

Universität Stuttgart

**Gerätekonstruktion und
-fertigung in der Feinwerktechnik**



**Institut für Konstruktion und
Fertigung in der Feinwerktechnik**

Gerätekonstruktion und -fertigung in der Feinwerktechnik

Skript zur gleichnamigen Vorlesung

Nachdruck nicht gestattet!

9. Auflage 09/2013

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Schinköthe

Anschrift:	Institut für Konstruktion und Fertigung in der Feinwerktechnik Pfaffenwaldring 9 70550 Stuttgart
Telefon:	0711 / 685-66402/66411
Telefax:	0711 / 685-56402
E-Mail:	sekretar@ikff.uni-stuttgart.de
Internet:	http://www.uni-stuttgart.de/ikff/

Inhaltsübersicht

0 Vorbemerkungen zum Manuskript

1 Einordnung der Lehrinhalte

2 Methodik der Geräteentwicklung

- 2.1 Produktplanung
- 2.2 Aufbereiten
- 2.3 Konzipieren
- 2.4 Entwerfen
- 2.5 Ausarbeiten
- 2.6 Ergänzende Hinweise

3 Genauigkeit und Fehlerverhalten in Geräten

- 3.1 Grundlagen/Einführung
- 3.2 Ableitung von Fehlerfaktoren für Wirkprinzip und Anordnung/Gestalt
- 3.3 Maßnahmen zur Verbesserung des Fehlerverhaltens
 - 3.3.1 Minimierung der Fehlerfaktoren
 - 3.3.2 Kompensation
 - 3.3.3 Justage
 - 3.3.4 Toleranzfestlegung
 - 3.3.5 Rechnerische Korrektur

4 Toleranzrechnung/-analyse

- 4.1 Ausgangssituation
- 4.2 Methoden zur Toleranzrechnung - Übersicht
- 4.3 Arithmetische Toleranzrechnung
(Maximum-Minimum-Methode / Extremwertmethode)
- 4.4 Statistische Toleranzrechnung
 - 4.4.1 Statistische Grundbegriffe
 - 4.4.2 Grundlagen der statistischen Toleranzrechnung
 - 4.4.3 Vorgehensweise bei der statistischen Toleranzrechnung
- 4.5 Ermittlung statistischer Merkmale im Fertigungsprozess

5 Sicherheitstechnik im Gerätebau

- 5.1 Einführung
- 5.2 Grundsätzliches Herangehen in der Sicherheitstechnik
- 5.3 Grundsätzliche Methoden der Sicherheitstechnik
 - 5.3.1 Unmittelbare Sicherheitstechnik
 - 5.3.2 Mittelbare Sicherheitstechnik
- 5.4 Methoden zur Erkennung von Gefährdungspotentialen
- 5.5 Sicherheitsgerechte Gestaltung elektrischer Geräte
 - 5.5.1 Gefährdungspotential Körperströme
 - 5.5.2 Maßnahmen zum Schutz vor berührungsgefährlichen Spannungen an Geräten
 - 5.5.2.1 Schutz gegen direktes Berühren (Grundschutz)
 - 5.5.2.2 Schutz gegen indirektes Berühren (Fehlerschutz)
- 5.6 Gesetzliche Regelungen
 - 5.6.1 Produktsicherheitsgesetz (ProdSG)

- 5.6.2 Europäische Harmonisierung - CE-Kennzeichen
- 5.6.3 Medizinproduktegesetz (MPG)
- 5.6.4 Produkthaftung

6 Zuverlässigkeit im Gerätebau

- 6.1 Einführung
- 6.2 Kennziffern und Charakterisierung der Zuverlässigkeit
- 6.3 Charakteristische Verteilungsfunktionen
 - 6.3.1 Exponentialverteilung
 - 6.3.2 Gaußsche Normalverteilung
 - 6.3.3 Weibull-Verteilung
- 6.4 Zuverlässigkeit von Systemen
 - 6.4.1 Rechnerische Ermittlung der Systemzuverlässigkeit
 - 6.4.2 Weitere Methoden zur Ermittlung von Zuverlässigkeitsangaben
 - 6.4.3 Möglichkeiten zur Beeinflussung der Zuverlässigkeit durch den Konstrukteur

7 Schwingungs- und Lärminderung im Gerätebau

- 7.1 Einführung
- 7.2 Grundlagen der Geräuscentstehung und -ausbreitung in Geräten
 - 7.2.1 Kenngrößen des Schalls und seiner Ausbreitung
 - 7.2.2 Rechnung mit Pegelgrößen
 - 7.2.3 Frequenzabhängigkeit der Schallwahrnehmung durch den Menschen
 - 7.2.4 Mess- und Auswerteverfahren
 - 7.2.4.1 Vorbemerkungen
 - 7.2.4.2 Messverfahren
 - 7.2.5 Geräuscentstehung und -weiterleitung
 - 7.2.5.1 Wirkungskette der direkten Geräuscentstehung
 - 7.2.5.2 Wirkungskette der indirekten Geräuscentstehung
- 7.3 Zulässige Lärmbelastungen
 - 7.3.1 Geräuschemission
 - 7.3.2 Geräuschemission von Geräten und Maschinen
- 7.4 Maßnahmen zur Lärminderung im Gerätebau
- 7.5 Schwingungen in Geräten

8 Thermische Situation in Geräten

- 8.1 Einführung
- 8.2 Leistungsbilanz eines Gerätes
- 8.3 Theoretische Grundlagen
 - 8.3.1 Wärmeleitung
 - 8.3.2 Wärmestrahlung
 - 8.3.3 Konvektion
 - 8.3.4 Kombination verschiedener Effekte
- 8.4 Konstruktive Maßnahmen der Wärmeabführung
 - 8.4.1 Maßnahmen zur Verbesserung der Wärmeleitung
 - 8.4.2 Maßnahmen zur Verbesserung der Wärmeabstrahlung
 - 8.4.3 Maßnahmen zur Verbesserung der Konvektion

9 Umwelt und Gerät - verbleibende Aspekte der Klassifizierung**10 Zusammenfassung****11 Literaturhinweise**

1 Einordnung der Lehrinhalte

Ziel des vorliegenden Manuskriptes ist es, die komplexen Anforderungen bei der Entwicklung feinwerktechnischer Systeme (Geräte) deutlich zu machen. Aufbauend auf dem im Rahmen der Konstruktionslehre behandelten Grundlagenwissen sowie den erworbenen Kenntnisse über bewährte Lösungskomponenten von Geräten (z. B. Verbindungselemente, Wälzlager, Kupplungen, Getriebe) steht nun das Gesamtsystem, das Gerät, und insbesondere dessen Wechselwirkungen im inneren Aufbau und zur Umwelt hin im Vordergrund, Abb.1.1. Gegenstand ist deshalb die Geräteentwicklung unter Systemgesichtspunkten, Abb.1.2.

