

BERND KLEIN



Bemaßung und Tolerierung von Kunststoffbauteilen

5., überarbeitete Auflage

expert ›

Bemaßung und Tolerierung von Kunststoffbauteilen

Prof. em. Dr.-Ing. Bernd Klein

Bemaßung und Tolerierung von Kunststoffbauteilen

Maße und Abmaße – Form- und Lagetoleranzen –
Tolerierungsprinzipien – Werkzeug und Prozess –
Maßketten am Teil – Qualitätsfähigkeit sichern

5., überarbeitete Auflage

expert ›

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

© 2020 · expert verlag GmbH
Dischingerweg 5 · D-72070 Tübingen

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Alle Informationen in diesem Buch wurden mit großer Sorgfalt erstellt. Fehler können dennoch nicht völlig ausgeschlossen werden. Weder Verlag noch Autoren oder Herausgeber übernehmen deshalb eine Gewährleistung für die Korrektheit des Inhaltes und haften nicht für fehlerhafte Angaben und deren Folgen.

Internet: www.expertverlag.de
eMail: info@verlag.expert

Printed in Germany

ISBN 978-3-8169-3513-1 (Print)
ISBN 978-3-8169-8513-6 (ePDF)

Vorwort zur 5. Auflage

Durch die Neuerscheinung der ISO 20457 (Kunststoff-Formteile – Toleranzen und Abnahmebedingungen) und der Zurückziehung der DIN 16742 hat sich die Basis für das Buch geändert. Dies macht es erforderlich den Text, einige Textbeispiele und den Anhang zu überarbeiten und neu auszurichten. Bei dieser Gelegenheit habe ich auch einige ergänzende Informationen aus der Weiterentwicklung des ISO-GPS-Systems (neue ISO 14405-2 und ISO 22081) eingearbeitet. Das Buch bezieht sich somit wieder auf den aktuellen Normenstand und gibt insofern den Stand der Technik bezüglich der Bemaßung und der F+L-Tolerierung wieder.

Calden bei Kassel, Juli 2020

B. Klein

Vorwort zur 4. Auflage

Nachdem sich im Jahre 2018 einige wesentliche Grundnormen zur Bemaßung und Tolerierung geändert haben und auch neue Definitionen eingeführt worden sind, war es notwendig, das Manuskript entsprechend anzupassen. So wurden beispielsweise Normergänzungen zu Freiformgeometrien, zur Winkelbemaßung, zur Tolerierung von *Bohrungs*-Mustern, zu Toleranzzonen mit Nebenbedingungen, zur Bezugsbildung und weitere kleine Ergänzungen aufgenommen. Die überarbeitete Neuauflage entspricht somit wieder dem neuesten Stand der ISO-GPS-Normung, so dass die gezeigten Normenauslegungen wieder direkt zur Anfertigung von Fertigungsunterlagen übernommen werden können. Insofern hoffe ich, dass das Buch auch weiterhin seinem Leitfadencharakter gerecht wird.

Calden bei Kassel, Oktober 2018

B. Klein

Vorwort zur 3. Auflage

Bücher die sich mit Technologie und Normung befassen haben leider die unangenehme Eigenschaft nie fertig zu werden. Da ich zur 2. Auflage einige Leserrückmeldungen erhalten habe, sehe ich es als notwendig an, den Text noch einmal zu aktualisieren und einige Bilder an den neuen ISO/GPS-Normenstand anzupassen. Mit der vorliegenden Fassung ist somit der neueste Normenstand berücksichtigt worden. Ich hoffe damit jetzt wieder allen Lesern einen hohen praktischen Nutzwert bieten zu können.

Calden bei Kassel, Juli 2017

B. Klein

Vorwort zur 2. Auflage

Nach der überaus positiven Resonanz die ich auf mein Buch erfahren habe, habe ich mich entschlossen, eine überarbeitete Neuauflage anzufertigen. Dies ist auch vor dem Hintergrund zu sehen, dass einige Normen zur Kunststofftechnologie und viele Normen zur maßlichen und geometrischen Beschreibung von Produkten bzw. Werkstücken zwischenzeitlich überarbeitet wurden und neu erschienen sind.

Weil aber die fertigungsgerechte Beschreibung und die wirtschaftliche Herstellung von Kunststoffbauteilen nicht nur Querschnittswissen benötigt, sondern auch eines integrativen Erstellungsprozesses bedarf, ist es besonders wichtig, Herstellungsunterlagen verfügbar zu haben, die einem aktuellen Normenstand entsprechen.

In diesem Zusammenhang war es mir wichtig, die „Beschreibungssprache“ des ISO/GPS-Normenwerkes, welche in der Hauptsache auf metallische Konstruktionen (aber werkstoff-unabhängig ist) ausgerichtet ist, so abzuwandeln, dass hiermit auch Kunststoffbauteile eindeutig beschrieben werden können. Interessierte Leser haben hiervon hoffentlich einen hohen Nutzen.

Calden bei Kassel, März 2016

B. Klein

Vorwort zur 1. Auflage

Die Ausbildung von Technikern und Ingenieuren hat normalerweise ihren Schwerpunkt in der Gestaltung, Auslegung und Berechnung von Konstruktionen aus Metallen. Darüber hinaus haben natürlich Kunststoffe in der Technik einen festen Platz gefunden, weil sich bestimmte Anwendungen eben besser und kostengünstiger mit synthetischen Werkstoffen abdecken lassen. Viele Anwender tun sich aber schwer mit Kunststoffen, weil sie deren Verhalten (kein „weicher“ Stahl) nicht richtig einzuschätzen wissen. So können sich die spezifischen Kurz- und Langzeiteigenschaften von Kunststoffen ändern durch

- Belastung, Temperatur und Zeit,
 - Technoklima (Versprödung, Alterung),
 - Kriechen und Relaxation,
 - Nachreaktionen (Schwinden, Quellen),
 - Formgebungsprozess,
- sowie
- Verarbeitungsbedingungen.

Diese Faktoren wirken sich aus auf die Gebrauchseigenschaften sowie die Maß- und Geometriehaltigkeit von Formteilen^{*)}. Es ist daher das Ziel der folgenden Ausführungen, diese Zusammenhänge zu zeigen, wobei der besondere Fokus auf die Maß- und Winkelveränderungen sowie den Form- und Lageveränderungen liegen soll.

Wie dieses Verhalten in der Praxis zu berücksichtigen ist, geben etwa 27 Normen (s. Seite 4) vor, die teils fachspezifischen oder allgemeinen Charakter haben. Konstrukteure sind daher gut beraten, wenn sie für eine funktions-, kosten- und qualitätsgerechte Produktkonstruktion auf diese Erfahrungen zurückgreifen, weil dann Eindeutigkeit gegeben ist. Die meisten Reklamationen ufern in endlosen Diskussionen aus, wobei gegenteilige Auffassungen ausgetauscht werden. Viel zielführender ist es in derartigen Fällen, sich auf die DIN-, EN- oder ISO-Normen zu beziehen, die im Bereich der Bemaßung, Tolerierung und Oberflächen sehr weit ausgearbeitet sind.

Normen sind anerkannte Standards und dafür geschaffen worden, dass bestimmte Probleme der Technik eindeutig geregelt sind und somit nicht missverstanden werden können. Der

^{*)} Anmerkung: Nach ISO 10135 werden Formteile unter Verwendung von Formen (z. B. Kunststoff-Spritzguss) hergestellt.

Fachmann erkennt beispielsweise an einer Zeichnung sofort das Herstellproblem, meist jedoch nicht, ob die angegebenen Toleranzen (Größe, Art und Lage) überhaupt einhaltbar sind oder wie sich Geometrie- bzw. Form- und Lageabweichungen (Material-Bedingungen) kompensieren lassen. Hierzu gibt jedoch das Normenwerk ausführliche und bewährte Hinweise.

Dieser Exkurs vertieft somit schon die Gesamtproblematik von der Artikelzeichnung, über das Werkzeug, den Prozess bis zum Fertigprodukt und sei hier am Anfang nur angerissen. Der Anspruch dieses Fachbuchs ist insofern, diese Zusammenhänge aufzuzeigen und eindeutige Lösungen für die Phasen Konstruktion und Detaillierung bereitzustellen.

Calden bei Kassel, 2013

B. Klein

Inhaltsverzeichnis

Vorwort

0	Allgemeines	1
1	Maß- und Toleranzanforderungen	5
1.1	Auslegung von Bauteilen	5
1.2	Qualitätsgerechte Gestaltung	6
1.2.1	Austauschgerechte Auslegung	6
1.2.2	Solleigenschaften von Bauteilen	7
1.2.3	Qualitäts- und prozessfähige Toleranzen	8
1.2.4	Statistische Prozessregelung	11
1.2.5	Prüfanforderungen	12
1.3	Kostenentwicklung	13
1.4	Formteil-Qualität	16
2	Fertigungs- und anwendungsbedingte Maßungenaugigkeiten	19
3	Eigenschaften von Kunststoffen	22
4	Maßabweichungen bei der Herstellung	32
4.1	Maßbildung beim Urformen	32
4.2	Erreichbare Genauigkeiten beim Pressen, Prägen und Gießen	34
4.3	Allgemeintoleranzen und Urformen	37
4.4	Erreichbare Genauigkeit beim Extrudieren	38
4.5	Maßbildung beim Umformen	39
4.6	Maßbildung bei spanender Bearbeitung	40
4.7	Maschinenbau-Allgemeintoleranzen	43
5	Maßtoleranzen für formgebende Werkzeuge	44
5.1	Toleranzzuordnung	44
5.2	Abstimmungsprobleme	46
6	Fertigungs- und anwendungsbedingte Maßabweichungen	51
6.1	Maßbezugsebenen	51
6.2	Toleranzabstimmung	56
6.3	Passungen	56
6.4	Anwendungstoleranzen	57
6.4.1	Kunststoff-Gleitlager	58
6.4.2	Kunststoff-Zahnräder	60

7	Maße und Toleranzen für Fertigteile aus Gummi	61
7.1	Herstelltoleranzen für Formteile	61
7.1.1	Toleranzklassen.....	62
7.1.2	Grenzabmaße	63
7.2	Herstelltoleranzen für Extrusionsteile	63
7.3	Herstelltoleranzen für Kalandrierte Bahnen	64
7.4	Herstellbare Form- und Lagetoleranzen	64
7.4.1	Ebenheitstoleranz	64
7.4.2	Parallelitätstoleranz.....	65
7.4.3	Rechtwinkligkeitstoleranz.....	66
7.4.4	Koaxialitätstoleranz	67
7.5	Funktionstoleranzen bei nachgiebigen Teilen	68
8	Geometrische Produktspezifizierung	70
8.1	Entstehung von Maß- und Geometrieabweichungen.....	70
8.2	Vereinbarungen zur Maßtolerierung.....	71
8.3	Theoretisch exaktes Maß	72
8.4	Geometrietoleranzen.....	73
8.5	Minimum-Bedingung.....	75
8.6	Stufenmaße	78
8.7	Zeichnungseintragung.....	79
8.7.1	Angabe von Maßen in einer Zeichnung.....	79
8.7.2	Beschreibung der Angaben am tolerierten Element	80
8.8	Festlegung der Toleranzzone	81
8.8.1	Zuweisung der Toleranzzone.....	81
8.8.2	Gemeinsame Toleranzzone	83
8.8.3	Begrenzung der Toleranzzone	84
8.8.4	Projizierte Toleranzzone	85
8.9	Bildung von Bezügen.....	87
8.9.1	Grundlagen.....	87
8.9.2	Bezugselemente	88
8.9.2.1	Kanten und Flächen	88
8.9.2.2	Mittelachsen als Bezüge.....	89
8.10	Zeichnungseintragung von Bezügen.....	90
8.10.1	Mehrere Bezugselemente.....	91
8.10.2	Bezug aus mehreren Bezugsflächen	93
8.10.3	Bezugsstellenangaben	93
8.11	Bildung von Bezugssystemen.....	95
8.12	Referenzen als Hilfsbezüge	98
9	Tolerierungsprinzipien.....	100
9.1	Anforderungen an Zeichnungen	100
9.2	Funktionsbeschreibung	100
9.2.1	Maximum-Material-Zustand/MMC	101
9.2.2	Maximum-Material-Maß	101

