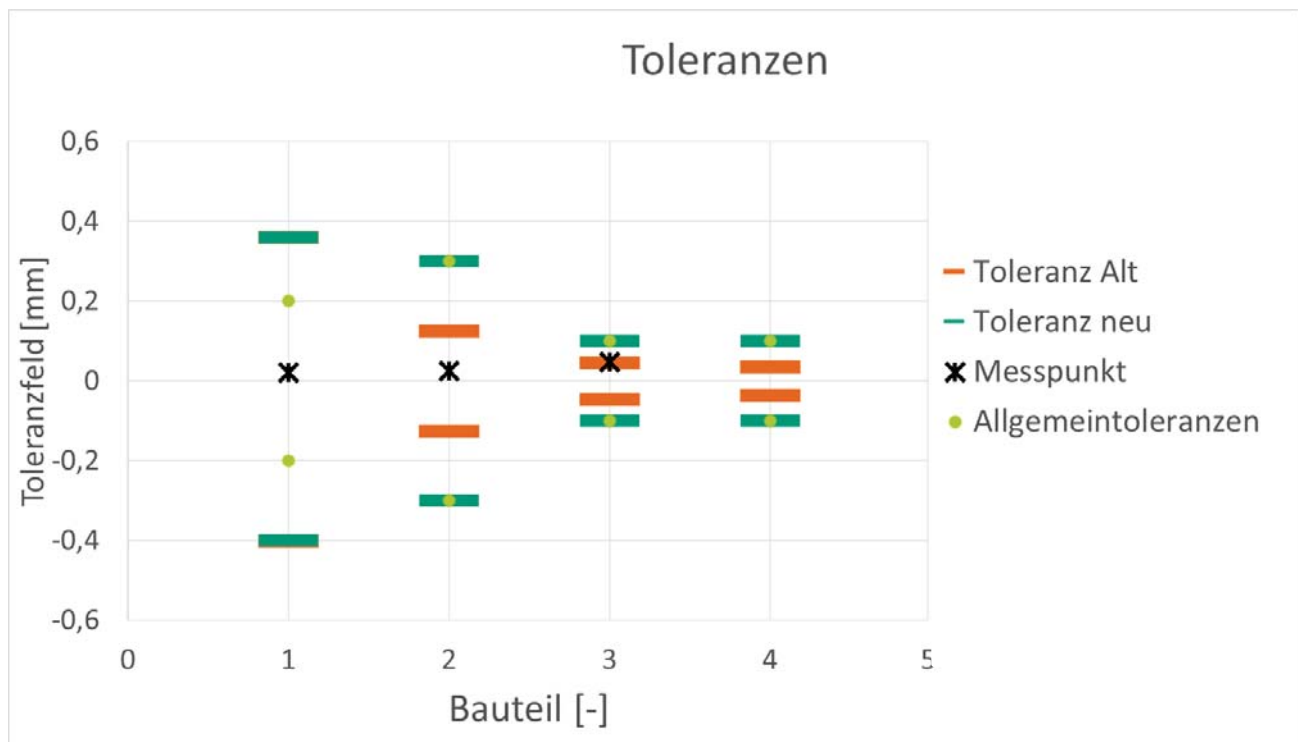
$$ULS_{\Sigma 4} = \sum_{i=1}^m ULS_i = (1,000 + 59,860 + 5,200 + 4,200) \text{ mm} = 70,260 \text{ mm}$$

Überprüfung der Bedingungen I und II:

$$LLS_{\Sigma 4} \geq LLS_{\Sigma 1} \rightarrow 69,840 \text{ mm} \geq 69,440 \text{ mm} \rightarrow i. O.$$

$$ULS_{\Sigma 4} \leq ULS_{\Sigma 1} \rightarrow 70,260 \text{ mm} \leq 70,610 \text{ mm} \rightarrow i. O.$$

Da alle Bedingungen für die Hülse rechts (Bauteil 3) eingehalten werden und alle Bauteile der Baugruppe nun nach der dynamischen Tolerierung neue Toleranzen erhalten haben, ist die Anwendung des Algorithmus nun abgeschlossen. Abbildung 41 zeigt je Prozessschritt die alte Toleranz (orange), die neue Toleranz (dunkelgrün), den ermittelten Messwert (schwarzes Kreuz) und die Allgmeintoleranzen (hellgrüner Punkt):



**Abbildung 41: Vergleich der alten und neuen Toleranzfelder**

*Quelle: Eigene Darstellung*

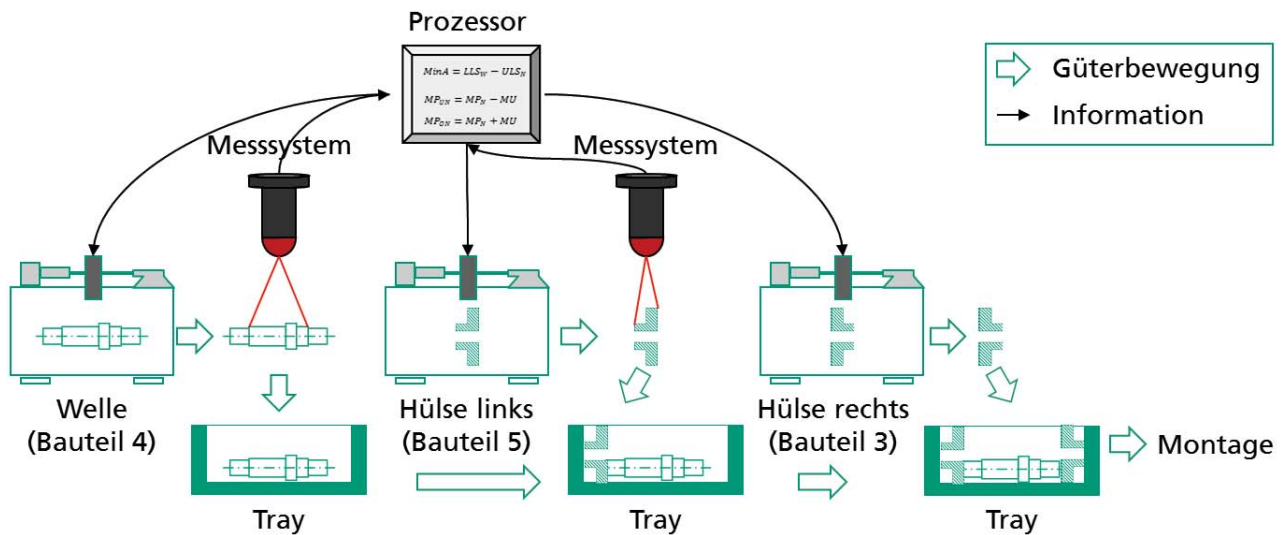
Da es sich bei Prozessschritt 1 um eine Schließtoleranz und somit um ein fiktives Maß ohne reales Bauteil handelt, ist in diesem Fall die Überschreitung der Allgemeintoleranzen erlaubt, denn die geometrischen oder mechanischen Eigenschaften (Bedingung III) eines fiktiven Bauteils können nicht negativ beeinflusst werden. Im zweiten, dritten und vierten Prozessschritt entspricht die neue Toleranz der Allgemeintoleranz. Der eigentliche Toleranzgewinn aller Bauteile wäre theoretisch viel größer gewesen, aber auch hier muss die Bedingung III wieder eingehalten werden. Dies kann in diesem Beispiel nur sicher gewährleistet werden, wenn die Allgemeintoleranzen eingehalten werden.

### **Schritt 5: Herstellkosten und Qualitätsbetrachtung**

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Toleranz in Prozessschritt 2 um 240 % erweitert werden konnte, in Prozessschritt 3 um 222 %, und in Prozessschritt 4 konnte sogar ein Toleranzgewinn von 286 % erreicht werden. Die von der Konstruktion angegebenen Toleranzen in der Produktion konnten somit deutlich erhöht werden. Die Welle (Bauteil 4) sollte laut Konstruktion in dem Grundtoleranzgrad IT12 gefertigt werden. Mit Hilfe der dynamischen Tolerierung konnte die Toleranzklasse auf die IT-Klasse 14 gehoben werden. Ebenso verhält es sich bei der Hülse links (Bauteil 5). Die Hülse rechts (Bauteil 3) wurde von der Konstruktion sogar in der IT-Klasse 11 angegeben und konnte ebenso auf die IT-Klasse 14 angehoben werden. Da die Qualität des Getriebes durch die Anwendung der dynamischen Tolerierung nicht beeinflusst wurde, spiegelt sich der Gewinn der Anwendung in niedrigeren Herstellkosten durch die Aufweitung der Toleranzen beziehungsweise durch das Anheben der IT-Klassen.

**Schritt 6: Integrationskonzept:**

Die logistische und technische Umsetzung könnte wie folgt durchgeführt werden (vergleiche Abbildung 42):



**Abbildung 42: Beispielhafte logistische und technische Umsetzung**  
*Quelle: Eigene Darstellung*

Da durch die Anwendung der dynamischen Tolerierung das Schließmaß genutzt werden kann, können die Toleranzen und das Fertigungsmaß der Welle (Bauteil 4) bereits angepasst werden. Sobald die Welle (Bauteil 4) gefertigt wurde, kann das Maß M4 mittels Fertigungsmesssystem vermessen werden. Der Messwert wird an den Prozessor weitergegeben. Die vermessene Welle wird in ein Tray gelegt und weitergegeben. Der Prozessor berechnet nun mit Hilfe des Algorithmus das neue Fertigungsmaß und die neuen Toleranzen für die Hülse links (Bauteil 5) und gibt diese weiter an den Fertigungsschritt, der die Hülse herstellt. Die gefertigte Hülse links (Bauteil 5) wird nun vermessen (Maß M5) und zu der zuvor gefertigten Welle in den Tray gelegt. Der Messwert wird wiederum an den Prozessor weitergegeben, welcher das neue Fertigungsmaß inklusive neuer Toleranzen berechnet und diese Werte an den Prozessschritt zur Fertigung der Hülse rechts (Bauteil 3) weitergibt. Sobald sie gefertigt ist, muss auch sie in

## Die dynamische Tolerierung

---

den Tray dazu gelegt werden. Die Bauteile werden dann zusammen in die Montage weitertransportiert.

---

## 6 Validierung der Methodik anhand eines Beispiels aus der industriellen Praxis

Im vorangegangenen Kapitel wurde die Methodik der dynamischen Tolerierung erfolgreich auf Beispiele aus der Literatur angewendet. Im vorliegenden Kapitel wird die in dieser Arbeit vorgestellte Methodik nun auf ein Fallbeispiel aus der industriellen Praxis angewendet, um den Kundennutzen zu erproben. Der Autor baute den ersten Kontakt mit dem betreffenden Unternehmen in Schulungen im Bereich der „Fehlermöglichkeits- und -einflussanalyse (FMEA)“ auf. Dadurch kam es zu zahlreichen Diskussionen über die hohen Präzisionsanforderungen an einzelne Produkte. Daraufhin entstand ein enger Kontakt mit der Innovationsabteilung des Unternehmens, mit der überwiegend technische, aber auch logistische sowie ökonomische Herausforderungen diskutiert wurden. Das Unternehmen stellte dabei alle benötigten Daten für das vorliegende Praxisbeispiel bereit. Um die proprietären Produktspezifikationen des Unternehmens zu schützen, wird in diesem Kapitel jedoch nicht weiter auf das Produkt eingegangen.

Das Produkt umfasst drei Unterbaugruppen, die zueinander gepasst sind. Die Unterbaugruppen bestehen aus maximal drei Einzelteilen, die aber im Zusammenschluss zu keiner weiteren Funktion führen. Daher werden die Unterbaugruppen im Weiteren als Bauteile bezeichnet. Diese Mehrfachpassung führt zu sehr engen Toleranzen an einem der drei Bauteile. Ziel der Anwendung der Methodik ist es, die Produktionskosten zu reduzieren, ohne dass das Produkt hinsichtlich seiner qualitativen Eigenschaften Einbußen erfährt.

**Schritt 1: Daten erfassen:**

**Konstruktionsdaten:**

Innendurchmesser Bauteil I

Mindestmaß  $LLS_{BI} = 12,300 \text{ mm}$

Höchstmaß  $ULS_{BI} = 12,700 \text{ mm}$

Toleranz  $T_{BI} = 0,400 \text{ mm}$

Außendurchmesser Bauteil II

Mindestmaß  $LLS_{a\phi-BII} = 12,470 \text{ mm}$

Höchstmaß  $ULS_{a\phi-BII} = 12,490 \text{ mm}$

Toleranz  $T_{a\phi-BII} = 0,020 \text{ mm}$

Innendurchmesser Bauteil II

Mindestmaß  $LLS_{i\phi-BII} = 8,010 \text{ mm}$

Höchstmaß  $ULS_{i\phi-BII} = 8,030 \text{ mm}$

Toleranz  $T_{i\phi-BII} = 0,020 \text{ mm}$

Außendurchmesser Bauteil III:

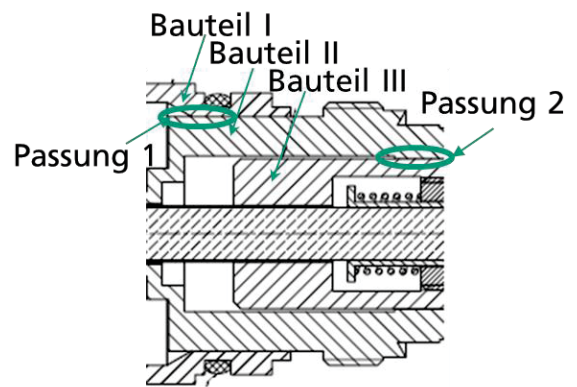
Mindestmaß  $LLS_{BIII} = 7,970 \text{ mm}$

Höchstmaß  $ULS_{BIII} = 7,990 \text{ mm}$

Toleranz  $T_{BIII} = 0,020 \text{ mm}$

Produktionsablauf:

Sowohl Bauteil I als auch Bauteil III werden von einem Lieferanten bereitgestellt. Bauteil II wird im Haus gefertigt.



**Abbildung 43: Ausschnitt aus der technischen Zeichnung**  
*Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an die technische Zeichnung des Industrie-Partners*

---

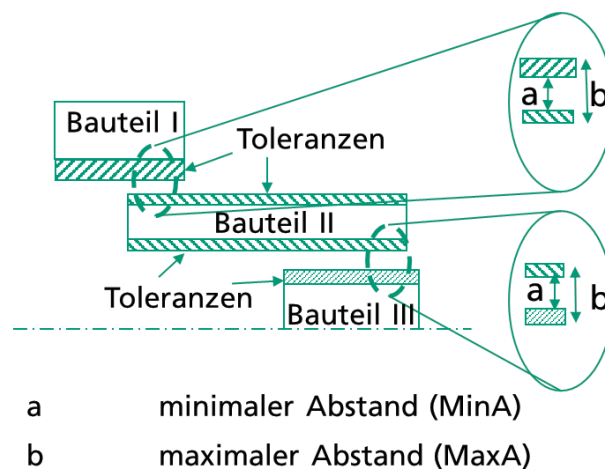
## Schritt 2: Passungssystem entwickeln

### Analyse der Daten:

Die erste Verbindung zwischen Bauteil I und II ist eine Übergangspassung. Die zweite Verbindung zwischen Bauteil II und Bauteil III entspricht einer Spielpassung.

### Bedingungen ableiten:

Abbildung 44 zeigt eine schematische Darstellung der beiden Verbindungen die in diesem Projekt untersucht werden sollen.



### **Abbildung 44: Schematische Darstellung der Verbindungen der Baugruppe (Bedingungsanalyse)**

*Quelle: Eigene Darstellung*

Um die Funktionalität zu gewährleisten, müssen folgende Bedingungen eingehalten werden:

Bedingung I: *„Die Passfunktion ist nur dann gewährleistet, wenn der minimale und der maximale Abstand eingehalten werden.“*

Bedingung II: *„Der Toleranzgewinn darf das Bauteil weder in seiner mechanischen noch in seiner geometrischen Eigenschaft beeinträchtigen.“*

Um Bedingung II umzusetzen, müssen maximale Aufweitungsgrenzen gesetzt werden.

Diese können beispielsweise von Experten bestimmt werden, oder es können Allgemeintoleranzen nach DIN ISO 2768 (Norm DIN ISO 2768-1 1991) verwendet werden.

### **Schritt 3: Messsystem, Handlingsprinzip und Datenbank abschätzen**

Da Experten vor Ort die Auswahl eines konkreten Messsystems vor der eigentlichen Kostenabschätzung noch nicht als sinnvoll erachteten, findet nur eine Abschätzung der Messgenauigkeit statt: Der Innendurchmesser von Bauteil I kann mit einer Genauigkeit von 0,01 mm gemessen werden; der Außendurchmesser von Bauteil III kann mit einer Genauigkeit von 0,005 mm gemessen werden.

Bei dem Handlingsprinzips muss darauf geachtet werden, dass die vermessenen Bauteile mit den dafür produzierten Gegenstücken gepaart werden. Außerdem müssen die vermessenen Bauteile gekennzeichnet und die Ergebnisse der Messung in einer Datenbank hinterlegt werden.