Voraussetzungen für einen Entwickler / Konstrukteur

1. Grundkenntnisse, Fachwissen

„Handwerkszeug“

Technisches Darstellen
Toleranzen
Passungen
Zeichnungssatz
Festigkeitslehre
Statik
Werkstoffe
Fertigungsverfahren
Kosten

„bewährte Lösungskomponenten“

Verbindungsverfahren, -elemente
mechanische Konstruktionselemente
(Federn, Lager, Wellen...)
mechanische Funktionsgruppen
(Kupplungen, Getriebe...)
optische Funktionsgruppen
elektromechanische Funktionsgruppen
messtechnische Funktionsgruppen

2. Kenntnisse zum Gesamtablauf einer Entwicklung

3. Methoden für einzelne Lösungsschritte

- Ideenfindung
- Konzipieren
- Entwerfen, Gestalten
- Ausarbeiten

unter Betrachtung des gesamten Systems:

- Sicherheit für Mensch und System
- Schutz gegen äußere Einflüsse
- Wechselwirkung mit der Umwelt (Wärme, Schwingungen, Geräusche)
- Zuverlässigkeit, Fehlverhalten

4. Kenntnisse konkreter Beispiele

Abb. 1.1: Voraussetzungen für einen Entwickler/Konstrukteur

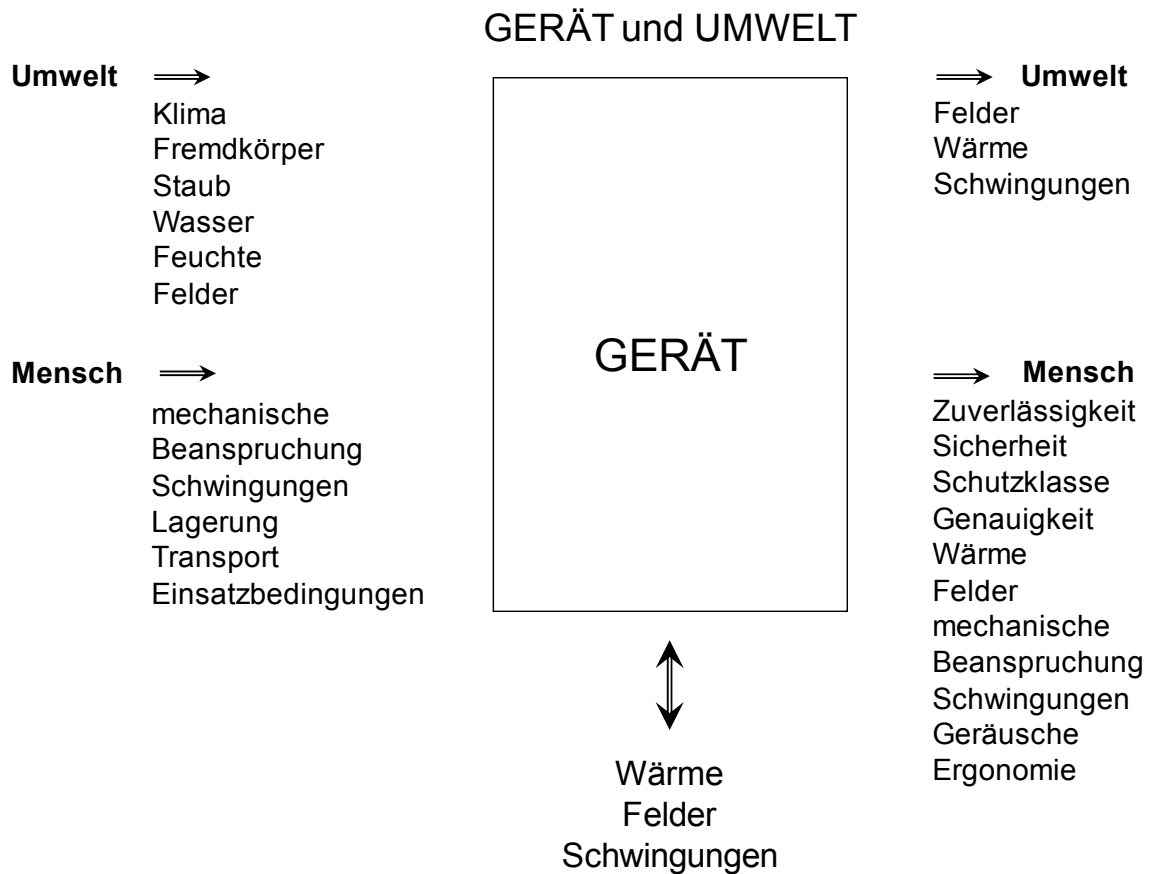


Abb. 1.2: Wechselwirkungen Gerät und Umwelt

Schwerpunkt soll dabei nicht eine abstrakte Konstruktionsmethodik bilden, vielmehr sind komplexe Anforderungen und Betrachtungsweisen auf ganz konkretem Niveau eingeordnet in die einzelnen Entwicklungsstufen zu verdeutlichen.

Solche für die Feinwerktechnik wesentliche Problemkreise betreffen:

- Genauigkeit und Fehlverhalten in Geräten
- Zuverlässigkeit und Sicherheit von Geräten (zuverlässigkeits- und sicherheitsgerechte Konstruktion)
- Toleranzrechnung, Toleranzanalyse
- Schwingungsdämpfung und Lärminderung in der Feinwerktechnik
- Beziehungen zwischen Gerät und Umwelt.

2 Methodik der Geräteentwicklung

Zunächst soll der methodische Entwicklungsablauf zur Einordnung der nachfolgend zu behandelnden Schwerpunkte nochmals kurz verdeutlicht werden. Basis sei dabei die in VDI 2221 bzw. VDI/VDE 2422 /1//2/ dargestellte Vorgehensweise /3/. Der gesamte Ablauf einer Geräteentwicklung, wie er in Abbildung 2.1 dargestellt ist, wird praktisch jedoch nur bei völligen Neuentwicklungen ohne Vorbilderzeugnis anzutreffen sein. Betrachtet man die Zahl wirklicher Innovationen beispielsweise in den letzten 10 Jahren, so sind nur sehr wenige echte Neuentwicklungen zu verzeichnen. Meistens sind also Schritte in diesem Ablauf zu überspringen. Praktisch wird man den Gesamtablauf deshalb wohl auch oft unbewusst durchlaufen.