9.2.3	Minimum-Material-Zustand/LMC	101
9.2.4	Minimum-Material-Maß	101
9.2.5	Material-Bedingungen	101
9.2.6	Wirksames Maximum-Material-Maß	102
9.3	Der Taylor'sche Prüfgrundsatz	102
9.4	Unabhängigkeitsprinzip	104
9.5	Hüllprinzip	107
9.6	Maximum-Material-Bedingung	118
9.6.1	Beschreibung der Maximum-Material-Bedingung	118
9.6.2	Eingrenzung der Anwendung.....	122
9.6.2.1	Hüllbedingung.....	123
9.6.2.2	Wirkung der Hülle im Tolerierungsgrundsatz	124
9.6.3	Prüfung der Maximum-Material-Bedingung	127
9.6.4	Tolerierung mit dem Toleranzwert „0“	129
9.6.5	Festlegung von Prüflehren	130
9.7	Minimum-Material-Bedingung.....	133
9.7.1	Anwendung	136
9.8	Reziprozitätsbedingung	136
9.9	Passungsfunktionalität	139
10	Maß-, Form- und Lagetoleranzen.....	142
10.1	Bedeutung für die Herstellung	142
10.2	Toleranzbegrenzungen.....	142
10.3	Angabe der Toleranzzonen	142
10.4	Formtoleranzen	144
10.4.1	Geradheit.....	144
10.4.2	Ebenheit	146
10.4.3	Rundheit	148
10.4.4	Zylinderform	150
10.5	Profilformtoleranzen.....	152
10.5.1	Linienformprofil.....	152
10.5.2	Flächenformprofil	154
10.6	Lagetoleranzen.....	156
10.6.1	Richtungstoleranzen.....	156
10.6.1.1	Winkligkeit.....	157
10.6.1.2	Parallelität	159
10.6.1.3	Rechtwinkligkeit	161
10.6.2	Orsttoleranzen	162
10.6.2.1	Position.....	162
10.6.2.2	Konzentritizität bzw. Koaxialität	168
10.6.2.3	Symmetrie	170
10.6.3	Laufstoleranzen	171
10.6.3.1	Rundlauf.....	171
10.6.3.2	Gesamtlauf	173
10.6.4	Gewinde	174
10.6.5	Freiformgeometrien	175
10.7	Tolerierung von Längenmaßen	175

11 Toleranzverknüpfung durch Maßketten.....	185
11.1 Entstehung von Maßketten	185
11.2 Bedeutung des Schließmaßes und der Schließtoleranz.....	185
11.2.1 Vorgehen bei der Untersuchung von Toleranzketten	186
11.3 Berechnung von Toleranzketten	186
11.3.1 Worst Case	186
11.3.2 Arithmetische Berechnung.....	187
11.3.3 Vorgehensweise	188
11.3.4 Bestimmung der Extremwerte von Kreisquerschnitten	192
11.3.5 Maßkette mit „ebenen“ Maßen	193
11.4 Form- und Lagetoleranzen in Maßketten.....	194
11.5 Statistische Tolerierung	198
11.5.1 Erweiterter Ansatz.....	198
11.5.2 Mathematische Grundlagen	199
11.5.2.1 Beispiel zur statistischen Tolerierung.....	204
12 Interpretation und Festlegung Toleranzen	211
12.1 Festlegung von Form- und Lagetoleranzen	211
12.2 Interpretation von Toleranzen.....	217
13 Temperaturabhängigkeit der geometrischen Eigenschaften	225
13.1 Wärmedehnung.....	225
13.2 Übertragung auf Passmaße	226
13.3 Simulation an einer Spielpassung	227
13.4 Grenztemperatur	230
14 Anforderungen an die Oberflächenbeschaffenheit	232
14.1 Technische Oberflächen	232
14.2 Herstellbare Oberflächenrauheiten	234
14.3 Symbolik für die Oberflächenbeschaffenheit	236
14.3.1 Oberflächencharakterisierung	239
14.3.2 Filter und Übertragungscharakteristik	241
14.3.3 Definition der Oberflächenkenngrößen	243
14.3.4 Zeichnungsangaben für Oberflächen	248
14.3.5 Zeichnungsangaben für Oberflächenrillen.....	250
15 Unterschiede zwischen ISO und ASME	252
15.1 ASME-Standard.....	252
15.2 Symbole und Zeichen	252
15.2.1 Maßeintragung	252
15.2.2 Unterschied zwischen Millimeter und Inch-Bemaßung in ASME	253
15.2.3 Eintragung von Toleranzen.....	254
15.3 Besonderheiten der Maßangabe in ASME.....	255
15.3.1 Radientolerierung.....	255
15.3.2 Begrenzende Toleranzangaben	256
15.3.3 Darstellung von Bohrungen und Senkungen	257

15.3.4 Kennzeichnung statistischer Toleranzen.....	258
15.3.5 Tolerierung einer Tangentenebene.....	258
15.4 Tolerierungsprinzipien.....	259
15.4.1 Bedeutung	259
15.5 Definition der Materialprinzipien in ASME.....	261
15.5.1 Struktur der Toleranzprinzipien	261
15.5.2 Unterschiede in der Begriffsdefinition.....	262
15.5.3 Anwendung einer Materialbedingung.....	263
15.6 Form- und Lagetoleranzen	263
15.6.1 Ebenheitstolerierung bzw. Koplanarität.....	264
15.6.2 Profil- und Positionstolerierung	265
15.6.3 Mehrfachtoleranzrahmen	265
15.6.4 Profiltoleranzen.....	269
16 Prozessspezifikationen der Urformtechnik.....	272
16.1 Technologische Restriktionen.....	272
16.2 Teilungsebene und Auswerfer	272
16.3 Werkzeugspuren	273
16.4 Versatz	274
16.5 Gratrippe	276
16.6 Formschrägen.....	277
16.7 Maßanalyse	282
17 Geometrische Produktspezifikation/GPS.....	283
17.1 Konzeption.....	283
17.2 Normenkette.....	285
18 Erfahrungswerte für Form- und Lagetoleranzen	288
19 Übungen zur Zeichnungseintragung	290
19.1 Form- und Lagetoleranzen in Zeichnungen.....	290
19.2 Eintragung von Formtoleranzen	290
19.3 Eintragung von Profiltoleranzen.....	293
19.4 Eintragung von Lagetoleranzen.....	295
19.4.1 Richtungstoleranzen.....	295
19.4.2 Ortstoleranzen	299
19.5 Eintragung von Bezügen.....	301
19.6 Oberflächensymbole in technischen Zeichnungen	307
20 Normgerechte Anwendungsbeispiele.....	314
21 Fallbeispiele	328
22 Literaturverzeichnis	347
23 Sachwortverzeichnis.....	350

Allgemeines

Dimensionelle Toleranzen für Paarungen bzw. Passungen und Toleranzen zur Geometriebeschreibung spielen im gesamten Maschinen-, Fahrzeug-, Geräte- und Anlagenbau eine große funktionelle und wirtschaftliche Rolle. Da überwiegend Stahl oder NE-Metalle eingesetzt werden, haben die Werkstoffeigenschaften und die Herstelltechnologie im Temperaturbereich von ca. -40 °C bis $+150\text{ °C}$ letztlich jedoch keinen gravierenden Einfluss auf die Maßhaltigkeit, Form- und Lagestabilität sowie Steifigkeit.

Dies ist bei Erzeugnissen aus Kunststoffen (sog. Polymeren) aber anders. Gegenüber anderen Werkstoffgruppen hat eine größere Anzahl von Einflussfaktoren eine starke Wirkung auf die *Maßhaltigkeit*, *Maßveränderungen* und *Formtreue*. Verantwortlich hierfür sind der makromolekulare Aufbau und Strukturänderungen, die sich bereits bei relativ niedrigen Temperaturen vollziehen können. Hinzu kommt eine stärkere Abhängigkeit der Geometrie von den physikalischen und chemischen Zuständen im Vergleich zu anderen Werkstoffen. So muss man beispielsweise bei dem Einsatz von Kunststoffen mit der Aufnahme oder Abgabe von Flüssigkeit, mit Schwindung/Nachschwindung oder Relaxation sowie mit größeren Wärmeausdehnungen rechnen. Auch kann der relativ niedrige Elastizitätsmodul schon bei vergleichsweise geringen Belastungen zu erheblichen Verformungen und daher zu Dimensions- und Geometrieänderungen führen.

Wie bei allen Urformverfahren, die über den flüssigen Zustand zur Erzeugnisgestalt führen, beeinflusst der Phasenübergang flüssig zu fest und die physikalischen Zustandsparameter (Zeit, Druck, Temperatur) das spezifische Volumen eines Formteils erheblich. Hieraus resultiert eine deutliche Abhängigkeit der fixierten Idealgestalt von den Prozessgrößen (s. *Bild 0.1*), der Prozessführung und den Folgeoperationen (Beschichten) bzw. Nachbehandlungen (Tempern, Konditionieren).

Man sollte deshalb bei der Tolerierung von Kunststoff-Formteilen nicht zu enge Funktionstoleranzen wählen. Die Einhaltung von Toleranzen ist nämlich immer mit werkzeug-, maschinen- und prozesstechnischem Aufwand verbunden, so führt eine Vergrößerung von Toleranzen gewöhnlich zu einer deutlichen Reduzierung der Herstellkosten. Für den Konstrukteur können daher die folgenden Leitlinien formuliert werden:

- Die Größe und Einhaltbarkeit von Toleranzen (s. ISO 20457) ist vom Materialtyp (Tabelle auf S. 31) sowie den Füll- und Verstärkungstoffen abhängig:
 - Amorphe Thermoplaste (z. B. PS, SB, SAN, ABS, PMMA, PC) sind besonders für das Spritzgießen, Spritzprägen und Warmformen von Formteilen mit hoher Maßgenauigkeit geeignet. Die Verarbeitungsschwindigkeit $VS \approx 0,5\text{--}1\%$ von N_0 ist relativ gering.
 - Teilkristalline Thermoplaste (PE, PP, POM, PA, PEK, PBT) werden ebenfalls durch Spritzgießen verarbeitet, zeigen jedoch eine ausgeprägte Anisotropie (ggf. Nachschwindung) mit schlechter Maßhaltigkeit sowie eine relativ große Verarbeitungsschwindigkeit $VS \approx 1\text{--}2,5\%$ und Nachschwindung $NS \approx 1\%$ von N_0 .
 - Durch den Zusatz von Glasfasern (GF) können die Maßschwankungen und die Verarbeitungsschwindigkeit (VS) auf 30–50 % des Grundwertes reduziert werden. Über 25 % GF-Gehalt ergibt sich kein weiterer Effekt auf die VS. Ebenso zeigen organische Zusätze keinen Einfluss auf die VS.
- Die Einhaltbarkeit von Toleranzen wird sehr stark von der Größe eines Kunststoff-Formteiles beeinflusst, d. h., die Maß- und F+L-Toleranzen wachsen proportional mit.

