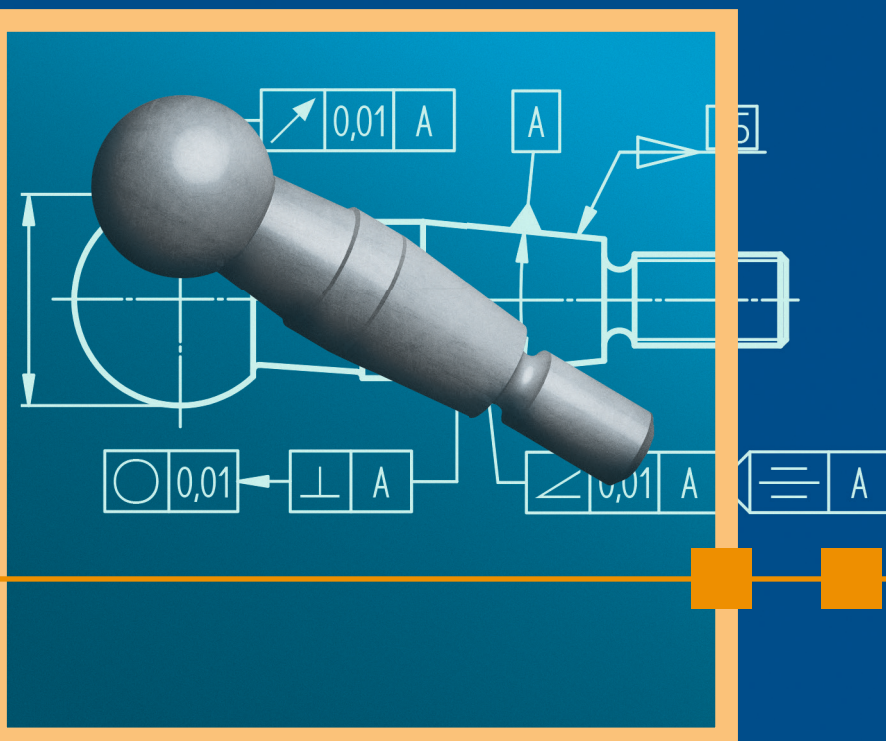


Walter Jorden
Wolfgang Schütte

Form- und Lagetoleranzen

Geometrische Produktspezifikationen
(ISO GPS) in Studium und Praxis

$S\phi 25 \begin{matrix} 0 \\ -0,02 \end{matrix}$



10., überarbeitete und erweiterte Auflage

HANSER



Ihr Plus – digitale Zusatzinhalte!

Auf unserem Download-Portal finden Sie zu diesem Titel kostenloses Zusatzmaterial. Geben Sie dazu einfach diesen Code ein:

plus-1q71g-rp9j6

plus.hanser-fachbuch.de



Bleiben Sie auf dem Laufenden!

Hanser Newsletter informieren Sie regelmäßig über neue Bücher und Termine aus den verschiedenen Bereichen der Technik. Profitieren Sie auch von Gewinnspielen und exklusiven Leseproben. Gleich anmelden unter

www.hanser-fachbuch.de/newsletter

Walter Jordan (†)

Wolfgang Schütte

Form- und Lagetoleranzen

Geometrische Produktspezifikationen (ISO GPS)
in Studium und Praxis

10., überarbeitete und erweiterte Auflage

HANSER

Autoren:

Univ.-Prof. (em.) Dr.-Ing. Walter Jordan (†), Universität Paderborn

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Schütte, Fachhochschule Südwestfalen, Iserlohn



Alle in diesem Buch enthaltenen Informationen wurden nach bestem Wissen zusammengestellt und mit Sorgfalt geprüft und getestet. Dennoch sind Fehler nicht ganz auszuschließen. Aus diesem Grund sind die im vorliegenden Buch enthaltenen Informationen mit keiner Verpflichtung oder Garantie irgendeiner Art verbunden. Autor(en, Herausgeber) und Verlag übernehmen infolgedessen keine Verantwortung und werden keine daraus folgende oder sonstige Haftung übernehmen, die auf irgendeine Weise aus der Benutzung dieser Informationen – oder Teilen davon – entsteht.

Ebenso wenig übernehmen Autor(en, Herausgeber) und Verlag die Gewähr dafür, dass die beschriebenen Verfahren usw. frei von Schutzrechten Dritter sind. Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

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

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdruckes und der Vervielfältigung des Buches, oder Teilen daraus, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder ein anderes Verfahren) – auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung – reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

© 2020 Carl Hanser Verlag München

Internet: www.hanser-fachbuch.de

Lektorat: Dipl.-Ing. Natalia Silakova-Herzberg

Herstellung: Anne Kurth

Covergestaltung: Max Kostopoulos

Coverkonzept: Marc Müller-Bremer, www.rebranding.de, München

Titelbild: © Sebastian Völkel

Satz: Kösel Media GmbH, Krugzell

Druck und Bindung: CPI books GmbH, Leck

Printed in Germany

Print-ISBN 978-3-446-45847-5

E-Book-ISBN 978-3-446-46064-5

Inhalt

Vorwort	10
Zeichen und Abkürzungen	15
1 Grundlagen des Tolerierens	17
1.1 Probleme bei der technischen Darstellung von Bauteilen	17
1.2 Einflussgrößen auf die Toleranzfestlegung	21
1.2.1 Gestaltabweichungen und ihre Grenzen	21
1.2.2 Aufgaben und Bedingungen für Toleranzen	24
1.3 Maßtoleranzen und Passungen	27
1.3.1 Maßbegriffe	27
1.3.2 Besondere Maßarten	30
1.3.3 ISO-Maßtoleranzsystem	36
1.3.4 Passungen	40
1.4 Tolerierungsgrundsatz	43
1.4.1 Einführung	43
1.4.2 Unabhängigkeitsprinzip	45
1.4.3 Hüllbedingung beim Unabhängigkeitsprinzip	49
1.4.4 Hüllprinzip als Tolerierungsgrundsatz	53
1.4.5 Anwendung der Tolerierungsgrundsätze	60
1.5 Aufbau der Form- und Lagetolerierung	63
1.5.1 Grundbegriffe	63
1.5.2 Formtolerierung am Beispiel „gerade Kante“	65
1.5.3 Lagetolerierung am Beispiel „parallele Kanten“	66
1.5.4 Zusammenhang zwischen Maß- und Lagetolerierung	70
1.6 Zeichnungseintragung	71
1.6.1 Toleriertes Element	71
1.6.2 Bezugselement	81

2	Toleranzarten und Bezüge	86
2.1	Überblick	86
2.2	Formtoleranzen	88
2.2.1	Übersicht	88
2.2.2	Geradheit	90
2.2.3	Ebenheit	99
2.2.4	Rundheit (Kreisform)	100
2.2.5	Zylindrizität (Zylinderform)	106
2.3	Bezüge und Bezugssysteme	108
2.3.1	Grundlagen und Übersicht	108
2.3.2	Bezüge aus wirklichen Geraden oder Ebenen	109
2.3.3	Achsen oder Mittelebenen als Bezüge	113
2.3.4	Bezugssysteme	122
2.4	Profiltoleranzen	132
2.4.1	Übersicht	132
2.4.2	Linienprofil	133
2.4.3	Flächenprofil	137
2.5	Richtungstoleranzen	140
2.5.1	Übersicht	140
2.5.2	Parallelität	141
2.5.3	Rechtwinkligkeit	152
2.5.4	Neigung	153
2.6	Ortstoleranzen	155
2.6.1	Übersicht	155
2.6.2	Position	157
2.6.3	Koaxialität und Konzentrizität	164
2.6.4	Symmetrie	167
2.7	Lauftoleranzen	170
2.7.1	Übersicht	170
2.7.2	Einfacher Lauf	171
2.7.3	Gesamtlauf	175
3	Allgemeintoleranzen	178
3.1	Grundlagen	178
3.2	Allgemeintoleranzen nach ISO 2768	182
3.2.1	Übersicht	182
3.2.2	Maß- und Winkeltoleranzen	183
3.2.3	Form- und Lagetoleranzen	185

3.3	Allgemeintoleranzen für verschiedene Fertigungsverfahren	192
3.3.1	Übersicht und Lücken	192
3.3.2	Einzelne Fertigungsverfahren	194
3.3.3	Ermittlung von Rohteilnennmaßen	199
3.3.4	Allgemeintolerierung mit Profiltoleranzen	202
3.4	Allgemeintoleranzen nach ISO 22081	204
4	Toleranzverknüpfungen	209
4.1	Übersicht	209
4.2	Maßketten	210
4.2.1	Arithmetische Tolerierung	210
4.2.2	Grundlagen des statistischen Tolerierens	213
4.2.3	Vorgehensweise zum überschlägigen statistischen Tolerieren	218
4.3	Form- und Lagetoleranzen in Maßketten	223
4.3.1	Einführung	223
4.3.2	Grenzgestalten von Geometrieelementen	227
4.3.3	Beispiele für die Verkettung von Grenzgestalten	234
4.4	Maximum-Material-Bedingung	240
4.4.1	Einführung	240
4.4.2	Eingrenzung der Anwendung	243
4.4.3	Vorgehensweise zur Toleranzuntersuchung	245
4.4.4	Festlegung von Funktionslehren	248
4.5	Minimum-Material-Bedingung	259
4.5.1	Einführung	259
4.5.2	Anwendung	261
4.6	Verknüpfung mit Oberflächenkennwerten	263
5	Praktische Anwendung der Tolerierung	266
5.1	Vorgehensweisen zur Form- und Lagetolerierung	266
5.1.1	Interpretation von eingetragenen Toleranzen	266
5.1.2	Methodik zur Form- und Lagetolerierung	269
5.2	Toleranzen und Kosten	274
5.2.1	Übersicht	274
5.2.2	Kostensprünge	276
5.3	Leitregeln zum toleranzgerechten Gestalten	280
5.3.1	Zum Aufbau von Bemaßung und Tolerierung	280
5.3.2	Zur Wirtschaftlichkeit der Tolerierung	286
5.3.3	Zum Qualitätsmanagement	294

5.4 Anwendungsbeispiele aus der Praxis 298
 5.4.1 Werkstücke mit relativ einfacher Nenngeometrie 298
 5.4.2 Beispiele für komplizierter geformte Werkstücke 306

6 Unterschiede der ASME-Normung gegenüber ISO 315

Literaturverzeichnis 322

Sachwortregister 324

Tabelle 0.1: Wo finde ich was? – Form- und Lagetoleranzen







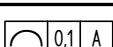
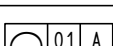
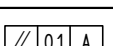
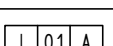
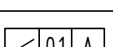
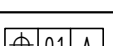
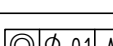
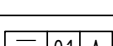
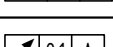
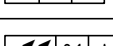