### **Schritt 4: Algorithmus entwickeln**

#### Verbindung I

In einem ersten Schritt wird die Verbindung zwischen Bauteil I (Index BI; alle Maße von Bauteil I sind mit dem Index BI gekennzeichnet) und Bauteil II (Index BII) berechnet. Da die erste Bedingung die Einhaltung des minimalen und maximalen Abstandes verlangt, ist der erste Schritt die Berechnung von MinA und MaxA zwischen dem Innendurchmesser (Index  $i\emptyset$ ) von Bauteil I und dem Außendurchmesser (Index  $a\emptyset$ ) von Bauteil II:

Maximaler Abstand:

$$MaxA_{BI+BII} = ULS_{i\emptyset-BI} - LLS_{a\emptyset-BII} \quad (58)$$

$$MaxA_{BI+BII} = 12,700 \text{ mm} - 12,470 \text{ mm} = 0,230 \text{ mm}$$

---

Minimaler Abstand:

$$MinA_{BI+BII} = LLS_{i\emptyset-BI} - ULS_{a\emptyset-BII} \quad (59)$$

$$MinA_{BI+BII} = 12,300 \text{ mm} - 12,490 \text{ mm} = -0,190 \text{ mm}$$

Da Bauteil I ein Zukaufteil ist, kann es am Wareneingang vermessen werden. Vermessen wird der Innendurchmesser. Dabei muss der Messpunkt für den Innendurchmesser des Bauteils I ( $MP_{i\emptyset-BI}$ ) innerhalb der Toleranzgrenzen liegen:

$$MP_{i\emptyset-BI} \in [LLS_{BI}; ULS_{BI}]$$

Um die Messgenauigkeit des Messsystems zu berücksichtigen, müssen in dem Algorithmus zwei fiktive Messpunkte eingeführt werden. Der untere (Index U), reale Wert auf Grundlage des Messpunktes ( $MP_{Ui\emptyset-BI}$ ) und der obere (Index O) reale Wert auf Grundlage des Messpunktes ( $MP_{Oi\emptyset-BI}$ ):

$$MP_{Ui\emptyset-BI} = MP_{i\emptyset-BI} - MU \quad (60)$$

$$MP_{Oi\emptyset-BI} = MP_{i\emptyset-BI} + MU \quad (61)$$

wobei MU hier die Messunsicherheit darstellt. Die Messgenauigkeit (siehe Schritt 2) wurde in diesem Beispiel auf  $MU = 0,010 \text{ mm}$  geschätzt. Der betreffende Innendurchmesser wurde mit einem Durchmesser von  $MP_{i\emptyset-BI} = 12,400 \text{ mm}$  bestimmt:

$$MP_{Ui\emptyset-BI} = 12,400 \text{ mm} - 0,010 \text{ mm} = 12,390 \text{ mm}$$

$$MP_{Oi\emptyset-BI} = 12,400 \text{ mm} + 0,010 \text{ mm} = 12,410 \text{ mm}$$

Um Bedingung I einzuhalten, kann nun auf der Grundlage des maximalen Abstands und des unteren realen Werts des Innendurchmessers von Bauteil I das neue Höchstmaß des Außendurchmessers von Bauteil II berechnet werden:

$$ULS'_{a\emptyset-BII_{neu}} = MP_{Ui\emptyset-BI} + MaxA_{BI+BII} \quad (62)$$

$$ULS'_{a\emptyset-BII_{neu}} = 12,390 \text{ mm} + 0,230 \text{ mm} = 12,620 \text{ mm}$$

Parallel dazu kann das Mindestmaß des Außendurchmessers von Bauteil II neu berechnet werden:

$$LLS'_{a\emptyset-BII_{neu}} = MP_{O\emptyset-BI} + MinA_{BI+BII} \quad (63)$$

$$LLS'_{a\emptyset-BII_{neu}} = 12,410 \text{ mm} - 0,190 \text{ mm} = 12,220 \text{ mm}$$

In einem nächsten Schritt wird getestet, ob der erfolgte Toleranzgewinn Bedingung II („Der Toleranzgewinn darf das Bauteil weder in seiner mechanischen noch in seiner geometrischen Eigenschaft beeinträchtigen.“) einhält. Dafür wird ein Begrenzungsmaß  $Bm$  eingeführt, welches in diesem Beispiel durch die Allgemeintoleranzen nach DIN ISO 2768 definiert wird. Für Bauteil II folgt ein Nennmaß von 12,480 mm mit einer Allgemeintoleranz  $\pm 0,2$  mm (bei einer mittleren Tolerierung).

$$\begin{aligned}
 & ULS_{a\emptyset-BII_{neu}} \\
 & = \begin{cases} ULS_{a\emptyset-BII_{neu}} = ULS'_{a\emptyset-BII_{neu}} & , \text{ wenn } ULS'_{a\emptyset-BII_{neu}} \leq Bm_{Oa\emptyset-II} \\ ULS_{a\emptyset-BII_{neu}} = Bm_{Oa\emptyset-II} & , \text{ wenn } ULS'_{a\emptyset-BII_{neu}} > Bm_{Oa\emptyset-II} \end{cases} \quad (64)
 \end{aligned}$$

Daraus ergibt sich:

$$ULS_{a-BII_{neu}} = 12,620 \text{ mm} \quad , \text{ da } 12,620 \text{ mm} \leq 12,680 \text{ mm}$$

Parallel dazu müssen auch die unteren Toleranzgrenzen geprüft werden:

$$\begin{aligned}
 & LLS_{a\emptyset-BII_{neu}} \\
 & = \begin{cases} LLS_{a\emptyset-BII_{neu}} = LLS'_{a\emptyset-BII_{neu}} & , \text{ wenn } LLS'_{a\emptyset-BII_{neu}} \geq Bm_{Ua\emptyset-II} \\ LLS_{a\emptyset-BII_{neu}} = Bm_{Ua\emptyset-II} & , \text{ wenn } LLS'_{a\emptyset-BII_{neu}} < Bm_{Ua\emptyset-II} \end{cases} \quad (65)
 \end{aligned}$$

Daraus ergibt sich:

$$LLS_{a-BII_{neu}} = 12,280 \text{ mm} \quad , \text{ da } 12,220 \text{ mm} < 12,280 \text{ mm}$$

Aus den ermittelten Werten kann nun zum einen die neue Toleranz berechnet werden:

$$T_{a\emptyset-BII_{neu}} = ULS_{a\emptyset-BII_{neu}} - LLS_{a\emptyset-BII_{neu}} \quad (66)$$

$$T_{a\emptyset-BII_{neu}} = 12,620 \text{ mm} - 12,280 \text{ mm} = 0,340 \text{ mm}$$

Zum anderen kann nun das neue Mitten- beziehungsweise Fertigungsmaß berechnet werden:

$$C_{a\emptyset-BII_{neu}} = \frac{ULS_{a\emptyset-BII_{neu}} + LLS_{a\emptyset-BII_{neu}}}{2} \quad (67)$$

$$C_{a\emptyset-BII_{neu}} = \frac{12,620 \text{ mm} + 12,280 \text{ mm}}{2} = 12,450 \text{ mm}$$

In einem nächsten Schritt muss das gleiche Verfahren für die Passung zwischen Bauteil II und Bauteil III durchgeführt werden.

### Verbindung II:

In diesem zweiten Schritt wird die Verbindung zwischen Bauteil II und Bauteil III (Index BIII) berechnet. Zur Einhaltung des minimalen und des maximalen Abstands (Bedingung I) werden zunächst wieder MinA und MaxA berechnet:

Maximaler Abstand:

$$MaxA_{BII+BIII} = ULS_{i\emptyset-BII} - LLS_{a\emptyset-BIII} \quad (68)$$

$$MaxA_{BII+BIII} = 8,030 \text{ mm} - 7,970 \text{ mm} = 0,060 \text{ mm}$$

Minimaler Abstand:

$$MinA_{BII+BIII} = LLS_{i\emptyset-BII} - ULS_{a\emptyset-BIII} \quad (69)$$

$$MinA_{BII+BIII} = 8,010 \text{ mm} - 7,990 \text{ mm} = 0,020 \text{ mm}$$

Da auch Bauteil III ein Zukaufteil ist, kann es ebenfalls am Wareneingang vermessen werden. Vermessen wird der Außendurchmesser. Dabei muss der Messpunkt (MP) innerhalb der Toleranzgrenzen liegen:

$$MP_{a\emptyset-BIII} \in [LLS_{BIII}; ULS_{BIII}]$$

Um die Messungenauigkeit des Messsystems zu berücksichtigen, werden in dem Algorithmus wieder zwei fiktive Messpunkte eingeführt, der untere, reale Wert auf Grundlage des Messpunktes ( $MP_{Ua\emptyset-BIII}$ ) und der obere reale Wert auf Grundlage des Messpunktes ( $MP_{Oa\emptyset-BIII}$ ):

$$MP_{Ua\emptyset-BIII} = MP_{a\emptyset-BIII} - MU \quad (70)$$

$$MP_{Oa\emptyset-BIII} = MP_{a\emptyset-BIII} + MU \quad (71)$$

, wobei MU hier die Messunsicherheit darstellt. Die Messgenauigkeit (siehe Schritt 2) beträgt in diesem Beispiel  $MU = 0,005 \text{ mm}$ . Der betreffende Innendurchmesser wurde mit einem Durchmesser von  $MP_{a-BIII} = 7,980 \text{ mm}$  bestimmt:

$$MP_{Ua\emptyset-BIII} = 7,980 \text{ mm} - 0,005 \text{ mm} = 7,975 \text{ mm}$$

$$MP_{Oa\emptyset-BIII} = 7,980 \text{ mm} + 0,005 \text{ mm} = 7,985 \text{ mm}$$

Um Bedingung I einzuhalten, kann nun auf Grundlage des maximalen Abstandes und des unteren realen Wertes des Innendurchmessers von Bauteil III das neue Höchstmaß des Innendurchmessers von Bauteil II berechnet werden:

$$ULS'_{i\emptyset-BII_{neu}} = MP_{Ua\emptyset-BIII} + MaxA_{BII+BIII} \quad (72)$$

$$ULS'_{i\emptyset-BII_{neu}} = 7,975 \text{ mm} + 0,060 \text{ mm} = 8,035 \text{ mm}$$

Parallel dazu kann das Mindestmaß des Außendurchmessers von Bauteil II neu berechnet werden:

$$LLS'_{i\emptyset-BII_{neu}} = MP_{Oa\emptyset-BIII} + MinA_{BII+BIII} \quad (73)$$

$$LLS'_{i\emptyset-BII_{neu}} = 7,985 \text{ mm} + 0,020 \text{ mm} = 8,005 \text{ mm}$$

In einem nächsten Schritt wird getestet, ob der erhaltene Toleranzgewinn Bedingung II („Der Toleranzgewinn darf das Bauteil weder in seiner mechanischen noch in seiner

geometrischen Eigenschaft beeinträchtigen.“) einhält. Dafür wird ein Begrenzungsmaß  $Bm$  eingeführt, welches durch die Allgmeintoleranzen nach DIN ISO 2768 definiert wird. Für Bauteil II folgt ein Nennmaß von 8,020 mm, mit einer Allgmeintoleranz von  $\pm 0,2$  mm (bei einer mittleren Tolerierung).

$$\begin{aligned}
 & ULS_{i\emptyset-BII_{neu}} \\
 &= \begin{cases} ULS_{i\emptyset-BII_{neu}} = ULS'_{i\emptyset-BII_{neu}} & , \text{wenn } ULS'_{i\emptyset-BII_{neu}} \leq Bm_{Oi\emptyset-II} \\ ULS_{i\emptyset-BII_{neu}} = Bm_{Oi\emptyset-II} & , \text{wenn } ULS'_{i\emptyset-BII_{neu}} > Bm_{Oi\emptyset-II} \end{cases} \quad (74)
 \end{aligned}$$

Daraus ergibt sich:

$$ULS_{i-BII_{neu}} = 8,035 \text{ mm} \quad , \text{da } 8,035 \text{ mm} \leq 8,220 \text{ mm}$$

Parallel dazu müssen auch die unteren Toleranzgrenzen geprüft werden:

$$\begin{aligned}
 & LLS_{i\emptyset-BII_{neu}} \\
 &= \begin{cases} LLS_{i\emptyset-BII_{neu}} = LLS'_{i\emptyset-BII_{neu}} & , \text{wenn } LLS'_{i\emptyset-BII_{neu}} \geq Bm_{Ui\emptyset-II} \\ LLS_{i\emptyset-BII_{neu}} = Bm_{Ui\emptyset-II} & , \text{wenn } LLS'_{i\emptyset-BII_{neu}} < Bm_{Ui\emptyset-II} \end{cases} \quad (75)
 \end{aligned}$$

Daraus ergibt sich:

$$LLS_{i\emptyset-BII_{neu}} = 8,005 \text{ mm} \quad , \text{da } 8,005 \text{ mm} \geq 7,820 \text{ mm}$$

Aus den ermittelten Werten kann nun zum einen die neue Toleranz berechnet werden:

$$T_{i\emptyset-BII_{neu}} = ULS_{i\emptyset-BII_{neu}} - LLS_{i\emptyset-BII_{neu}} \quad (76)$$

$$T_{i\emptyset-BII_{neu}} = 8,035 \text{ mm} - 8,005 \text{ mm} = 0,030 \text{ mm}$$

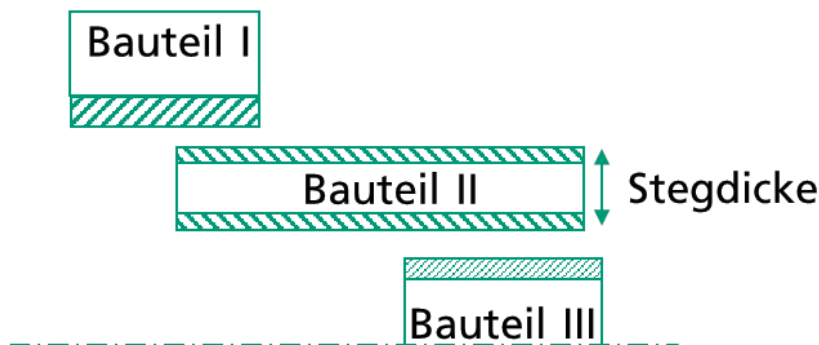
Zum anderen kann nun das neue Mitten- beziehungsweise Fertigungsmaß berechnet werden:

$$C_{i\emptyset-BII_{neu}} = \frac{ULS_{i\emptyset-BII_{neu}} + LLS_{i\emptyset-BII_{neu}}}{2} \quad (77)$$

$$C_{i\emptyset-BII_{neu}} = \frac{8,035 \text{ mm} + 8,005 \text{ mm}}{2} = 8,020 \text{ mm}$$

Stegdicke prüfen:

Da an einem Bauteil (Bauteil II) sowohl der Außendurchmesser als auch der Innendurchmesser dynamisch an die Messergebnisse von Bauteil I und Bauteil III angepasst wurden, muss nun darauf geachtet werden, dass Bedingung II nicht verletzt wird. Hier ist die „Stegdicke“ des Bauteils II genauer zu beachten. Abbildung 45 zeigt eine schematische Darstellung (ähnlich Abbildung 44) der Verbindungen zwischen Bauteilen mit dem Fokus der Stegdicke von Bauteil II.



**Abbildung 45: Schematische Darstellung der Verbindungen der Baugruppe (Fokus Stegdicke)**

*Quelle: Eigene Darstellung*

Als minimal zulässige Stegdicke wird  $S_{\text{Min}} = 4,400$  mm angenommen, um die mechanische und geometrische Eigenschaft zu gewährleisten (Bedingung II)<sup>30</sup>.

$$S_{BII\text{-aktuell}} > S_{\text{Min}} \quad (78)$$

Um dies zu gewährleisten, muss zunächst die aktuelle Stegdicke berechnet werden:

$$S_{BII\text{-aktuell}} = LLS_{\alpha\emptyset\text{-BII}} - ULS_{i\text{-BII}} \quad (79)$$

$$S_{BII\text{-aktuell}} = 12,280 \text{ mm} - 8,035 \text{ mm} = 4,245 \text{ mm}$$

Ist der aktuell berechnete Steg kleiner als er mindestens sein darf, muss eine der beiden

---

<sup>30</sup> Die minimal zulässige Stegdicke wurde in einem Expertengespräch ermittelt.

neu errechneten Toleranzen verkleinert werden, um die minimale Stegbreite garantieren zu können. Hierfür sind zwei Modelle denkbar und individuell an die Baugruppe und die entsprechenden Fertigungsverfahren anzupassen. Im Folgenden werden diese zwei möglichen Modelle vorgestellt:

### Erstes Modell:

Die fehlende Stegbreite  $\Delta S$  kann durch die durch die dynamische Tolerierung gewonnene Toleranzfelder (Innen- und Außendurchmesser) ausgeglichen werden. In diesem Fall wird das größere der beiden Toleranzfelder von Bauteil II verwendet.

$$\Delta S = S_{Min} - S_{BII-aktuell} \quad (80)$$

$$\Delta S = 4,400 \text{ mm} - 4,245 \text{ mm} = 0,155 \text{ mm}$$

$$\Delta S = \begin{cases} \Delta S = \Delta S & \Delta S \geq 0 \\ \Delta S = 0 & \Delta S < 0 \end{cases} \quad (81)$$

Daraus ergibt sich:

$$\Delta S = 0,155 \text{ mm}, \text{ da } \Delta S \geq 0$$

Der Außendurchmesser besitzt im Moment das größere Toleranzfeld ( $T_{a-BII\_neu} = 0,340$  mm). Daher kann die fehlende Stegbreite auf das neu berechnete Mindestmaß ( $LLS_{a-BII}$ ) aufgeschlagen werden:

$$LLS_{a\emptyset-BII_{end}} = LLS_{a\emptyset-BII} + \Delta S \quad (82)$$

$$LLS_{a\emptyset-BII_{end}} = 12,280 \text{ mm} + 0,155 \text{ mm} = 12,435 \text{ mm}$$