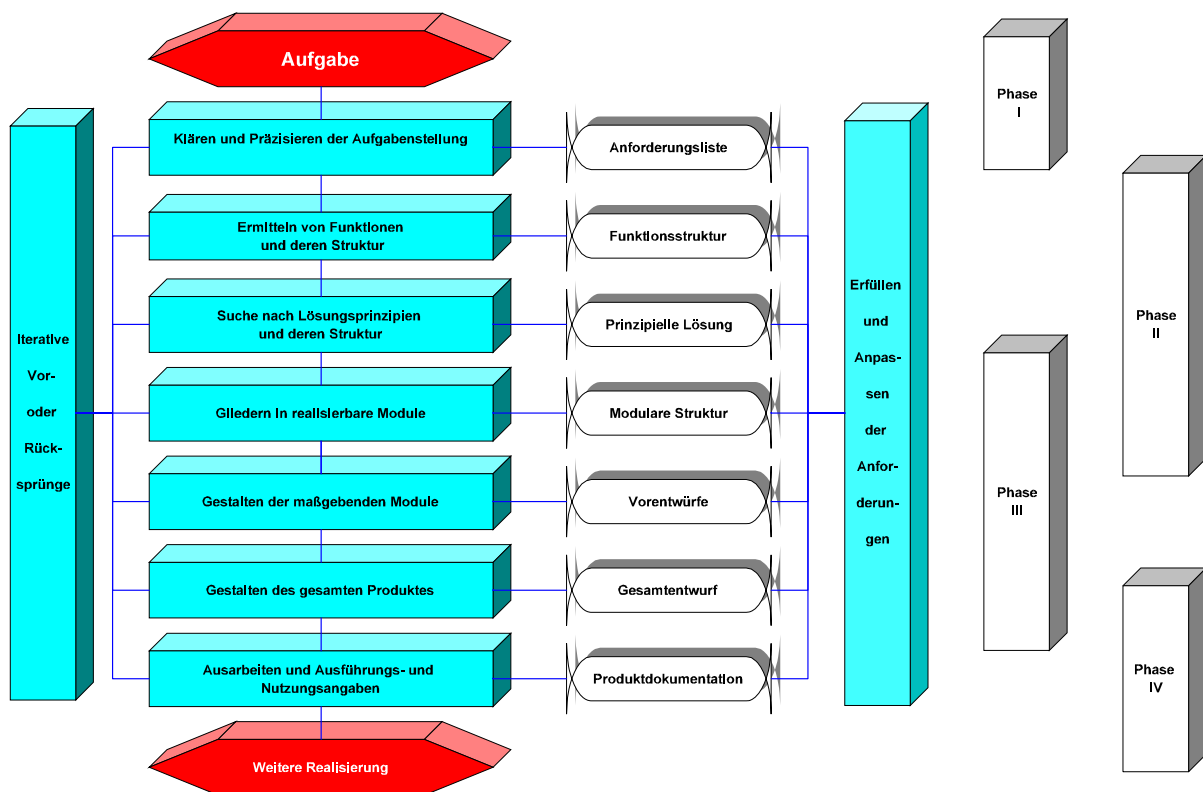


Abb. 2.1: Generelles Vorgehen beim Entwickeln und Konstruieren nach /1/

Die entscheidenden Phasen einer Geräte- oder auch allgemein Erzeugnisentwicklung sind demnach:

- Phase I** Aufbereitung und Aufgabenpräzisierung (informative Festlegung / Lastenheft)
- Phase II** Konzipieren (prinzipielle Festlegung / technisches Prinzip, Funktionsstruktur)
- Phase III** Entwerfen (gestalterische Festlegung / technische Gestalt)
- Phase IV** Ausarbeiten (herstellungstechnische Festlegung / Produktdokumentation, Zeichnungssatz).

2.1 Produktplanung

Nicht unmittelbar zur Geräteentwicklung zuzuordnen, jedoch mit erheblichen Auswirkungen auf diese, ist die Produktplanung und damit das Finden und Auswählen einer tragfähigen Produktidee.

Dabei sind prinzipiell völlig verschiedene Ausgangssituationen denkbar:

- a) Die Aufgabenstellung liegt als Kundenauftrag oder innerbetrieblicher Auftrag vor.
- b) Eine Produktidee ist erst aus der systematischen Analyse des Marktes, des Unternehmens und des Umfeldes zu erarbeiten.

Während im ersten Fall eine Anforderungsliste oder Lastenheft sofort präzisiert werden kann, ist im zweiten Fall zunächst eine umfassende Analyse der Istsituation und Klärung möglicher Zielrichtungen erforderlich.

Neben der Marktsituation, dem Vergleich zum Wettbewerb, ist auch die eigene Leistungsfähigkeit des Unternehmens zu analysieren. Darauf aufbauend sind Suchstrategien für Produktideen zu entwickeln, beispielsweise unter Nutzung neuer Technologien, durch Suche nach Freiräumen im Markt bezüglich Umsatz und / oder Sortiment oder nach neuen Bedürfnissen und Trends.

In einem folgenden Entscheidungsprozess ist dann zunächst eine Produktidee herauszufiltern, ehe an die Erarbeitung einer konkreten Anforderungsliste zu denken ist.

2.2 Aufbereiten

Ziel dieser Phase der Entwicklung ist eine **informative Festlegung** der Aufgabenstellung in Form einer Anforderungsliste, eines Lasten-/Pflichtenheftes, vgl. Abb. 2.2.

In einer Situation, in der nicht einmal das Funktionsprinzip, geschweige denn eine Geometrie bekannt ist, gilt es, Forderungen und Wünsche in Form von Leistungsdaten oder Funktionsumfängen möglichst exakt festzulegen.

Eine zu starke Festlegung zu vieler Details schränkt den Spielraum für nachfolgende Entwicklungsphasen stark ein, eine zu offene, unverbindliche Festlegung (also eine Orientierung statt einer Festlegung) kann jedoch zum Ausweichen und Abweichen von geplanten Zielen führen, die letztlich unter Umständen den Markterfolg verhindern können.

Eine Anforderungsliste sollte also möglichst konkret, jedoch auch für notwendige Änderungen, beispielsweise nach Finden des Funktionsprinzips, noch offen sein. Sie darf erst im Laufe der Entwicklung abgeschlossen werden und sollte neben Festforderungen auch Mindestwerte und Wünsche kennzeichnen und dazu Prioritäten festlegen. Üblich ist oft auch eine Unterscheidung in folgende Kategorien:

- must (zwingend notwendig, Mindestanforderungen),
- want (wird gebraucht, möglichst realisieren, mit Prioritäten),
- nice (schön zu haben, aber nebensächlich).

Nebenbedingungen für die Anforderungsliste sind dabei:

- Fertigungsstückzahlen (Einzel-, Serien- oder Massenfertigung).
- Neuheitsgrad (Neuentwicklung, Weiterentwicklung, Anpassungskonstruktion).
- Branchenspezifika:
 - Feinwerktechnik mit Schwerpunkten Miniaturisierung, Funktionalität, Kosten
 - Großmaschinenbau mit Schwerpunkten Sicherheit, Energieeffizienz
 - Werkzeugmaschinenbau mit Schwerpunkten Arbeitsgenauigkeit, Arbeitsgeschwindigkeit, Flexibilität
 - Fahrzeugbau mit Schwerpunkten Sicherheit, Kosten, Design.