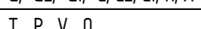
















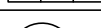

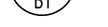

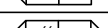
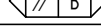
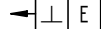
Symbol	Beschreibung /Benennung	Bemerkung / toleriertes Element	Kapitel
	Geradheit	Formtolerierung Linielement (Gerade)	Kap. 2.2.2
	Ebenheit	Formtolerierung Flächenelement (Ebene)	Kap. 2.2.3
	Rundheit	Formtolerierung Linielement (Kreis)	Kap. 2.2.4
	Zylinderform	Formtolerierung Flächenelement (Zylinder)	Kap. 2.2.5
	Profil einer (beliebigen) Linie	Formtolerierung Linielement (beliebige Linie)	Kap. 2.4.2
	Profil einer (beliebigen) Fläche	Formtolerierung Flächenelement (beliebige Fläche)	Kap. 2.4.3
	Profil einer (beliebigen) Linie	Lagetolerierung (Richtung oder Ort) Linielement (beliebigen Linie)	Kap. 2.4.2
	Profil einer (beliebigen) Fläche	Lagetolerierung (Richtung oder Ort) Flächenelement (beliebige Fläche)	Kap. 2.4.3
	Parallelität	Lagetolerierung (Richtung) Linien- oder Flächenelement	Kap. 2.5.2
	Rechtwinkligkeit	Lagetolerierung (Richtung) Linien- oder Flächenelement	Kap. 2.5.3
	Neigung	Lagetolerierung (Richtung) Linien- oder Flächenelement	Kap. 2.5.4
	Position	Lagetolerierung (Ort) Linien- oder Flächenelement	Kap. 2.6.2
	Koaxialität/Konzentrität	Lagetolerierung (Ort) Linielement	Kap. 2.6.3
	Symmetrie	Lagetolerierung (Ort) Linien- oder Flächenelement	Kap. 2.6.4
	Einfacher Lauf	Lagetolerierung (Lauf) Linielement (Kreis)	Kap. 2.7.2
	Gesamtlauf	Lagetolerierung (Lauf) Flächenelement (i. d. R. Zylinder od. Ebene)	Kap. 2.7.3

Tabelle 0.2: Wo finde ich was? – Symbole und Modifikatoren für die geometrische Produktspezifikation

Symbol / Modifikator	Beschreibung	Kapitel
 ... usw.	Modifikatoren für Größenmaßmerkmale nach ISO 14405	13.2
	Hüllbedingung für Größenmaßelemente	14.3
	kombinierte Toleranzzone (früher gemeinsame Toleranzzone)	16.1
	separate Toleranzzone	16.1, 2.4.2, 2.6.2, 4.4.4
	"Unsymmetrische Zone" (spezifiziert versetzte Toleranzzone)	2.4.1
	Vereinigtes Geometrieelement (United Feature)	16.1, 2.4.2
	Modifikatoren für das Referenzelement bei Formabweichungen	2.2.2, 2.2.4
	Modifikatoren für Parameter	2.2.2
	Modifikatoren für assoziierte tolerierte Elemente	2.5.2
	Indikator für das abeleitete Geometrieelement (Achse)	16.1
	projizierte Toleranzzone	16.1
	Maximum-Material-Bedingung (DIN EN ISO 2692)	4.4
	Minimum-Material-Bedingung (DIN EN ISO 2692)	4.5
	Reziprozitätsbedingung (DIN EN ISO 2692)	4.5
	freier Zustand (bei nicht-formstabilen Bauteilen) (DIN EN ISO 10579)	5.3.1, 5.4.2
	jeder beliebige Querschnitt (Any Cross Section, u. a. DIN EN ISO 14405)	16.1
	bestimmter Querschnitt (Special Cross Section, u. a. DIN EN ISO 14405)	16.1
	beliebiger Längsschnitt (Any Logitudinal Section, DIN EN ISO 14405)	16.1
	kleinster Durchmesser (Lower Diameter)	16.1, 5.4.1
	größter Durchmesser (Major Diameter)	16.1
	Flankendurchmesser (Pitch Diameter)	16.1
	Nur-Richtung-Modifikator bei Bezügen (DIN EN ISO 5459)	2.4.3
	zwischen (für den begrenzten Gültigkeitsbereich einer Toleranz)	16.1
	Bezug	2.3
	Bezugssystem	2.3
	Bezugsstellensymbol	2.3
	Schnittebenen-Indikator	2.2.2
	Orientierungsebenen-Indikator	2.2.2, 2.5.2
	Richtungselement-Indikator	2.2.4
	Kollektionsebenen-Indikator	2.4.3

Vorwort zur 10. Auflage

Als ich vor etwa 30 Jahren als wissenschaftlicher Assistent von Prof. Dr.-Ing. Walter Jorden einige Bilder zur ersten Auflage dieses Buches gezeichnet habe (damals noch mit Tusche), hätte ich nie gedacht, dass es einmal ein derart erfolgreiches und weithin bekanntes Lehrbuch zur geometrischen Produktspezifikation (GPS) werden würde. Schon gar nicht hätte ich mir vorstellen können, dass ich einmal völlig eigenverantwortlich dieses Buch vertrete. Seit der 7. Auflage bin ich nun Co-Autor und bearbeite die Neuauflagen federführend, da mein sehr geschätzter ehemaliger Chef und Doktorvater mich darum gebeten hatte. Nach seinem Rückzug aus der aktiven Arbeit mit den Form- und Lagetoleranzen in der Normung, Forschung und Praxis, wollte er den „Staffelstab“ an mich übergeben, da er nicht mehr so nah am Thema sei wie ich, wie er damals sagte. Ich war sein erster Doktorand im Arbeitsbereich der geometrischen Produktspezifikation. Dieser Begriff existierte in der Normung zu der Zeit noch gar nicht. „Form- und Lagetoleranzen“ war die in Deutschland übliche Bezeichnung für die geometrische Tolerierung sowohl in der Normung als auch in der industriellen Praxis. Daher auch der Titel, den wir natürlich bis heute beibehalten haben, auch wenn ich nun mit der hier vorliegenden 10. Auflage die heute international bekannte Begrifflichkeit „Geometrische Produktspezifikation (GPS)“ im Untertitel mit eingebaut habe.

Walter Jorden hat mich schon sehr früh sowohl in die firmeninternen Schulungen als auch in die Seminare des VDI in Düsseldorf oder des Haus der Technik e. V. in Essen eingebunden. Die erste Auflage dieses Buches basierte auf dem damaligen Manuskript zu diesen Seminaren. In den vergangenen 30 Jahren hat sich die Normung natürlich sehr stark weiterentwickelt. Die heutige Zielsetzung der Normung und die grundsätzliche Philosophie zur Arbeit an den Normen haben sich verändert. Während man früher eher anhand von praktischen Beispielen genormt hat, existiert heute der Anspruch der mathematischen Eindeutigkeit, Vollständigkeit und insbesondere auch der Widerspruchsfreiheit. Vor allem die Widerspruchsfreiheit und die mathematische Eindeutigkeit waren in der Vergangenheit nicht immer gegeben. So wurden unterschiedliche Begriffe in verschiedenen Normen für identische Sachverhalte verwendet. Mathematische eindeutig definierte Algorithmen z. B. zur Definition von Bezügen oder zur Verifikation bestimmter Abweichungen gab es oft nicht. Abweichungen wurden anhand von einfachen Bildern erläutert.

Mit der zunehmenden Digitalisierung erhöhte sich selbstverständlich auch der Druck, mathematisch eindeutig beschreibbare Regeln für die Tolerierung und insbesondere für die Verifikation festzulegen. Infolgedessen wurden die Normen aufgrund des Anspruchs der (mathematischen) Eindeutigkeit und Vollständigkeit (sog. Toolbox-Gedanke) zwar immer präziser, gleichzeitig aber auch schwieriger und umständlicher in der Beschreibung und

Erläuterung der Toleranzproblematik. Eine heutige ISO-GPS-Norm ist zum Selbststudium daher kaum noch geeignet. Man könnte ketzerisch behaupten, dass die Klarheit und Verständlichkeit der Normen auf dem Altar der mathematischen Eindeutigkeit geopfert wurden. Aber auch der Toolbox-Gedanke, also der Anspruch, alle theoretisch denkbaren Spezifikationsprobleme mit Symbolen oder Modifikatoren abdecken zu wollen ohne über die praktische Relevanz nachzudenken, führt zu einer stetigen Komplexitätserhöhung, die für den normalen Anwender kaum noch überschaubar ist.

An dieser Stelle setzt unser Lehrbuch an. Schon mit der ersten Auflage hat Prof. Jorden das Ziel verfolgt, die insgesamt ohne Zweifel nicht ganz einfache geometrische Tolerierung für die praktischen Anwender verständlich darzustellen. Er hat immer versucht, komplexe Sachverhalte mit Hilfe einfacher, nachvollziehbarer Erläuterungen und anhand praktischer Beispiele zu verdeutlichen. Diese grundsätzliche Zielsetzung habe ich seit der 7. Auflage natürlich ebenso zur Grundlage meiner Arbeit am Buch gemacht. Die zahlreichen positiven Rückmeldungen aus der Leserschaft bestätigen, dass uns das recht gut gelungen ist.

Je länger ich in der Normung mitarbeite und die Entwicklungen dort nun schon seit gut 30 Jahren verfolge, sehe ich heute mehr denn je die Notwendigkeit, für den Anwender der geometrischen Produktspezifikationen in der industriellen Praxis und im Studium einen nachvollziehbaren Leitfaden durch den internationalen Normenschwung an die Hand zu geben. Auch in der vorliegenden 10. Auflage habe ich daher nicht den Anspruch, alle Inhalte der internationalen Normen (ISO) zu 100% wiederzugeben und zu erläutern, sondern vielmehr die 90% der Inhalte, die 99% der Anwender benötigen, verständlich und nachvollziehbar darzustellen. Durch meine jahrzehntelange Arbeit in Schulung und Beratung der industriellen Praxis konnte ich diesbezüglich eine gute Einschätzung erwerben.

Lassen sie mich abschließend noch einige sehr persönliche und für mich wichtige Ausführungen machen. Wie sie sicher gemerkt haben, ist dieses Vorwort – anders als bei den letzten Auflagen – in der „Ich-Form“ formuliert. Prof. Walter Jorden ist im Frühjahr 2018 leider verstorben. Auch wenn ich schon bei den letzten Auflagen Bilder und Texte eigenverantwortlich festgelegt habe, hat mir Prof. Jorden noch bis zur 9. Auflage als Korrektor, Ratgeber und nicht zuletzt väterlicher Förderer immer zur Seite gestanden. Die ihnen nun vorliegende Auflage musste ich ohne seinen Rat erstellen. Ich hoffe, dass es mir gelungen ist und auch weiter gelingen wird, das Buch in seinem Sinne fortzuführen. Walter Jorden war seinerzeit in der Erkenntnis der Sachverhalte und Probleme der geometrischen Tolerierung der Normung oft voraus. So hat er in vielen Veröffentlichungen und auch in frühen Auflagen unseres Buches bereits auf Defizite in der Normung hingewiesen, die heute oder erst in der jüngeren Vergangenheit eindeutig geklärt wurden. In diesem Sinne widme ich diese Auflage Herrn Prof. Dr.-Ing. Walter Jorden.