Daraus ergibt sich die endgültige Toleranz für den Außendurchmesser des Bauteils II:

$$\begin{aligned} T_{a\emptyset-BII_{end}} &= ULS_{a\emptyset-BII_{neu}} - LLS_{a\emptyset-BII_{end}} = 12,620 \text{ mm} - 12,435 \text{ mm} \\ &= 0,185 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$C_{a\emptyset-BII_{end}} = \frac{12,620 \text{ mm} + 12,435 \text{ mm}}{2} = 12,528 \text{ mm}$$

Da die Stegbreite nur über den Außendurchmesser anpasst wird, bleiben der Innendurchmesser und somit die Toleranzen gleich:

$$T_{i\emptyset-BII_{end}} = 0,030 \text{ mm}$$

$$C_{i\emptyset-BII_{end}} = \frac{8,035 \text{ mm} + 8,005 \text{ mm}}{2} = 8,020 \text{ mm}$$

Daraus lässt sich an diesem Beispiel der konkrete Toleranzgewinn ableiten:

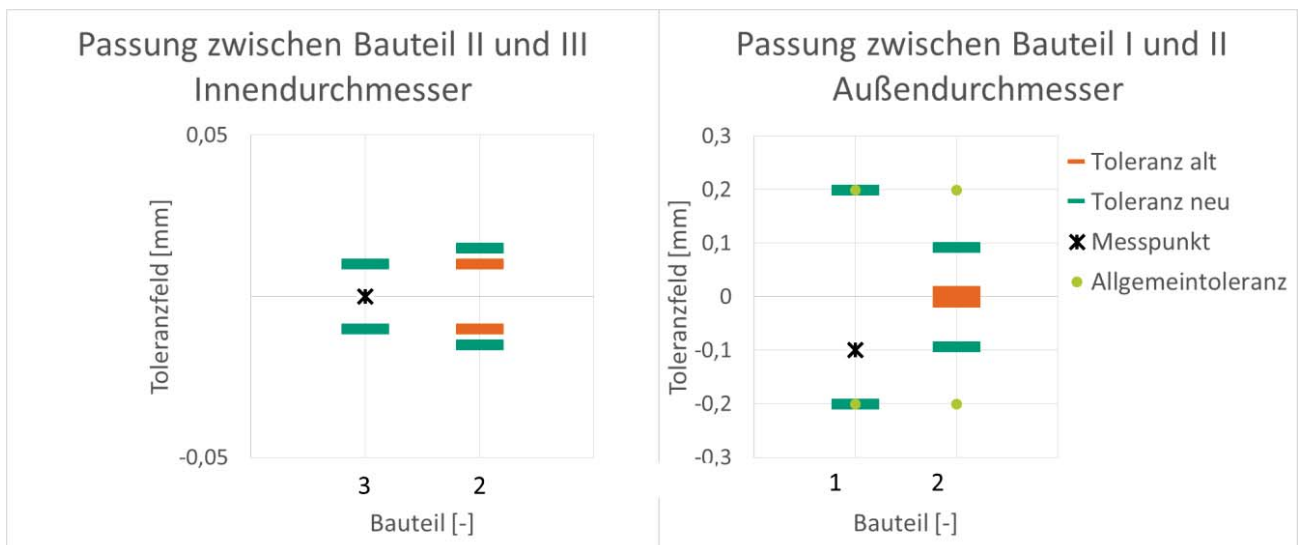
$$Toleranzgewinn_{Außendurchmesser} = \frac{T_{a\emptyset-BII_{end}}}{T_{a\emptyset-BII}} * 100\%$$

$$= \frac{0,185 \text{ mm}}{0,020 \text{ mm}} * 100\% = 925\%$$

$$Toleranzgewinn_{Innendurchmesser} = \frac{T_{i\emptyset-BII_{end}}}{T_{i\emptyset-BII}} * 100\%$$

$$= \frac{0,030 \text{ mm}}{0,020 \text{ mm}} * 100\% = 150\%$$

Abbildung 46 zeigt die Toleranzfelder der Innen- und Außendurchmesser. Dabei sind die Toleranzfelder symmetrisch dargestellt.



**Abbildung 46: Toleranzanpassungsdiagramm der Passungen nach dem ersten Modell**

*Quelle: Eigene Darstellung*

---

Durch das Toleranzanpassungsdiagramm wird der Toleranzgewinn verdeutlicht.

Zweites Modell:

Die fehlende Stegbreite  $\Delta S$  könnte auch in einem beliebigen Ausmaß auf die beiden Toleranzen verteilt werden. Im folgenden Beispiel wird die fehlende Stegbreite im Verhältnis der Toleranzen zueinander auf selbige aufgeschlagen. In diesem Fall würden 83 % der fehlenden Stegbreite zu dem Außendurchmesser hinzuaddiert und 17 % der fehlenden Stegbreite vom Innendurchmesser abgezogen:

$$LLS_{a\emptyset-BII_{end}} = LLS_{a\emptyset-BII} + 0,83 * \Delta S = 12,280 \text{ mm} + 0,129 \text{ mm} = 12,422 \text{ mm}$$

$$ULS_{i\emptyset-BII_{end}} = ULS_{i\emptyset-BII} - 0,17 * \Delta S = 8,220 \text{ mm} - 0,026 \text{ mm} = 8,194 \text{ mm}$$

Daraus ergibt sich die endgültige Toleranz für den Außendurchmesser von Bauteil II:

$$T_{a\emptyset-BII_{end}} = ULS_{a\emptyset-BII_{neu}} - LLS_{a\emptyset-BII_{end}} = 12,620 \text{ mm} - 12,422 \text{ mm} \\ = 0,198 \text{ mm}$$

$$C_{a\emptyset-BII_{end}} = \frac{12,620 \text{ mm} + 12,422 \text{ mm}}{2} = 12,521 \text{ mm}$$

Da die Stegbreite nur über den Außendurchmesser anpasst wird, bleiben der Innendurchmesser und somit die Toleranzen gleich:

$$T_{i\emptyset-BII_{end}} = 0,017 \text{ mm}$$

$$C_{i\emptyset-BII_{end}} = \frac{8,035 \text{ mm} + 8,005 \text{ mm}}{2} = 8,014 \text{ mm}$$

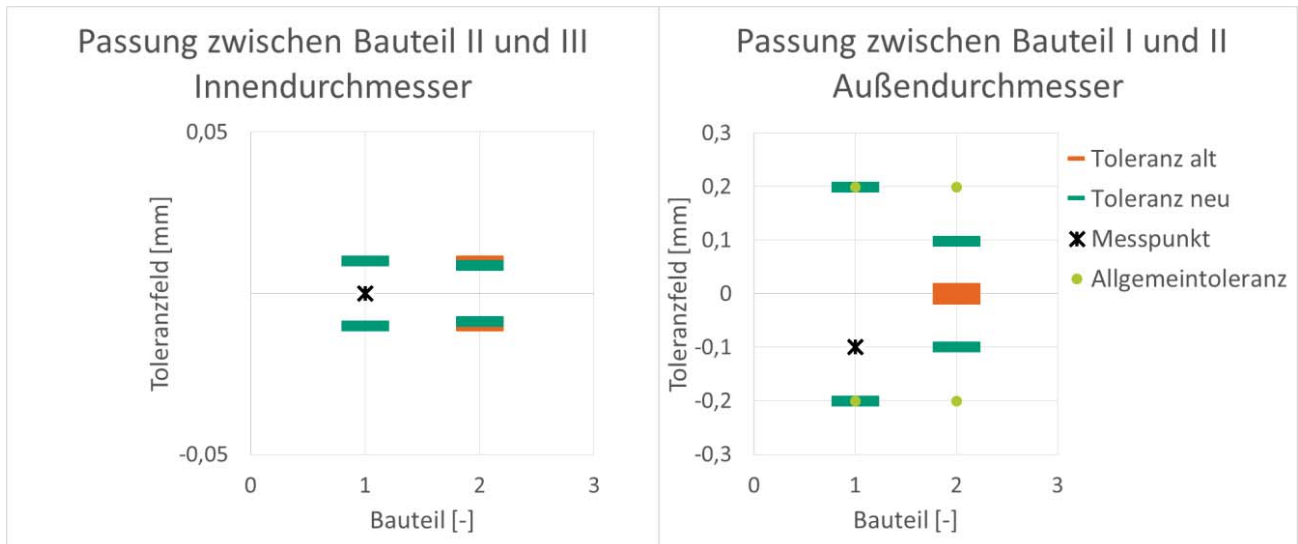
Daraus lässt sich an diesem Beispiel der konkrete Toleranzgewinn ableiten:

$$\text{Toleranzgewinn}_{\text{Außendurchmesser}} = \frac{T_{a\emptyset-BII_{end}}}{T_{a\emptyset-BII}} * 100\% \\ = \frac{0,198 \text{ mm}}{0,020 \text{ mm}} * 100\% = 987,84\%$$

$$Toleranzgewinn_{Innendurchmesser} = \frac{T_{i\phi-BII\ end}}{T_{i\phi-BII}} * 100\%$$

$$= \frac{0,017\ mm}{0,020\ mm} * 100\% = 87,162\%$$

Abbildung 47 zeigt die Toleranzfelder der Innen- und Außendurchmesser.



**Abbildung 47: Toleranzanpassungsdiagramm der Passungen nach dem zweiten Modell**

*Quelle: Eigene Darstellung*

Bei der Anwendung des zweiten Modells fällt auf, dass nur bei der Verbindung zwischen Bauteil I und Bauteil II ein Toleranzgewinn erzielt wird. Die zweite Verbindung zwischen Bauteil II und Bauteil III wird sogar negativ beeinflusst. Es ist ein Toleranzverlust zu verzeichnen. Daher wird in diesem konkreten Fall die Wahl des ersten Modells empfohlen.

---

## Schritt 5: Herstellkosten und Qualitätsbetrachtung

Ziel der Anwendung der Methodik der dynamischen Tolerierung ist es in diesem Praxisbeispiel, die Kosten der Produktion bei gleichbleibender Qualität deutlich zu senken. Die Toleranz des Innendurchmessers von Bauteil II konnte mittels Modell I um insgesamt 150 % (von 0,02 mm auf 0,03 mm) erweitert werden. Die Toleranz des Außendurchmessers konnte je nach Messwerten der Bauteile I und III zwischen 375 % und bis zu 1.275 % erweitert werden. Experten zufolge können durch diese Toleranzerweiterung im Bearbeitungsschritt „Drehen“ (vergleiche Abbildung 51) Kosten in Höhe von ca. 2,00 €/Stück eingespart werden. Ebenso kann der Bearbeitungsschritt „Anpassungsschritt“ komplett weggelassen werden, da dieser ausschließlich zur Fertigung der engen Toleranzen notwendig ist. Dieser dauert etwa 2,8 Minuten/Stück (bzw. 168 Sekunden/Stück). Die Personalkosten in der Fertigung in diesem Unternehmen liegen bei ca. 80,00 €/Stunde. Dadurch können pro Bauteil

$$80,00 \frac{\text{€}}{\text{Stunde}} * 168 \frac{\text{Sekunden}}{\text{Stück}} * \frac{1 \text{ Stunde}}{3.600 \text{ Sekunden}} = 3,73 \frac{\text{€}}{\text{Stück}}$$

eingespart werden.

Im Jahr werden ca. 15 000 Produkte dieser Art hergestellt. Dadurch kann das Einsparpotential pro Jahr berechnet werden:

$$\text{Ersparnis} = 15.000 \frac{\text{Stück}}{\text{Jahr}} * (2,00 + 3,73) \frac{\text{€}}{\text{Stück}} = 85.950 \frac{\text{€}}{\text{Jahr}}$$

Um den Einsatz der dynamischen Tolerierung in der Produktion vor Ort zu ermöglichen, müssen allerdings einige logistische Umstrukturierungen vorgenommen werden. Zudem müssen an den Prüfstationen zwei neue Messsysteme eingeführt werden. Diese sind mit erheblichen Mehrkosten verbunden. Nach Einschätzung der Experten vor Ort wird mit einem Mehraufwand für die Logistik (insbesondere die Zusammenführung der gepaarten Bauteile) von ca. 75.000,00 € gerechnet. Um den Außendurchmesser von Bauteil III zu vermessen, kann ein Profilprojektor eingesetzt werden. Die Experten

schätzen den Preis für einen geeigneten Profilprojektor inklusive Integration (insbesondere die Vernetzung mit dem Produktionsprozess) in die aktuelle Fertigungslinie auf ca. 50.000,00 €. Etwas anspruchsvoller ist die Vermessung des Innendurchmessers von Bauteil I. Diese kann beispielsweise mit einem Düsenmessdorn durchgeführt werden. Laut Experteneinschätzung würde die Integration eines solchen Messgerätes ca. 150.000,00 € kosten. Daraus ergibt sich eine nötige Gesamtinvestition von schätzungsweise:

$$\begin{aligned} \text{Invest} &= \text{Logistik} + \text{Messung}_{\text{Außendurchmesser}} + \text{Messung}_{\text{Innendurchmesser}} \\ &= 75.000 \text{ €} + 50.000 \text{ €} + 150.000 \text{ €} = 275.000 \text{ €} \end{aligned}$$

Daraus lässt sich folgende Amortisation berechnen

$$\text{Amortisation} = \frac{\text{Invest}}{\text{Ersparnis}} = \frac{275.000 \text{ €}}{85.950 \frac{\text{€}}{\text{Jahr}}} \approx 3,2 \text{ Jahre}$$

Die aktuelle Amortisationszeit ist verhältnismäßig lang. Somit ist eine Integration in die momentanen Fertigung vor Ort zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht als sinnvoll zu erachten.

Dennoch kann die Methodik der dynamischen Tolerierung in Zukunft voraussichtlich lohnend auch in diese Fertigung integriert werden: In Anbetracht zunehmender Digitalisierung, der rasanten Entwicklung der Fertigungsmesstechnik und immer strengerer behördlicher Vorschriften zum Schutz der Öffentlichkeit, die immer höhere Qualitätsstandards und Transparenz fordern<sup>31</sup>, kann davon ausgegangen werden, dass die Integration der Methodik in den kommenden Jahren deutlich günstiger werden wird. Diese Entwicklungen wurden bereits genauer in Kapitel 4 der vorliegenden Arbeit untersucht: Wie in Kapitel 4.1 beschrieben, geht der Trend in der Fertigungsmess-

---

<sup>31</sup> Beispielsweise wird im Bereich der Medizinprodukte ein weltweites System für eine einheitliche Produktkennzeichnung eingeführt. Dieses soll bei bestimmten Medizinprodukten verpflichtend sein (U.S. Department of Health and Human Services et al. 2018).

---

technik eindeutig in Richtung 100%-Prüfung sowie zur Integration der Fertigungsmesstechnik in die Produktionslinie. Zudem werden qualitative Prüfungen immer häufiger durch quantitative Prüfungen ersetzt und die quantitativen Daten zunehmend in den Produktionsprozess rückgeführt. Daher kann davon ausgegangen werden, dass viele Eigenschaften der hergestellten Produktmerkmale in Zukunft ohnehin erfasst werden, beziehungsweise geeignete Messmittel vor Ort vorhanden sind. Wie in Kapitel 4.2 beschrieben, werden Produktionsanlagen auch zunehmend vernetzt und verkettet, was eine zwingende Voraussetzung für die dynamische Tolerierung ist. Zudem ist eine weitere, zu erwartende Veränderung im Rahmen von Industrie 4.0 die zunehmende Verwendung so genannter „Smart Products“, welche in der Lage sind, Informationen über ihre Eigenschaften zu transportieren. Dadurch verringert sich der logistische Aufwand zur Integration der Methodik der dynamischen Tolerierung sowie zur Vernetzung von Messmittel und Produktionsprozess.

Da das Unternehmen, von dem dieses Praxisbeispiel stammt, große Ambitionen hat, die Produktion zu digitalisieren, kann angenommen werden, dass die Integration der Fertigungsmesstechnik in die Produktion, die Vernetzung der Produktionsanlagen sowie die Rückverfolgbarkeit einzelner Bauteile in den nächsten Jahren umgesetzt werden wird. Dadurch würden sich die Beschaffungs- und Integrationskosten der Fertigungsmesstechnik sowie die angenommenen Kosten für die Logistik deutlich reduzieren.