- Verfahrensbedingt sollten für *nicht werkzeuggebundene* Maße und *werkzeuggebundene* Maße unterschiedliche Toleranzen vergeben werden. Dies gilt jedoch nur für Kunststoff-Spritzguss; bei Al- und Mg-Druckguss ist dies nicht zwingend notwendig.
- Die Maßstabilität von Kunststoff-Formteilen ist sehr stark von der Einsatztemperatur (Wärmedehnung) und dem Wassergehalt abhängig.
- Der Einfluss der Schwindung auf die Maße lässt sich zwar theoretisch gut berechnen, aber bei komplexen Teilen nur schwer vorhersagen:
 - Die Schwindung wird in Fließrichtung anders sein als quer zur Fließrichtung, was zu unterschiedlichen Dicken- und Längenabweichungen führt.
 - Durch Füll- und Verstärkungsstoffe können Schwindungsbehinderungen auftreten. Behinderungen können auch konstruktive Ursachen (z. B. Verrippungen) haben.
 - Durch eine ungleichmäßige Erstarrung der Schmelze im Werkzeug bzw. ungleichmäßige Abkühlung nach dem Auswerfen können ebenfalls Schwindungsbehinderungen und Verzüge auftreten.
- Nach der Verarbeitung kann noch Quellen (z. B. PA bei Wasseraufnahme= 4,5 % Volumenquellung; CA mit nur 1,75 % Volumenquellung) oder eine Nachschwindung (insbesondere bei Duromeren mit $NS \leq 0,15$ % von N_0) mit Maßveränderungen eintreten.
- Die Maßhaltigkeit lässt sich durch besondere Prozessfolgeschritte (wie: Druckverfestigung, Strahlenvernetzung oder Tempern) noch gezielt verbessern.

Vor diesem Hintergrund ist es Zielsetzung der folgenden Darlegungen, die Einflüsse auf die Maßbildung beim Urformen und bei der spanenden Nachbearbeitung von ungeschäumten Formteilen^{*)} darzustellen sowie diese zu quantifizieren. Ergänzend sollen Wege zu einer Toleranzoptimierung unter Funktions- und Fertigungsgesichtspunkten sowie unter Einschluss der internationalen Normung gezeigt werden.

Hierzu gehört heute:

- Gültigkeit der DIN EN ISO 14405-1:2016,-/2:2019,-/3:2016 für die dimensionelle Tolerierung und der DIN EN ISO 1101:2017 für die geometrische Tolerierung

sowie

- alleinige Gültigkeit des Unabhängigkeitsprinzips nach der DIN EN ISO 8015:2011 und die gesonderte Kenntlichmachung abweichender GPS-Spezifikationen auf der Zeichnung, z. B. für das Normklima (Maße bei $+23^{\circ}\text{C} \pm 2\text{K}$ und 50 ± 10 % Luftfeuchte)

Tolerierung ISO 8015 (AD) - DIN EN ISO 291:2008-08

(AD = Altered Default= abgewandelter Standard; Aufhebung der Messung bei RT).

- Vereinbarung von Formteil-Toleranzen (z. B.: ISO 20457-TG 5, Bezugssystem A,B,C)

Daher soll umseitig noch ein erweitertes Schlaglicht auf die speziellen Werkstoffeigenschaften (siehe *Bild 0.1*) und die gültige Normensituation (siehe *Bild 0.2*) geworfen werden. Gerade die Normung ist infolge der Umstellung des internationalen ISO-Normungssystems auf die „GPS“ (Geometrische Produkt-Spezifizierung) seit einiger Zeit im Umbruch. Durch die Möglichkeiten der Internetrecherche und der DIN-Normendatenbank (PERINORM)

^{*)} Anmerkung: Im Normenwerk werden als Formteile unterschiedliche Werkstücke bezeichnet, welche durch „Einspritzen, Blasen, Gießen oder Schmieden“ hergestellt werden. Halbzeuge werden überwiegend durch Extrusion hergestellt und unterliegen oft einer spanenden Nachbearbeitung.

gibt es heute jedoch ausgezeichnete Möglichkeiten sich über den neuesten Normenstand schnell und gezielt zu informieren.

1. Alterung:	UV-Strahlung, Temperaturwechsel und/oder Sauerstoffaufnahme können eine physikalische oder chemische Alterung mit oder ohne Volumenveränderung bewirken.
2. Kriechen:	„Kalter Fluss“ unter Last (auch Zeitstandsverhalten) mit bleibender Veränderung von Längenmaßen.
3. Quellen:	Volumenänderung eines Kunststoffteils durch Einwirken einer Flüssigkeit (1% Wasser \approx 0,1 % Maßänderung).
4. Sorption:	Aufnahmefähigkeit für Flüssigkeit, mit Volumenänderung.
5. Relaxation:	Rückverformung eingefrorener, elastischer Spannungen (bewirken Geometrieänderungen) nach Teileentformung.
6. Kompressibilität:	Volumenvergrößerung (2 – 4 V%) eines Teils durch Entspannung wegen unterschiedlicher Drücke in den Kavitäten.
7. Technoklima:	Einsatz von Kunststoffen in einer realen Umgebung (Temperatur, Feuchtigkeit, etc.), gegenüber Normklima.
8. Volumenschwindung:	Nach dem Entformen entsteht eine Volumenkontraktion: $SV = \frac{V_W - V_F}{V_W} \cdot 100$ $V_W = \text{(kaltes) Werkzeugvolumen}$ $V_F = \text{Formteilmolumen}$
9. Verarbeitungsschwindung:	Längenkontraktion, d. h. Verkürzung der Formteilmaße: $VS = \frac{L_W - L_{F1}}{L_W} \cdot 100$ $L_W = \text{(kaltes) Werkzeugmaß}$ $L_{F1} = \text{Formteilmaß vor Nachschwindung}$
10. Nachschwindung:	Eigenspannungsrelaxation, Reorientierung oder Nachkristallisation unter Temperatureinwirkung: $NS = \frac{L_{F1} - L_{F2}}{L_W} \cdot 100$ $L_{F2} = \text{Formteilmaß nach Nachschwindung}$
11. Gesamtschwindung:	Summe aus Verarbeitungsschwindung und Nachschwindung.
12. Orientierung:	Schwindungsunterschiede längs zu quer, hauptsächlich bei verstärkten Kunststoffen (meist größere Querschwindung)
13. Tempern:	Wärmeeinwirkung zur Erzeugung einer zusätzlichen Vernetzung. Nachschwindung wird vorweggenommen.
14. Konditionierung:	Lagerung von Formteilen im feuchten Klima, um bestimmten Wassergehalt zu erzeugen.
15. Wärmeformbeständigkeit:	Maßbeständigkeit von Formteilen unter Wärmeeinwirkung.

Bild 0.1: Einflüsse und Auswirkungen auf Kunststoff-Bauteile

A) Grundnormen ^{*)}	
DIN EN ISO 17450-1	Modell der geometrischen Spezifikation und Prüfung
DIN ISO 286	ISO-System für Grenzmaße und Passungen
DIN ISO 129-1	TPD – Angabe von Maßen und Toleranzen
DIN EN ISO 14405	Dimensionelle Tolerierung (Längen-, Winkelmaße, Pos.-Tol.)
<i>DIN 7167</i>	Zusammenhang zwischen Maß-, Form- und Parallelitätstoleranzen – Hüllbedingung (<i>zurückgezogen</i>)
DIN EN ISO 8015	GPS-ISO-Tolerierungsgrundsatz – Unabhängigkeitsprinzip
DIN EN ISO 2692	Form- und Lagetolerierung: Kompensations-Bedingungen
DIN EN ISO 1101	Geometrische Tolerierung (F+L-Toleranzen)
<i>DIN 7186</i>	Statistische Tolerierung (<i>ruhend</i>)
DIN EN ISO 5458	Form- und Lagetolerierung – Positions- und Muster
DIN EN ISO 5459	Form- und Lagetolerierung – Bezüge
DIN EN ISO 8062	Maß-, F+L-Toleranzen für Formteile aus Metallen
DIN EN ISO 1660	Profiltolerierung (insb. Freiformflächen)
DIN ISO 16792	Technische Produktdokumentation und 3D-CAD-Tolerierung
B) Kunststoffteile	
DIN EN ISO 1043	Kunststoffe – Kennbuchstaben und Kurzzeichen
DIN EN 15860	Kunststoffe – Thermoplastische Halbzeuge für die spanende Verarbeitung – Anforderungen und Prüfmethode
DIN ISO 20457	Kunststoff-Formteile, Toleranzen und Abnahmebedingungen
<i>DIN 16742</i>	(<i>zurückgezogen</i>)
<i>DIN 16749</i>	Presswerkzeuge und Spritzgießen, Maßtoleranzen für formgebende Werkzeugteile (<i>zurückgezogen</i>)
DIN 16940	Stranggepresste Schläuche aus PVC weich, zulässige Abweichungen für Maße ohne Toleranzangaben
<i>DIN 16941</i>	Extrudierte Profile aus thermoplastischen Kunststoffen, Allgemeintoleranzen für Maße, Form und Lage (<i>zurückgezogen</i>)
DIN ISO 16916	Press-, Spritzguss- und Druckgusswerkzeuge
DIN EN ISO 291	Kunststoffe-Normklimate
DIN 53760	Prüfung von Kunststoff-Fertigteilen
C) Verarbeitung	
DIN EN ISO 22081	Allgemeine geometrische und Maßspezifikationen (<i>z.Zt. DIN ISO 2768 weiter gültig</i>)
DIN ISO 3302, T.1	Gummi – Toleranzen für Fertigteile (<i>Teil 2 zurückgezogen</i>)
DIN EN ISO 10579	Bemaßung und Tolerierung nichtformstabiler Teile
DIN EN ISO 10135	GPS-Zeichnungsangaben für Formteile i. d. Produkt-Doku
D) Feinwerktechnik	
DIN 58700, T. 1/2	ISO-Passungen; Toleranzfeldauswahl für die Feinwerktechnik
E) Oberflächen	
DIN 4760	Gestaltungsabweichungen; Begriffe, Ordnungssystem
DIN 4761	Oberflächencharakter, Oberflächen-Texturmerkmale, Begriffe, Kurzzeichen
DIN 16747	Rauheit der formgebenden Oberflächen von Press- und Spritzgießwerkzeugen für Kunststoff-Formmassen
DIN EN ISO 1302	Angabe der Oberflächenbeschaffenheit: Rauheit, Tastschnitte
DIN EN ISO 25178	Oberflächenbeschaffenheit: Flächenhafte Beschreibung
F) Qualität	
DIN ISO 22514, T.1/2	Statistische Methoden im Prozessmanagement

Bild 0.2: Aktueller Normenstand zur Tolerierung in der Kunststofftechnologie

^{*)} Anm.: Für Werkzeuge bzw. metallische Teile: Allgemeintoleranznorm ist ISO 22081 oder weiter ISO 2768

1 Maß- und Toleranzanforderungen

1.1 Auslegung von Bauteilen

Aufgabe des Konstrukteurs ist es, für technische Produkte die Funktionsfähigkeit, Zuverlässigkeit, Qualitätsfähigkeit und die Herstellbarkeit zu Marktpreisen zu gewährleisten. Diese Merkmale sind heute entscheidende Erfolgsfaktoren für die Durchsetzung von Produkten am Markt. Gewöhnlich wird das Produkt in einer Zeichnung mit Nenngeometrie dargestellt. In *Bild 1.1* ist ein Zeichnungsausschnitt mit den notwendigen, normgerechten Spezifizierungen für ein Kunststoff-Formteil angegeben.