Anröchte, im Juli 2020

Wolfgang Schütte

Vorwort zur 9. Auflage

Eine technische Zeichnung muss ein Werkstück *vollständig* und *eindeutig* beschreiben. Wenn wir diese einfache Aussage wirklich ernst nehmen, dann geht jedoch der dafür notwendige Aufwand schnell ins Uferlose. Das zeigt sich an der Flut von neuen Normen, die in den letzten Jahren unter dem Oberbegriff „Geometrische Produktspezifikation“ erschienen sind. Und nicht nur ihre Zahl macht es dem Anwender schwer, Übersicht zu gewinnen bzw. zu behalten. Hinzu kommt eine Menge von neuen Begriffen, die im Zuge der internationalen Vereinheitlichung oder Angleichung darin auftauchen.

Eine Neuauflage dieses Buches wird daher für uns Verfasser zunehmend zu einer Gratwanderung. Wie bisher bemühen wir uns, Ihnen zu zeigen, dass Maße und Maßtoleranzen allein niemals ausreichend sein können, ferner wie die notwendige Form- und Lagetolerierung aufgebaut ist, wie sie eingetragen wird und was sie bedeutet, und zwar so klar und einfach wie irgend möglich. Natürlich beruht die Neuauflage auf dem aktuellen Stand der Normung. Dabei ist es jedoch nicht möglich, den Inhalt aller Normen vollständig darzustellen. Teilweise wurden Änderungen sogar bei einer erneuten Neuausgabe wieder rückgängig gemacht. Auch stoßen wir immer wieder auf ungewohnte neue Bezeichnungen, die teilweise sperrig und wenig einleuchtend sind. Wir führen sie zwar auf, mussten uns aber von Fall zu Fall entscheiden, ob wir nicht besser die bisher gewohnten, bekannten und griffigen Namen beibehalten.

Nach wie vor liegt das Grundproblem darin, dass wir Werkstücke mit Maßen und Maßtoleranzen allein nicht hinreichend *vollständig* und *eindeutig* beschreiben können. Diese Tatsache ist häufig ebenso unbekannt wie ihre Folgen. Auch heute noch sind viele Zeichnungen aufgrund unzureichender Form- und Lagetolerierung unvollständig und somit als Grundlage für Fertigung und Qualitätsprüfung unbrauchbar.

Das vorliegende Buch bietet Ingenieuren, Technikern und Zeichnern, Auszubildenden, Studierenden und Lehrenden eine systematische Einführung und fundierte Hilfen. Ohne die wissenschaftliche Exaktheit zu verlassen, haben wir Theorie und Formeln auf ein notwendiges Mindestmaß beschränkt, um das Buch anschaulich, verständlich und übersichtlich zu halten.

Kap. 1 enthält die wesentlichen *Grundlagen*; an seinem Beginn finden Sie, wie bei allen Hauptkapiteln, weitere Hinweise zum Inhalt. In Kap. 2 werden die verschiedenen *Toleranzarten* und ihre Anwendung betrachtet einschließlich der Bildung von *Bezugssystemen*, auf denen die Lagetolerierung aufbaut. Kap. 3 beschäftigt sich mit *Allgemeintoleranzen*, die für alle nicht einzeln tolerierten Elemente gelten, vorwiegend unter dem Gesichtspunkt der Form- und Lagetolerierung. Kap. 4 beleuchtet die teilweise recht unübersichtlichen *Verknüpfungen* zwischen mehreren Toleranzen und Toleranzarten; wesentlich sind hier die Nutzung der Toleranzstatistik ohne großen mathematischen Aufwand und die für die Praxis wichtige Maximum-Material-Bedingung. Zusammenfassend bietet Kap. 5 Vorgehensweisen, Leitregeln und Beispiele für die praktische *Anwendung* der Form- und Lagetolerierung; dabei werden die Kosten und die betriebliche Zusammenarbeit einbezogen.

Damit Ihnen das Lesen und Blättern auch ein wenig Spaß macht, haben wir uns um einen trotz präziser Ausdrucksweise lockeren Sprachstil bemüht, verwenden das Wörtchen

„wir“ für unsere persönlichen Ansichten, setzen über jeden Absatz eine Absatzüberschrift und bieten Ihnen (eingeklammert) zahlreiche Querverweise an.

Hofbieber und Anröchte, im November 2016

Walter Jordan und Wolfgang Schütte

Zeichen und Abkürzungen

Bedeutung: *Variable* Größen sind *kursiv* geschrieben. Das Verzeichnis enthält nur die häufiger vorkommenden Zeichen.

Zeichen und Abkürzungen:

<i>C</i>	Mittenmaß
<i>C_p</i>	Prozessfähigkeitswert
<i>f</i>	Abweichung
<i>F</i>	Fertigmaß
<i>G</i>	Grenzmaß
<i>I</i>	Istmaß
IT	Grundtoleranzgrad
<i>K</i>	Kosten
LMB	Minimum-Material-Bedingung
<i>LML</i>	Minimum-Material-Grenzmaß
<i>LMVL</i>	wirksames Minimal-Grenzmaß
MMB	Maximum-Material-Bedingung
<i>MML</i>	Maximum-Material-Grenzmaß
<i>MMVL</i>	wirksames Grenzmaß an der Maximum-Material-Grenze
<i>N</i>	Nennmaß
<i>R</i>	Rohteilnennmaß
<i>RMA</i>	Bearbeitungszugabe
<i>Rz</i>	gemittelte Rautiefe
<i>S</i>	Schließmaß; Passungsspiel
<i>t</i>	Form- oder Lagetoleranz
<i>T</i>	Maßtoleranz
VS	wirksames Istmaß
<i>W</i>	Wertigkeit
σ	Standardabweichung

Indizes:

a	arithmetisch
E	Ebenheit
F	Festwert
FP	Flächenprofil
G	Geradheit
i	Einzelwert
K	Kreisform, Rundheit
KO	Koaxialität, Konzentrität
L	Lauf, einfacher Lauf
LG	Gesamtlauf
LP	Linienprofil
N	Neigung
P	Parallelität
PS	Position
q	quadratisch
r	rechteckig
R	Rechtwinkligkeit
S	Symmetrie; Schließmaß
V	vergrößert
w	wahrscheinlich
Z	Zylinderform; zusätzlich vergrößert

1 Grundlagen des Tolerierens

***Für Leserinnen und Leser:** Das 1. Kapitel hilft Ihnen in anschaulicher Weise, einen Einstieg in das Gebiet des Tolerierens zu finden, sei es als Fundament für die tausend Einzelheiten, die in den Kapiteln 2 bis 4 für die tägliche Arbeit enthalten sind, sei es zur Orientierung für Führungskräfte ebenso wie für Neulinge oder Neugierige. In Kap. 1.1 erfahren Sie, dass die meisten technischen Zeichnungen weder vollständig noch eindeutig sind – ein unhaltbarer Zustand für das Qualitätsmanagement. Was alles die Tolerierung beeinflusst und wesentliche Begriffe dazu stehen in Kap. 1.2. Kap. 1.3 befasst sich mit Maßtoleranzen, der Urform des Tolerierens, und baut mit den Passungen in Kap. 1.3.4 Brücken sowohl zur Zusammenarbeit zwischen Konstruktion, Fertigung und Prüfung als auch zum Verständnis des Tolerierungsgrundsatzes in Kap. 1.4, der in der Praxis immer noch häufig im Dunkel der Unkenntnis liegt. Wenn es Ihnen vornehmlich um die Übersicht geht, sollten Sie mindestens die Kap. 1.1, 1.2, 1.3.4 und 1.4 lesen. Kap. 1.5 erläutert Ihnen dann in möglichst greifbarer Weise den Aufbau der Form- und Lagetolerierung, während Kap. 1.6 darlegt, wie die Toleranzen einzutragen sind, damit eine eindeutige Zeichnung entsteht.*

1.1 Probleme bei der technischen Darstellung von Bauteilen

Aufgaben der Zeichnungsdarstellung: Ein technisches Bauteil (Werkstück) entsteht in der Vorstellung des Konstrukteurs. Er fertigt davon eine technische Darstellung an in Form einer Skizze, eines rechnerinternen Modells mit Bildschirmdarstellung o.Ä. Damit ein anderer das Werkstück fertigen kann, muss die Darstellung sein:

- *vollständig*, d. h., sie muss alle wesentlichen Eigenschaften festlegen, und
- *eindeutig*, d. h., sie darf keine unterschiedlichen Auslegungen zulassen.

Heute wird dazu allgemein (noch) die technische Zeichnung verwendet, obwohl die Umsetzung der geometrischen Eigenschaften in eine Bemaßung und Tolerierung sowie deren Rückübertragung in die Geometrie des realen Werkstücks in gewisser Weise als „Umweg“ anzusehen sind. Das soll hier jedoch nicht weiter diskutiert werden.

Die Darstellung muss allen technischen und wirtschaftlichen Anforderungen genügen, d. h., sie muss insbesondere sein:

- *funktionsgerecht* (das ist die wichtigste Anforderung),
- *fertigungsgerecht* (das betrifft vor allem die kostengünstige Herstellung) und
- *prüfgerecht* (das bezieht sich auf das Qualitätswesen).

Eine Zeichnung, die diesen Anforderungen nicht entspricht, kostet in der Fertigung und im Qualitätsmanagement unnötig Zeit und Geld, d. h., sie ist unzureichend.

Vollständigkeit und Eindeutigkeit: Eine Zeichnung, die die Voraussetzungen „vollständig“ und „eindeutig“ nicht erfüllt, ist als Grundlage für die Fertigung und Qualitätssicherung unbrauchbar, insbesondere heute unter den steigenden Anforderungen an die Qualität und den rechtlichen Folgen aus der Produkthaftung. Eigene Untersuchungen in zahlreichen Industriebetrieben [Süt 95] haben ergeben, dass etwa 80% aller Zeichnungen nicht vollständig und eindeutig sind. Die folgenden Bilder verdeutlichen das anhand von zwei Werkstücken, die zwar in den Einzelheiten stark vereinfacht sind, aber dadurch die Problematik um so deutlicher herausstellen.

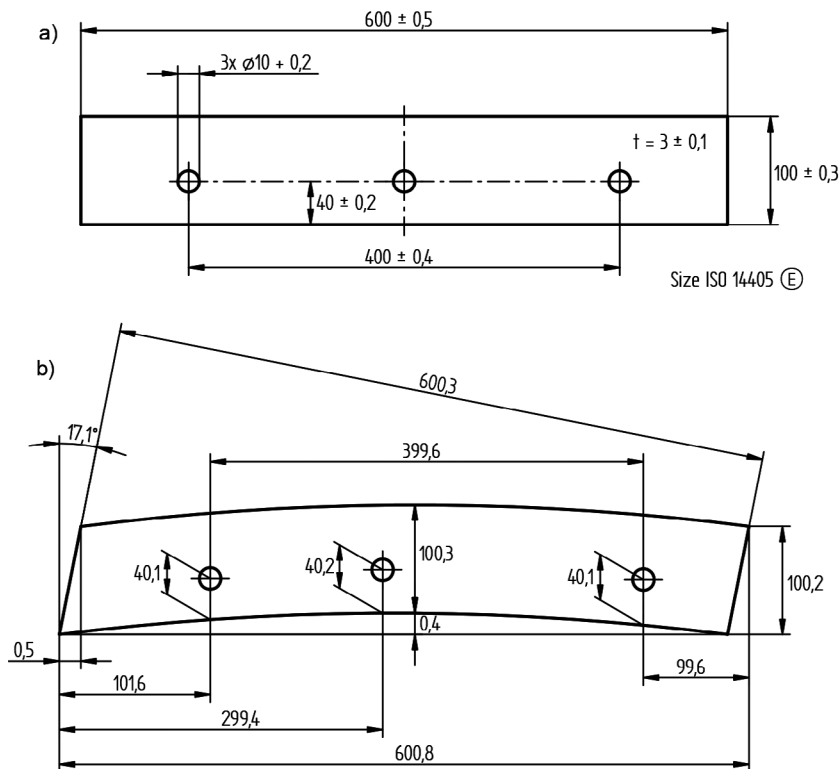


Bild 1.1: a) Zeichnung einer Schalterblende (stark vereinfacht); b) reales Werkstück mit Istmaßen (Abweichungen überhöht dargestellt)

Beispiel „Schalterblende“: Häufig enthielten und enthalten technische Zeichnungen im Wesentlichen nur *Maßangaben*. Die Bemaßung und Tolerierung wirkt auf den ersten Blick oft vollständig und eindeutig, ist es aber nicht. *Bild 1.1* stellt die Schalterblende einer Ma-

schine dar, d. h. eine dünne Kunststoffplatte, die in eine entsprechende Trägerplatte eingearastet wird. Bild 1.1 a enthält scheinbar alle zur Erläuterung notwendigen Zeichnungsangaben. Alle Toleranzen sind hier einzeln eingetragen; Allgemeintoleranzen sollen nicht existieren. Werkstoff- und Oberflächenangaben sind weggelassen.