Die Amortisationszeit für die Integration der dynamischen Tolerierung in das hier untersuchte Industriebeispiel müsste dann neu berechnet werden. Dies erfolgt nun beispielhaft unter Annahme folgender Kosten:

- Mehraufwand Logistik (Trays, Beschriften, etc...): ca. 15 000,00 €
- Beschaffungskosten und Integrationskosten Profilprojektor: ca. 25 000,00 €
- Beschaffungskosten und Integrationskosten Düsenmessdorn: ca. 50 000,00 €

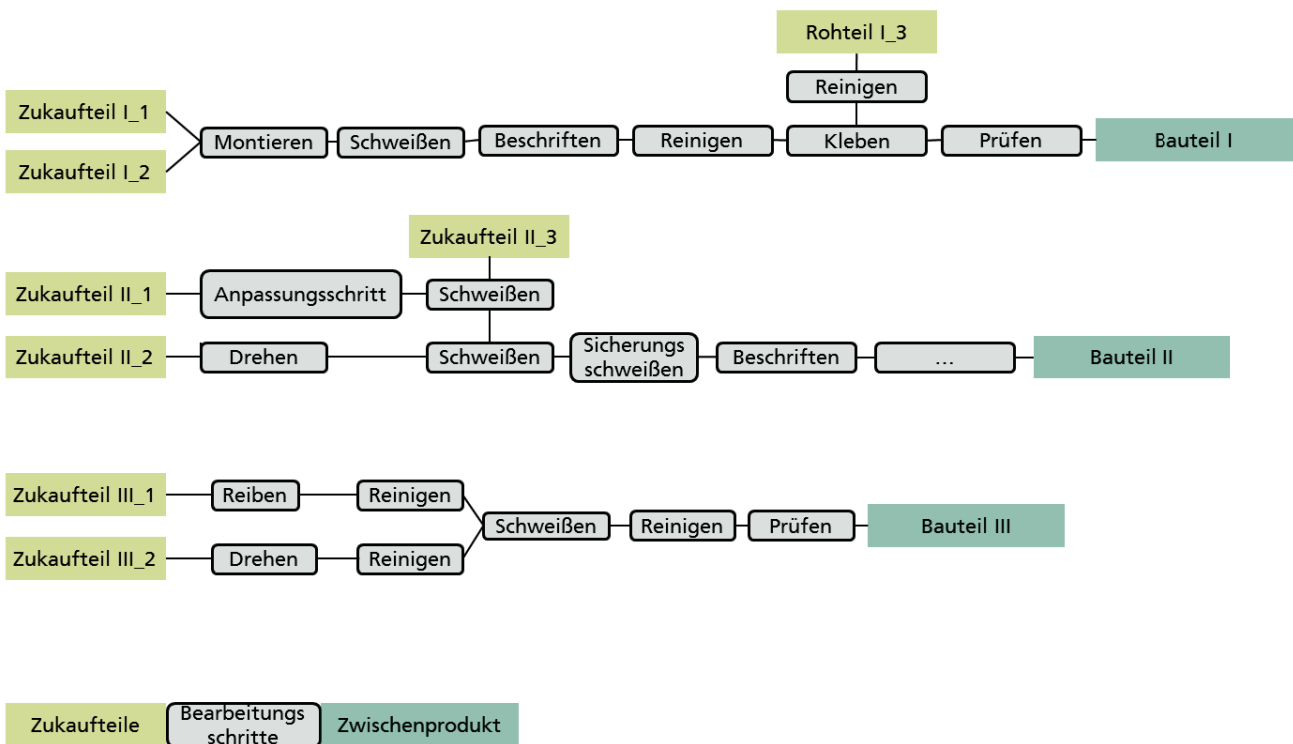
Damit lägen die Gesamtinvestitionen bei ca. 90 000,00 €. Daraus folgt:

$$Amortisation = \frac{Invest}{Ersparnis} = \frac{90.000 \text{ €}}{85.950 \frac{\text{€}}{\text{Jahr}}} \approx 1,05 \text{ Jahre}$$

Es kann daher davon ausgegangen werden, dass sich die Anwendung der Methodik der dynamischen Tolerierung in Zukunft im berechneten Beispiel deutlich schneller (hier etwa innerhalb eines Jahres, welche die allgemein akzeptierte Ein-Jahres-Frist einhält) amortisiert.

### Schritt 6: Integrationskonzept

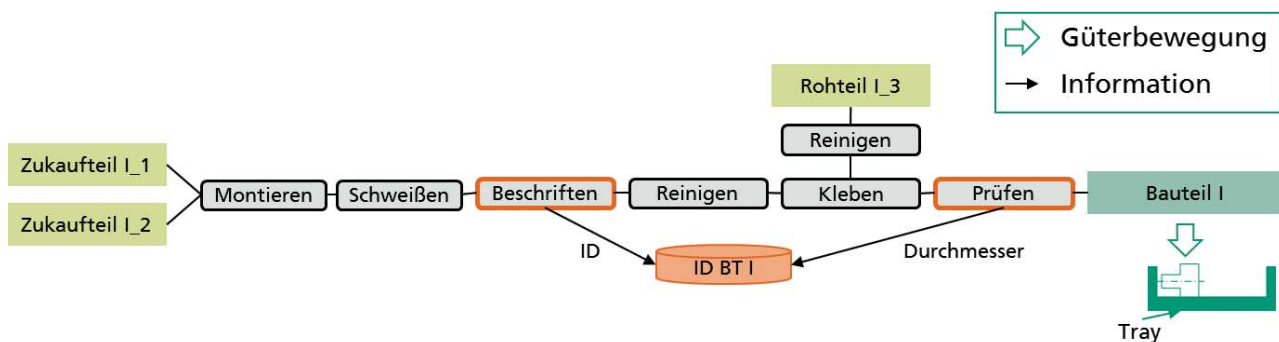
In einem ersten Schritt muss eine Bestandsaufnahme des aktuellen Bearbeitungs- und Montageablaufs erarbeitet werden (siehe Abbildung 48).



**Abbildung 48: Bestandsaufnahme des aktuellen Bearbeitungs- und Montageablaufs**

*Quelle: Eigene Darstellung*

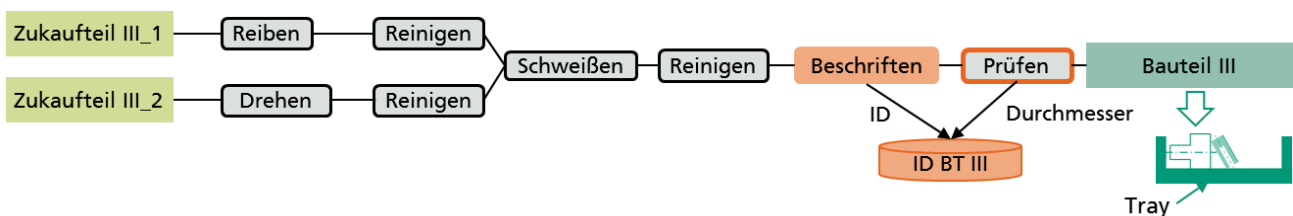
Bauteil I besteht aus drei Rohteilen, die miteinander verbunden werden. Da bereits ein Beschriftungsprozess durchgeführt wird, kann die ID jedes einzelnen Bauteils zu diesem Zeitpunkt direkt hinterlegt werden. Ebenso wird Bauteil I am Ende der Montage geprüft. Allerdings muss diese Prüfung um die Messung des Innendurchmessers erweitert werden. Der gemessene Wert muss in der Datenbank hinterlegt werden (vergleiche Abbildung 49).



**Abbildung 49: Prüf- und Beschriftungsergänzungen für Bauteil I**

*Quelle: Eigene Darstellung*

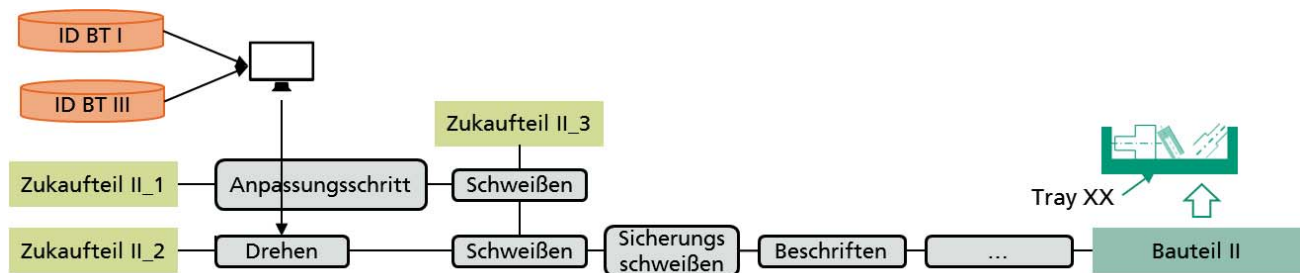
Bauteil III besteht aus zwei Rohteilen, die miteinander verschweißt werden. Zudem wird Bauteil III gereinigt und geprüft. Dabei wird bereits der Rundlauf des Bauteils geprüft. Ein zusätzlicher Prüfschritt zur Bestimmung des Außendurchmessers wäre an dieser Stelle ideal. Um die Messwerte immer einem einzelnen Bauteil zuordnen zu können, muss jedes Bauteil eine ID erhalten. Daher muss ein weiterer Prozessschritt „Beschriften“ integriert werden (vergleiche Abbildung 50).



**Abbildung 50: Prüf- und Beschriftungsergänzungen für Bauteil III**

*Quelle: Eigene Darstellung*

Bevor die Fertigung von Bauteil II beginnen kann, müssen jeweils ein Bauteil I und ein Bauteil III in einem Tray zusammengeführt werden. Mittels der ID der Bauteile können die Messwerte der relevanten Durchmesser aus der Datenbank entnommen und mit dem Algorithmus weiterverarbeitet werden. Die berechneten neuen Werte (Außen- und Innendurchmesser mit neuen Toleranzen) für Bauteil II können dann an die Prozessschritte „Drehen“ weitergegeben werden (vergleiche Abbildung 51).



**Abbildung 51: Zusammenführen der Bauteile**  
*Quelle: Eigene Darstellung*

### Datenbank

Da in diesem Unternehmen bereits SAP SE® eingesetzt wird, erfolgt die Umsetzung über diese Software.

---

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

In den vorangegangenen Kapiteln wurde die Plausibilität der dynamischen Tolerierung anhand von zwei Fallbeispielen aus der Literatur sowie einem Praxisbeispiel demonstriert. Dieses Kapitel fasst nun die Erkenntnisse zusammen, zählt die Vor- und Nachteile der Methodik der dynamischen Tolerierung auf und bietet einen Ausblick.

### 7.1 Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine Methodik entwickelt, welche die Herstellung eng tolerierter (sehr präziser) Baugruppen oder Module bei gleichbleibender Qualität zu geringeren Kosten erlaubt. Ebenso ermöglicht die Methodik eine Steigerung der Qualität bei gleichbleibenden Kosten. Die Methodik wird in dieser Arbeit als dynamische Tolerierung bezeichnet. Sie passt Bauteile einer Baugruppe während der Produktion aneinander an. Dadurch kann ein Toleranz- oder Qualitätsgewinn erreicht werden.

Die Methodik der dynamischen Tolerierung nutzt dabei aktuelle Entwicklungen in der Digitalisierung und in der Fertigungsmesstechnik. Zu den Fortschritten in der Fertigungsmesstechnik gehören ihr zunehmender Integrationsgrad, der Trend zur 100%-Prüfung sowie die schnelle Rückführung der Mess- und Prüfergebnisse in die Produktion. Die vierte industrielle Revolution, Industrie 4.0, schafft grundlegende Voraussetzungen für diese Arbeit. Eine wesentliche Rolle spielen hier die zunehmende Vernetzung von Maschinen und Anlagen, die Möglichkeit, die vorgegebenen Parameter einer Maschinensteuerung während der Produktion zu verändern (bottom-up Steuerungslogik), sowie die Möglichkeit, Bauteile zu identifizieren und ihnen Informationen mitzugeben (Smart Products). Zudem profitiert die Methodik von der zunehmenden Modularisierung: Die Austauschbarkeit einzelner Bauteile kann bei der dynamischen Tolerierung nur mit hohem technischem Aufwand ermöglicht werden. Durch die Modularisierung ist sie nicht mehr zwingend notwendig.

In einem ersten Schritt wurde die Problemstellung dargelegt: Es besteht ein Zielkonflikt zwischen der Präzision eines Produktmerkmals (und damit seiner Funktionalität) und seinen Herstellkosten. Daher wird nach dem Motto „So grob wie möglich, so fein wie nötig!“ (Matek et al. 2001); S. 21 konstruiert und entwickelt. Aus dieser Problemstellung wurde die Forschungsfrage dieser Arbeit abgeleitet: „*Wie können sowohl Kosten als auch Qualität in der digitalisierten Produktion optimiert werden?*“ Um diese Forschungsfrage zu beantworten, wurden drei Hypothesen formuliert, die in der Arbeit überprüft wurden:

*H1: Wenn die Toleranzen in der Produktion dynamisch angepasst werden, dann können die Kosten der Herstellung einer Baugruppe bei gleichbleibender Qualität gesenkt werden.*

*H2: Wenn die Toleranzen in der Produktion dynamisch angepasst werden, dann kann die Qualität und somit die Zuverlässigkeit einer Baugruppe bei gleichbleibenden Kosten gesteigert werden.*

*H3: Wenn die Toleranzen in der Produktion dynamisch angepasst werden, dann können sowohl die Qualität als auch die Kosten der Herstellung einer Baugruppe verbessert werden.*

Daraus resultierten die folgenden Ziele der Arbeit: Die Entwicklung, Verifikation und Validierung der Methodik der dynamischen Tolerierung.

In der anschließend erfolgten wissenschaftstheoretischen und -systematischen Einordnung wurde gezeigt, dass die vorliegende Arbeit den Ingenieurwissenschaften und somit der angewandten Handlungswissenschaft zugeordnet werden kann. Zudem konnte in Bezug auf das wissenschaftstheoretische Vorgehen verdeutlicht werden, dass die Hypothesen zunächst induktiv ermittelt und dann anhand von mehreren Fallbeispielen aus der Literatur und Praxis deduktiv überprüft wurden.

---

Anschließend wurden für das Verständnis der Arbeit relevante Begriffe definiert, insbesondere im Zusammenhang mit der geometrischen Bemaßung. Darauf aufbauend konnte anhand eines kurzen historischen Überblicks über die Herkunft von ISO-Toleranzen gezeigt werden, welchen Zweck diese erfüllen und dass sie auch heute noch ein zentrales Thema in der Entwicklung und Konstruktion bilden. Anschließend erfolgte eine Analyse der Zusammenhänge zwischen Maßgenauigkeit, Herstellkosten und Qualitätsverlusten.

Darauf aufbauend wurden existierende Ansätze, welche die Qualität von Baugruppen bei möglichst geringen Kosten optimieren, skizziert. Diese umfassen konstruktionsbestimmte, maschinen- und montageseitige Ansätze. Diese Verfahren wurden nach den Bewertungskriterien:

- Komplexität Konstruktion,
- Risiko für die Funktionalität,
- zusätzlich anfallende Kosten,
- Einsatzmöglichkeit Produktionstyp,
- Austauschbarkeit der Einzelkomponenten und
- Toleranzgewinn

bewertet. Dabei wurde gezeigt, dass viele der existierenden Ansätze zwar einige Bewertungskriterien gut, andere Bewertungskriterien dafür aber nicht oder nur suboptimal erfüllen. Maschinenseitige Ansätze haben beispielsweise den Vorteil, dass sie nicht in die Entwicklung und Konstruktion eingreifen. Da die zu fertigenden Bauteile entsprechend der Auslegung der Konstruktion und Entwicklung gefertigt werden, besteht hier auch kein erhöhtes Risiko. Auch die Austauschbarkeit der einzelnen Bauteile ist voll gewährleistet. Allerdings wird auch kein Toleranzgewinn erzielt. Dadurch entstehen erhebliche Kosten für hochpräzise Maschinen. Auch andere bestehende Ansätze zur Optimierung von Qualität und Kosten in der Produktion erfüllen die Bewertungskriterien nicht vollständig. Daher bedarf es einer neuen Methodik, die in der Lage ist,

eng tolerierte Bauteile einer Baugruppe bei gleichbleibender Qualität kostengünstig zu produzieren, ohne einen Mehraufwand für die Konstruktion zu erzeugen. Die Methodik muss dabei auf diverse Produktionstypen übertragbar sein. Alle diese Anforderungen bietet die Methodik der dynamischen Tolerierung.

Bevor sie genauer erklärt wurde, erfolgte in der vorliegenden Arbeit jedoch zunächst ein Blick auf die eingangs erwähnten aktuellen Entwicklungen in der Produktion, welche wichtige Voraussetzungen für die erfolgreiche und lohnende Umsetzung der hier entwickelten Methodik schaffen (vergleiche Kapitel 4).

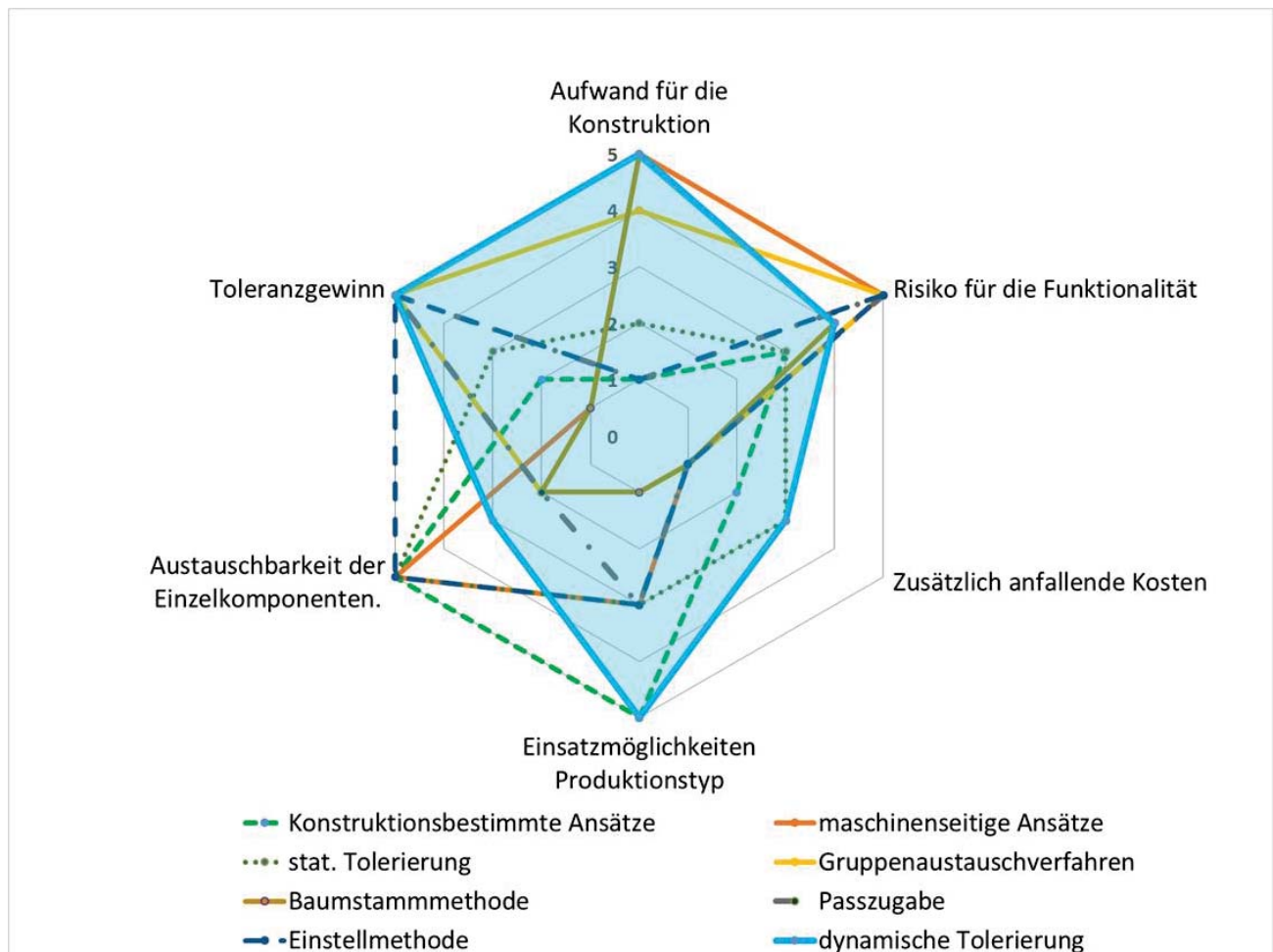
Nach der Darlegung dieser zentralen Voraussetzungen wurde die im Anschluss vorgestellte Methodik der dynamischen Tolerierung induktiv anhand des spezifischen Beispiels einer Welle-Nabe-Verbindung hergeleitet. Anschließend wurde eine allgemeingültige Vorgehensweise zu ihrer Umsetzung vorgestellt. Dabei wird ein erstes Bauteil einer Baugruppe gefertigt und das funktionsrelevante Produktmerkmal vermessen. Auf Grundlage der Vorgaben des Konstrukteurs oder Entwicklers und des ermittelten Messwerts können dann ein neues Mitten- oder Fertigungsmaß sowie die neuen Toleranzen für das nächste Bauteil der Baugruppe berechnet werden.