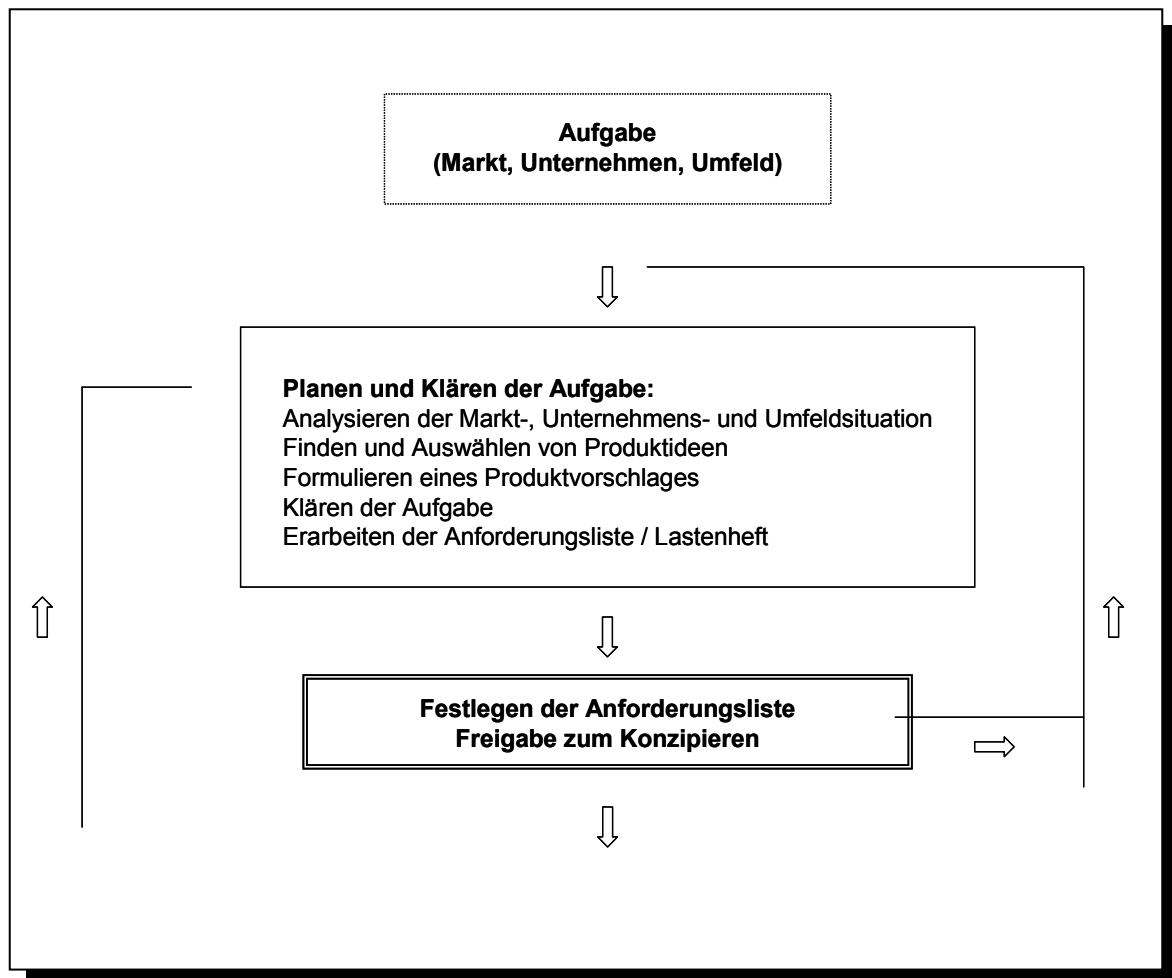


Abb. 2.2: Aufbereitungsphase

2.3 Konzipieren

Ziel des Konzipierens ist es, durch einen oder besser mehrere prinzipielle Lösungsansätze eine zunächst **prinzipielle Festlegung** zu erarbeiten. Hauptziel ist folglich das Finden geeigneter physikalischer Effekte und Wirkprinzipie und erster wesentlicher geometrischer Beziehungen dazu sowie letztlich eine erste einschränkende Auswahl auf weiter zu verfolgende Lösungsansätze.

Dazu ist zunächst ein Abstrahieren der meist umfangreichen Anforderungen auf wesentliche Probleme auf der funktionalen Ebene erforderlich, um für diese Probleme dann Wirkprinzipie und Wirkstrukturen zu finden. Wesentliche Funktionen sind in ihre Funktionsstruktur aufzugliedern und durch prinzipielle Lösungen dafür zu untersetzen, Abb. 2.3. Zuzuordnen sind erste geometrische Beziehungen, um orientierende Berechnungen vornehmen zu können und eine Auswahl der verschiedenen Lösungsansätze zu erleichtern.