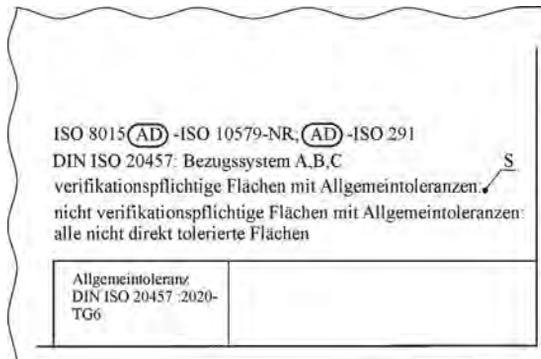


Bild 1.1: Anpassung des Zeichnungsschriftfelds für ein Kunststoff-Formteil (ISO 20457)

In der Hauptsache ist hierbei die Abwandlung der Annahmebedingungen der ISO 8015 (metallische Bauteile) und deren Übertragung auf Kunststoff-Bauteile zu berücksichtigen. Damit sind auch die bestimmenden funktionellen Anforderungen festgelegt.

Ein wichtiger funktioneller Aspekt von Kunststoff-Bauteilen ist deren Serieneignung oder die Voraussetzung für den *Austauschbau* /SZY 93/, der folgendes verlangt:

- Auslegung von Einzelteilen mit beherrschbarer Maß- und Geometriegestalt,
- Möglichkeit der örtlich und zeitlich getrennten Herstellung sowie
- Gewährleistung einer sicheren Montage in der Einzel-, Klein- und Großserienfertigung.

Insbesondere beim Einsatz von Kunststoffen stellt der systemische Austauschbau eine besondere Schwierigkeit dar, weil trotz der relativen Nachgiebigkeit (niedriger E-Modul) eine Vielzahl chemisch-physikalischer Eigenschaften auf die Funktionsfähigkeit zurückwirken. Dieses Problemumfeld wird von den Gesetzmäßigkeiten der Serienstatistik überlagert: Viele Formteile gehen als Massenteile in den Automobilbau, die Medizintechnik, die Mechatronik und in die Bürotechnik etc. ein, weshalb eine konstant gute Herstellqualität verlangt wird. Dies bedeutet, dass vor Produktionsbeginn die Maschinenfähigkeit und mittels der Prozessfähigkeit eine beherrschte Herstellung (SPC) nachgewiesen werden muss /PFE 01/.

Damit schließt sich wieder der Kreis zur maßlichen, geometrischen und oberflächentechnischen Beschreibung, die wichtige Produktmerkmale darstellen und die mit entsprechend großem Aufwand^{*)} gehalten werden sollten.

Maß- und Geometriebeziehung	Toleranzart
• Bauteilabmessungen	Dimensionelle Maße oder Maßtoleranzen (insbesondere Längen- und Winkeltoleranzen)
• Bauteilbegrenzungen	Formtoleranzen
• Bauteillagen	Lagetoleranzen Bezüge, Bezugsstellen
• Bauteiloberflächen	Welligkeits- und Rauigkeitstoleranzen

Bild 1.2: Bildung von Toleranzen an Bauteilen

Dies bedeutet, dass die Teileanwendung, Teilefertigung und die Werkzeugauslegung (Maßbezugsebenen) bei Kunststoff-Formteilen untrennbar miteinander verknüpft sind und abgestimmte Lösungen erforderlich machen. Von den Entwicklern verlangt dies somit systematisches Vorgehen und ganzheitliches Denken in der Produktentwicklung.

1.2 Qualitätsgerechte Gestaltung

Zu den wichtigsten qualitätsbestimmenden Maßnahmen in der Produktkonstruktion gehören gemäß den vorhergehenden Darlegungen /KLE 11/:

- die austauschgerechte Gestaltung und Abstimmung,
- die Festlegung und Tolerierung der Solleigenschaften
und
- die Verschlüsselung des Know-hows in Zeichnungen durch Normsymbolik.

Auf diese Aspekte soll im Folgenden näher eingegangen werden.

1.2.1 Austauschgerechte Auslegung

Die austauschgerechte Gestaltung besteht als Forderung in der Einzel-, Klein- und Großserienherstellung von Produkten.

Bei der *Einzelteilerstellung* ist es handwerkliche Tradition, dass jedes Einzelteil passgenau (also vollständige Austauschbarkeit nach DIN EN ISO 286) unter allen Umständen ausgetauscht werden kann. Dies setzt eine entsprechende Montage und Herstellung mit meist engen Toleranzen voraus, da keine Variationsmöglichkeit durch ein anderes Teil besteht.

Die *Serienherstellung* hat demgemäß andere Möglichkeiten zu funktionalen Maßen zu kommen. Diese Möglichkeiten bestehen einerseits in Einstellungen oder der kompensierenden Wirkung durch Variation von Teilen. Das Variationsprinzip beruht dabei auf der Theorie der *stochastischen Fertigungsprozesse*, welches davon Gebrauch macht, dass Maße

^{*)} Anmerkung: Die Automobilindustrie fordert, dass ein Messmittel 15–20 % eines Toleranzfeldes sicher und reproduzierbar messen kann. Kleine Toleranzen erfordern somit einen erheblichen Aufwand.

als Zufallsgrößen innerhalb des Toleranzbereiches (siehe auch VDI 2247) erzeugt werden. Insofern wird es sehr unwahrscheinlich sein, dass bei Zusammenbauten extreme Maße (Mini-Max) aufeinandertreffen, weshalb der Zufall oft Montagen begünstigt.

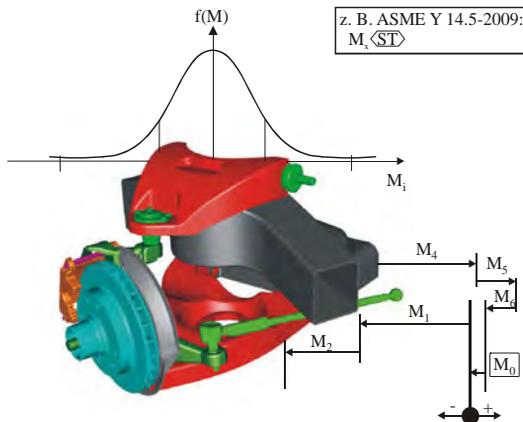


Bild 1.3: Beispielhafte Montagesimulation an einer Baugruppe (z.B. Pkw-Achse)

Die hierauf beruhende statistische Tolerierung (nach alter DIN 7186 oder neuer ASME) ist insofern ein pragmatisches Hilfsmittel Systemmontagen zu vereinfachen und die Fertigung zu entfeinern, was sich wiederum in einer Senkung der Herstellkosten niederschlägt.

1.2.2 Solleigenschaften von Bauteilen

Es ist eine Erfahrungstatsache, dass die Solleigenschaften von Bauteilen hinsichtlich Material, Funktion, Geometrie, Form und Oberfläche nur annähernd realisiert werden können. Somit gehört es zu den wichtigsten Aufgaben des Konstrukteurs, neben den Solleigenschaften auch die zulässigen Abweichungen von den Sollwerten als Toleranz (Istwerte) festzulegen.



Eine Maßtoleranz T wird allgemein definiert als Unterschied zwischen einem zugelassenen Größtwert/Höchstwert ULS und einem zugelassenen Kleinstwert/Mindestwert LLS bzw. als messbare Eigenschaft: $T = ULS - LLS$.

Maßabweichungen sind in einem *Zweipunkt-Messverfahren* nachzuweisen. Paarungen, Passungen und Geometrieabweichungen müssen *gelehrt* werden.

Eine Toleranz ist damit immer eine reale Größe. Eine Übersicht über bauteilbeeinflussende Abweichungen bzw. Toleranzen zeigt insbesondere das folgende Bild 1.4.

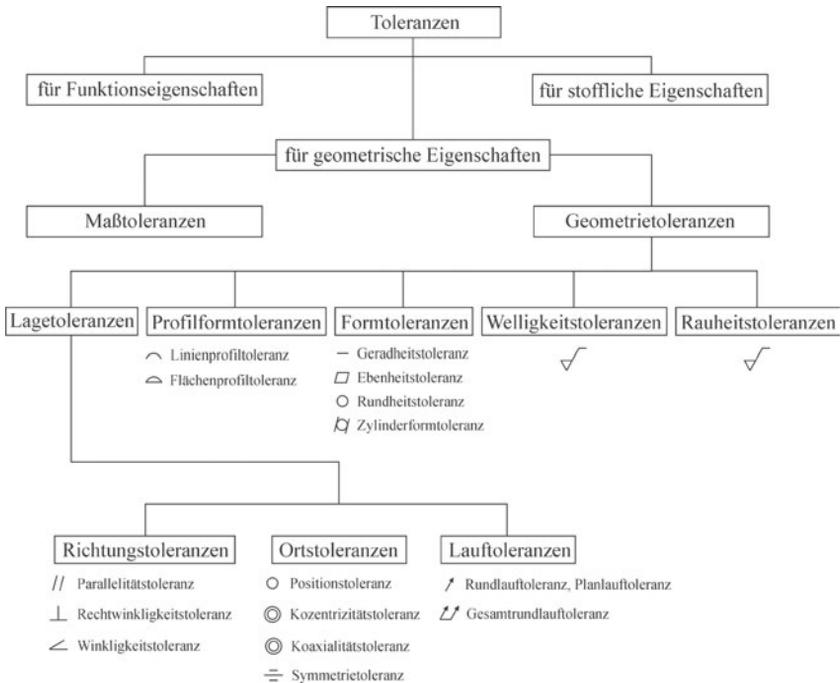


Bild 1.4: Übersicht über Toleranzarten nach ISO 1101 (s. auch /TRU 97/)

Bei einigen Eigenschaften, wie Form- und Lageabweichungen und Oberflächenrauigkeit, ist der zulässige Kleinstwert bis auf wenige Ausnahmen gleich null. Die Toleranz entspricht dann dem zulässigen GrößtWert. Man bezeichnet solche Eigenschaften auch als *einseitig tolerierte Eigenschaften*. Je nach verwendetem „Tolerierungsgrundsatz“ (Unabhängigkeits- oder Hüllprinzip) kann die Lage des Geometrietoleranzfeldes außerhalb oder innerhalb des Maßtoleranzfeldes liegen, welches insbesondere bei Passungseigenschaften wichtig ist.

1.2.3 Qualitäts- und prozessfähige Toleranzen

Die Herstellungskosten steigen gewöhnlich mit kleiner werdenden Toleranzen überproportional an, weshalb ohne Einschränkungen der Grundsatz gilt:



„Toleriere so genau wie nötig, aber so ungenau wie möglich“.

Dies erfordert vom Produkt-Konstrukteur recht gute Kenntnisse über die mit der vorhandenen Verarbeitungstechnik einhaltbaren Maß- und Geometrietoleranzen sowie eine enge Zusammenarbeit mit dem Werkzeugbauer und dem Spritzgießer.

Für eine wirtschaftliche Tolerierung ist eine beherrschte Herstellung notwendig, die eine definierte Prozessstreuung und Maschinengenauigkeit verlangt. Erstmals wurde mit der Ford-Richtlinie Q-101 ein toleranzbezogener Maschinen- und Prozessfähigkeitsindize eingeführt, welche über die Automobilbranche hinaus nunmehr umfassende Bedeutung in der gesamten Industrie erlangt hat. Im VDA, Band. 4, Teil 1 /VDA 96/, sind die üblichen Nachweise für eine qualitätsfähige Herstellung (siehe *Bild 1.5*) aufgeführt.