Daraufhin erfolgten Verifizierung und Validierung. Um den Nachweis zu erbringen, dass die Herstellkosten durch die Anwendung der Methodik reduziert werden können, wurde sie exemplarisch auf zwei Literaturbeispiele angewendet und es wurden entsprechende Algorithmen entwickelt. Bei den Beispielen handelte es sich um ein Rillenkugellager, welches über eine Presspassung mit einer Welle verbunden werden sollte, und eine lineare Maßkette eines Getriebes. Ebenso wurde am Beispiel des Rillenkugellagers gezeigt, dass auch die Qualität einer vorhandenen Produktion durch diese Methodik erhöht werden kann (Qualitätsnachweis nach Taguchi). Somit konnte die leitende Forschungsfrage der Arbeit, „*Wie können sowohl Kosten als auch Qualität in der digitalisierten Produktion optimiert werden?*“, mit dem Einsatz der dynamischen Tolerierung beantwortet werden. Die Validierung der Methodik erfolgte dann an

einem industriellen Beispiel. Auch hier konnten sowohl die technische Machbarkeit als auch die potentiellen Ersparnisse gezeigt werden.

## 7.2 Stärken und Einsatzgrenzen der Methodik

Um die Stärken und Einsatzgrenzen der Methodik der dynamischen Tolerierung aufzuzeigen, wird das Netzdiagramm aus Kapitel 3.4 noch einmal herangezogen. Dabei werden die Bewertungskriterien aus Kapitel 3 genutzt, um die Methodik zu bewerten und mit den existierenden Lösungsansätzen der beschriebenen Problemstellung zu vergleichen. Abbildung 52 zeigt das erweiterte Netzdiagramm. Die Fläche der dynamischen Tolerierung ist in Hellblau eingetragen.



**Abbildung 52: Netzdiagramm inklusive der dynamischen Tolerierung**  
*Quelle: Eigene Darstellung*

Das Netzdiagramm zeigt, dass die Methodik der dynamischen Tolerierung einen Toleranzgewinn erzeugt, ohne einen zusätzlichen Aufwand für die Konstruktion (und Entwicklung) zu verursachen. Zudem ist sie vielseitig in unterschiedlichen Produktionstypen einsetzbar. Damit unterscheidet sich die Methodik von vielen existierenden Lösungsansätzen.

Im Folgenden werden zunächst die Einsatzgrenzen der dynamischen Tolerierung (das Risiko für die Funktionalität, die zusätzlich anfallenden Kosten und die Austauschbarkeit der Einzelkomponenten) in den Blick genommen. Anschließend werden ihre Stärken (Einsatzmöglichkeiten Produktionstyp, Toleranzgewinn und Aufwand für die Konstruktion) diskutiert.

### **7.2.1 Einsatzgrenzen**

Die Methodik der dynamischen Tolerierung birgt ein gewisses Produktrisiko. Dieses ist gering, da sie den Fokus auf die Funktionalität der Baugruppe legt (vergleiche Kapitel 3). Dennoch: Um den jeweiligen Algorithmus zur Berechnung des Fertigungsmaßes sowie der dazugehörigen Toleranzen des zu paarenden Bauteils (oder der zu paarenden Bauteile) abzuleiten, werden im Vorfeld Bedingungen abgeleitet, welche die Funktionalität der Baugruppe sicherstellen. Werden diese Bedingungen richtig abgeleitet und mathematisch korrekt formuliert, besteht kein weiteres Risiko bei der Produktion der Baugruppe. Bei der Ableitung der Bedingungen sowie der mathematischen Formulierung können jedoch Fehler unterlaufen. Daher wird die Methodik hier mit einer vier (manche Produkte können durch den Zufall bedingt Mängel aufweisen) statt einer fünf (die angewendete Methodik hat keinen Einfluss auf das Produktrisiko) bewertet.

Wie das industrielle Fallbeispiel gezeigt hat, sind die zusätzlich anfallenden Kosten für die dynamische Tolerierung im Moment recht hoch. Dies liegt im vorliegenden Beispiel vor allem daran, dass zum einen die Messmittel nicht vorhanden sind und eine

---

Integration neuer Prüfmittel sehr lange Anlauf- beziehungsweise Ramp-up-Phasen besitzt und somit hohe Kosten verursacht. Zum anderen verfügen die vorhandenen Fertigungsanlagen nicht über die aktuellsten Maschinensteuerungen. Dadurch ist die Verkettung dieser Fertigungsanlagen mit viel Aufwand und somit hohen Kosten verbunden. Um die dynamische Tolerierung zu ermöglichen, müsste in dem Fallbeispiel zuerst die Logistik angepasst werden, was wiederum einen Mehraufwand bedeutet.

Allerdings ist der Grad der Digitalisierung von Unternehmen zu Unternehmen unterschiedlich. Je höher der bestehende Digitalisierungsgrad, desto kostengünstiger wird die Integration der Methodik der dynamischen Tolerierung. Zudem sprechen die aktuellen Trends in der Fertigungsmesstechnik (zunehmender Integrationsgrad der Fertigungsmesstechnik sowie der Trend zur 100%-Prüfung und zur Rückführung der Mess- und Prüfdaten, vergleiche Kapitel 4.1) sowie aktuelle Entwicklungen in der Produktion im Rahmen der vierten industriellen Revolution (Smart Products, verkettete Maschinen und bottom-up Steuerungslogiken, vergleiche Kapitel 4.2) dafür, dass die zusätzlich anfallenden Kosten in Zukunft geringer werden und die Amortisationsdauer sich deutlich verkürzt.

Genormte Toleranzsysteme dienen hauptsächlich dazu, die Austauschbarkeit von einzelnen Bauteilen zu realisieren (vergleiche Kapitel 2.2). Diese ist durch die Methodik der dynamischen Tolerierung nur bedingt gegeben. Die Austauschbarkeit eines einzelnen Bauteils kann nur dann realisiert werden, wenn einzelne Bauteile identifizierbar sind, und wenn die Herstelldaten und somit das Fertigungsmaß beziehungsweise Mittenmaß und die dazugehörigen Toleranzen bekannt sind. Allerdings stellt sich die Frage, ob die Austauschbarkeit von einzelnen Bauteilen im Zuge der zunehmenden Modularisierung immer noch notwendig ist. Da immer mehr Produkte aus Modulen (vergleiche Kapitel 4.3) bestehen und der Austausch, beispielsweise von defek-

ten Komponenten, nur noch auf Modulebene stattfindet, wird das Ziel der Austauschbarkeit der Einzelkomponenten hinfällig. Damit rückt die eigentliche Funktion der Passung im Modulverbund in den Vordergrund.

### 7.2.2 Stärken

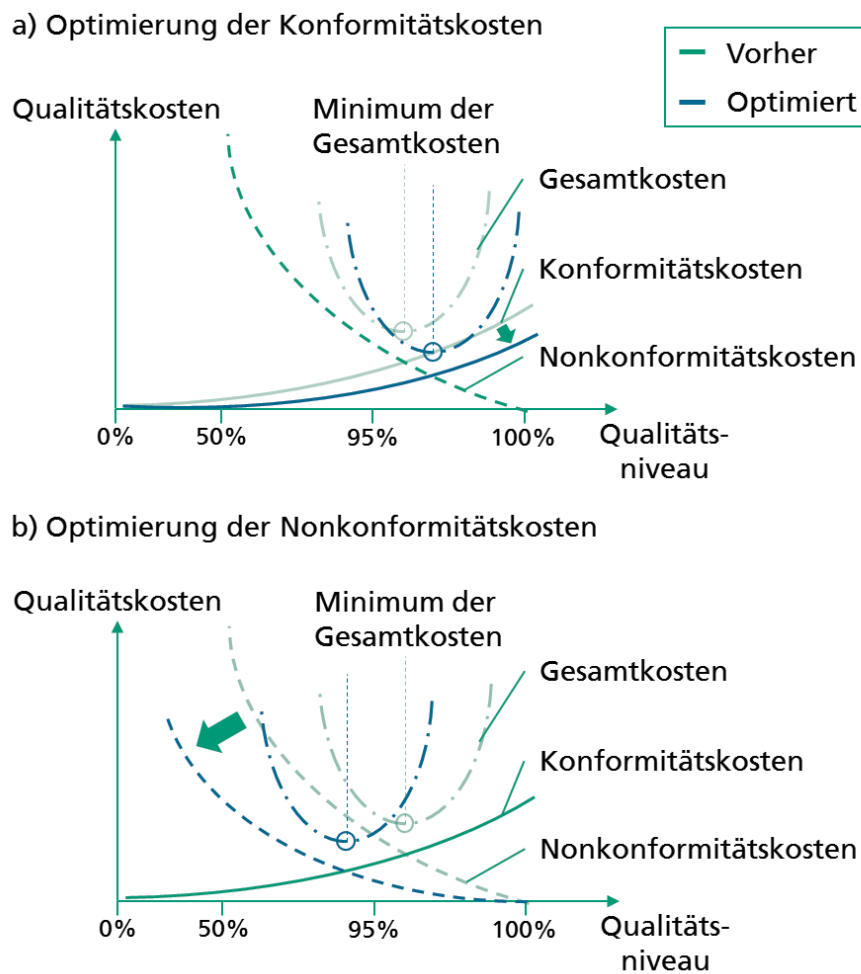
Die Methodik der dynamischen Tolerierung weist einige entscheidende Stärken gegenüber bestehenden Ansätzen zur Lösung der beschriebenen Problemstellung auf. Anders als die statistische Tolerierung, das Gruppentauschverfahren, die Passzugabe, die Baumstamm- oder die Einstellmethode ist die dynamische Tolerierung für alle Produktionstypen (Einzel-, Kleinserien-, Serien oder Massenfertigung) einsetzbar.

Allerdings ist zu beachten, dass ihre Amortisationsdauer unter anderem abhängig von der Stückzahl der produzierten Baugruppen ist. Unter der Annahme, dass die notwendige Infrastruktur für die dynamische Tolerierung in den kommenden Jahren in den meisten produzierenden Unternehmen vorhanden sein wird, relativieren sich jedoch die notwendigen Investitionskosten, und die Amortisationsdauer verkürzt sich. Dadurch spielt die Stückzahl dann eine untergeordnete Rolle.

Zudem kann die Methodik zur Herstellung von Produkten mit einer hohen Variantenanzahl angewendet werden, bei denen die gepaarten Produktmerkmale lediglich in der Größe variieren.. Lediglich die Konstruktionsdaten müssen vorher an die jeweilige zu produzierende Variante angepasst werden.

Die dynamische Tolerierung führt zu einem Toleranzgewinn, ohne die Qualität der Baugruppe zu beeinflussen. Im Gegensatz dazu wird bei den konstruktionsbestimmten oder maschinenseitigen Ansätzen kein Toleranzgewinn erzielt. Zudem kann die Methodik auch dazu genutzt werden, die Qualität der Baugruppe bei gleichbleibenden Herstellkosten zu erhöhen. Die Methodik erlaubt so beispielsweise eine Optimie-

rung der Nullserie<sup>32</sup>. Durch ihre Anwendung können somit zum einen die Konformitätskosten durch das Erreichen eines Toleranzgewinns bei gleichbleibender Qualität reduziert werden (vergleiche Abbildung 53 a)). Zum anderen können die Nonkonformitätskosten durch Optimierung der Qualität bei gleichbleibenden Herstellkosten reduziert werden (vergleiche Abbildung 53 b)). In beiden Fällen werden dadurch die Qualitätskosten gesenkt.



**Abbildung 53: Einfluss der dynamischen Tolerierung auf die Qualitätskosten**  
*Quelle: Eigene Darstellung*

<sup>32</sup> Die Nullserie ist eine seriennahe Produktion, in der zu 100% Serienwerkzeuge verwendet werden. (Schuh et al. 2008); S. 2. Sie dient möglicher Qualitätsänderungen der zu fertigenden Bauteile, bevor die eigentliche Serienfertigung beginnt (Ulrich 2016); S. 26.

Auch bei existierenden Methoden wie der Einstellmethode, der Passzugabe oder dem Gruppentauschverfahren kann ein Toleranzgewinn erzielt werden. Allerdings hebt sich die Methodik der dynamischen Tolerierung insofern ab, als dass die Anwendung des Gruppenaustauschverfahrens nur bei einer großen Stückzahl möglich ist. Bei der Passzugabe oder der Einstellmethode wird darüber hinaus in die Konstruktion eingegriffen. Bei der dynamischen Tolerierung wird der Konstrukteur dagegen nicht weiter gefordert. Im Gegenteil, er kann seine Bauteile durch den in der Produktion erzeugten Toleranzgewinn sehr eng tolerieren, ohne sich um die Herstellkosten und Herstellbarkeit der Bauteile sorgen zu müssen.

Eine weitere Besonderheit der Methodik ist, dass die gefertigten Bauteile maßlich von den Vorgaben der technischen Zeichnung abweichen können, da sie an das zuvor gefertigte Bauteil beziehungsweise die zuvor gefertigten Bauteile angepasst werden. Dies erschwert das Plagiiere von Produkten erheblich, da nur schwer auf die Maßangaben sowie deren Toleranzen geschlossen werden kann. Gleichzeitig ist diese Abweichung für den Kunden nicht von Nachteil, denn er stellt Anforderungen an die Zuverlässigkeit der Produktfunktionen und nicht an die gefertigten Produktmerkmale.

### **7.3 Ausblick**

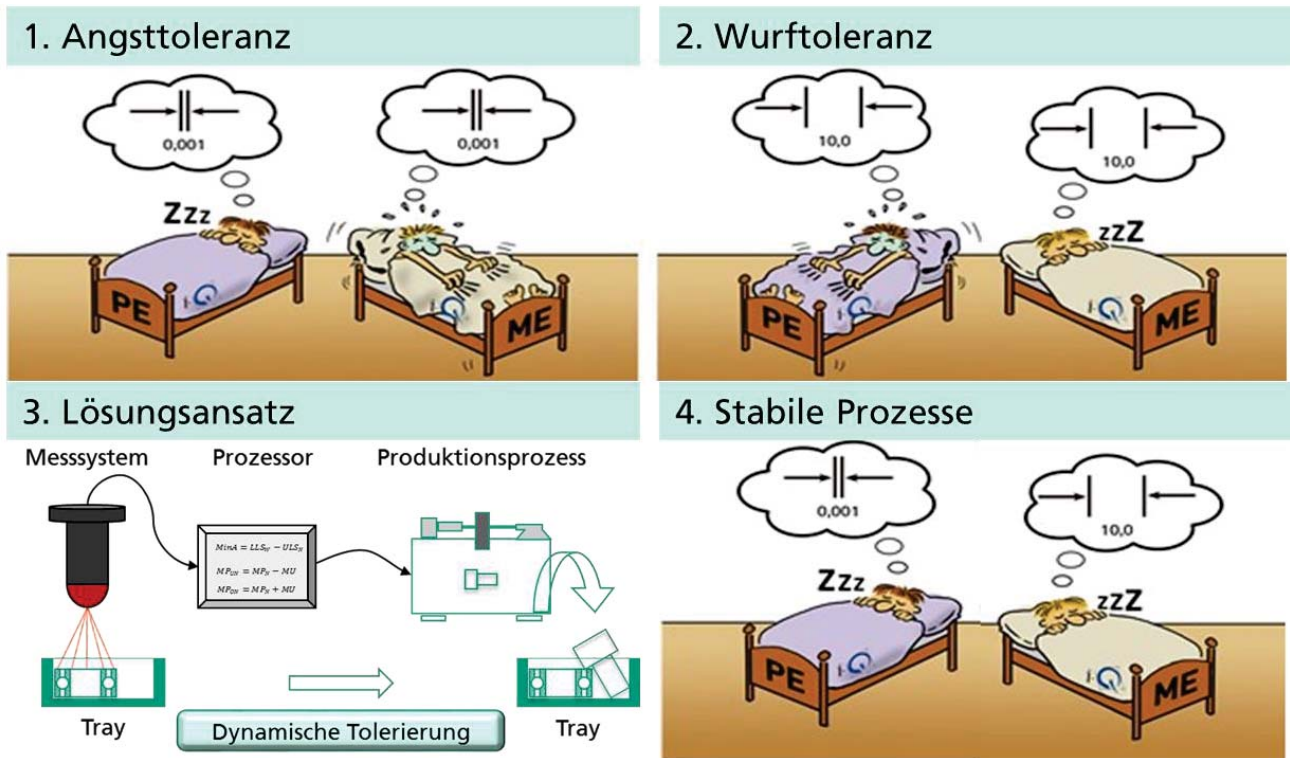
Eine der größten Herausforderungen für die dynamische Tolerierung ist es, die Austauschbarkeit einzelner Bauteile zu gewährleisten. Dies ist zwar möglich, erfordert aber einen hohen technischen Aufwand. Im Zuge der zunehmenden Modularisierung (vergleiche Kapitel 4.3) ist die Austauschbarkeit einzelner Baugruppen jedoch nicht mehr zwingend notwendig. Dieser potentielle Nachteil der Methodik relativiert sich somit zunehmend.