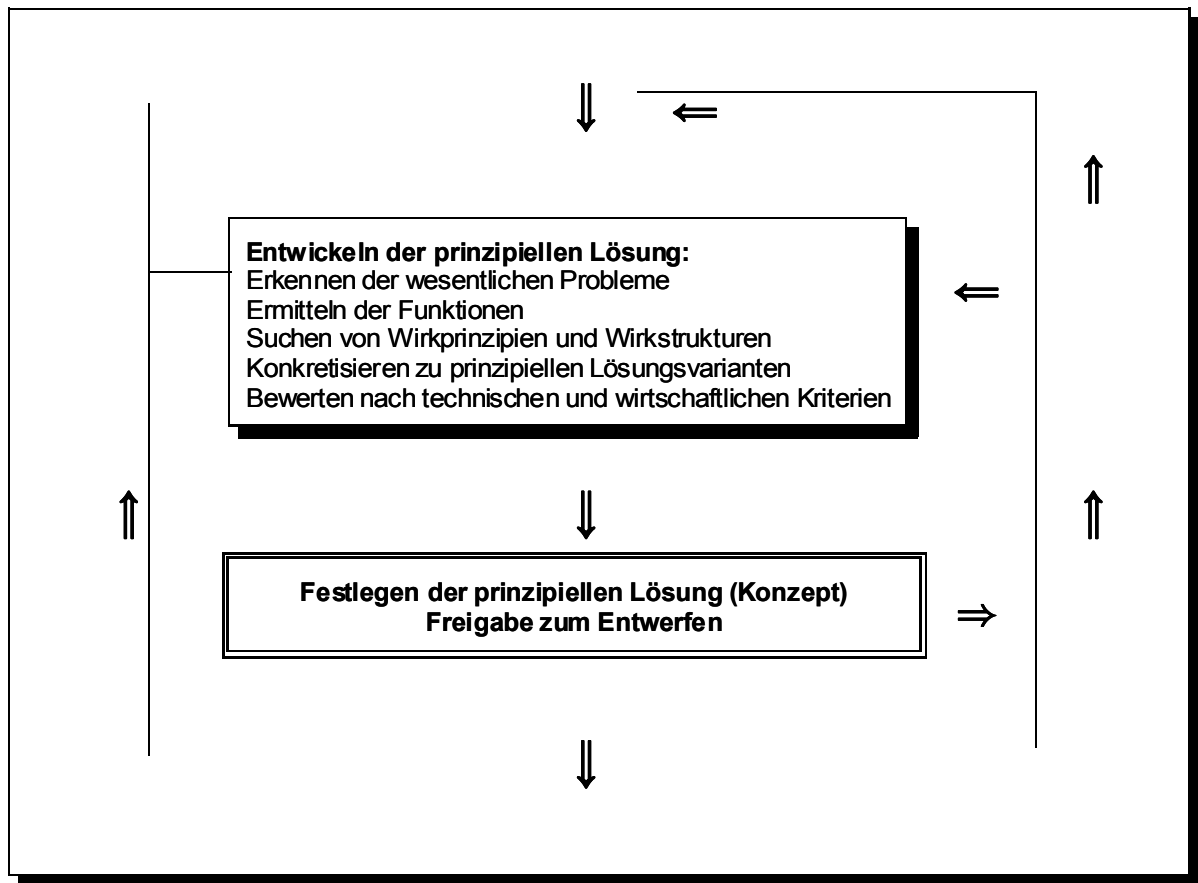


Abb. 2.3: Konzipieren

Hier ist meist eine breite Variantenvielfalt wünschenswert, um durch technische und soweit schon möglich wirtschaftliche Bewertung eine optimale Auswahl oder zumindest Einschränkung auf wenige weiter zu verfolgende Lösungsansätze vorzunehmen. Nachfolgende Entwicklungsphasen können grundlegende Mängel des Lösungsprinzips nicht oder nur noch schwer ausgleichen!

Der konkrete Ablauf beim Konzipieren könnte wie folgt sein:

- Pflichtenheft / Lastenheft als Basis
- Abstrahieren, Erkennen wesentlicher Probleme der Aufgabenstellung
- Erstellen einer Funktionsstruktur
 - Gesamtfunktion klären
 - Ableiten von Teilfunktionen
 - Energie-, Stoff- und Signalumsatz definieren
 - Blockdarstellung der Gesamtfunktion
- Aufgliedern in Teilfunktionen niedrigerer Komplexität

- Aufgliedern in Hauptflüsse, Nebenflüsse
getrennt bearbeitbare Teilfunktionen abgrenzen.
- Suche nach Wirkprinzipien für die Teilfunktion (physikalische Effekte für Teilfunktionen:
 - erforderlicher physikalischer Effekt,
 - geometrisch stoffliche Merkmale dazu,
 - grobe Geometrievorstellung
 - Kombinieren der Wirkprinzipie zu mehreren Gesamtfunktionen
 - Konkretisieren, Bewerten, Einschränken
 - Bewertung der unterschiedlichen Lösungsansätze,
 - Einschränkung auf ein bis zwei weiter zu verfolgende Prinzipien.
 - Ergebnis: Prinziplösung
 - Konzept, Konkretisierung auf prinzipieller Ebene,
 - wichtigste Eigenschaften der vorgeschlagenen Wirkstruktur
 - qualitativ und grob quantitativ,
 - Raumbedarf, Gewicht,
 - Lebensdauer als Orientierung,
 - orientierende Berechnungen mit Vereinfachungen,
 - erste technologische Überlegungen zu Werkstoff und Fertigungsverfahren,
 - skizzenhafte Anordnungen,
 - gegebenenfalls auch Modellversuche,
 - Anschauungsmodelle, Labormuster.

Methoden zum Finden geeigneter Lösungsansätze können dabei stark intuitiv geprägt sein oder eher diskursiv ausgerichtet sein, Abb. 2.4. Häufig wird man jedoch mehrere Methoden kombiniert nutzen.

Problemlösungsmethoden

intuitiv
Primäre Kreativität
(einfallsbetont, von Vorerfahrungen
und jeweiligem Horizont geprägt)

- Brainstorming
- Galeriemethode
- Methode 635
- Synektik
(bewusstes Verfremden)

diskursiv
Sekundäre Kreativität
(Analysieren, Variieren,
Kombinieren)

- Literaturrecherche
- Analyse bekannter technischer Systeme
- Ähnlichkeitsbetrachtungen
- Messungen,
Modellversuche, Simulation
- Variieren der physikalischen Grundzusammenhänge
- Ordnungsschemata
(morphologischer Kasten)
- Konstruktionskataloge

Abb. 2.4: Problemlösungsmethoden

Zwei Bewertungsmethoden zur Eingrenzung der Varianten enthält Abb. 2.5.

Generell gelten dabei folgende Hinweise:

- Festlegen von Bewertungskriterien und –zielen als Basis.
- Festlegen einer Wichtung (unter Umständen auch ohne).
- Beurteilung der Teillösungen hinsichtlich der Erfüllung der Bewertungskriterien, qualitativ oder quantitativ oder beides.
- Gesamtwert berechnen.
- Auswahl treffen (möglichst nicht formal aufgrund der höchsten Bewertungszahl)

Wichtig: Ungeeignete Lösungen dürfen nicht in die Bewertung einbezogen werden. K.O.-Kriterien dazu festlegen!

Vorgehen	Nutzwertanalyse / Gebrauchswertanalyse	VDI 2225
Kriterien auch hierarchisch durchstrukturiert	$W_1 \dots W_n$	$p_1 \dots p_n$
Beurteilung der jeweiligen Kriterien mit einem Punktesystem	$W_i = 1 \dots 10$	$p_i = 0 \dots 4$
Wichtung mit Wichtungsfaktoren	q_i (ungewichtet $q_i = 1$)	q_i (ungewichtet $q_i = 1$)
	Oft werden q_i so gewählt, dass $\sum q_i = 1$ gilt.	
Gewichteter Wert	$q_i W_i$	$q_i p_i$
Gesamtwert	$G_W = \sum q_i W_i$	$G_W = \sum q_i p_i$
Wertigkeit / relativer Gesamtwert bezogen auf die Maximalpunktzahl.	$W = \frac{G_W}{\sum q_i W_{\max}} = \frac{\sum q_i W_i}{W_{\max} \sum q_i}$	$W = \frac{G_W}{\sum q_i p_{\max}} = \frac{\sum q_i p_i}{p_{\max} \sum q_i}$

Abb. 2.5: Bewertung von Lösungskonzepten

2.4 Entwerfen

Ausgehend vom Lösungskonzept steht nun die **gestalterische Festlegung** des oder der Lösungsprinzipe im Vordergrund. Neben der Geometrie-Festlegung stehen Werkstoffwahl, Berechnungen, Montage-, Sicherheits-, Ergonomie- und Kostenkriterien im Mittelpunkt.