Bild 1.1 b gibt ein reales Werkstück mit Istmaßen wieder; die Abweichungen sind überhöht dargestellt. Der Vergleich mit den Zeichnungsangaben ergibt Folgendes:

- Alle Abweichungen sind zulässig bis auf eine einzige.
- Die in der Mitte gemessene Gesamthöhe von 100,3 mm zuzüglich 0,4 mm = 100,7 mm ist nicht zulässig. Hier wird die Hüllbedingung verletzt. Sie ist gültig, weil auf der Zeichnung „Size ISO 14405 $\text{\textcircled{C}}$ “ steht.
- Die Länge von 600,8 mm ist zulässig. Das Maß $600 \pm 0,5$ mm bezieht sich auf den Abstand der beiden Seitenkanten voneinander, die hier ein lineares Größenmaßelement bilden (s. Kap. 1.3); der beträgt 600,3 mm und hat nichts zu tun mit der Richtung der unteren Längskante.
- Der Abstand der beiden Löcher von 399,6 mm ist in Ordnung, obwohl für den Abstand von Bohrungen streng genommen kein Maß verwendet werden darf (s. Kap. 1.3). Der Versatz des Lochbildes um 1 mm aus der Mitte (Maße 101,6 und 99,6 mm) ist zulässig, da er überhaupt nicht toleriert ist. Hier fehlt eine Symmetrietoleranz.
- Generell ist die Lage der Bohrungen das Problem. Sie kann und darf nach ISO 14405 aufgrund der Mehrdeutigkeit grundsätzlich nicht mit Maßen definiert werden. Ein Maß ist ein Abstand zweier gegenüberliegender Punkte an einem Größenmaßelement.
- Insofern erscheint der Abstand der Bohrungen von der gebogenen unteren Kante (40,1 bzw. 40,2 mm) zulässig. Denn in keinem Fall wird der Abstand so wie es die Funktion meist fordert von einem anliegenden Lineal o. Ä. aus gemessen (Krümmung 0,4 mm). Tatsächlich ist aber auch die Messung des „Maßes“ von einem Punkt auf der Kante zum Mittelpunkt der Bohrung nicht zulässig. Es ist nämlich nicht klar, wo der Punkt auf der Kante liegen soll und es handelt sich hier nicht um ein Größenmaßelement. Die Maße 40 und 400 sind keine Größenmaße.

Wenn Ihnen die obigen Aussagen suspekt erscheinen, dann lohnt es sich für Sie, dieses Buch weiterzulesen. (Die gleiche Platte mit korrekter Tolerierung finden Sie in Kap. 5.4, Bild 5.21.)

Beispiel „Lochplatte“: Eine Sonderwerkzeugmaschine zur Fertigung des Werkstücks in *Bild 1.2 a* (nach [Jor 91a]) war der Anlass zu einem jahrelangen Rechtsstreit zwischen dem Abnehmer und dem Hersteller der Maschine. Das quaderähnliche Werkstück wurde ebenfalls stark vereinfacht; die auf der Zeichnung angeführten Allgemeintoleranzen sind zusätzlich (explizit) eingetragen. Das Bauteil wird zur Bearbeitung auf der rechten Seitenfläche aufgespannt und legt sich dabei mit der unteren Fläche in der Vorrichtung an. Das Problem reduziert sich hier auf die Frage, wie weit die Lage der Bohrungen von der unteren Fläche abweichen darf. Sie lässt sich nicht beantworten, weil die Zeichnung unvollständig ist:

- Teilweise besteht in der Praxis die Vorstellung, man könne die Maßtoleranzen der drei symmetrisch liegenden Maße einfach halbieren und auf die Mitte beziehen, Bild 1.2 b, sodass jede Bohrung und auch die Außenflächen jeweils eine Toleranzzone von $\pm 0,15$ mm relativ zur Mittelebene hätten. Diese Vorstellung ist falsch. Auch wenn die Abstandstoleranz der Löcher bzw. der Flächen voll ausgeschöpft wird, kann ein Mittenversatz auftreten. Hier fehlt wiederum die Symmetrietoleranz.

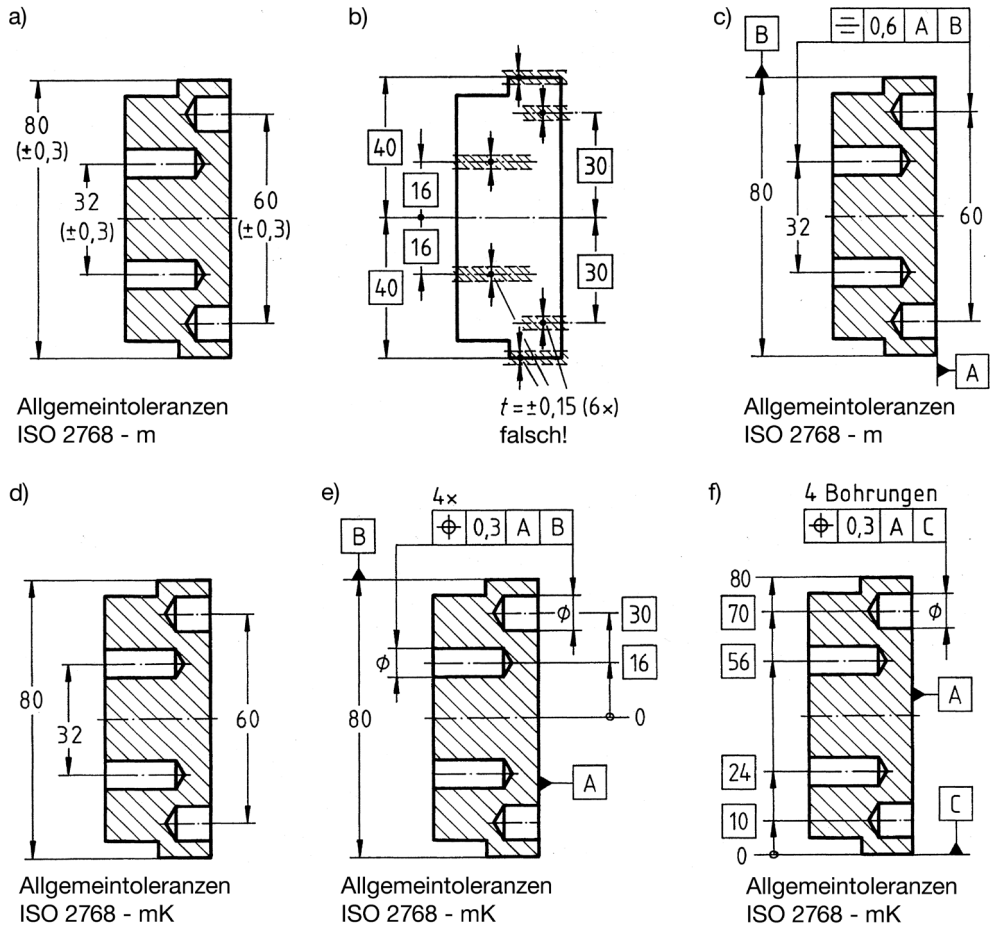


Bild 1.2: Zusammenhang von Maßtoleranzen und Lageabweichungen. a) unvollständige Angaben; b) falsche Toleranzvorstellung zu a; c) zusätzliche Symmetrietolerierung; d) vollständige Allgmeintoleranzangabe; e) Positionstolerierung ähnlich der Vorstellung von b; f) Positionstolerierung entsprechend der Werkstückeinspannung

- Die Symmetrietoleranz lässt sich einführen entweder als Einzelangabe, Bild 1.2 c, wobei die rechte Auflagefläche A und die Mittelebene B als Bezüge dienen (s. Kap. 2.3.4), oder durch eine vollständige Allgmeintoleranzangabe mit dem 2. Kennbuchstaben (hier K) für Form- und Lage-Allgmeintoleranzen (s. Kap. 3.2), Bild 1.2 d.
- Wenn man dagegen die Toleranzzonen etwa so wie bei b jeweils von der Mittelebene ausgehend festlegen will, so ist eine Positionstolerierung der einzelnen Löcher nach Bild 1.2 e erforderlich.
- Der beschriebenen Aufnahme des Werkstücks in der Bearbeitungsvorrichtung würde jedoch eher eine Positionstolerierung mit Bezug auf die rechte Auflagefläche A und die untere Fläche C entsprechen, Bild 1.2 f. Die Mittelebene spielt hierbei keine Rolle.

Das Beispiel soll hier nicht mit allen Einzelheiten diskutiert werden. Es dient, wie das vorige, vor allem dazu, das Bewusstsein für die Problematik zu wecken:

1-1 Vollständigkeit und Eindeutigkeit: Eine technische Einzelteilzeichnung muss ein Werkstück vollständig und eindeutig beschreiben. Ohne Form- und Lagetoleranzen ist das nicht möglich.

Weitere Praxisbeispiele: Die Gültigkeit und Bedeutung der Leitregel 1-1 wird durch zahlreiche Fälle aus der Praxis belegt. Dazu hier nur zwei weitere Beispiele:

- Ein Großauftrag für 4000 Ventile mit entsprechendem Preisdruck führte dazu, dass sich ein Betrieb mit den gleichen Zeichnungen eine kostengünstigere Gießerei für die Ventilgehäuse suchte. Bald nach der Auslieferung waren alle Ventile wieder zurück wegen mangelnder Dichtigkeit zwischen den Gummidichtelementen und den entsprechenden unbearbeiteten Gussflächen, obwohl die Gehäuse die Zeichnungsanforderungen erfüllten.
- Immer wieder finden sich in der Praxis Aussagen wie: „Wenn wir die Teile im *eigenen* Hause fertigen, dann passen sie. Lassen wir sie nach denselben Zeichnungen *auswärts* fertigen, dann passen sie nicht.“

Das verwundert nicht, wenn die Zeichnungen nicht vollständig und eindeutig sind. Darin zeigt sich die unabdingbare Notwendigkeit, Zeichnungsunterlagen zu schaffen, die den Anforderungen aus der technisch-wirtschaftlichen Verflechtung, aus Qualitätsanforderungen und aus Produkthaftungsansprüchen genügen. Dieses Buch will dazu die Grundlagen liefern.