Darüber hinaus sind die Kosten zur Integration der Methodik der dynamischen Tolerierung derzeit noch recht hoch (vergleiche Kapitel 6). Aktuelle Trends in der Pro-

---

duktion (Industrie 4.0) und der Fertigungsmesstechnik schaffen jedoch eine für die dynamische Tolerierung wesentliche Infrastruktur. In den digitalisierten Unternehmen der Zukunft kann die Methodik somit voraussichtlich preisgünstig integriert werden. Im Validierungsbeispiel konnte zudem durch Anwendung der Methodik ein Herstellschritt eingespart werden. Ob und in welchem Umfang Herstellschritte auch bei anderen Fertigungslinien durch die Anwendung der Methodik reduziert werden können, und wie hoch die Gesamtkosten für deren Integration in die Fertigung sind, muss für die jeweilige Fertigungslinie individuell untersucht werden. Dabei sind, wie eingangs erwähnt, die notwendigen Arbeitsvorbereitungen (Maschinenauswahl, Fertigungsschritte etc.) von zentraler Bedeutung. Zudem muss der hier entwickelte Algorithmus stets individuell angepasst werden. Genauere Berechnungen der Amortisationszeit auf Grundlage von vorhandenen Maschinen in Produktionsunternehmen müssen daher Gegenstand weiterer Forschung sein.

Abbildung 54 illustriert verschiedene Sichtweisen auf kritisch tolerierte Bauteile und karikiert dabei noch einmal die Vorteile der dynamischen Tolerierung sowohl für die Konstruktion als auch die Produktion.



**Abbildung 54: Die verschiedenen Sichtweisen auf tolerierte Bauteile**  
*Quelle: Eigene Darstellung nach (i-Q Schacht et al.)*

Das erste Bild zeigt einen Konstrukteur (PE steht für Product Engineer), der, um die Funktion seiner Baugruppe sicherzustellen, eine Angsttoleranz (siehe Kapitel 1.1) einsetzt. Dadurch kann er gut schlafen. Allerdings macht sich der Produktionsplaner (ME steht für Manufacturing Engineer) große Sorgen, wie er die engen Toleranzen fertigen kann, und hat aus diesem Grund eine miserable Nacht. Setzt der Konstrukteur allerdings eine großzügig bemessene so genannte Wurf toleranz ein (Bild 2), schläft der Produktionsplaner bestens, da dieser Toleranzbereich einfach zu fertigen ist. Der Konstrukteur hingegen schläft schlecht, da er nicht weiß, ob die Funktion seiner Baugruppe bei allen Passungen sichergestellt ist.

Die dynamische Tolerierung (Bild 3) läutet dann jedoch einen Paradigmenwechsel in der Produktion ein: Die Produktionsplanung wird von der Konstruktion und Entwicklung entkoppelt. Bisher ist die Produktionsplanung immer so ausgelegt, dass die

---

Bauteile entsprechend der vorgegebenen technischen Zeichnung gefertigt werden. Durch die Methodik der dynamischen Tolerierung ist dies nicht mehr nötig. Stattdessen kann die Produktion mit neuen Fertigungs- beziehungsweise Mittenmaßen sowie neuen, erweiterten Toleranzfeldern arbeiten. Das resultiert in einer ruhigen Nacht sowohl für den Konstrukteur als auch für den Produktionsplaner (vergleiche Bild 4).

Die dynamische Tolerierung erlaubt es somit, die Produktion enger Toleranzen kostengünstig umzusetzen, die Produktqualität einer vorhandenen Produktion anzuheben, oder beide Faktoren zu optimieren. Durch ihren Einsatz werden die Qualitätskosten erheblich reduziert. Damit kann der Einsatz der Methodik die Wettbewerbsfähigkeit produzierender Unternehmen deutlich stärken.

---

## 8 Literaturverzeichnis

- Abdel-Malek et al. 1994** Abdel-Malek, L; Asadathorn, N., 1994.  
Process and Design Tolerance in Relation to Manufacturing Cost: A Review & Extension.  
*The Engineering Economist* **40** (1), S. 73–100  
DOI: 10.1080/00137919408903139
- Ahrberg et al. 2008** Ahrberg, R; Böge, A; Arndt, K. D; Bahmann, W;  
Bauer, J;  
Borutzki, U; Böge, G; Böge, W; Heinrich, B; Kemnitz, A., 2008.  
*Vieweg Handbuch Maschinenbau: Grundlagen und Anwendungen der Maschinenbau-Technik.*  
Wiesbaden: Vieweg+Teubner.  
ISBN 9783834890924
- Allgöwer et al. 2012** Allgöwer, F; Zheng, A., 2012.  
*Nonlinear Model Predictive Control.*  
Basel: Birkhäuser.  
ISBN 9783034884075
- Artischewski 2014** Artischewski, F., 2014.  
*Qualitätssicherung 4.0: Moderne Ansätze und Anforderungen der Qualitätssicherung im Kontext von Industrie 4.0*
- Ashton 2009** Ashton, K., 2009.  
That 'Internet of Things' Thing: In the real world, things matter more than ideas.  
*RFID Journal*, 2009  
Verfügbar unter: <https://www.rfidjournal.com/articles/view?4986>  
Zugriff am: 21.03.2019
- Bach et al. 2006** Bach, F. W; Möhwald, K; Laarmann, A; Wenz, T., 2006.  
*Moderne Beschichtungsverfahren.*  
Weinheim: Wiley.  
ISBN 9783527608898
- Barner et al. 2013** Barner, A; Bullinger, H.-J; Kagermann, H; Oetker, A;  
Ottenberg, K; Weber, T., 2013.  
*Perspektivenpapier der Forschungsunion Wirtschaft*

---

*und Wissenschaft begleiten die Hightech-Strategie  
Forschungsunion: Wohlstand durch Forschung - Vor  
welchen Aufgaben steht Deutschland?*

Berlin

Verfügbar unter: [http://www.forschungsunion.de/pdf/forschungsunion\\_perspektivenpapier\\_2013.pdf](http://www.forschungsunion.de/pdf/forschungsunion_perspektivenpapier_2013.pdf)

Zugriff am: 24.04.2018

**Bassler 2010**

Bassler, A., 2010.

*Die Visualisierung von Daten im Controlling.*

Siegburg : Josef Eul Verlag GmbH.

ISBN 9783899369397

**Behera et al. 2015**

Behera, A. K.; Lu, B.; Ou, H.; Qin, Y.; Dean, T. A.;  
Lin, J.; Yuan, S. J.; Vollertsen, F., 2015.

Characterization of shape and dimensional accuracy of  
incrementally formed titanium sheet parts.

*MATEC Web of Conferences* **21**, S. 4014

DOI: 10.1051/mateconf/20152104014

**Bettenhausen et al. 2011**

Bettenhausen, K. D; Schmitt, R.; Berthold, J. (Hrsg.) ,  
2011.

*Fertigungsmesstechnik 2020: Technologie-Roadmap  
für die Messtechnik in der industriellen Produktion.*

Düsseldorf: VDI

**BMBF 2017**

Bundesministerium für Bildung und Forschung  
(BMBF) - Referat Produktion und Dienstleistung; Zu-  
kunft der Arbeit (Hrsg.) , 2017.

*Industrie 4.0: Innovation für die Produktion von mor-  
gen.*

Berlin

Verfügbar unter: <https://www.bmbf.de/de/zukunftsprojekt-industrie-4-0-848.html>

Zugriff am: 15.01.2019

**BMBF 2018**

Bundesministerium für Bildung und Forschung, 2018.  
*Industrie 4.0*

Verfügbar unter: <https://www.bmbf.de/de/zukunftsprojekt-industrie-4-0-848.html>

Zugriff am: 15.01.2019

**BMWi 2018**

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, 2018.  
*Was ist Industrie 4.0*

Verfügbar unter: <https://www.plattform-i40.de/I40/Navigations/DE/Industrie40/WasIndustrie40/was-ist-industrie-40.html>

Zugriff am: 26.04.2018

**Bohn 1998**

Bohn, M., 1998.

*Toleranzmanagement im Entwicklungsprozess: Reduzierung der Auswirkungen von Toleranzen auf Zusammenbauten der Automobil-Karosserien.*

Karlsruhe, Dissertation, 1998

<https://publikationen.bibliothek.kit.edu/1000018816/1980105>

**Borgmeier et al. 2017**

Borgmeier, A.; Grohmann, A.; Gross, St. F., 2017.

*Smart services und Internet der Dinge: Geschäftsmodelle, Umsetzung und Best Practices : Industrie 4.0, Internet of Things (IoT), Machine-to-Machine, Big Data, Augmented Reality Technologie.*

München: Hanser.

ISBN 9783446452701

**Borner 2005**

Borner, R., 2005.

*Prozessmodell für projekt- und erfolgsorientiertes Wissensmanagement zur kontinuierlichen Verbesserung in Bauunternehmen.*

Zürich: vdf, Hochschulverlag.

ISBN 9783728129956

**Box et al. 1951**

Box, G; Wilson, K.

On the Experimental Attainment of Optimum Conditions.

*Wiley for the Royal Statistical Society: Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)*

1951 (1), S. 1–45

**Brüggemann et al. 2015**

Brüggemann, H.; Bremer, P., 2015.

*Grundlagen Qualitätsmanagement: Von den Werkzeugen über Methoden zum TQM.*

2., überarb. und erw. Aufl.

Wiesbaden: Springer Vieweg.

Lehrbuch.

ISBN 9783658092207

DOI: 10.1007/978-3-658-09221-4

- 
- Bruhn 2016** Bruhn, M., 2016.  
*Qualitätsmanagement für Dienstleistungen: Handbuch für ein erfolgreiches Qualitätsmanagement. Grundlagen – Konzepte – Methoden.*  
Berlin, Heidelberg, BullinmBBB : Springer.  
ISBN 9783662503607
- Budak 2006** Budak, E., 2006.  
Analytical models for high performance milling. Part I: Cutting forces, structural deformations and tolerance integrity.  
*International Journal of Machine Tools and Manufacture* **46** (12-13), S. 1478–1488  
DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2005.09.009
- Bullinger et al. 2003** Bullinger, H.-J.; Warnecke, H. J.; Westkämper, E., 2003.  
*Neue Organisationsformen im Unternehmen: Ein Handbuch für das moderne Management.*  
2., neu bearbeitete und erweiterte Auflage.  
Berlin, Heidelberg: Springer.  
VDI-Buch.  
ISBN 3662089351
- Buxbaum 1919** Buxbaum, B., 1919.  
*Beitrag zur Entwicklungsgeschichte der Passungen: Die Entstehung des Austauschbaues*
- Chen et al. 2012** Chen, D.; Fan, J.; Zhang, F., 2012.  
Dynamic and static characteristics of a hydrostatic spindle for machine tools.  
*Journal of Manufacturing Systems* **31** (1), S. 26–33  
DOI: 10.1016/j.jmsy.2010.11.006
- Chouvion et al. 2011** Chouvion, B.; Popov, A.; Ratchev, S.; Mason, C.; Summers, M., 2011.  
*Interface Management in Wing-Box Assembly: SAE Technical Paper: Aerospace Technology Conference and Exposition*  
DOI: 10.4271/2011-01-2640
- Dahl 2016** Dahl, C. 2016.  
*Die sieben Grundsätze von Qualitätsmanagement*

Verfügbar unter: <https://www.dgq.de/fachbeitraege/die-7-grundsaeetze-des-qualitaetsmanagements/>  
Zugriff am: 22.01.2019

**Dieter 1983**

Dieter, G. E., 1983.  
*Engineering design: A materials and processing approach.*  
New York: McGraw-Hill.  
McGraw-Hill Series in materials science and engineering.  
ISBN 978-0070168961

**Dietrich et al. 2017**

Dietrich, E; Schulze, A., 2017.  
*Eignungsnachweis von Prüfprozessen: Prüfmittelfähigkeit und Messunsicherheit im aktuellen Normenumfeld*  
München: Carl Hanser Verlag GmbH & Company KG.  
ISBN 9783446451711

**Faes 2013**

Faes, G., 2013.  
*SPC – Statistische Prozesskontrolle: Eine praktische Einführung in die statistische Prozesskontrolle und deren Nutzung.*  
Norderstedt: Books on Demand.  
ISBN 9783848287932

**Feigenbaum 2009**

Feigenbaum, A. V., 2009.  
*Total quality control.*  
Princeton, N.J. : Recording for the Blind & Dyslexic.  
ISBN 978-0071626286

**Fein et al. 2016**

Fein, M.; Böck-Schnepps, M.; Strommer, S.; Niederer, M.; Steinboeck, A.; Kugi, A., 2016.  
Modellbasierte Regelung und Optimierung von kontinuierlichen Bandglühöfen.  
*gwi - gaswärme international* **65**, S. 61–69

**Feldmann et al. 2014**

Feldmann, K.; Schöppner, V.; Spur, G. (Hrsg.) , 2014.  
*Handbuch Fügen, Handhaben, Montieren.*  
2 Auflage.  
München: Hanser.  
ISBN 978-3-446-43656-5

**Fleischer et al. 2017**

Fleischer, J; Haag, S; Hofmann, J., 2017.  
*Quo Vadis Wickeltechnik?: Eine Studie zum aktuellen Stand der Technik und zur Recherche zukünftiger Trends im Automobilbau*

- 
- Forschungsunion 2006** Die Forschungsunion Wirtschaft – Wissenschaft, 2006.  
*Die Forschungsunion Wirtschaft – Wissenschaft*  
Verfügbar unter: <http://www.forschungsunion.de/>  
Zugriff am: 15.01.2019
- Fortino et al. 2014** Fortino, G; Trunfio, P., 2014.  
*Internet of Things Based on Smart Objects: Technology, Middleware and Applications.*  
Basel: Springer International.  
ISBN 9783319004914
- Fritsch 2013** Fritsch, M., 2013  
*Qualitätskosten - Qualitätskostenerfassung: Ein wichtiges Instrument zur Sicherung der Wettbewerbsfähigkeit eines Unternehmens.*  
Hamburg: Diplomarbeiten Agentur.  
Wirtschaft.  
ISBN 9783832413743
- Fu et al. 2016** Fu, Q.; Lorite, G. S.; Rashid, Md. Masud-Ur; Neuhaus, R.; Cada, M.; Hubicka, Z.; Pitkänen, O.; Selkälä, T.; Uusitalo, J.; Glanz, C.; Kolaric, I.; Kordas, K.; Niculescu, C.-M.; Toth, G., 2016.  
High dynamic stiffness mechanical structures with nanostructured composite coatings deposited by high power impulse magnetron sputtering.  
*Carbon* **98**, S. 24–33  
DOI: 10.1016/j.carbon.2015.10.074
- Gal 2019** Gal, T., 2019.  
*Betriebliche Entscheidungsprobleme, Sensitivitätsanalyse und Parametrische Programmierung.*  
Berlin: De Gruyter.  
Operations Research Ser.  
ISBN 3110835703
- Galsworth 1994** Galsworth, G., 1994.  
*Smart, simple design: Using variety effectiveness to reduce total costs and maximise customer selection.*  
Essex Junction, Vt. : Wiley.  
ISBN 9780939246625
- Geiger et al. 2007** Geiger, W; Kotte, W., 2007.  
*Handbuch Qualität: Grundlagen und Elemente des Qualitätsmanagements: Systeme - Perspektiven.*