Ausgehend von einer groben Gestaltung des Hauptfunktionsträgers sind Baustruktur und Gestalt festzulegen und schließlich Nebenfunktionsträger einzubeziehen und durch Feingestaltung ein Gesamtentwurf zu erstellen, der durch technische und ökonomische Bewertung zu optimieren ist, Abb. 2.6.

Es erfolgt ein Übergang

vom Qualitativen	→	zum Quantitativen
vom Abstrakten	→	zum Konkreten
von der Grobgestalt	→	zur Feingestalt.

In der Konstruktionslehre wird dieser Übergang durch vielfältige mehr oder weniger abstrakte Regeln unterstützt, die sogenannten „Gerechtheiten“ (Konstruiere funktionsgerecht, kostengerecht, werkstoffgerecht . . .).

Am Ende steht **ein** Gesamtentwurf, der ausgewählt und optimiert wurde.

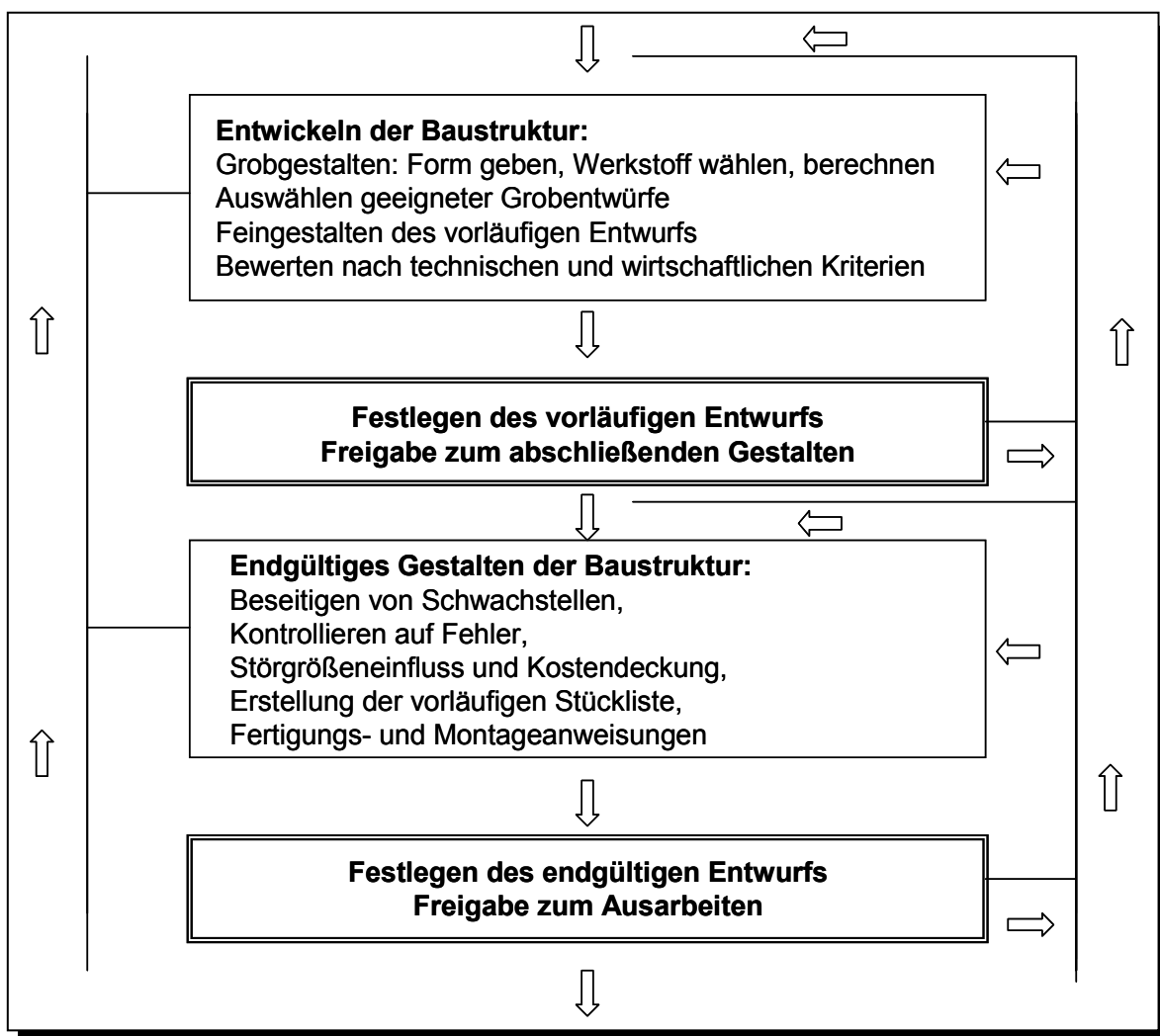


Abb. 2.6: Entwurf

Im Detail könnte der Ablauf eines Entwurfes so erfolgen:

1. Wesentliche gestaltbestimmende Anforderungen festlegen (Bewegungen, Funktionen, Leistung, Ergonomie, ...)
2. Räumliche Anordnung (Abstände, Einbaugrenzen)
3. Grobgestalt der Baustruktur (ausgehend von Hauptfunktionsträgern Bauraum klären, vorläufige Werkstoffwahl)

4. Grobgestaltung der Hauptfunktionsträger (räumlich, maßlich, Festlegen von Teilzonen für Teilfunktionen und Nebenfunktionsträger).
5. Beurteilung des vorläufigen Entwurfes / Eingrenzung auf einen.
6. Nebenfunktionen realisieren.
7. Feingestaltung der Hauptfunktionsträger (notwendige Einzelheiten festlegen, Berechnungen, Versuche, Vorschriften, Normen).
8. Feingestaltung der Nebenfunktionsträger.
9. Bewerten, Auswählen, bis ein einziger Gesamtentwurf entsteht.
10. Schwachstellen analysieren, optimieren, kontrollieren.
11. Erstellen einer vorläufigen Stückliste, vorläufige Fertigungs- und Montageanweisung für den Gesamtentwurf.
12. Freigabe des Gesamtentwurfs zum Ausarbeiten.

2.5 Ausarbeiten

Es verbleibt die Detaillierung des Gesamtentwurfs mit endgültiger **herstellungstechnischer Festlegung** aller Geometrien, Werkstoffe, Fertigungs-, Montage-, Prüfverfahren, aller Oberflächen und Toleranzen usw. Ziel sind vollständige Fertigungs- und alle anderen Unterlagen, vom Zeichnungssatz bis zur Serviceanleitung und letztlich die Freigabe zur Produktion, Abb. 2.7.