1.2 Einflussgrößen auf die Toleranzfestlegung

1.2.1 Gestaltabweichungen und ihre Grenzen

Gestaltabweichungen: Wenn ein Konstrukteur ein Werkstück zeichnet oder wenn ein CAD-System es als rechnerinterne Darstellung abspeichert, so gehen beide von einer *geometrisch idealen Gestalt* oder *Nenngestalt* aus. Eine Idealform besteht jedoch nur im Bereich des Geistes bzw. der Information (CAD-Modell). Bei der materiellen Fertigung entstehen immer *Abweichungen* zwischen der *Istgestalt* und der vorgestellten idealen Gestalt. Die Abweichungen können sich auf die folgenden Gestalteigenschaften beziehen, die Bild 1.3 am Beispiel einer Bohrung erläutert:

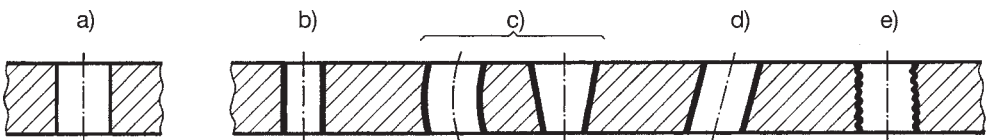


Bild 1.3: Gestaltabweichungen. a) Nenngestalt; Abweichungen von b) Maß, c) Form, d) Lage, e) Oberfläche

- a) **Nenngestalt:** Sie entspricht der idealen Vorstellung.
- b) **Maß** (Größe): Die Bohrung kann zu klein oder zu groß sein.
- c) **Form:** Das Loch kann z. B. krumm (verzogen) sein. Auch wenn das Maß, d. h. der Abstand von jeweils zwei gegenüberliegenden Punkten, stimmt, ist die Funktion der Bohrung nicht gewährleistet. Bei einer konischen Bohrung besteht dagegen ein zwangsläufiger Zusammenhang zwischen Maß und Form.
- d) **Lage:** Die Bohrung kann z. B. schief oder an der falschen Stelle sitzen. Lageabweichungen werden von Maßtoleranzen nur teilweise eingeschränkt (vergleiche Symmetrieabweichungen in Bild 1.1 und Bild 1.2).
- e) **Oberfläche:** Die Oberfläche des Lochs kann z. B. rau oder riefig sein. Diese Abweichungen zählen zur *Feingestalt*, die unter b bis d genannten zur *Grobgestalt*. Die Grobgestalt wird über die Spitzen der Rauheit gemessen und daher in diesem Buch überwiegend behandelt. Die Feingestalt kann aber die Messergebnisse beeinflussen; sie wird daher in Kap. 4.6 kurz betrachtet.

Entstehung von Gestaltabweichungen: Form- und Lageabweichungen haben oft andere Ursachen als Maßabweichungen. Bei spanender Fertigung geht z. B. die Einhaltung einer Maßtoleranz meist unmittelbar auf den Bediener (Dreher) oder den Einrichter der Maschine zurück, während Form- und Lageabweichungen maschinen- bzw. prozessbedingt und daher nur mittelbar zu beeinflussen sind. Beispielsweise hängt die Rundheitsabweichung des Drehteils in *Bild 1.4a* von der Lagerung der Maschinenspindel ab, während die Geradheitsabweichung auf der elastischen Verformung des Werkstücks infolge der Zerspanungsbedingungen beruht; die Koaxialitäts- bzw. Laufabweichung bei b) folgt aus der Ungenauigkeit des Spannfutters. Natürlich gibt es noch zahlreiche andere Ursachen (z. B. Verzug oder Einfallen von Spritzgussteilen).

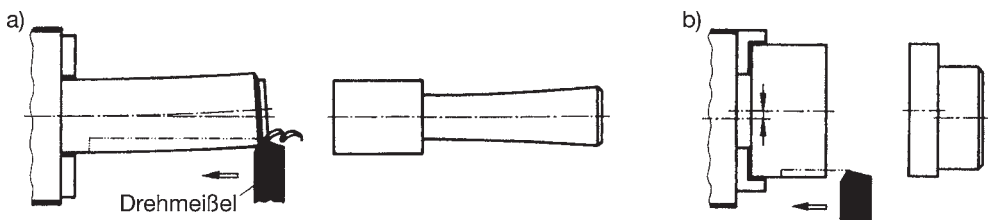


Bild 1.4: Beispiele für die Entstehung von a) Formabweichungen (Geradheit, Zylindrizität), b) Lageabweichungen (Koaxialität, Rundlauf)

Gestalt und Funktion: Jedes Bauteil (das kann ein Werkstück sein, eine Baugruppe, ein Aggregat o. Ä.) hat bestimmte Funktionen zu erfüllen; dafür wird es hergestellt. Die Funktion verlangt in der Regel den Kontakt mit benachbarten Bauteilen, allgemein im Sinne einer *Paarung* (z. B. Einlegen oder Verkleben) oder speziell als *Passung* (z. B. ein Gleitstein in einer Nut).

Die geometrische Funktionsfähigkeit im Sinne der Paarungsfähigkeit wird meist durch das Zusammenwirken mehrerer Arten von Abweichungen bestimmt. Ob beispielsweise ein Mitnehmerbolzen (*Bild 1.5*, hier in geometrisch idealer Form und Lage vorgestellt)

in eine zugehörige Bohrung passt, hängt vom *Maß*, von der *Form* und von der *Lage* der Bohrung ab. Der für die Funktion erforderliche Kontakt eines Bauteils zu den benachbarten Teilen wie auch alle Messungen der Bauteilgestalt erfolgen über die *Oberfläche*. Daher müssen auch Oberflächenabweichungen in die Betrachtung einbezogen werden (s. Kap. 4.6).

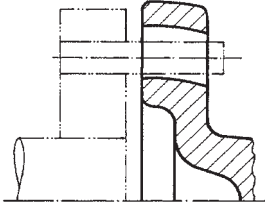


Bild 1.5: Geometrische Funktion einer Bohrung bei der Paarung mit einem (geometrisch idealen) Mitnehmerbolzen

Toleranzbegriffe: Weil Abweichungen unvermeidlich sind, müssen wir für alle Eigenschaften eines Werkstücks Grenzen angeben, innerhalb derer die Abweichungen liegen dürfen. Die dazu notwendigen Begriffe sind z. T. in DIN EN ISO 286 festgelegt. Falls sie noch ungewohnt sind, stellen wir sie den bei uns bislang gebräuchlichen Bezeichnungen (gekennzeichnet durch „früher“) gegenüber. Manchmal lässt es sich nicht vermeiden, noch ein paar zusätzliche Begriffe zu verwenden; die werden entsprechend erläutert. Die wichtigsten Begriffe sind:

- **Grenzabweichungen** (früher „zulässige Abweichungen“) sind die Grenzen, innerhalb derer Abweichungen zulässig sind, d. h. die größten zulässigen Abweichungen. Sie legen das „Soll“ fest; der Wortteil „Grenz-“ macht das deutlich. Bei Form- und Lagetoleranzen ist der Name „Grenzabweichungen“ nicht genormt und wurde nicht verwendet. Das kann jedoch zu Mißverständnissen führen. Daher haben wir diesen Begriff hier eingeführt [Jor 92] und benutzen ihn konsequent in diesem Buch. DIN EN ISO 286 behandelt nur Maße und verwendet daher den Begriff „Grenzabmaße“ für die Grenzabweichungen von den Nennmaßen.
- **Toleranz T** ist der Bereich zwischen den Grenzabweichungen; letztere zählen noch dazu.
- **Abweichung f** ist die Differenz zwischen dem Istwert (z. B. einem gemessenen Istmaß am Werkstück) und seinem Nennwert bzw. idealen Sollwert:

$$f = \text{Istwert} - \text{Nennwert} \quad (1.1)$$

- **Zulässige Abweichung** ist jede vorhandene Abweichung, die innerhalb der Grenzabweichungen, d. h. innerhalb der Toleranz liegt; sie stellt einen Istwert dar.
- **Fehler** ist eine vorhandene Abweichung, die eine Grenzabweichung überschreitet.

Aufgrund dieser Definitionen muss man z. B. vom „Abweichungsfortpflanzungsgesetz“ statt vom „Fehlerfortpflanzungsgesetz“ sprechen. Aus den obigen Festlegungen und den Erörterungen in Kap. 1.1 folgt:

1-2 Vollständige Grenzangaben: Alle Gestalteigenschaften (Maß, Form, Lage, Oberfläche) müssen vollständig und eindeutig eingegrenzt, d.h. toleriert sein. Das kann geschehen durch

- *Einzeltoleranzen* (meist für funktionswichtige Formelemente) oder
- *Allgemeintoleranzen* (für alle anderen Elemente, s. Kap. 3).

Bei konsequenter Anwendung dieser Leitregel lassen sich funktionswichtige Formelemente auf der Zeichnung anhand der einzeln eingetragenen Toleranzen, insbesondere Form- und Lagetoleranzen, unmittelbar erkennen. Sinngemäß ist Regel 1-2 auch für alle anderen Werkstückeigenschaften wie Werkstoff, Härte, Farbe usw. anzuwenden [Jor 91b]. Für die *Prüfung* gilt generell:

1-3 Toleranzüberprüfung: Eine tolerierte Werkstückeigenschaft hält die Toleranz ein, wenn die vorhandene Abweichung (Istabweichung) die Grenzabweichung(en) nicht überschreitet.

1.2.2 Aufgaben und Bedingungen für Toleranzen

Bedeutung: Die Festlegung von Toleranzen ist nötig zur Erfüllung der in *Bild 1.6* skizzierten und in den Regeln 1-4 bis 1-7 zusammengefassten Aufgaben und Bedingungen.

Größtmögliche Toleranzen: Sind die Abweichungen zu groß, so erfüllt das Bauteil seine vorgegebene Funktion nicht oder lässt sich nicht montieren. Daraus ergeben sich die größtmöglichen Grenzabweichungen bzw. die weitesten Toleranzen. Allerdings existiert hier keine scharfe Grenze (s. Kap. 5.2.1).

1-4 Funktionserfüllung: Jedes Bauteil ist so zu tolerieren, dass es seine vorgegebene Funktion erfüllt, und zwar während der gesamten vorgesehenen Lebensdauer.

Jedes Werkstück wird hergestellt, um bestimmte Funktionen zu erfüllen. Die Funktionserfüllung genießt deshalb in der Regel die höchste Priorität. Bei der Tolerierung sind z. B. die voraussehbare Abnutzung (Verschleiß) und gebrauchsbedingte Werkstoffveränderungen (z. B. Langzeitschwindung) zu berücksichtigen.

1-5 Montierbarkeit: Das Bauteil muss sich montieren lassen, und zwar entweder

- *unbedingt*, d. h., gleiche Teile sind beliebig austauschbar, oder
- *bedingt*, d. h., Teile werden zusortiert und sind dann nur gemeinsam austauschbar.