	Qualitätsfähigkeitskennzahl für					
	Prozesspotenzial			Prozessfähigkeit		
Warngrenzen	UWG		OWG	UWG	Istgröße	OWG
Kurzzeit-prozessfähigkeit	C_m			C_{mk}		
vorläufige Prozessfähigkeit	P_p			P_{pk}		
Langzeit-prozessfähigkeit	C_p			C_{pk}		

Bild 1.5: Qualitätsfähigkeitskennzahlen in Abhängigkeit vom Stadium der Untersuchung

Von besonderer Wichtigkeit ist dabei der *Prozessfähigkeitskennwert*

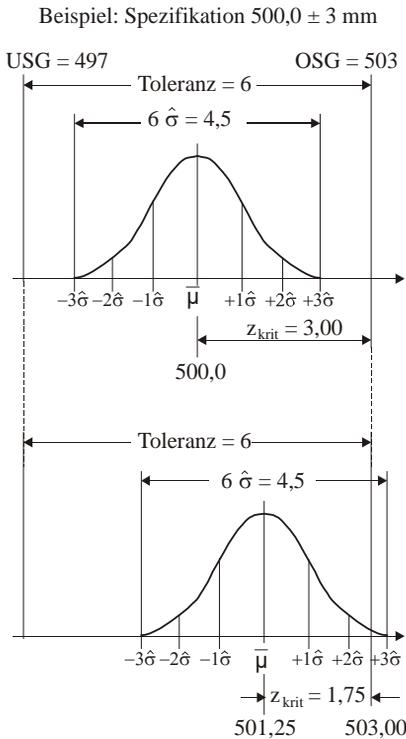
$$C_p = \frac{T}{6 \cdot \sigma}$$

und der *Prozesslagekennwert*

$$C_{pk} = \min \left[\frac{G_o - \bar{\mu}}{3 \cdot \sigma}; \frac{\bar{\mu} - G_u}{3 \cdot \sigma} \right] \equiv \frac{z_{krit.}}{3 \cdot \sigma}$$

Hierin bezeichnet σ die Streuung der sogenannten „theoretischen Normalverteilung“, $\bar{\mu}$ den Mittelwert, G_o (\equiv OSG) und G_u (\equiv USG) den zulässigen Größt- bzw. Kleinstwert der Maßgröße.

Im folgenden *Bild 1.6* sind die Zusammenhänge exemplarisch an einem großen Kunststoff-Funktionsbauteil dargestellt.



a) zentrierte Verteilung

$$C_p = \frac{T}{6 \cdot \hat{\sigma}} = \frac{6}{4,5} = 1,33$$

$$C_{pk} = \frac{z_{\text{krit}}}{3 \cdot \hat{\sigma}} = \frac{3,0}{3 \cdot 0,75} = 1,33$$

Herstellprozess ist **fähig!**

b) verschobene Verteilung

$$C_{pk} = \frac{z_{\text{krit}}}{3 \cdot \hat{\sigma}} = \frac{1,75}{3 \cdot 0,75} = 0,78(!)$$

Herstellprozess ist **nicht** *fähig!*

Bild 1.6: Bestimmung der Prozessfähigkeit für ein großes Kunststoffbauteil

Zu beachten ist hierbei, dass mit $\hat{\sigma}$ ein Schätzwert für die reine Herstellungsstreuung aufgenommen ist, womit jedoch keine anderen systematischen Einflüsse (Werkstoffanomalien, Einstellabweichungen o. Ä.) erfasst werden.

Den Unterschied zwischen C_p und C_{pk} wird im vorstehenden Beispiel noch einmal sehr transparent herausgearbeitet: Der *Prozessfähigkeitskennwert* C_p ist demgemäß nur ein Verhältniswert zwischen zulässiger und ausgenutzter Toleranz. Demgegenüber kann der *Prozesslagekennwert* C_{pk} zusätzlich zur Bewertung der Prozesslage herangezogen werden.

Ein gegenüber dem C_p -Index kleinerer C_{pk} -Index besagt, dass der Mittelwert der Verteilung außerhalb der Toleranzmitte liegt.

Ein Prozess ist im Normalfall als *gerade fähig und beherrscht* einzustufen, wenn die folgenden Toleranzlage-Bedingungen (s. DIN ISO 22514-1/2) erfüllt sind:

$$C_p \geq 1,33, C_{pk} \geq 1,33 \quad \text{konstant qualitätsfähige Herstellung}$$

$$C_p \geq 1,0, C_{pk} \geq 1,0 \quad \text{Grenze der qualitätsfähigen Herstellung}$$

Für $C_p < 1,0$ und $C_{pk} < 1,0$ ist ein Prozess nicht fähig und erfordert eine laufende Überwachung und Aussortierung von Nicht-in-Ordnung-Teilen.

1.2.4 Statistische Prozessregelung

In der Vergangenheit hat die deutsche Industrie die „Gut/Schlecht-Prüfung“ bzw. „die Sortierung“ am Ende der Herstellung kultiviert. Hiermit kann heute aber der hohe Qualitätsanspruch, den Kunden von Produkten erwarten, nicht mehr erfüllt werden. Nachdem die Japaner und Amerikaner mittels SPC (Statistical Process Control) zur Online-Qualitätssicherung (oder Q-Regelung) übergegangen sind, ist unter dem Druck der Automobilindustrie auch in Deutschland SPC mit seinen Statistikwerkzeugen Standard /VDA 09/ geworden.

Zur Philosophie gehört dabei, ausgewählte Produktmerkmale während der Herstellung zeitnah zu überwachen, um sofort eingreifen zu können, wenn sich Abweichungen zeigen. Dazu werden in festgelegten kleinen Zeitabschnitten Stichproben mit dem Umfang von 5 Teilen bzw. Messwerten gezogen und hieraus Mittelwert und Spannweite bestimmt. Diese Ist-Daten werden dann in eine Qualitätsregelkarte (QRK) eingetragen und mit vorgegebenen Sollwerten verglichen.

Je nach Datenauswertung unterscheidet man hierbei:

- \bar{x} -R-Regelkarten für messbare Q-Merkmale und
- p-Regelkarten für zählbare Q-Merkmale.

Im *Bild 1.7* ist ein Ausschnitt aus einer \bar{x} -R-Regelkarte wiedergegeben und das gemessene Merkmal im Verlauf dargestellt. Als Sollwert gilt es: $27,50 \pm 0,05$ mm einzuhalten.

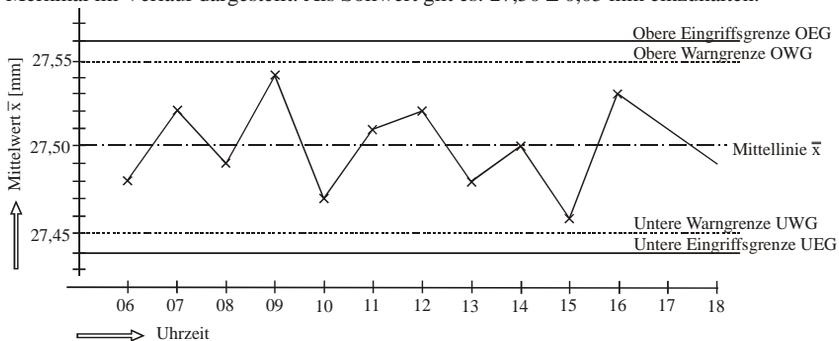


Bild 1.7: \bar{x} -R-Regelkarte zur laufenden Herstellprozess-Überwachung

In der gezeigten Regelkarte sind einige Grenzwerte über den Toleranzbereich markiert. Diese sind:

- \bar{x} als Mittellinie bzw. Sollwert (entspricht dem Mittelwert der Mittelwerte),
- die Eingriffsgrenzen (99,7 %) für beherrschte und zufällige Verteilungen

$$\text{OEG} = \bar{x} + \frac{2,58}{\sqrt{n}} \cdot \sigma, \quad \text{UEG} = \bar{x} - \frac{2,58}{\sqrt{n}} \cdot \sigma,$$

worin n den Umfang der Einzelstichprobe und σ die Maschinenstreuung (ermittelt aus mindestens 100 Messwerten) darstellt,

- die Warngrenzen (95 %)

$$\text{OWG} = \bar{x} + \frac{1,96}{\sqrt{n}} \cdot \sigma, \quad \text{UWG} = \bar{x} - \frac{1,96}{\sqrt{n}} \cdot \sigma.$$

Ein Q-Merkmal sollte natürlich innerhalb der Warngrenzen verlaufen. Bei Überschreitung der Warngrenzen ist die Herstellung erst einmal zu stoppen, um den Fehler suchen zu können. Die Fähigkeit der Herstellung wird darin sichtbar, dass bei der Werteauftragung der Verlauf über der Zeit tatsächlich zufällig ist und sich um die Mittellinie häufen.

1.2.5 Prüfanforderungen

Zur herstellungsgerechten Toleranzfestlegung gehört auch die Beachtung der damit verbundenen Anforderungen an eine rationelle Kontrolle der Einhaltung von Toleranzen, da die Prüfkosten ebenfalls eng mit der Größe der Toleranz korrelieren. Beispielsweise besteht zwischen der Messunsicherheit u als einer Kenngröße für die Wahl und den Einsatz geeigneter Messgeräte und der Toleranz nach DIN 2257 die Beziehung

$$u \approx \pm \left(\frac{1}{5} \text{ bis } \frac{1}{10} \right) \cdot T.$$

Das heißt, die Messunsicherheit darf nur 10–20 % der Toleranz betragen, womit direkt die Anforderungen an ein Messmittel festliegen.

In Verbindung mit den Prozessfähigkeitsindizes wurde für die Toleranzüberwachung auch ein *Messmittel-Fähigkeitskennwert* C_g eingeführt. Dieser lautet:

$$C_g = \frac{0,15 \cdot \sigma_G}{6 \cdot \sigma_w},$$

oder wenn die Gesamtstreuung σ_G der Herstellung nicht bekannt ist, jedoch das zu messende Merkmal toleriert ist

$$C_g = \frac{0,15 \cdot T}{6 \cdot \sigma_w}.$$

Hierin ist σ_w die Wiederholstandardabweichung, die sich ergibt, wenn derselbe Beobachter nach einem festgelegten Messverfahren am selben Messobjekt und unter gleichen Bedingungen mehrmals in kurzen Zeitabständen Messungen durchführt.

Nach DIN ISO 5725 ist σ_w aus mindestens 25 Messungen am gleichen Bauteil zu ermitteln. Ist σ_w bei analog anzeigenden Messgeräten kleiner als 0,2 des Skalenteilungswertes

tes (S_{kw}) oder bei digital anzeigenden Geräten kleiner als 0,5 des Zifferschrittwertes (Z_w), muss entweder ein höher auflösendes Messgerät verwendet werden oder es ist bei der Berechnung von C_g für die Wiederholstandardabweichung σ_w mindestens 0,2 S_{kw} oder 0,5 Z_w einzusetzen. Mit der Forderung $C_g \geq 1$ wird weitestgehend der Empfehlung entsprochen, dass die Messunsicherheit $u = (0,1 \text{ bis } 0,2) \cdot T$ bei herstellungsbegleitenden Messungen (s. ISO 14253-1) nicht überschreiten soll.

1.3 Kostenentwicklung

Nachweislich reagieren die Herstellkosten je Teil

$$HK = MK + FK \text{ (Euro/Teil)}, \text{ mit } MK = \text{Materialkosten und } FK = \text{Fertigungskosten}$$

bzw. die Fertigungskosten je Teil

$$FK = FLK + FGK + KW, \text{ mit } FLK = \text{Lohnkosten und } FGK = \text{Gemeinkosten}$$

unmittelbar auf Veränderungen der Formteildimensionalität. Diese gehen nämlich direkt über die anteiligen Werkzeugkosten (KW) in die Fertigungskosten und indirekt über Volumenänderungen in die Materialkosten ein, wie umseitig *Bild 1.8* zeigt.