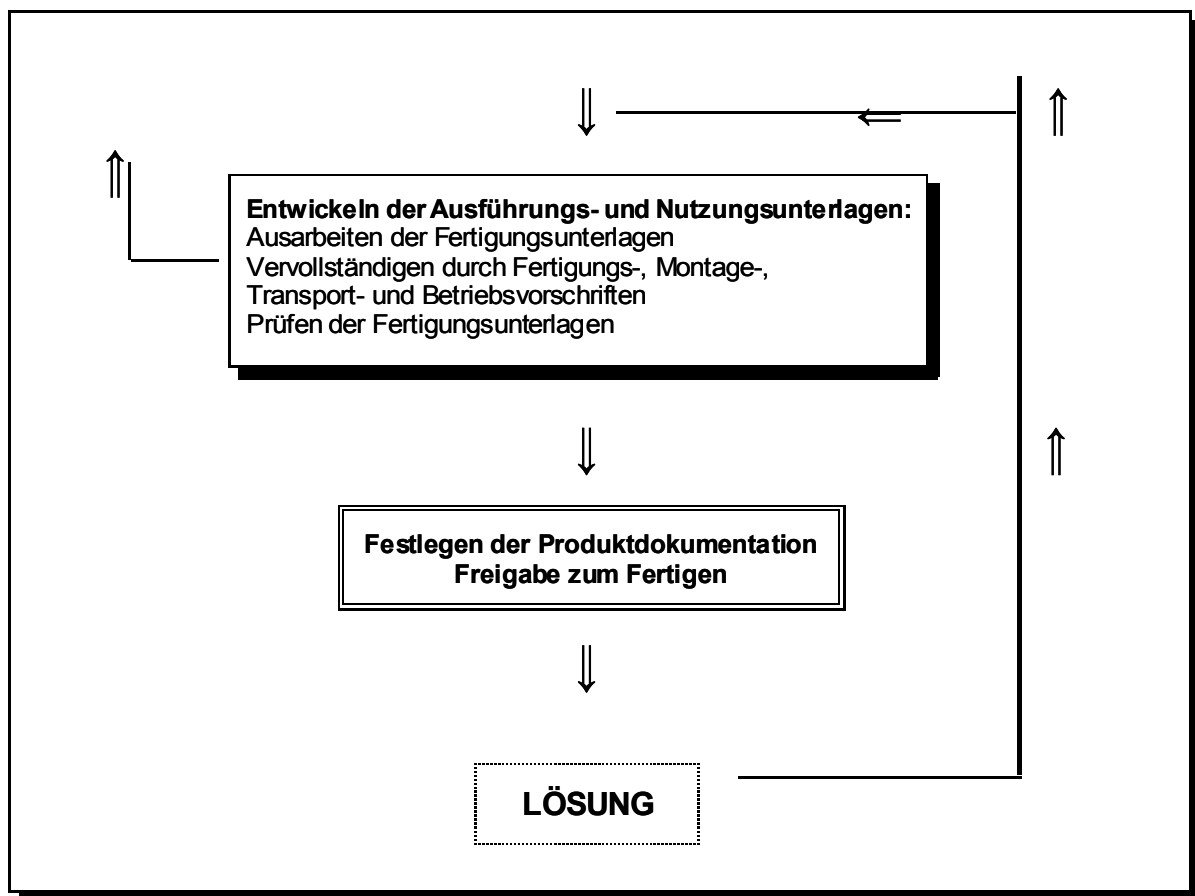


Abb. 2.7: Ausarbeiten

Ergebnis ist die vollständige Fertigungsdokumentation:

- Zeichnungssatz (Einzelteil-, Gruppen-, Zusammenbauzeichnungen, Stücklisten)
- Vorschriftensatz (Fertigungs-, Montage-, Transport-, Prüfvorschriften)
- Anleitungen (Bedienungs-, Serviceanleitung).

Wenngleich am Ende die Produktdokumentation den Abschluss der Entwicklung verdeutlicht, sollte nicht vergessen werden, dass auch die Fertigungsbetreuung, der ständige Änderungsdienst und damit verbundene Überarbeitungen von den jeweiligen Konstrukteuren mit zu vertreten sind.

2.6 Ergänzende Hinweise

Der gesamte, kurz angerissene Ablauf enthält natürlich jeweils Rückgriffe und Optimierungsschleifen zu übergeordneten Phasen. Auch sind diverse Versuche, Prototypen, unter Umständen auch Vorserien erforderlich, um die gewählten Lösungen zu erproben, Abb. 2.8. Teilergebnisse, beispielsweise neue Funktionsprinzipie, müssen schon in einer frühen Entwicklungsphase erprobt werden. In wesentlich geringerer Reife ist für eingegrenzte Funktionen also schon ein Durchlauf bis zur Ausarbeitung nötig. Für komplexere Prototypen bzw. Nullserien gilt Gleiches mit höherem Reifegrad.