- Wiesbaden: Vieweg+Teubner.  
ISBN 9783834894298
- Gerboth 2002** Gerboth, T., 2002.  
*Statistische Prozessregelung bei administrativen Prozessen im Rahmen eines ganzheitlichen Prozesscontrollings.*  
Berlin, Technische Universität Berlin, Dissertation, 2002  
Hamburg: Diplomica Verlag GmbH
- Gershenson et al. 2003** Gershenson, J. K; Prasad, G. J; Zhang, Y., 2003.  
Product modularity: Definitions and benefits.  
*Journal of Engineering Design* **14** (3), S. 295–313  
DOI: 10.1080/0954482031000091068
- Göpfert 2016** Göpfert, I., 2016.  
*Logistik der Zukunft - Logistics for the Future.*  
7. Aufl.  
Wiesbaden: Springer Gabler.  
ISBN 9783658122553
- Greven 2013** Greven, E., 2013.  
*Technologie: Lehr- und Arbeitsbuch für den Fachkundeunterricht in metallverarbeitenden Berufen.*  
Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag.  
ISBN 9783322836236
- Grüne et al. 2016** Grüne, L; Pannek, J., 2016.  
*Nonlinear Model Predictive Control: Theory and Algorithms.*  
Basel: Springer International.  
ISBN 9783319460246
- Guo et al. 2015** Guo, J.; Liu, Z.; Li, B.; Hong, J., 2015.  
Optimal tolerance allocation for precision machine tools in consideration of measurement and adjustment processes in assembly.  
*The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* **80** (9-12), S. 1625–1640  
DOI: 10.1007/s00170-015-7122-2
- Haberhauer 2011** Haberhauer, H., 2011.  
*Maschinenelemente: Gestaltung, berechnung, anwendung.*

- 
- Berlin Heidelberg: Springer.  
ISBN 9783642142895
- Hehenberger et al. 2009** Hehenberger, P; Vajna, S; Weber, C; Bley, H; Zeman, K., 2009.  
*CAX für Ingenieure: Eine praxisbezogene Einführung.*  
Berlin Heidelberg: Springer.  
ISBN 9783540360391
- Heinrich et al. 2008** Heinrich, J. G; Aldinger, F., 2008.  
*Ceramic Materials and Components for Engines.*  
Weinheim: Wiley.  
ISBN 9783527612772
- Herzog 2017** Herzog, A., 2017.  
*Callcenter - Analyse und Management: Modellierung und Optimierung mit Warteschlangensystemen.*  
Wiesbaden: Springer Gabler.  
Studienbücher Wirtschaftsmathematik.  
ISBN 9783658183080  
DOI: 10.1007/978-3-658-18309-7
- Hesse et al. 2013** Hesse, S; Konold, P; Reger, H., 2013.  
*Praxis der Montagetechnik: Produktdesign, Planung, Systemgestaltung.*  
Wiesbaden: Vieweg+Teubner.  
ISBN 9783663016090
- Hoenow et al. 2016** Hoenow, G.; Meißner, T., 2016.  
*Entwerfen und Gestalten im Maschinenbau: Bauteile - Baugruppen - Maschinen.*  
München: Hanser.  
ISBN 9783446439955
- Hofbauer et al. 2009** Hofbauer, G; Hellwig, C., 2009.  
*Professionelles Vertriebsmanagement.*  
Paris : Publicis Publishing.  
ISBN 9783895783289
- Hofmann et al. 2017** Hofmann, E; Oettmaier, K., 2017.  
*Potenziale und Hürden für die Umsetzung von Industrie 4.0: Factsheet zur Logistikmarktstudie Schweiz, Band 2017.*  
Wabern

Verfügbar unter: <https://www.alexandria.unisg.ch/250951/>  
Zugriff am: 28.01.2019

**Hsieh 2006**

Hsieh, K.-L., 2006. The study of cost-tolerance model by incorporating process capability index into product lifecycle cost.  
*The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* **28** (5-6), S. 638–642  
DOI: 10.1007/s00170-004-2385-z

**Ickert 2013**

Ickert, J., 2013.  
*Das Genauigkeitswesen in der technischen Normung*.  
Berlin Heidelberg: Springer.  
ISBN 9783642998539

**Imkamp et al. 2016**

Imkamp, D.; Berthold, J.; Heizmann, M.; Kniel, K.; Peterek, M.; Schmitt, R.; Seidler, J.; Sommer, K.-D., 2016.  
Herausforderungen und Trends in der Fertigungsmesstechnik – Industrie 4.0.  
*tm - Technisches Messen* **83** (7-8)  
DOI: 10.1515/teme-2015-0081

**i-Q Schacht et al.**

i-Q Schacht & Kollegen Qualitätskonstruktion GmbH, 2015.  
*Besondere Merkmale / Special Characteristics*  
Verfügbar unter: <https://www.i-q.de/leistungen/besondere-merkmale-special-characteristics/>  
Zugriff am: 04.02.2019

**Janakiraman et al. 2010**

Janakiraman, V; Saravanan, R., 2010.  
Concurrent optimization of machining process parameters and tolerance allocation.  
*The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* **51** (1-4), S. 357–369  
DOI: 10.1007/s00170-010-2602-x

**Jarecki et al. 2011**

Jarecki, U; Schulz, H.-J., 2011.  
*Dubbel Mathematik: Eine kompakte Ingenieurmathematik zum Nachschlagen*.  
Berlin, Heidelberg: Springer.  
ISBN 9783642220593  
DOI: 10.1007/978-3-642-22059-3

- 
- Jeang 1996** Jeang, A., 1996.  
Optimal tolerance design for product life cycle.  
*International Journal of Production Research* **34** (8),  
S. 2187–2209  
DOI: 10.1080/00207549608905020
- Jorden et al. 2014** Jorden, W.; Schütte, W., 2014.  
*Form- und Lagetoleranzen: Handbuch für Studium und  
Praxis.*  
8., aktualisierte Auflage.  
München: Hanser.  
ISBN 3446439854  
DOI: 10.3139/9783446439856
- Kagermann et al. 2011** Kagermann, H; Lukas, W.-D; Wahlster W., 2011.  
Industrie 4.0: Mit dem Internet der Dinge auf dem Weg  
zur 4. industriellen Revolution, 2011  
Verfügbar unter: <https://www.vdi-nachrichten.com/Technik-Gesellschaft/Industrie-40-Mit-Internet-Dinge-Weg-4-industriellen-Revolution>  
Zugriff am: 15.01.2019
- Kagermann et al. 2013** Kagermann, H; Wahlster, W; Helbig, J. (Hrsg.) , 2013.  
*Deutschlands Zukunft als Produktionsstandort sichern:  
Umsetzungsempfehlung für das Zukunftsprojekt Industrie  
4.0.*  
Frankfurt
- Kalveram 2005** Kalveram, M., 2005.  
*Analyse und Vorhersage der Prozessdynamik und Pro-  
zessstabilität beim Hochgeschwindigkeitsfräsen.*  
Essen: Vulkan.  
ISBN 9783802787294
- Kamrani 2014** Kamrani, A. K., 2014.  
*Engineering design and rapid prototyping.*  
Berlin Heidelberg: Springer.  
ISBN 9781489989918
- Keinert et al. 2012** Keinert, M; Verl, A., 2012.  
System Platform Requirements for High Performance  
CNCs.  
In: *Proceedings of FAIM 2012, 22nd International  
Conference on Flexible Automation and Intelligent*

*Manufacturing, Helsinki, Finland, June 10th - 13th 2012*, S. 837–844

**Kieferstein 2011**

Kieferstein, C. P., 2011.  
*Fertigungsmesstechnik: praxisorientierte Grundlagen, moderne Messverfahren.*  
7., erw. Aufl.  
Wiesbaden: Vieweg + Teubner.  
Fertigung.  
ISBN 9783834806925

**Kienzle 1994**

Kienzle, O., 1994.  
Auslese-Paarung.  
In: Warnecke, Hans-Jürgen (Hrsg.): *wt spezial.*  
Berlin, Heidelberg: Springer, S. 9–16  
DOI: 10.1007/978-3-642-52357-1\_2

**Kirschling 2013**

Kirschling, G., 2013.  
*Qualitätssicherung und Toleranzen: Toleranz- und Prozeßanalyse für Entwicklungs- und Fertigungsingenieure.*  
Berlin Heidelberg: Springer.  
ISBN 9783662128664

**Klein 2014**

Klein, B., 2014.  
*Toleranzdesign im Maschinen- und Fahrzeugbau: Dimensionelle und geometrische Toleranzen (F+L), CAD-Tolerierung, Tolerierungsprinzipien, Maßketten und Oberflächen.*  
Berlin: De Gruyter.  
ISBN 9783110367492

**Klein et al. 2013**

Klein, B; Mannewitz, F., 2013.  
*Statistische Tolerierung: Qualität der konstruktiven Gestaltung*  
Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag.  
ISBN 9783663202301

**Kober 2018**

Kober, C., 2018.  
*Die Verhandlungsmethoden der Einkäufer: Wie Verkäufer sie durchschauen und ihnen souverän begegnen.*  
Wiesbaden: Springer Fachmedien.  
ISBN 9783658225483  
DOI: 10.1007/978-3-658-22548-3

- 
- Koch et al. 2014** Koch, V; Kuge, S; Geissbauer, R; Schrauf, S., 2014.  
*Industrie 4.0: Chancen und Herausforderungen der vierten industriellen Revolution.*  
New York: PwC; Strategy&
- Kreidel 1997** Kreidel, T. 1997  
*Ohne verbesserte Meßgeräte kein Drei-Liter-Auto Mahr: Die Industrie investiert verstärkt in Meßtechnik / Umsatz soll um 12 Prozent auf 190 Millionen DM steigen*  
in: F.A.Z. Frankfurter Allgemeine Zeitung vom 31.07.1997; Ressort: Wirtschaft
- Labisch et al. 2017** Labisch, S; Wählich, G, 2017.  
*Technisches Zeichnen: Eigenständig lernen und effektiv üben.*  
5., überarbeitete Auflage.  
Wiesbaden: Springer Vieweg.  
Lehrbuch.  
ISBN 9783658183127  
DOI: 10.1007/978-3-658-18313-4
- Leinweber 1941** Leinweber, P., 1941.  
*Passung und Gestaltung (ISA-Passungen).*  
Berlin, Heidelberg : Springer.  
ISBN 9783662268766  
DOI: 10.1007/978-3-662-28342-4
- Lemke 1988** Lemke, E, 1988.  
*Fertigungsmeßtechnik.*  
Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag.  
ISBN 9783322856098  
DOI: 10.1007/978-3-322-85609-8
- Lichtblau et al. 2015** Lichtblau, K; Stich, V; Bertenrath, R; Blum, M; Bleider, M; Millack, A; Schmitt, K; Schmitz, E; Schröter, M., 2015.  
*Industrie 4.0-Readiness.*  
Aachen, Köln  
Verfügbar unter: <http://www.impuls-stiftung.de/documents/3581372/4875835/Industrie+4.0+Readiness+IMPULS+Studie+Oktober+2015.pdf/447a6187-9759-4f25-b186->

b0f5eac69974  
Zugriff am: 28.02.2017

**Liebl 2018**

Liebl, J., 2018.  
*Ladungswechsel im Verbrennungsmotor 2015: Variabilitäten und Laststeuerung im Fokus 8. MTZ-Fachtagung.*  
Wiesbaden: Springer Fachmedien.  
ISBN 9783658235246

**Lindemann 2016**

Lindemann, U., 2016.  
*Handbuch Produktentwicklung :*  
München: Carl Hanser.  
ISBN 9783446445819

**Linß 2018**

Linß, G., 2018.  
*Qualitätsmanagement für Ingenieure.*  
4., aktualisierte und erweiterte Auflage.  
München: Hanser Carl.  
ISBN 9783446439368  
DOI: 10.3139/9783446439368

**Liu et al. 2011**

Liu, H.; Li, B.; Wang, X.; Tan, G., 2011.  
Characteristics of and measurement methods for geometric errors in CNC machine tools.  
*The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* **54** (1-4), S. 195–201  
DOI: 10.1007/s00170-010-2924-8

**Liu et al. 2013**

Liu, S.-G.; Jin, Q.; Liu, C.; Xie, R.-J., 2013.  
Analytical method for optimal component tolerances based on manufacturing cost and quality loss.  
*Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* **227** (10), S. 1484–1491  
DOI: 10.1177/0954405413488769

**Lorenzoni et al. 2017**

Lorenzoni, A.; Tielemann, C; Sauer, A., 2017.  
A new approach to handling precise tolerances.  
In: Gao, James;El Souri, Mohammed;Keates, Simeon (Hrsg.): *Advances in Manufacturing Technology XXXI.*  
Amsterdam: IOS Press, S. 251–256  
ISBN 9781614997924

- 
- Lotter et al. 2013** Lotter, B; Wiendahl, H. P., 2013.  
*Montage in der industriellen Produktion: Ein Handbuch für die Praxis:*  
Berlin Heidelberg: Springer-Verlag  
ISBN 9783642290619
- Lucke et al. 2014** Lucke, D.; Görzig, D.; Kacir, M.; Volkmann, J. W;  
Haist, C.; Sachsenmaier, M.; Rentschler, H., 2014.  
*Strukturstudie "Industrie 4.0 für Baden-Württemberg":  
Baden-Württemberg auf dem Weg zu Industrie 4.0.*  
Stuttgart
- Manohar et al. 2018** Manohar, K.; Hogan, T.; Buttrick, J.; Banerjee, A. G;  
Kutz, J. N.; Brunton, S. L., 2018. Predicting shim gaps  
in aircraft assembly with machine learning and sparse  
sensing.  
*Journal of Manufacturing Systems* **48**, S. 87–95  
DOI: 10.1016/j.jmsy.2018.01.011
- Matek et al. 2001** Matek, W.; Muhs, D.; Wittel, H.; Becker, M.; Jan-  
nasch, D., 2001.  
*Roloff/Matek Maschinenelemente: Normung Berech-  
nung Gestaltung.*  
15., durchgesehene Auflage.  
Wiesbaden: Vieweg+Teubner.  
Viewegs Fachbücher der Technik.  
ISBN 3-528-94028-X
- McFarland 1924** McFarland, D. H., 1924.  
*Manufacture of the Bolt of the Springfield Rifle.*  
29. Aufl.  
Jefferson : McFarland and Company, Incorporated

- Meins 2013** Meins, W., 2013.  
*Handbuch Fertigungs- und Betriebstechnik*  
Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag.  
ISBN 9783322849106
- Merget 2004** Merget, M., 2004.  
*Kostenoptimierung durch Toleranz-variation im Simultaneous Engineering.*  
Aachen, RWTH Aachen, Dissertation, 2004.
- Miehe et al. 2018** Miehe, R.; Bauernhansl, T.; Schwarz, O.; Traube, A.; Lorenzoni, A.; Waltersmann, L.; Full, J.; Horbelt, J.; Sauer, A., 2018.  
The biological transformation of the manufacturing industry – envisioning biointelligent value adding.  
*Procedia CIRP* **72**, S. 739–743  
DOI: 10.1016/j.procir.2018.04.085
- Milberg 1992** Milberg, J., 1992.  
*Werkzeugmaschinen - Grundlagen: Zerspantechnik, Dynamik, Baugruppen und Steuerungen.*  
Berlin Heidelberg: Springer.  
Springer-Lehrbuch.  
ISBN 3540545387
- Mirow 1996** Mirow, J., 1996.  
*Geschichte des deutschen Volkes: Von den Anfängen bis zur Gegenwart.*  
Gernsbach: Katz.  
ISBN 3-925825-64-9
- Mühlhäuser et al. 2008** Mühlhäuser, M.; Aitenbichler, E.; Ferscha, A. (Hrsg.) , 2008.  
*Constructing Ambient Intelligence: Aml 2007 Workshops Darmstadt, Germany, November 7-10, 2007 Revised Papers.*  
Berlin, Heidelberg: Springer.  
ISBN 978-3-540-85378-7  
DOI: 10.1007/978-3-540-85379-4
- Muthu et al. 2009** Muthu, P; Dhanalakshmi, V; Sankaranarayananasamy, K., 2009. Optimal tolerance design of assembly for minimum quality loss and manufacturing cost using metaheuristic algorithms.  
*The International Journal of Advanced Manufacturing*

---

*Technology* **44** (11-12), S. 1154–1164  
DOI: 10.1007/s00170-009-1930-1

**Nebeling 2015**

Nebeling, P. H., 2015.  
Dynamisches Verhalten von Gestellwerkstoffen in  
Werkzeugmaschinen: Vergleichende Untersuchung  
von Werkstoffen mit einheitlicher Probengeometrie  
*wt Werkstattstechnik online: Vergleichende Untersu-  
chung von Werkstoffen mit einheitlicher Probengeo-  
metrie* **5**.  
Düsseldorf: Springer-VDI-Verlag, S. 263–268

**Niemann et al. 2013**

Niemann, G; Winter, H; Höhn, B. R., 2013.  
*Maschinenelemente: Band 1: Konstruktion und Be-  
rechnung von Verbindungen, Lagern, Wellen*  
Berlin: Heidelberg Springer.  
ISBN 9783662085202

**Norm DIN 7182-1 1986**

DIN 7182-1:1986.  
*Maße, Abmaße, Toleranzen und Passungen; Grundbe-  
griffe.*

**Norm DIN 1319-1 1995**

DIN 1319-1:1995.  
*DIN 1319 - 1: Grundlagen der Meßtechnik - Teil 1:  
Grundbegriffe.*

**Norm DIN 4760 1982**

DIN 4760:1982.  
*Gestaltabweichungen.*

**Norm DIN ISO 286-1 2010**

DIN ISO 286-1:2010.  
*Geometrische Produktspezifikation (GPS) - ISO-Tole-  
ranzsystem für Längenmaße, Teil 1: Grundlagen für  
Toleranzen, Abmaße und Passungen (ISO286-1:2010).*

**Norm DIN ISO 286-2 2010**

DIN ISO 286-2:2010.  
*Geometrische Produktspezifikation (GPS) - ISO-Tole-  
ranzsystem für Längenmaße, Teil 2: Tabellen der  
Grundtoleranzgrade und Grenzabmaße für Bohrungen  
und Wellen (ISO 286-2:2010).*

**Norm DIN 620-2 1988**

DIN 620-2:1988.  
*Wälzlager; Wälzlagertoleranzen; Toleranzen für Radi-  
allager.*