Letztlich sind die entscheidenden Kosten die Selbstkosten eines Produktes für ein Unternehmen

$$SK = HK + EK + VVGK + SEV \quad \text{mit} \quad \begin{array}{l} EK = \text{Entwicklungs- + Konstruktions-} \\ \quad \text{kosten} \\ VVGK = \text{Verwaltungs- und Vertriebs-} \\ \quad \text{gemeinkosten} \\ SEV = \text{Sondereinzelkosten des Ver-} \\ \quad \text{triebs} \end{array}$$

Verschiedene Studien haben gezeigt, dass mit einer funktions- und herstellungsgerechten Tolerierung bis zu 7 % von HK eingespart werden können. Zusammen mit der Montage summiert sich der Einfluss der Toleranzen auf ca. 10 % von HK . Dies erscheint zwar wenig, ist aber dennoch ein Gewinnpotenzial, das man aktivieren sollte.

Der Hauptstellhebel dazu liegt in der Konstruktion, wo etwas Mehraufwand bei der Festlegung von Toleranzen geleistet werden muss.

<p>Herstellkosten pro Formteil: $HK = MK + FK$ [€/Teil]</p> $FK = \frac{t_z \cdot (K_{MS} + K_{LS})}{n_f} + KW$ <p>Zykluszeit t_z (z. B. für Polyacetal POM)</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 10px auto;"> $t_z = (18,7 + 12,8 \ln s + 1,8 \ln G_T) f_s$ </div> <p>$MK = G_T \cdot P_M$</p>	<p>Bezeichnung: FK = Fertigungskosten</p> <p>MK = Materialkosten t_z = Zykluszeit [s] d. h. Verweilzeit in der Spritzgussmaschine</p> <p>K_{MS} = Kosten für Maschinensekunde [€/s] K_{LS} = Kosten für Lohnsekunde [€/s] KW = Werkzeugkosten pro Teil [€/Teil] n_f = Formnestzahl [-] G_T = Teilegewicht [g] bzw. [kg] P_M = Materialpreis [€/kg] s = maximale Teilewandstärke [mm] f_s = Verzugsfaktor</p>
<p>Verzugsfaktor f_s :</p> <p>$f_s = 1,3$ für glatte (unverrippte), großflächige, dünne Teile (Abmessung > 100/Wandstärke > 1)</p> <p>$f_s = 1,45$ Zahnräder und verzahnte Teile</p> <p>$f_s = 1,33$ dünne Hülsen und Rohre (Länge/Durchmesser > 1) (Durchmesser/Wandstärke > 5)</p>	<p>Gültigkeit: nacharbeitungsfrei gespritzte Teile aus thermo-plastischen Kunststoffen (z. B. POM, PA 6, ...) mit Stückzahl > 10.000 Stück über ein Werkzeug.</p>

Bild 1.8: Kalkulationsansatz für Kunststoff-Spritzussteile

Insofern sollten keine übertriebenen Genauigkeitsanforderungen gestellt werden, die in der Folge eine überwachte Präzisionssonderfertigung erforderlich machen. Für Kunststoff-Formteile sollte gelten, dass Toleranzen nicht kleiner gewählt werden sollen als:

$T \approx 0,10 \%$ (sehr fein) ... $0,30 \%$ (fein) ... $0,60 \%$ (mittel) ... 1% (grob) vom Nennmaß N_0 (Präzisionssonder-) (Präzisions-) (Genau-) (Normalfertigung)

Bei der Toleranzfestlegung sollte berücksichtigt werden, dass viele Kunststoff-Formteile oft auch nicht so genau wie Metallteile sein müssen, da sich mit der höheren Dehnung und dem niedrigeren E-Modul viele Ein- und Anbausituationen entschärfen lassen.

Bei Kunststoffzeugnissen wirken sich verringerte Toleranzen in den folgenden Kostenbestandteilen /HAS 01/ aus:

- Formwerkzeug-Herstellung

Werkzeuge, einschließlich formgebender Kontureinsätze, werden gewöhnlich spanend hergestellt. In der Zerspanungstechnik gilt, dass eine „Halbierung der Toleranz etwa eine Vervierfachung der Fertigungskosten“ zur Folge hat. Dabei liegen die Kosten für Innen-

passflächen (Außenmaße am Formteil) stets höher als die für Außenpassflächen (Kerne). Hierbei ist zu bedenken, dass die Fertigungsgenauigkeit für ein Formwerkzeug ca.

2–3 IT-Klassen genauer liegen muss als für das Formteil. Dies ist auch etwa Ansatz der Normung mit der Abstufung:

$$\text{IT-Werkzeug} \approx \text{IT-Formteil} - (2-3 \text{ IT-Klassen})$$

Nach Angaben des IKT-Aachen (Institut für Kunststofftechnik) sollten die Werkzeugtoleranzen nur 15–20 % der Formteiltoleranzen (entspricht -3–4 IT-Klassen geringer) betragen, welches in der Praxis aber nur bei Präzisionssonderfertigungen notwendig ist.

Toleranzreihe IT		01	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
		für Lehren										für Passungen					als grobe Toleranzen, z.B. für spanlose Formung					
		Nennmaßbereiche in mm										Toleranzen in μm										
IT	bis 3	> 3 bis 6	> 6 bis 10	> 10 bis 18	> 18 bis 30	> 30 bis 50	> 50 bis 80	> 80 bis 120	> 120 bis 180	> 180 bis 250	> 250 bis 315	> 315 bis 400	> 400 bis 500	> 500 bis 630	> 630 bis 800	> 800 bis 1000	> 1000 bis 1250	> 1250 bis 1600	> 1600 bis 2000	> 2000 bis 2500	> 2500 bis 3150	> 3150 bis 4000
01	0,3	0,4	0,5	0,6	0,8	1	1,2	1,5	2	2,5	3	4	5	6	8	10	12	15	20	25	32	40
0	0,5	0,6	0,8	1	1,2	1,5	2	2,5	3	4	5	6	8	10	12	15	20	25	32	40	50	63
1	0,8	1	1,2	1,5	2	2,5	3	4	5	6	8	10	12	15	20	25	32	40	50	63	80	100
2	1,2	1,5	2	2,5	3	4	5	6	8	10	12	15	20	25	32	40	50	63	80	100	125	160
3	2	2,5	3	4	5	6	8	10	12	15	20	25	32	40	50	63	80	100	125	160	200	250
4	3	4	5	6	8	10	12	15	20	25	32	40	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400
5	4	5	6	8	10	12	15	20	25	32	40	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500
6	6	8	10	12	15	20	25	32	40	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800
7	10	12	15	20	25	32	40	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250
8	14	18	22	27	33	39	46	54	63	72	81	89	97	106	117	129	142	156	171	188	206	225
9	25	30	36	43	52	62	74	87	100	115	130	140	155	170	185	200	215	230	250	270	290	315
10	40	48	58	70	84	100	120	140	160	185	210	230	250	280	315	350	390	430	470	510	560	630
11	60	75	90	110	130	160	190	220	250	290	320	360	400	450	500	560	630	700	780	870	970	1080
12	100	120	150	180	210	250	300	350	400	460	520	570	630	700	780	870	970	1080	1200	1350	1500	1650
13	140	180	220	270	330	390	460	540	630	720	810	890	970	1080	1200	1350	1500	1650	1800	2000	2200	2400
14	250	300	360	430	520	620	740	870	1000	1150	1300	1400	1550	1700	1850	2000	2150	2300	2500	2700	2900	3150

Bild 1.9: Tabelle der IT-Klassen nach ISO

- Maschinen- und Prozessführung

Geringe Herstellungstoleranzen stellen hohe Anforderungen an die Maschine (Wartungszustand, Genauigkeit), die Bedienung und die Maschinensteuerung. Darüber hinaus ist eine ständige Überwachung der Maschinenparameter (Prozessregelkarte) und der kritischen Bauteilmaße (SPC) erforderlich.

- Qualitätskosten und Ausschuss

Jede Toleranzeinengung führt selbst bei nur geringen Prozessschwankungen zu Ausschuss. Damit ist ein Verlust an Herstellungszeit sowie beim Material- und Energieeinsatz verbunden. Gleichzeitig erhöht sich der erforderliche Aufwand für die Produktionskontrolle und die Warenendprüfung.

Ein weiterer Aspekt sind Handling, Fügung und Verbindung. Kunststoff-Formteile werden oft in Produktsystemen eingesetzt, und zwar auch in Kombination mit Metallteilen (Stanzteile). Insofern spielt manchmal die Montage eine große Rolle. Durch die gute Formbarkeit der meisten Kunststoffe sind Passungsprobleme jedoch meist unkritisch, da schon mit geringen Kräften Maßkompensationen möglich sind.

- Montageaufwand

Enge Toleranzen erhöhen die Montagekosten und führen meist zu zusätzlichen Anpassungskosten. Dem kann durch eine geeignete Tolerierung (Hüllprinzip oder Unabhängigkeitsprinzip, Positionstolerierung mit Maximum-Material-Bedingung) entgegengewirkt werden. Um im Vorfeld keine unnötigen Kosten zu erzeugen, ist es vielfach sinnvoll, eine Montagesimulation (mit statistischen Toleranzen nach DIN 7186) durchzuführen. Hierbei sollten die Maß-, Form- und Lageabweichungen berücksichtigt werden. Das Zusammenwirken von Maßen und Toleranzen im ISO/GPS-System zeigt *Bild 1.10* in einem Überblick*).

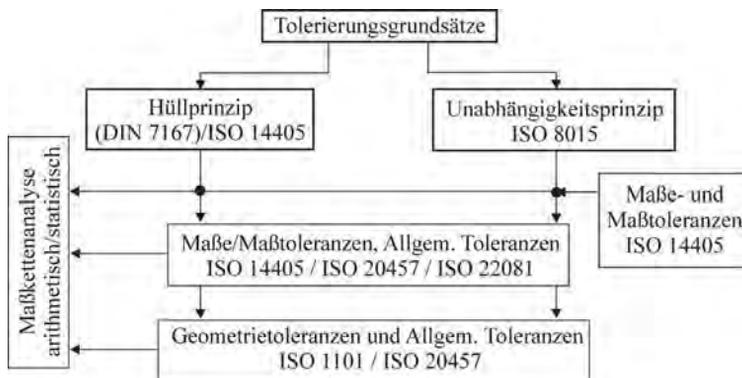


Bild 1.10: Prinzipien der Toleranzanalyse für eine Montagesimulation

- Integration / Einstückigkeit

Eng mit der Montage und dem Zusatznutzen von Kunststoffbauteilen verbunden ist die größtmögliche funktionelle Integration. Hierunter ist zu verstehen, dass alle Befestigungsstellen, Gelenke, Aufnahmen etc. ohne Nacharbeit im Herstellprozess erzeugt werden. Oft bedingt dies eine genauere Endfertigung.

Nur bei Berücksichtigung aller funktionalen Möglichkeiten ist letztlich ein Kunststoff-Formteil einem Metallteil im Einsatz technologisch und wirtschaftlich überlegen.

1.4 Formteil-Qualität

Aus den vorgenannten Ausführungen ist deutlich geworden, dass nur dann ein technisch und wirtschaftlich optimales Kunststoff-Formteil gestaltet werden kann, wenn die funktionalen Anforderungen im Werkzeug und im Herstellprozess umgesetzt werden können. Oft bedingt dies interdisziplinäre Teamarbeit von Spezialisten.

Die Gesamtqualität eines Kunststoff-Formteils lässt sich anschaulich durch den nachfolgenden Zusammenhang beschreiben:

*) Anmerkung: Die DIN 7167 ist mittlerweile ersatzlos zurückgezogen worden. Das hierin beschriebene „Hüllprinzip“ kann jedoch auch in der ISO 14405 sinnvoll weiter genutzt werden. Bei Neuzeichnungen sollte heute die ISO 8015 gewählt werden.

Die Formteil-Qualität Q_F ist das Produkt aus

- Qualität der Konstruktion Q_K ,
- Qualität des Werkzeugs Q_W
- und
- Qualität der Verarbeitung Q_V .