Beispiel: Die Gewindebohrungen an einem Maschinengestell und die Durchgangsbohrungen am zugehörigen Deckel kann man so tolerieren, dass jeder Deckel zu jedem Gestell

passt. Oder man kann die Toleranzen etwas vergrößern, somit billiger produzieren und in Kauf nehmen, dass einmal ein Deckel bei der Montage nicht passt; dann muss man einen anderen, passenden Deckel aussuchen. Der Käufer einer Maschine merkt davon nichts.

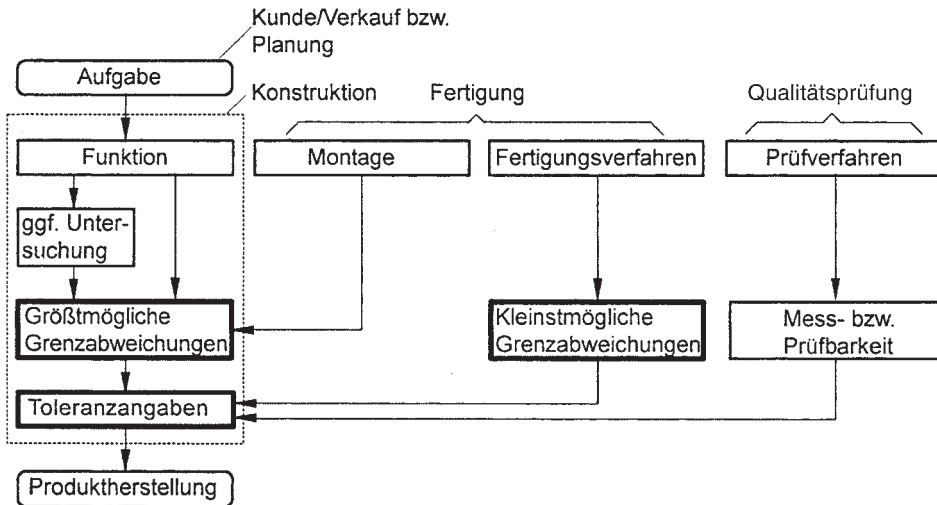


Bild 1.6: Einflussgrößen auf die Festlegung von Toleranzen

Kleinstmögliche Toleranzen: Jedes Fertigungsverfahren hat seine eigenen Genauigkeitsgrenzen; d. h., bestimmte Abweichungen lassen sich damit nicht unterschreiten. Diesseits der kleinsten *technisch möglichen* Abweichungen gibt es einen Bereich mit größeren Toleranzen, innerhalb dessen man *wirtschaftlich* (prozesssicher) fertigen kann. Auch hier lassen sich allgemein keine exakten Grenzen ziehen; sie sind abhängig von der Art der Maschine, von ihrem Zustand und vom Know-how des Betriebs.

1-6 Herstellbarkeit: Das Bauteil muss sich innerhalb der Toleranzen fertigen lassen, und zwar möglichst sicher (prozessfähig) und kostengünstig.

Es sollte selbstverständlich sein, dass die Toleranzen in der Zeichnung nicht kleiner sein dürfen, als es diesen Grenzen entspricht. Dennoch sind Gegenbeispiele in der Praxis nicht selten.

Beispiel: An einem Spritzgussteil aus Polyamid verlangt der Konstrukteur aus Funktionsgründen bei einem Maß von 150 mm Grenzabmaße von $\pm 0,1$ mm. Die Fertigung erklärt das für unerreichbar und fertigt seit Jahren $\pm 0,3$ mm. Praktisch ist das Teil sowohl montierbar als auch funktionsfähig. Das zugehörige Produkt ist auf dem Markt bestens bewährt. Daraus folgt zweierlei:

- Der Konstrukteur hat die funktionsbedingten Grenzabweichungen zu eng gesetzt, sei es aus Vorsicht oder aus Unkenntnis (s. „zur Übergangspassung“ in Kap. 1.3.4). Das ist in der Praxis häufiger zu beobachten. Es führt regelmäßig zu überhöhten Kosten (s. Kap. 5.2.1) und zu innerbetrieblichen Schwierigkeiten (s. Kap. 5.3.3).

- Das Problem liegt hier eher im Bereich der menschlichen als der technischen Toleranzen. Eine dauernde Überschreitung der Toleranzgrenzen bzw. Abweicherlaubnis dürfte vom Qualitätsmanagement niemals hingenommen werden, sondern müsste zu geänderten Festlegungen führen (s. Kap. 5.3.3).

Prüfung von Toleranzen: Zeichnungsangaben, die sich nicht messen oder prüfen lassen, sind wertlos.

1-7 Mess- und Prüfbarkeit: Das Bauteil muss sich möglichst einfach und sicher prüfen oder messen lassen, und zwar so, dass die wesentlichen Funktions- und Montageeigenschaften möglichst direkt erfasst werden (s. Kap. 5.3.1).

Diese Forderung betrifft den Aufbau der Bemaßung und Tolerierung in der Zeichnung. Sie richtet sich, neben der Erfüllung der funktions-, fertigungs- und montagebedingten Anforderungen, vor allem auch nach der messtechnischen Ausstattung des Betriebs. Oft entscheidet die Art der Messung über die Wahl bestimmter Toleranzarten (z.B. Koaxialität oder Rundlauf bei einer Welle) und der Bezugselemente (z.B. Lagersitze oder Stirnzentrierungen).

Festlegung von Toleranzen: Verantwortlich für die Festlegung von Toleranzen ist der Konstrukteur bzw. die Abteilung, die die Einzelteilzeichnungen erstellt und prüft. Wie aus Bild 1.6 hervorgeht, unterliegt jedoch die Tolerierung einer Vielzahl von Einflussgrößen mit teilweise einander widersprechenden Anforderungen:

- Die *Aufgabe* und damit die *Funktion* des Produkts bzw. des Bauteils stammen von einem Auftraggeber. Das kann ein Kunde sein, vertreten durch den Außendienst oder den Vertrieb, oder aber die Produktplanungs- bzw. die Entwicklungsabteilung. Von diesen Stellen sind gegebenenfalls Informationen einzuholen, welche Angaben der Aufgabenstellung wirklich harte *Forderungen* darstellen, welche Angaben etwa aus Vorsicht von den übermittelnden Stellen hineingenommen wurden und welche als *Wünsche* anzusprechen sind, deren Realisierung vom Aufwand abhängig sein sollte. Diese Informationen sollte der Konstrukteur in eine präzise *Anforderungsliste* aufnehmen.
- Kenntnisse und Erfahrungen über die *Herstellung* und die *Montage* der Teile, über Fertigungsverfahren, Maschinen und Kapazitäten sind im Fertigungsbereich, insbesondere in der Arbeitsvorbereitung, vorhanden, und zwar in einem Maße, wie sie ein Konstrukteur naturgemäß nie besitzen kann.
- Entsprechendes gilt für das Qualitätsmanagement bezüglich der Art der Bemaßung und der Tolerierung im Hinblick auf eine optimale *Mess- und Prüfbarkeit*.

Daraus folgt, dass die Tolerierung niemals dem Konstrukteur allein übertragen oder zugemutet werden darf. Eine sowohl unter funktionellen als auch unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten optimierte Tolerierung setzt unbedingt eine gute, auf das gemeinsame Betriebsziel gerichtete Zusammenarbeit von Konstruktion, Fertigung und Qualitätsmanagement voraus, ggf. unter Einbezug weiterer Abteilungen. In den meisten Betrieben gibt es kaum eine größere Rationalisierungsreserve als eine solche Kooperation, bei der die Entscheidungen von den betroffenen Bereichen gemeinsam erarbeitet und verantwortet werden (s. dazu Kap. 5.3.3). Umgekehrt verhindert enges, nur auf die scheinbare Sicher-

heit der eigenen Abteilung gerichtetes Ressortdenken mit Sicherheit, dass Toleranzen optimal festgelegt werden, und führt damit unweigerlich zu Schwierigkeiten und unnötig hohen Kosten für den Betrieb.

1.3 Maßtoleranzen und Passungen

Bedeutung: Mit Maßtoleranzen hat die Tolerierung begonnen. Sie sind nicht nur die Grundlage der Tolerierung, sondern auch wesentlich für das Verständnis der Form- und Lagetoleranzen. Daher bringt dieses Kapitel vor allem die dazu notwendigen Begriffe und Erläuterungen. Darüber hinausgehende Einzelheiten (z. B. die Ermittlung von Toleranzintervallen – früher „Toleranzfelder“ genannt – und Passungstoleranzen) finden Sie in der Fachliteratur bzw. in DIN EN ISO 286.

1.3.1 Maßbegriffe

Normung: Maß- und Toleranzbegriffe sind genormt in DIN EN ISO 286-1 und seit 2011 in DIN EN ISO 14405-1. Erstere hat bereits in der Vorgängernorm DIN EN ISO 286 aus dem Jahr 1990 die DIN 7182 ersetzt sowie, zusammen mit Teil 2, frühere DIN-Normen, die das ISO-Toleranzsystem enthalten (s. Kap. 1.3.3).

Maßdefinition: Ein Maß besteht aus einem Zahlenwert und einer Einheit (z. B. „100 mm“). Es ist üblich, unter „Maß“ allgemein ein Längenmaß zu verstehen; alle anderen Maßarten werden speziell benannt (z. B. „Winkelmaß“). ISO 14405-1 schränkt den Begriff „Maß“ noch weiter ein. Ein Maß gilt nur als Eigenschaft von bestimmten linearen *Größenmaßelementen*; d. h., es ist entweder der *Durchmesser eines Kreiszyinders* bzw. einer *Kugel* oder der *Abstand* von zwei sich gegenüber liegenden *Parallelebenen*. Wir nennen diese Elemente hier meist einfach *Größenmaßelemente* (s. auch Kap. 1.3.2 und 1.4.3).

Nach dieser Norm ist ein Maß eine Eigenschaft, die das Maßelement in sich trägt („intrinsisch“ nennt sich das). Es kann in verschiedener Weise ermittelt und ausgewertet werden; damit ergeben sich unterschiedliche *Maßmerkmale*. Die Auswertung wird beschrieben durch sog. *Spezifikationsoperatoren* (s. Kap. 1.3.2). Im Normalfall, d. h., wenn keine zusätzlichen Angaben beim Maß stehen, gilt der *Standardspezifikationsoperator*. Dieses Wortungetüm besagt Folgendes:

1-8 Längenmaß: Sofern nicht anders gekennzeichnet, ist ein Maß der *Abstand zwischen zwei gegenüberliegenden Punkten*. Die Maßtoleranz wird daher im Normalfall im Zweipunktverfahren geprüft.

Das bedeutet, dass eine Maßangabe nichts mit der Form des bemaßten Elements zu tun hat, solange nicht zusätzliche Festlegungen getroffen werden (s. Kap. 1.4). Gemessen wird senkrecht zur Hauptrichtung des Elements (Näheres s. Kap. 1.5.4). Nach ISO 14405-1 sind

auch andere Maßmerkmale möglich. Sie erfordern jedoch eine besondere Kennzeichnung (s. Kap. 1.3.2).