**Norm DIN 7150-1 1966**

DIN 7150-1:1966.  
*ISO-Toleranzen und ISO-Passungen für Längenmaße  
von 1 bis 500 mm; Einführung.*

- Norm DIN 7151 1964** DIN 7151:1964.  
*ISO-Grundtoleranzen für Längenmaße von 1 bis 500 mm Nennmaß.*
- Norm DIN 7152 1965** ISO DIN 7152:1965.  
*Bildung von Toleranzfeldern aus den ISO-Grundabmaßen für Nennmaße von 1 bis 500 mm.*
- Norm DIN 7160 1965** DIN 7160:1965.  
*ISO-Abmaße für Außenmaße (Wellen), für Nennmaße von 1 bis 500 mm.*
- Norm DIN 7161 1965** DIN 7161:1965.  
*ISO-Abmaße für Innenmaße (Bohrungen), für Nennmaße von 1 bis 500 mm.*
- Norm DIN 7172-1 1986** DIN 7172-1:1986.  
*Toleranzen und Grenzabmaße für Längenmaße über 500 bis 10000 mm; Grundtoleranzen.*
- Norm DIN 7172-2 1986** DIN 7172-2:1986.  
*Toleranzen und Grenzabmaße für Längenmaße über 500 bis 10000 mm; Grenzabmaße.*
- Norm DIN 7172-3 1986** DIN 7172-3:1986.  
*Toleranzen und Grenzabmaße für Längenmaße über 500 bis 10000 mm; Grundlagen.*
- Norm DIN EN ISO 286-1 2010** DIN EN ISO 286-1:2010.  
*Geometrical product specifications (GPS) - ISO code system for tolerances on linear sizes.*
- Norm DIN EN ISO 9000 2015** DIN EN ISO 9000:2015.  
*DIN 9000:2015 - Qualitätsmanagementsysteme - Grundlagen und Begriffe (ISO 9000:2015).*
- Norm DIN EN ISO 14405-1 2011a** DIN EN ISO 14405-1:2011.  
*Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Dimensionelle Tolerierung - Teil 1: Längenmaße (ISO 14405-1:2010) Deutsche Fassung EN ISO 14405-1:2010.*
- Norm DIN EN ISO 14405-1 2011** DIN EN ISO 14405-1:2011b.  
*Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Dimensionelle Tolerierung - Teil 1: Längenmaße.*
- Norm DIN EN ISO 14405-1 2017** DIN EN ISO 14405-1:2017.  
*Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Dimensionelle Tolerierung - Teil 1: Lineare Größenmaße.*

- 
- Norm DIN EN ISO 286-1 1990** DIN EN ISO 286-1:1990.  
*ISO-System für Grenzmaße und Passungen; Grundlagen für Toleranzen, Abmaße und Passungen; Identisch mit ISO 286-1:1988.*
- Norm DIN ISO 2768-1 1991** ISO DIN ISO 2768-1:1991.  
*Allgemeintoleranzen; Toleranzen für Längen- und Winkelmaße ohne einzelne Toleranzeintragung.*
- Norm DIN ISO 286-2 1990** DIN ISO 286-2:1990.  
*ISO-System für Grenzmaße und Passungen; Tabellen der Grundtoleranzgrade und Grenzabmaße für Bohrungen und Wellen; Identisch mit ISO 286-2:1988.*
- Norm ISO DIN ISO 2768-2 1991** ISO DIN ISO 2768-2:1991.  
*Allgemeintoleranzen; Toleranzen für Form und Lage ohne einzelne Toleranzeintragung.*
- Norm VDI/VDE 2600-2 2018** VDI/VDE 2600 Blatt 2:2018.  
*Prüfprozessmanagement - Ermittlung der Messunsicherheit komplexer Prüfprozesse.*
- Oetzmann 2005** Oetzmann, A., 2005.  
*Einsatz wissensbasierter Systeme in Qualitätsmanagement von Produktionsverbänden*  
Essen: Vulkan-Verlag.  
ISBN 9783802786822
- Opp 1970** Opp, K.-D., 1970.  
*Methodologie der Sozialwissenschaften: Einführung in Probleme ihrer Theorienbildung.*  
Hamburg: Rowohlt.  
Rororo Wissen 339-340-341.  
ISBN 9783499553394
- Patentschrift 102016223467 2018, 2018**  
*Verfahren und Vorrichtung zur Herstellung einer Baugruppe.*  
102016223467
- Patentschrift CN103903060 A 2014, 2014**  
*Optimum design method for assembly tolerances.*  
CN103903060 A,  
02.07.2014

**Patentschrift US 6,665,632 B2 2003, 2003**

*Assembly tolerance analysis apparatus, assembly tolerance analysis method and storage medium.*

US 6,665,632 B2,  
16.12.2003

**Patentschrift US20060129259 A1 2009, 2009**

*Automatic calculation of minimum and maximum tolerance stack.*

US20060129259 A1,  
30.12.2009

**Patentschrift WO 2010/022493 2008, 2016**

*Method for preparing logs for a log structure.*

WO 2010/022493,  
06.01.2016

**Pfeifer et al. 2010**

Pfeifer, T.; Schmitt, R., 2010.

*Fertigungsmesstechnik.*

3., überarb. und erw. Aufl.

München: Oldenbourg.

ISBN 9783486711356

**Ponn et al. 2008**

Ponn, J.; Lindemann, U., 2008.

*Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte: Optimierte Produkte - systematisch von Anforderungen zu Konzepten.*

Berlin: Springer.

VDI-Buch

**Poser 2001**

Poser, H., 2001.

*Wissenschaftstheorie: Eine philosophische Einführung.*

2 Aufl.

Stuttgart: Philipp Reclam.

ISBN 978-3-15-018995-5

**Pritschow 2006**

Pritschow, G., op. 2006.

*Einführung in die Steuerungstechnik.*

München, Wien: Carl Hanser Verlag.

ISBN 9783446214224

**Rieg et al. 2018**

Rieg, F; Steinhilper, R. (Hrsg.) , 2018.

*Handbuch Konstruktion.*

2 Auflage.

München: Hanser.

ISBN 9783446456198

- 
- Rogler 2002** Rogler, S.; 2002  
*Risikomanagement im Industriebetrieb - Analyse von Beschaffungs-, Produktions- und Absatzrisiken*  
1. Auflage.  
Springer Fachmedien Wiesbaden.  
ISBN 9783824490844
- Ruppert 2007** Ruppert, T., 2007.  
*Modularisierung des Verbrennungsmotors als strategische Option in der Motorenindustrie* : Kassel University Press.  
ISBN 9783899582970
- Salvador 2007** Salvador, F., 2007.  
Toward a Product System Modularity Construct: Literature Review and Reconceptualization.  
*IEEE Transactions on Engineering Management* **54** (2), S. 219–240  
DOI: 10.1109/TEM.2007.893996
- Schmid et al. 2011** Schmid, G.; Hanitzsch, T., 2011.  
Managing data for a zero defect production: The contribution of manufacturing automation to a corporate strategy.  
In: *2011 IEEE/SEMI Advanced Semiconductor Manufacturing Conference*,  
16. - 18. May, Saratoga Springs, NY, USA, S. 1–5
- Schmitt et al. 2008** Schmitt, R; Damm, B. E. 2008  
Prüfen und Messen im Takt: Wie Sie mit Inline-Messtechnik Ihre Wertschöpfung maximieren.  
*QZ - Qualität und Zuverlässigkeit* (**53**), S. 57–59
- Schmitt et al. 2015** Schmitt, R.; Pfeifer, T., 2015.  
*Qualitätsmanagement: Strategien - Methoden - Techniken*.  
5., aktualisierte Auflage.  
München: Hanser.  
ISBN 9783446440821  
DOI: 10.3139/9783446440821
- Schneider et al. 2006** Schneider, K. E; Belashchenko, V; Dratwinski, M; Siegmann, S; Zagorski, A., 2006.  
*Thermal Spraying for Power Generation Components*

- New Jersey: Wiley.  
ISBN 9783527609383
- Schnell et al. 2008** Schnell, R; Hill, P. B; Esser E., 2008.  
*Methoden der empirischen Sozialforschung.*  
8 Aufl.  
München: Oldenbourg.  
ISBN 978-3-486-58708-1
- Schönberg 2018** Schönberg, A., 2018.  
*Steigerung der Prozessfähigkeit gewandelter Montagezellen durch Selbstreferenz.*  
1st ed.  
Aachen: Apprimus.  
ISBN 9783863596064
- Schröder 2016** Schröder, C., 2016.  
*Herausforderungen von Industrie 4.0 für den Mittelstand.*  
Bonn.  
Gute Gesellschaft - soziale Demokratie # 2017plus.  
ISBN 978-3-95861-350-8
- Schuh et al. 2008** Schuh, G; Stölzle, W; Straube, F., 2008.  
*Anlaufmanagement in Der Automobilindustrie Erfolgreich Umsetzen/ Start-up Management in the Automotive Industry to Successfully Implement: Ein Leitfaden Für Die Praxis/ a Guide for Practice*  
Heidelberg: Springer-Verlag GmbH.  
ISBN 9783540784067
- Schwarze 2013** Schwarze, J., 2013  
*Kundenorientiertes Qualitätsmanagement in der Automobilindustrie*  
Heidelberg: Springer-Verlag GmbH.  
ISBN 9783322814715
- Selvarajan et al. 2016** Selvarajan, L.; Sathiya Narayanan, C.; Jeyapaul, R.; Manohar, M., 2016.  
Optimization of EDM process parameters in machining Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>–TiN conductive ceramic composites to improve form and orientation tolerances.  
*Measurement* **92**, S. 114–129  
DOI: 10.1016/j.measurement.2016.05.018

- 
- Sfantsikopoulos 1990** Sfantsikopoulos, M. M., 1990.  
A cost-tolerance analytical approach for design and manufacturing.  
*The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* **5** (2), S. 126–134  
DOI: 10.1007/BF02601602
- Sharon 1991** Sharon, A., 1991.  
*Issues in design/manufacture integration, 1991: Presented at the winter annual meeting of the American Society of Mechanical Engineers; Atlanta, Georgia, December 1 - 6, 1991.*  
New York, NY : The Society.  
DE / American Society of Mechanical Engineers, Design Engineering Division vol. 39.  
ISBN 0791808769
- Skirde 2015** Skirde, H., 2015.  
*Kostenorientierte Bewertung modularer Produktarchitekturen.*  
1. Auflage.  
Lohmar, Köln: Josef Eul.  
ISBN 3844104240
- Skladnikiewitz 2011** Skladnikiewitz, M.; 2011.  
*Messmittelpunkt: Taktil oder optisch? Welche Messtechnik bietet welche Vorteile?*  
Verfügbar unter: [https://www.mahr.com/de/Leistungen/Fertigungsmesstechnik/Der-News--und-Praxis-Blog/?BlogContentID=20921&Blog\\_action=comment](https://www.mahr.com/de/Leistungen/Fertigungsmesstechnik/Der-News--und-Praxis-Blog/?BlogContentID=20921&Blog_action=comment)  
Zugriff am: 26.10.2017
- Sommerfeld et al. 2010** Sommerfeld, E.; Banse, G. (Hrsg.) , 2010.  
*Einfachheit als Wirk-, Erkenntnis- und Gestaltungsprinzip: Wissenschaftliche Plenarveranstaltung der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften zu Berlin am 8. April 2010.*  
Berlin: Trafo-Wissenschaftsverl.  
ISBN 978-3-89626-953-9
- Spur et al. 2013a** Spur, G.; Feldmann, K; Schöppner, V., 2013.  
*Handbuch Fügen, Handhaben und Montieren*  
München: Carl Hanser.  
ISBN 9783446436565

- Spur et al. 2013b** Spur, G; Feldmann, K; Schöppner, V., 2013.  
*Handbuch Fügen, Handhaben und Montieren.*  
München: Carl Hanser.  
ISBN 9783446436565
- Szyminski 2013** Szyminski, S., 2013.  
*Toleranzen und Passungen: Grundlagen und Anwendungen.*  
Wiesbaden: Vieweg+Teubner.  
ISBN 9783663058014
- Taguchi 1985** Taguchi, G., 1985.  
Quality Engineering in Japan.  
In: Marcel Dekker, Inc. (Hrsg.): *Communications in Statistics 14 (11)*, S. 2785–2801
- Taguchi et al. 1990** Taguchi, G; Clausing, D., 1990.  
*Robust Quality.*  
Canada  
Verfügbar unter: <https://hbr.org/1990/01/robust-quality>  
Zugriff am: 09.01.2019
- Töpfer 2012** Töpfer, A., 2012.  
*Erfolgreich Forschen: Ein Leitfaden für Bachelor-, Master-Studierende und Doktoranden.*  
3., überarb. und erw. Aufl. 2012.  
Berlin, Heidelberg: Springer.  
ISBN 3642341683
- Trucks 1987** Trucks, H. E., 1987.  
*Designing for economical production.*  
2. ed., 1. printing.  
Dearborn, Mich. : Soc. of Manufacturing Engineers  
Publ. Development Department Marketing Div.  
ISBN 978-0872632493
- U.S. Department of Health and Human Services et al. 2018, 2018.**  
*Unique Device Identification: Policy Regarding Compliance Dates for Class I and Unclassified Devices and Certain Devices Requiring Direct Marking: Immediately in Effect Guidance for Industry and Food and Drug Administration Staff*  
Verfügbar unter: <https://www.fda.gov/downloads/Med->

---

icalDevices/DeviceRegulationandGuidance/GuidanceDocuments/UCM592340.pdf  
Zugriff am: 06.02.2019

**Ulrich 2016**

Ulrich, S., 2016.  
*Umgang mit Störungen im Produktionsanlauf: Adaption ausgewählter Methoden von Einsatzorganisationen auf den Produktionsanlauf*  
Siegburg: Josef Eul.  
ISBN 9783844104509

**Ulrich et al. 1976**

Ulrich, P.; H., W., 1976. Wissenschaftstheoretische Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre.  
*Wirtschaftswissenschaftliches Studium : WiSt ; Zeitschrift für Studium und Forschung* **5** (7), S. 304–309

**Vogel-Heuser et al. 2017**

Vogel-Heuser, B.; Bauernhansl, T.; Hompel, M. ten, 2017.  
*Handbuch Industrie 4.0: Produktion.*  
2., erweiterte und bearbeitete Auflage.  
Berlin: Springer Vieweg.  
Springer Reference Technik.  
ISBN 9783662452790

**Wagner 2018**

Wagner, 2018.  
*Taguchi-Methode: Qualitätskontrolle während der Produkt- oder Prozessdesign-Phase*  
Verfügbar unter: <https://logistikknowhow.com/kennzahlen/taguchi-methode-qualitaetskontrolle-waehrend-der-produkt-oder-prozessdesign-phase/>  
Zugriff am: 09.01.2019

**Weckenmann et al. 2009**

Weckenmann, A; Westkämper, E.; Dietmaier, A; Haag, H., 2009.  
Wert der Messung. Kosten-Nutzen-Analyse bei Messergebnissen.  
*QZ Qualitaet und Zuverlaessigkeit* (**54**), S. 54–55

**Wenturis et al. 1992**

Wenturis, N.; van Hove, W.; Dreier, V., 1992.  
*Methodologie der Sozialwissenschaften: Eine Einführung.*  
Tübingen: Francke.  
UTB 1704.  
ISBN 9783825217044

- Whitehouse 2011** Whitehouse, D. J., 2011.  
*Handbook of surface and nanometrology.*  
2nd ed.  
Boca Raton, FL : CRC Press.  
ISBN 9781420082012
- Xue et al. 1993** Xue, D; Zuomin, D., 1993.  
Automated concurrent design based on combined feature, tolerance, production process and cost modell.  
In: Gilmore, Brian J. (Hrsg.): *Advances in design automation - 1993.*  
New York, NY: American Soc. of Mechanical Engineers, S. 199–210  
ISBN 0791811816
- Yeo et al. 1996** Yeo, S. H; Ngoi, B. K. A; Chen, H., 1996.  
A cost-tolerance model for process sequence optimisation.  
*The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* **12** (6), S. 423–431  
DOI: 10.1007/BF01186931
- Zhang et al. 1993** Zhang, C; Wang, H.-P., 1993.  
Optimal process sequence selection and manufacturing tolerance allocation.  
In: Chapman & Hall (Hrsg.): *Journal of Design and Manufacturing.*  
3, S. 135–146
- Zhao et al. 2016** Zhao, Y. M; Liu, D. S; Wen, Z. J., 2016.  
Optimal tolerance design of product based on service quality loss.  
*The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* **82** (9-12), S. 1715–1724  
DOI: 10.1007/s00170-015-7480-9

Die Einhaltung von Toleranzen ist entscheidend für die technische Qualität eines Produktes. Im Rahmen dieser Arbeit wird eine neue Methode für Toleranzen, die dynamische Tolerierung, entwickelt. Diese ermöglicht die Herstellung von Baugruppen, die speziellen Passfunktionen unterliegen. Passfunktionen sind oft mit sehr engen Toleranzen verbunden. Die hier vorgeschlagene Methode der dynamischen Tolerierung bietet eine Lösung, die nicht in den Konstruktionsprozess eingreift, keine teuren Maschinen oder fehleranfällige Regelkreise benötigt und keine komplexen Montageverfahren verwendet. Durch den Einsatz moderner Messsysteme und der Infrastruktur von Industrie 4.0 ist es möglich, Baugruppen mit hochpräzisen Bauteilen kostengünstig bei gleicher oder besserer Qualität herzustellen.

ISBN 978-3-8396-1572-0



FRAUNHOFER VERLAG