Erreichbar ist mit dem heutigen Stand der Fertigungstechnik und bei einer wirtschaftlich günstigen Fertigung ein Wert von

$$Q_F \approx Q_K \cdot Q_W \cdot Q_V \approx 0,8 \dots 0,9 \dots (0,9973).$$

Bereits der unterste Qualitätswert $Q_F = 0,8$ verlangt Einzelqualitäten von $Q_i = 0,93$ (oder 93 % der Zielqualität) bzw. bei $Q_F = 0,9$ ist $Q_i = 0,965$ zu realisieren. Die Forderung der Automobilindustrie nach mindestens $Q_F \geq 0,99$ kann somit nur mit einem erheblichen Aufwand ($Q_i = 0,996$) erreicht werden. Dies verlangt vor allem Konstruktionen, die folgenden Kriterien /KIR 01/ zu berücksichtigen:

- richtige Auswahl und Abstimmung des Kunststoffes,
 - Teile funktions-, werkstoff- und werkzeuggerecht gestalten,
 - abgestimmte Konstruktion des Formwerkzeugs,
 - richtige Wahl des Verarbeitungsverfahrens
- sowie
- Auswahl der geeigneten Nachbearbeitungstechnologien.

Hieraus wird sichtbar, dass die Ausführungsqualität eines Kunststoff-Formteils von deutlich mehr Parametern als ein metallisches Teil beeinflusst wird. Dies bedingt gleichzeitig einen quantitativ und qualitativ höheren Engineering-Anteil in der Auslegung.

Im *Bild 1.11* sind noch einmal zusammenfassend die Funktions- und Qualitätsvorgaben der Automobilindustrie an Bauteilen aufgeführt. Hieraus können sofort die Anforderungen an Toleranzen, Passungen, Montagen sowie an den Messmitteln abgeleitet werden.

Prozessfähigkeit	Streuung	Formteilqualität	Fehler pro Million Möglichkeiten
$C_{pk} = 1,0$	$\pm 3 \cdot \sigma$	$Q_F = 0,99730$	2.700 FpMM
$C_{pk} = 1,33$	$\pm 4 \cdot \sigma$	$Q_F = 0,999937$	63 FpMM
$C_{pk} = 1,67$	$\pm 5 \cdot \sigma$	$Q_F = 0,9999994$	1 FpMM
$C_{pk} = 2,0$	$\pm 6 \cdot \sigma$ (SIX-SIGMA)	$Q_F = 0,9999999$	0 FpMM

Bild 1.11: Industrieforderungen bezüglich der Prozessqualität

In Praxisstudien mit der SIX-SIGMA-Philosophie haben die beiden Amerikaner Bender und Gilson festgestellt, dass sich Prozesse bzw. Prozessparameter mit der Zeit verschieben. Im Durchschnitt wurde ermittelt, dass diese Verschiebung etwa $1,5 \cdot \sigma$ betrug. Berücksichtigt man dies, so stellt sich eine etwas andere Fehlerrelation (gemäß *Bild 1.12*) ein, und zwar

	Fehler pro Million Möglichkeiten	Gutteile bzw. Formteilqualität
$\pm 3 \cdot \sigma$	66.807	93,32 %
$\pm 4 \cdot \sigma$	6.210	99,38 %
$\pm 5 \cdot \sigma$	233	99,97 %
$\pm 6 \cdot \sigma$	3,4	99,99967 %

Bild 1.12: Zulässige Fehler bei SIX-SIGMA

In der industriellen Fertigung wird versucht, diese Abweichungen mit SPC zu begegnen, welches jedoch nicht zu einer generellen Beseitigung von dimensionellen Schwankungen führt.

Prozessoptimierung muss am Formteil ansetzen, in dem beispielsweise die Toleranzen optimiert, d. h., besser mit Werkzeug und Prozess abgestimmt werden. Hierbei ist stets die folgende Regel zu befriedigen:



„Konstruktiv erforderliche Toleranz \geq mögliche Prozesstoleranz“

Die Realisierbarkeit einer festzusetzenden Toleranz lässt sich am einfachsten gegenüber der zulässigen Allgemeintoleranz bewerten. Eine praktische „Daumenregel“ besagt, dass etwa 50 % einer Allgemeintoleranz*) gerade noch herstellbar ist.

Im Vergleich zwischen einer geläufigen Metall- und Kunststoffkonstruktion gilt für Funktionsmaße noch die Erfahrungsrelation:



„Kunststofftoleranzen sollten etwa 40–70 % größer gewählt werden als die gleichen Metalltoleranzen“

Legt man für die Formteiltolerierung das Ordnungsschema der ISO 286-2 zugrunde, so sind die üblichen Herstellprozesse (Ur- und Umformung) den Grundtoleranzgraden IT 14 bis IT 18 zuzuordnen.

*) Anmerkung: Die Fa. Bayer (KL, Anwendungstechnik) unterstellt, dass 1/3 der DIN-Allgemeintoleranzen nach DIN 16901 mit den üblichen Herstelltechnologien erreichbar sind.

2 Fertigungs- und anwendungsbedingte Maßungenauigkeiten

Wie bei allen Herstell- und Bearbeitungsverfahren sind auch bei Kunststoff-Formteilen größere Maß- und Geometrieabweichungen unvermeidbar. Sie haben ihre Ursache in Werkzeugungenauigkeiten, Werkstoffeigenschaften und in der Prozessführung. Demgemäß sollten durch die Anwender auch nur solche Genauigkeiten gefordert werden, die auch bei der Herstellung eingehalten werden können.

Werkzeugursachen	
Herstellung	Auswirkung
• Bearbeitungsungenauigkeiten der Kontur	Ungleichmäßige Temperaturverteilung
• Härteverzug	Formänderungen (elastisch/plastisch)
• Ungleichmäßigkeit galvanischer Oberflächenschichten	Verzüge
• Teilungsversatz des Werkzeuges	Form-Unsymmetrie, Grat
• Versatz (unge. Führungen und Zentrierung)	Maß- und Geometrieabweichungen
Prozessführung	
Herstellung	Auswirkung
• Streuung der Verarbeitungsschwindigkeit	Maßänderungen
• Temperaturschwankungen	ungleichmäßige Schwindigkeit
• Molekül-/Kristallreorientierung	Flüssigkeitsaufnahme oder -abgabe
• Streuung in der Formmasse-Konditionierung	Relaxation, elastische Eigenspannungen
• ungleichmäßige Dosierung	Inhomogenität
• Streuung der Prozessbedingungen	Strukturumwandlungen (Nachhärtung, Nachkristallisation)
• anisotrope Füll- und Verstärkungstoffe	ungleicher Verzug
• ungleicher Werkzeugschluss	Lageversatz, F+L-Toleranzen
• Maßungenauigkeiten des Werkzeuges	Maßabweichungen, F+L-Toleranzen
• ungleichmäßige Druck- und Temperaturverhältnisse in den Kavitäten	Volumenkontraktion, Schwindung, Maßänderung

Bild 2.1: Beispielhafte Ursachen von Maßungenauigkeiten an Formteilen

• Herstellbedingte Maßungenauigkeiten

Für Kunststoff-Teile aus Thermoplasten, Duromeren und versteiften Formmassen, die durch Pressen, Spritzpressen, Spritzprägen oder Spritzgießen hergestellt werden, sind in der neuen ISO 20457 die dem „heutigen Stand der Technik“ gemäß erzielbaren Toleranzen in vier Toleranzreihen und neun *Toleranzgruppen* (TG 1 - TG 9) angegeben.

Die erreichbaren Toleranzen sind abhängig vom Strukturaufbau, dem Gehalt an Füllstoffen, teils von der Wanddicke und der Lage eines Maßes zu der Formgravur (werkzeug- und nicht werkzeuggebundene Maße). Es wird weiter unterschieden, welche Toleranzgruppen mit normalem und welche mit erhöhtem technologischen Aufwand erzielt werden können.

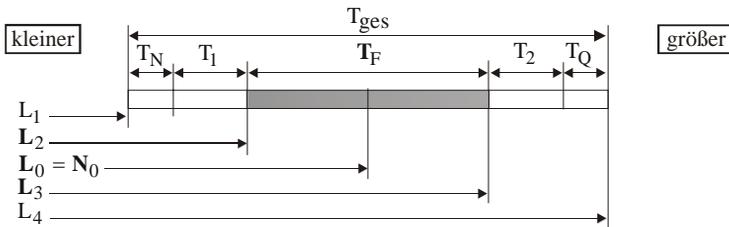
Die *DIN 16940* und die *DIN 16941* erhalten die entsprechenden Aussagen zu den Allgemeintoleranzen für extrudierte Schläuche aus PVC sowie extrudierte Profile aus weiteren Thermoplasten.

Für *spanend hergestellte Formteile* galt bisher die Maschinenbau-Norm ISO 286, Teil 1/Teil 2, welche Toleranzen, Abmaße und Passungen für Wellen und Bohrungen umfasst. Ergänzend konnte hier noch die DIN ISO 2768 (neu: ISO 22081) über Allgmeintoleranzen herangezogen werden. Nunmehr existiert mit der DIN EN 15860 eine eigene Norm für die spanende Verarbeitung von Thermoplasten.

Die Beziehungen zwischen den erzielbaren Toleranzen am Formteil waren nach der alten DIN 16901 zu grob. Die neue ISO 20457 ist im Stufensprung abgestimmt mit der ISO 286 und insofern realistischer.

- Anwendungsbedingte Maßgenauigkeiten
Kunststoff-Formteile erleiden nach der Herstellung durch Einwirken von Umwelteinflüssen und unter Anwendungsbedingungen nachträgliche Maßveränderungen. Diese haben ihre Ursache in Schwindung, Quellen, thermischer Ausdehnung und großen plastischen Verformungen (eventuell Kriechen). Hierdurch entstehen zusätzliche Verschiebungen von Maßen (siehe *Bild 2.2*) sowie Vergrößerungen von Streufeldern.

Um bestimmte Genauigkeitsforderungen (d. h. kleine Toleranzen) unter Anwendungsbedingungen aufrechterhalten zu können, muss an die Herstellung eine höhere Genauigkeitsforderung gestellt werden, als es sonst notwendig wäre. Dies bedeutet zwangsläufig auch eine Maßverschiebung für das Werkzeug und eine erhöhte Herstellgenauigkeit der Werkzeugmaße. Wie dies technologisch gewährleistet werden kann, führt der nachfolgende Maßnahmenkatalog (s. /STA 04/) auf.



Legende: L_0 = Nennmaß, L_1 = mögliches Kleinstmaß, L_2 = Kleinstmaß nach Zeichnung, L_3 = Größtmaß nach Zeichnung, L_4 = mögliches Größtmaß, T_{ges} = Gesamttoleranz, T_F = Fertigteiltoleranz, T_1 = Maßänderung bei Temperaturabfall, T_2 = Maßänderung bei Temperaturanstieg, T_N = Nachschwindung, T_Q = Quellung

Bild 2.2: Nennmaßbildung am Formteil mit möglichen Abweichungen

Vor diesem Hintergrund seien auch noch einmal einige Erfahrungen herausgestellt, die für die mechanische Endbearbeitung von Halbzeugen herangezogen werden können. Hier sind die geläufigsten Grundtoleranzgrade nach ISO 286 verwendet worden.