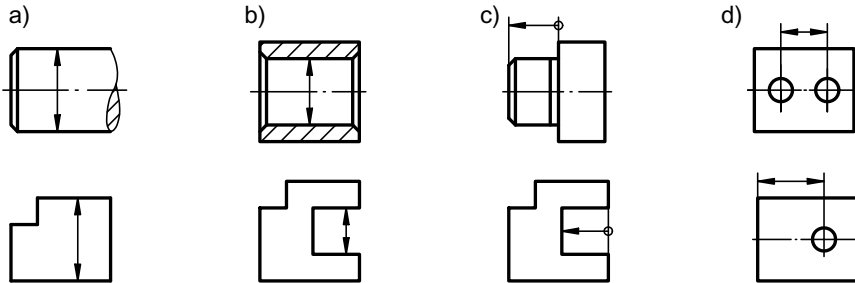


Bild 1.7: Maßgruppen. a) Außenmaße, b) Innenmaße, c) Stufenmaße, d) Abstandsmaße

Maßgruppen: Bei Längenmaßen unterscheidet man vier Maßgruppen, *Bild 1.7:*

- a) **Außenmaße** (z. B. Wellendurchmesser oder Blechdicke),
- b) **Innenmaße** (z. B. Bohrungsdurchmesser oder Nutbreite): Diese beiden Gruppen verbinden *gegenüberliegende* Flächen bzw. Elemente derselben Fläche (wie bei einer Zylinderfläche) gemäß der Definition in Regel 1-8.
- c) **Stufenmaße** (z. B. Absatzlänge oder Nuttiefe): Sie liegen zwischen *gleichgerichteten* Flächen und entsprechen daher nicht der Regel 1-8. Das verursacht messtechnische Probleme. Ein Stufenmaß lässt sich nur mit Hilfsmitteln messen (z. B. mit einem angelegten Lineal). Die Art der Messung sollte durch eine eindeutige Zeichnungseintragung festgelegt werden (s. Kap. 1.5.4).
- d) **Abstandsmaße** (z. B. Lochmittenabstand oder Teilungsmaß): Sie nehmen insofern eine Sonderstellung ein, als ihre Toleranz genau genommen keine reine Maßtoleranz, sondern eine Lagetoleranz darstellt. (Näheres dazu s. Kap. 1.3.2 unter „Maximum-Material-Grenzmaß“).

An dieser Stelle weisen wir darauf hin, dass diese Maßgruppen in der Industrie heute noch sehr viel verwendet werden, obwohl lineare Größenmaße nach DIN EN ISO 14405 nur für die Bemaßung von Größenmaßelementen verwendet werden dürfen. Stufenmaße und Abstandsmaße (s. Bild 1.7 c und d) sind aufgrund ihrer Mehrdeutigkeit kritisch und sollten durch geeignete Lagetoleranzen ersetzt werden.

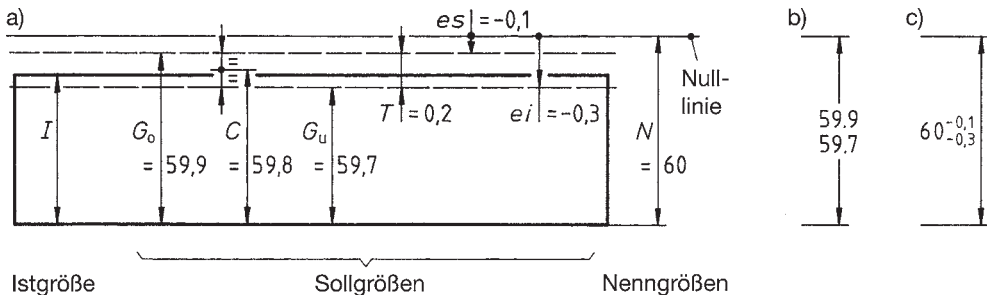


Bild 1.8: a) Maßarten und Toleranzbegriffe, dargestellt als Außenmaße an einer „Frontplatte“; b) Angabe von Grenzmaßen; c) Angabe als toleriertes Maß

Maßarten: Die wesentlichen Maßarten und Toleranzbegriffe sind in *Bild 1.8* am Beispiel eines Außenmaßes (z. B. der Höhe einer „Frontplatte“) dargestellt. Sie lassen sich auf die anderen Maßgruppen übertragen.

- **Örtliches Istmaß I** (local size) ist eine *gemessene* Größe. Es unterscheidet sich vom tatsächlich vorhandenen Maß dadurch, dass es durch die Art und die Abweichungen der Messung (früher „Messfehler“) verändert ist. Messungen an verschiedenen Stellen ergeben in aller Regel verschiedene örtliche Istmaße; darunter gibt es ein *Größtmaß* und ein *Kleinstmaß* (das sind Istgrößen).
- **Grenzmaße G** (limits of size) sind die Grenzen für das Istmaß I . Sie werden *Höchstmaß* G_o und *Mindestmaß* G_u genannt (im Beispiel $G_o = 59,9$ und $G_u = 59,7$).
- **Mittenmaß C** ist der arithmetische Mittelwert zwischen Höchst- und Mindestmaß:

$$C = \frac{G_o + G_u}{2} \quad (1.2)$$

Es wird vor allem beim statistischen Tolerieren gebraucht (s. Kap. 4.2.3). Mit dem Nennmaß N (s. u.) hat es nichts zu tun.

- **Toleranz T** (tolerance) oder Maßtoleranz (size tolerance), früher auch „Toleranzbreite“ oder „weite“, ist die Differenz zwischen Höchst- und Mindestmaß:

$$T = G_o - G_u \quad (1.3)$$

Die Toleranz hat kein Vorzeichen, d. h., sie ist immer ein positiver Zahlenwert.

Mit der Angabe von G_o und G_u ist an sich die Tolerierung vollständig. In manchen Ländern schreibt man auch einfach die beiden Grenzmaße untereinander an den Maßpfeil, entsprechend *Bild 1.8 b* [ASM 94]. Üblich ist aber die Tolerierung über ein *Nennmaß* (c):

- **Nennmaß N** (basic size, nominal size) ist eine ideal gedachte Bezugsgröße, oft (aber nicht zwingend) ein runder Zahlenwert. Das Nennmaß wird in der Zeichnung abgebildet, ist die Basis für die rechnerinterne Darstellung von Geometriemodellen und dient ferner zur Gliederung von Maßbereichen (z. B. in Toleranztabellen). N hat selbst keine Abweichungen, sondern dient zur Festlegung der Grenzmaße mittels der *Grenzabmaße* (limit deviations; früher einfach „Abmaße“). In der grafischen Darstellung von Toleranzen wird das Nennmaß meist durch die sog. „Nulllinie“ (zero line) wiedergegeben.
- **Oberes Abmaß** (upper deviation) *ES* bzw. *es* (früher A_o) liefert immer das *Höchstmaß* G_o :

$$G_o = N + ES \quad (\text{für Innenmaße, kurz „Bohrungen“}) \text{ bzw.} \quad (1.4)$$

$$G_o = N + es \quad (\text{für Außenmaße, kurz „Wellen“})$$

- **Unteres Abmaß** (lower deviation) *EI* bzw. *ei* (früher A_u) ergibt entsprechend das *Mindestmaß* G_u :

$$G_u = N + EI \quad (\text{für Bohrungen}) \text{ bzw.} \quad (1.5)$$

$$G_u = N + ei \quad (\text{für Wellen})$$

Die internationalen Bezeichnungen für die Grenzabmaße sind vielleicht noch ungewohnt. Man kann sie sich etwa so merken:

- Bohrung – Großbuchstaben
- E/e – „extrem“ (im Sinne von Grenze)
- S/s – „superior“ (oberes)
- I/i – „inferior“ (unteres).

Beide Grenzabmaße sind, wie alle Abmaße, vorzeichenbehaftet. Mit den entsprechenden Vorzeichen ergibt sich die *Toleranz T*:

$$T = ES - EI \quad \text{bzw.} \quad T = es - ei \quad (1.6)$$

1.3.2 Besondere Maßarten

Bedeutung: Die im Folgenden betrachteten Maßarten sind von besonderer Bedeutung für die Paarung bzw. Passung, d. h. für die *Fügarkeit* von Bauteilen. Darüber hinaus eröffnet ISO 14405 seit 2011 die Möglichkeit, in der Zeichnung die Art der messtechnischen *Ermittlung* eines Maßes eindeutig festzulegen, so wie sie in der Messtechnik seit Langem möglich und üblich ist. Diese *Maßmerkmale* werden hier ebenfalls dargestellt und erläutert.

Maximum-Material-Grenzmaß *MML* (maximum material limit), auch Maximum-Material-Grenze oder Maximum-Material-Maß, ist dasjenige der beiden Grenzmaße, das ein Maximum an Material (Volumen) ergibt, d. h. bei dem das Element seine größte Masse besitzt. Nach *Bild 1.9* ist es

- a) beim *Außenmaß* („Welle“) das *Höchstmaß*,
- b) beim *Innenmaß* („Bohrung“) jedoch das *Mindestmaß*;
- c) beim *Abstandsmaß* gibt es *kein* Maximum-Material-Grenzmaß.

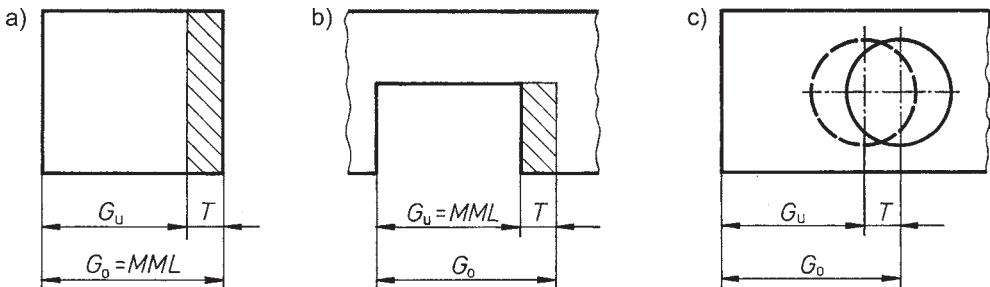


Bild 1.9: Maximum-Material-Grenzmaß *MML* bei a) Außenmaß, b) Innenmaß, c) Abstandsmaß (kein *MML*)

MML wird in der Praxis auch „Gutgrenze“ genannt; sie entspricht der „Gutseite“ der Prüflern. Falls es überschritten ist, kann das Werkstück durch Materialabnahme nachgearbeitet werden. Wenn bei einer Passung beide Passelemente auf der Maximum-Material-Grenze liegen, d. h. „Maximum-Material-Zustand“ haben, ergibt sich das kleinste Spiel bzw. das größte Übermaß (s. Kap. 1.3.4).

Beim *Abstandsmaß* ändert sich die Materialmenge nicht, gleichgültig ob das Istmaß beim Höchst- oder beim Mindestmaß liegt. Daran zeigt sich, dass die Toleranz hier einen anderen Charakter besitzt. Sie entspricht einer Lagetoleranz. Das ist wichtig für die Maximum-Material-Bedingung (s. Kap. 4.4).

Beim *Stufenmaß* ist die Maximum-Material-Grenze weniger wichtig. Welches das Maximum-Material-Maß ist bzw. ob überhaupt eins existiert, hängt von der Bemaßung ab.