Bearbeitungsverfahren	mögliche Anwendung	Thermoplaste, amorph	Thermoplaste, teilkristallin	Duroplaste
Schlichtschleifen	zylindrische Außenflächen	IT 7 und IT 8	IT 8 und IT 9	IT 6 und IT 7
Schlichtschleifen, Schlichtreiben	ebene Oberflächen	IT 8 und IT 9	IT 9 und IT 10	IT 7 und IT 8
Schlichtdrehen, Schlichtbohren, Schruppschleifen	ebene und zylindrische Außenflächen, Bohrungen,	IT 9 und IT 10	IT 10 und IT 11	IT 8 und IT 9
Bohren, ebene Flächen	Senken, Schlichtfräsen	IT 10 und IT 11	IT 11 und IT 12	IT 9 und IT 10
Bohren	Durchgangs- und Senkbohrungen	IT 11 und IT 12	IT 12 und IT 13	IT 10 und IT 11
Schruppdrehen, Schrappfräsen	ebene und zylindrische Flächen	IT 12 und IT 13	IT 13 und IT 14	IT 11 und IT 12

Bild 2.3: Erreichbare Genauigkeiten (ISO-Toleranzgrade) bei der Herstellung von Kunststoffformteilen nach /STA 04/

Aufgrund der Unterschiede in den makromolekularen Strukturen (siehe S. 29 ff.) sind die erreichbaren Toleranzgrade somit in starkem Maße werkstoffabhängig. So zeigt sich, dass

- IT 6 - 7 nur mit einem erhöhten Aufwand (wie Zwischentempnern) erreichbar ist;
- IT 7 - 8 nur bei PSU, PES, PEI, PC, PMMA, PVC, PEEK und PET mit normalem Aufwand erreicht werden können,

gleiches gilt für

- IT 9 bei POM
- IT 10 bei PA, PP

und

- IT 11 bei PTFE, PE - UHMW, PVDF.

Darüber hinaus gilt die Regel, dass sich zähnharte bis sprödharte Thermoplaste (mit ca. $E > 2.000 - 5.000 \text{ N/mm}^2$), Duroplaste (CF, FF, MF, MP, PDAP, PF, UF) und Hartgummi wegen ihrer „festeren“ Struktur und härteren Oberfläche genauer bearbeiten lassen. Gleiches gilt für die amorphen Thermoplasten. Mit größeren Maß- und Toleranzabweichungen muss regelmäßig bei teilkristallinen Kunststoffen gerechnet werden.

3 Eigenschaften von Kunststoffen

Die Verwendung von Kunststoffen beruht zum einen auf einen Kostenvorteil gegenüber konkurrierenden Leichtbauwerkstoffen, zum anderen auch auf Eigenschaften, die andere Werkstoffe nicht in gleichem Maße besitzen. Beispiele hierfür sind: niedrige Dichte, hohe Elastizität, elektrische und thermische Isolierfähigkeit, Witterungs- bzw. Korrosionsbeständigkeit, Einfärbbarkeit etc.

Das Eigenschaftsbild von Kunststoffen kann daher nicht wie bei Metallen mit ein paar Zahlenwerten charakterisiert werden, sondern hängt von ihrem unterschiedlichen Molekülaufbau und dem niedrigen Erweichungs- und Schmelzbereich nur wenig oberhalb der normalen Umgebungstemperatur ab.

Die als Kunststoffe bezeichneten Werkstoffe /BER 02/ bestehen aus

- dem Kunststoff an sich,
 - den Zuschlag-, Hilfs- und Füllstoffen
- sowie
- den Verstärkungsmaterialien.

Trotz dieser vielfältigen Anteile an Zusatzstoffen werden die Eigenschaften des Verbundes noch weitgehend vom Kunststoff geprägt. Eine verbreitete Definition ist:

„Als Kunststoffe bezeichnet man makromolekulare (organische) Stoffe, die synthetisch oder durch Umwandlung von Naturstoffen erzeugt werden und die unter bestimmten Bedingungen plastisch formbar sind“.

Gemäß den Eigenschaften, Preisen und Herstellmengen, kann in *Standardkunststoffen* (z. B. PE, PVC, PS, PP), *technischen Kunststoffen* (z. B. PA, POM, PC, PMMA, PET) und *Hochleistungskunststoffen* (z. B. PEI, PES, PPE, PPS, PEEK, PSU) klassifiziert werden (s. /HEN 11/).

Weiter kann auch unterschieden werden nach der Umformbarkeit in *Thermoplaste/Plastomere* (bei wiederholter Erwärmung plastisch formbar), *thermoplastische Elastomere (TPE)*, *Duroplaste/Duromere* (die nur einmal während der Urformung plastisch formbar sind) und gummielastische *Elastomere/Elaste* (recycler- und neu formbar).

- Thermoplaste bestehen aus linearen, unverzweigten Kettenmolekülen (verschlaft oder wirt durcheinander). Da die Ketten beweglich sind, haben Thermoplaste eine geringe geometrische Beständigkeit und niedrige mechanische Eigenschaften.
- Duroplaste bestehen aus dreidimensional vernetzten Kettenmolekülen, die erst während des Aushärteprozesses entstehen. Die Beweglichkeit der Moleküle wird durch ihre chemische Verknüpfung (enge Vernetzung) eingeschränkt. Dies führt zu einer besseren geometrischen Beständigkeit und höheren mechanischen Eigenschaften.
- Elastomere (Gummi) bestehen aus weitmaschig, schwach vernetzten Kettenmolekülen, die eine große Beweglichkeit zueinander haben, weshalb große Dehnungen möglich sind. Gummi wird beim Erwärmen nicht weich und ist gegen viele Lösungsmittel beständig. Anderes Verhalten zeigen die thermoplastischen Elastomere (PP/EPDM, PE/EPDM), welche Eigenschaften wie Thermoplaste aufweisen.

In vielen technischen Anwendungen gibt es zu Kunststoffen keine Alternative, weshalb Kunststoffe mittlerweile einen festen Platz in der Produktentwicklung gefunden haben. Ziel muss es immer sein, die Kunststoffeigenschaften vorteilhaft zu nutzen. Das folgende *Bild 3.1* soll dahingehend eine Einordnung unterstützen.

Eigenschaften	Kunststoffe	Metalle
Dichte ρ $[\text{kg}/\text{dm}^3]$	0,8 ... 2,2 $\leq 0,05$ (Schäume)	0,53 ... 7,9
Zugfestigkeit [MPa]	25 ... 100	150 ... 1.400
Elastizitätsmodul [GPa] (ungefüllt)	1 ... 3	45 ... 240
Biegefestigkeit, Kerbschlagzähigkeit	relativ gering	hoch
spanende Formbarkeit	meist gut	sehr gut
Ur-/ Umformbarkeit	sehr gut	meist gut
Wärmeleitfähigkeit λ $[\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}]$	0,12 ... 0,35 Isolator	17,2 (Ti) ... 459,4 (Ag)
Wärmeausdehnungskoeffizient α $[\text{K}^{-1}]$	$70 \cdot 10^{-6}$ bis $100 \cdot 10^{-6}$	$8,7 \cdot 10^{-6}$ bis $25 \cdot 10^{-6}$
elektr. Leitfähigkeit	Isolator	Leiter
Temperaturanwendungsbereich $[\text{°C}]$	-40 ... +180	schmelzpunkts- und belastungsabhängig
Korrosionsbeständigkeit	gut	bedingt
Alterungsbeständigkeit	begrenzt	gut
Schwindung (VS in %)	0,5–2,5 %	1 % (GG), 1,25 % (Al-Guss), 2 % (GS)
Quellen (mit Maßänderung)	ja	nein

Bild 3.1: Vergleich wichtiger Eigenschaften von Kunststoffen gegenüber Metallen
(nach /SAE 08/)

Die material- und prozessbezogenen Einflüsse (große Wärmedehnung, ungleichmäßige Abkühlung, druckabhängiges Volumen) auf die Maßhaltigkeit, lassen sich am einsichtigsten im „pVT-Diagramm“ erklären. Dieses zeigt den relativ großen Einfluss des Verarbeitungsdruckes auf das Teilvervolumen bzw. die Kompressibilität, welche sich in einer Schwindungsanisotropie und einer Rückfederung nach der Entformung bemerkbar machen kann.

Die Größe der zu erwartenden Verarbeitungsschwindung (VS) kann zwischen den beiden Temperaturpunkten T_E und T_R auf einer Isobare abgelesen werden. Hierbei bedingt der unterschiedliche makromolekulare Strukturaufbau von amorphen und teilkristallinen Polymeren auch andere Schwindungswerte, welches in *Bild 3.2* prinziphaft markiert ist.

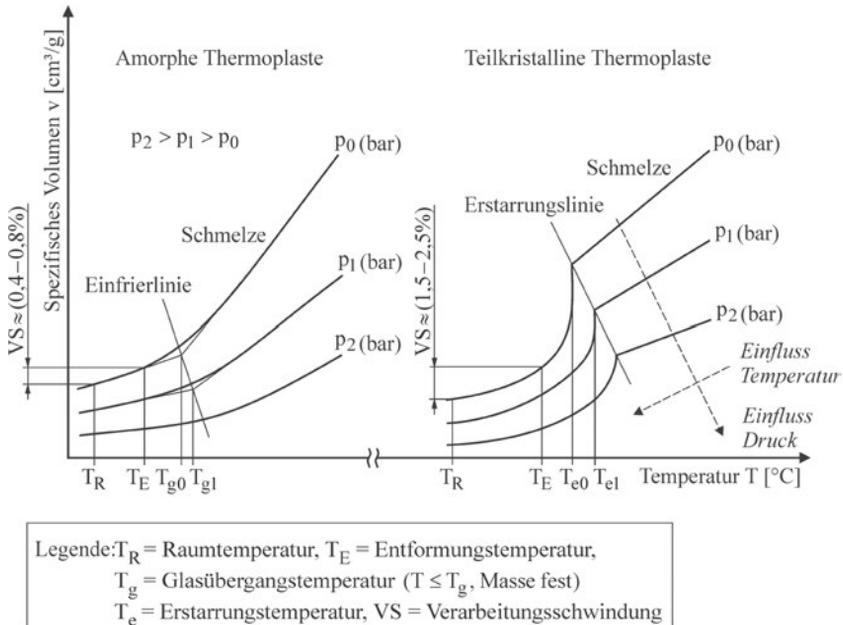


Bild 3.2: Darstellung der Schwindung im pV-T-Diagramm

Weitere für die Konstruktion und Auslegung wichtigen Eigenschaften^{*)} sind:

- Kurzzeitverhalten

Die mechanischen Eigenschaften der Kunststoffe, wie beispielsweise die Steifigkeit (E- und G-Modul), Festigkeit und das Arbeitsaufnahmevermögen, hängen in hohem Maße von der Temperatur ab. Hierdurch wird insbesondere der Einsatzbereich der Thermoplaste auf ca. 100-120 $^\circ\text{C}$ (Schmelzpunkt ca. 200 $^\circ\text{C}$) begrenzt. Zwischen 350-400 $^\circ\text{C}$ vergasen die meisten Thermoplaste vollständig.

Duomere können hingegen kurzfristig bis 180 $^\circ\text{C}$ (Zersetzungstemperatur > 200 $^\circ\text{C}$) eingesetzt werden. Wegen ihrer starken Vernetzung sind sie insgesamt beständiger als Thermoplaste. Jedoch können auch schon bei „niedrigen“ Temperaturen große Verformungen sowie erhebliche Maß- und Geometrieabweichungen auftreten.

Ergänzend zeigt Bild 3.3 auch die Temperaturabhängigkeit der Streckspannung (ist identisch der Streckgrenze von Metallen, s. ISO 527-1). Bereits jahreszeitliche Schwankungen können somit zu Festigkeitsveränderungen führen.

^{*)} Anmerkung: relative Längenänderung $\Delta L / L = \alpha \cdot \Delta T$
absolute Längenänderung $L_2 = L_1 [1 + \alpha \cdot \Delta T]$
absolute Volumenänderung $V_2 = V_1 [1 + \gamma \cdot \Delta T]$, mit $\gamma = 3 \alpha$