Minimum-Material-Grenzmaß *LML* (least material limit) ist das andere Grenzmaß, das die kleinste Stoffmenge ergibt. Es wird auch „Ausschussgrenze“ genannt, weil bei seiner Überschreitung das Werkstück Ausschuss ist.

Wirksames Istmaß *VS* (virtual size), auch **Paarungsmaß M_p** (mating size): Das ist das Maß eines geometrisch ideal gedachten *Gegenstücks*, mit dem sich das Geometrieelement gerade noch ohne Spiel paaren lässt, *Bild 1.10*. Es ist entscheidend für die geometrische Funktionsfähigkeit eines Bauteils. Bei einem Bolzen mit Außenpassfläche (a) ist *VS* das Maß einer spiel- und zwangsfrei sitzenden Hülse bzw. eines Futters, bei planparallelen Außenflächen (b) der Abstand von zwei spielfrei anliegenden parallelen Ebenen. Bei einer Bohrung (c) ist das wirksame Maß vorstellbar als Durchmesser eines spiel- und zwangsfrei eingepassten Dorns. Entsprechendes lässt sich auf parallele Nutflächen übertragen. Infolge von Formabweichungen unterscheidet sich das wirksame Istmaß *VS* vom örtlichen Istmaß *I*; beim Außenmaß (a und b) wird es größer, beim Innenmaß (c) kleiner. Nur in dem theoretischen Grenzfall, dass keine Formabweichungen vorliegen, ist $VS = I$. Das geometrisch ideale Gegenstück wird auch *wirksamer Istzustand* genannt. Die Benennung „wirksam“ entspricht dem englischen Wort „virtual“ nicht wörtlich, wohl aber dem Sinn nach, denn so *wirkt* das Geometrieelement beim Fügen.

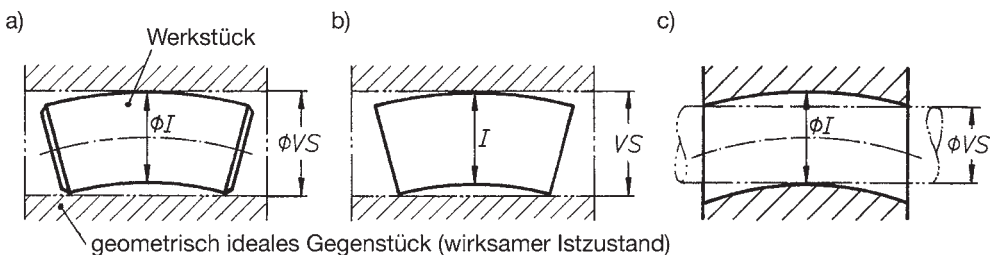


Bild 1.10: Wirksames Istmaß (Paarungsmaß) *VS* (entspricht GN bzw. GX s. Tab. 1.1) a) und b) bei Außenpassflächen (a) Bolzen, b) planparallele Flächen), c) bei Innenfläche (Bohrung)

Wirksames Grenzmaß *MMVL* (maximum material virtual limit), auch wirksames Maximum-Material-Maß, stellt in Verbindung mit dem Maximum-Material-Grenzmaß *MML* ein *Grenzpaarungsmaß* dar, d.h. das ungünstigste Paarungsmaß, bei dem das Geometrieelement den *Maximum-Material-Zustand* und zusätzlich die größte zulässige *Formabweichung* (Grenzabweichung) hat, die hier gleich der Formtoleranz t_{Form} ist. *Bild 1.11* erläutert die Zusammenhänge für kreiszylindrische Geometrieelemente, a für einen Bolzen („Welle“), b für eine Bohrung. Beide sollen überall auf der Maximum-Material-Grenze

MML liegen und die Geradheitstoleranz ihrer Achse t_G voll ausnutzen (Näheres s. Kap. 2.2.2). Entsprechendes lässt sich auch für parallele Ebenen ableiten (vgl. Bild 1.10 a und b). Das wirksame Grenzmaß $MMVL$ ergibt sich nach Bild 1.11 aus dem Maximum-Material-Grenzmaß MML und der Formtoleranz t (t kann ggf. auch eine Lagetoleranz sein, s. Kap. 4.4).

$$MMVL = MML \pm t \quad (+ \text{ für „Welle“, } - \text{ für „Bohrung“}) \quad (1.7)$$

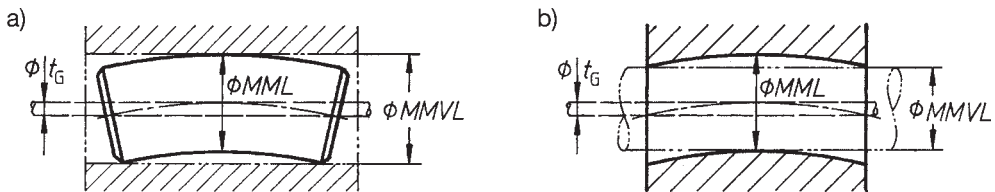


Bild 1.11: Wirksames Grenzmaß $MMVL$. a) für einen Bolzen, b) für eine Bohrung, jeweils mit Maximum-Material-Grenzmaß MML und Formtoleranz t_G für die Geradheit der Achse

Die geometrisch ideal gedachte Begrenzung (Zylinderfläche bzw. Parallelebenenpaar) mit dem wirksamen Grenzmaß $MMVL$ ist der „wirksame Grenzzustand“ bzw. der „wirksame Maximum-Material-Zustand“ des Geometrieelements. Er stellt den größten Raum dar, in dem das Geometrieelement sich erstrecken kann. Er ist insb. wichtig bei der *Maximum-Material-Bedingung* (DIN EN ISO 2692, s. Kap. 4.4).

Anmerkung 1: Die Bezeichnungen und ihre Formelzeichen sind teilweise in verschiedenen Normen unterschiedlich. Wir verwenden für Maße allgemein den Buchstaben S (size), für Grenzmaße aber L (limit); für „wirksam“ steht V (virtual).

Anmerkung 2: „Wirksame Maße“ gibt es nur bei *Größenmaßelementen* (s. Kap. 1.4.3).

Anmerkung 3: Neben dem wirksamen Maximum-Material-Grenzmaß $MMVL$ gibt es auch ein wirksames *Minimum-Material-Grenzmaß* $LMVL$; es kommt bei der *Minimum-Material-Bedingung* vor (s. Kap. 4.5).

Größenmaßelemente: Ein Größenmaßelement ist nach ISO 14405 ein Geometrieelement, das durch *eine* einzige Längen- oder Winkelmaßangabe eindeutig beschrieben wird. Ein *Längenmaß* bestimmt bei *linearen* Größenmaßelementen den Durchmesser eines *Zylinders* oder einer *Kugel* sowie den Abstand von zwei *parallelen*, sich gegenüberliegenden *Flächen* (kurz „Parallelebenen“), während ein *Kegel* oder ein *Keil* durch ein *Winkelmaß* beschrieben werden. Letztere Größenmaßelemente nennt man *Winkelgrößenmaßelemente*. Für lineare Größenmaße (Längenmaße) sind nur zwei davon wichtig, der *Zylinder* und die *Parallelebenen*. Wir nennen sie hier einfach *Größenmaßelemente*.

Spezifikationsoperator: Er definiert eine bestimmte Anzahl von Aktionen (*Operationen*), die in einer definierten *Reihenfolge* durchzuführen sind, um ein bestimmtes Maßmerkmal eines Maßelementes zu ermitteln. Im Folgenden werden die für die Praxis wesentlichen Spezifikationsoperatoren nach ISO 14405 beschrieben (s. *Tabelle 1.1*). Sie stehen hinter der

Maßzahl und deren Toleranz in einer ovalen Kartusche (s. Beispiel unten). Es gibt noch ein paar mehr; dazu verweisen wir auf die Norm.

Tabelle 1.1 Wichtige Größenmaßmerkmale nach ISO 14405 T1 (Auswahl)

Symbol	Bezeichnung	Beschreibung
Ⓕ	Zweipunktgrößenmaß	ISO Standard
ⒼⒼ	„Gaußmaß“	Größenmaß des idealen Ersatzelementes nach Gauß
ⒼX	„Pferchmaß“	Größenmaß des größten idealen einbeschriebenen Geometrieelementes
ⒼN	„Hüllmaß“	Größenmaß des kleinsten idealen umschriebenen Geometrieelementes
ⒸⒸ	Umfangsbezogener Durchmesser	Aus der Länge der Umfangslinie berechneter Durchmesser
ⒶX	Größtes Größenmaß	Größtes Größenmaß aus einer Menge von ermittelten Größenmaßen
ⒶN	Kleinstes Größenmaß	Kleinstes Größenmaß aus einer Menge von ermittelten Größenmaßen
ⒶA	Mittleres Größenmaß	arithmetischer Mittelwert aus einer Menge von ermittelten Größenmaßen
ⒶR	Spanne der Größenmaße	Differenz zwischen dem kleinsten und größten ermittelten Größenmaß

- **Zweipunktgrößenmaß:** Der *Standard*-Spezifikationsoperator nach ISO 14405 ist das Zweipunktgrößenmaß. Das ist ein örtliches (lokales) Maß, das den Abstand von zwei einander gegenüberliegenden Punkten auf einem Maßelement angibt. Dieser Operator gilt immer, solange kein anderes Spezifikations-Modifikationssymbol (Modifikator) angegeben wird (s. Regel 1-8). Bei einer zeichnungsspezifischen Änderung des Standards (z. B. Hüllprinzip/geänderter Tolerierungsgrundsatz) kann das Zweipunktgrößenmaß aber auch mit dem Symbol Ⓕ vorgeschrieben werden.
- **Gaußmaß** (Normbezeichnung: **Größenmaß der kleinsten Abweichungsquadrate**): Bei diesem Spezifikationsoperator wird dem *erfassten Geometrieelement* – das ist die vom Messgerät aufgenommene Punkteschar (s. Kap. 1.5.4) – ein *ideales* Geometrieelement nach der bekannten Methode des Gaußalgorithmus (Minimierung der Abweichungsquadrate) zugeordnet (assoziiert). Das Gaußmaß gilt als Istmaß dieses zugeordneten Geometrieelementes. Wenn ein Maßelement nach diesem Maßmerkmal ausgewertet werden soll, muss das Spezifikations-Modifikationssymbol ⒼⒼ hinter dem Maß stehen.
- **Pferchmaß** (Normbezeichnung: **größtes einbeschriebenes Größenmaß**): Hierbei wird dem erfassten Geometrieelement ein ideales Geometrieelement zugeordnet, das sich von innen als ideales Pferdelement mit dem größten möglichen Durchmesser bzw. Abstand an das erfasste Geometrieelement anlegt. Das Spezifikations-Modifikationssymbol ist ⒼX. Das wirksame Istmaß in Bild 1.10 c entspricht dem Pferchmaß für ein Innenelement.
- **Hüllmaß** (Normbezeichnung: **kleinstes umschriebenes Größenmaß**): Bei diesem Maßmerkmal wird dem erfassten Geometrieelement ein ideales Geometrieelement zugeordnet, das sich von außen als ideales Hüllelement mit dem kleinsten möglichen Durchmes-