Typischer zeitlicher Ablauf einer umfangreichen Entwicklung

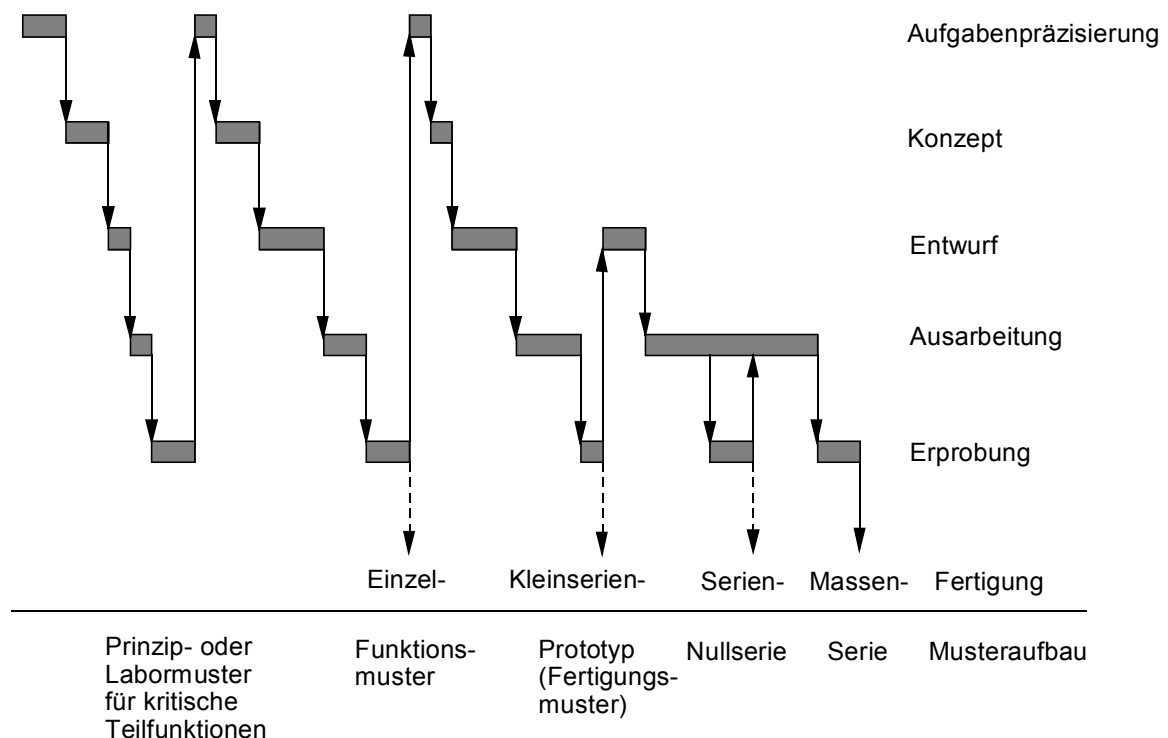


Abb. 2.8: Typischer zeitlicher Verlauf einer Entwicklung

In feinwerktechnischen Erzeugnissen finden wir dabei meist drei relativ verschiedene Bestandteile des Gerätes vor, nämlich Mechanik oder Elektromechanik, Elektronik-Hardware und Software. Die prinzipiellen Entwicklungsabläufe sind zwar gleich, konkrete Inhalte der Aufgaben und Denkweisen der jeweiligen Entwickler jedoch völlig verschieden, so dass eine parallele, aber untereinander ständig abzustimmende Entwicklung vorzusehen ist.

Beispielhaft verdeutlicht die VDI/VDE-Richtlinie 2422 Entwicklungsmethodik für Geräte mit Steuerung durch Mikroelektronik diese Problematik, siehe Abb. 2.9.

Neuere Ansätze dazu verdeutlicht die VDI-Richtlinie 2206 Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme im sogenannten V-Modell, vergleiche Abb. 2.10. Sie geht von einem gemeinsamen Systementwurf mit anschließenden domänenspezifischen Entwürfen in den drei Domänen Mechanik, Software und Elektronik sowie der abschließenden Systemintegration über eine Eigenschaftsabsicherung durch Schleifen im V-Modell aus.

Leider wurde in der VDI 2206 die bisher übliche Terminologie verlassen. Unter Systementwurf wird hier genau das verstanden, was in der VDI 2221, VDI 2422 und weiteren bisher als Systemkonzept bezeichnet wurde, vergleiche dazu Abb. 2.11.

Betrachtet man die Komplexität solcher Entwicklungsabläufe insgesamt, so ist es nicht verwunderlich, dass von 100 Produktideen nur etwa 8 % bis zum Entwicklungsabschluss gelangen, jedoch nur ca. 2 % zu Gewinn bringenden Produkten werden (Quelle: G. A. Steiner, Top Management Planung).

Nachfolgende Schwerpunkte gliedern sich an verschiedenen Stellen in den gesamten Entwicklungsablauf ein. Während beispielsweise das Fehlverhalten eines Gerätes, sein Schwingungs- und Geräuschverhaltens sowie die Zuverlässigkeit vorwiegend in der Konzeptphase entscheidend beeinflusst werden können, stehen Toleranzprobleme dagegen meist erst in der Ausarbeitungsphase zur Bearbeitung an.

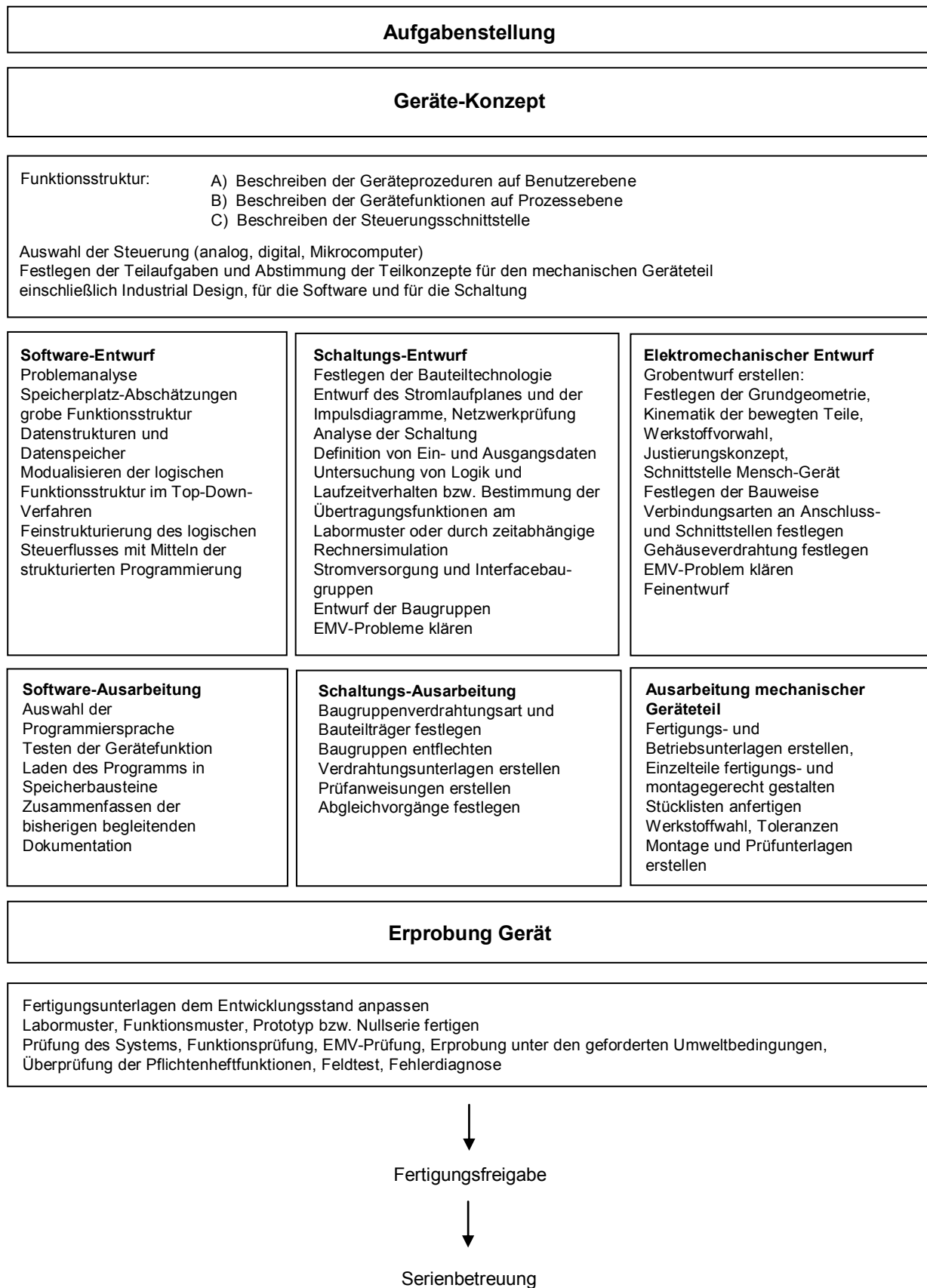


Abb. 2.9: Entwicklungsablauf für Geräte mit Mikrorechnersteuerung, nach /2/

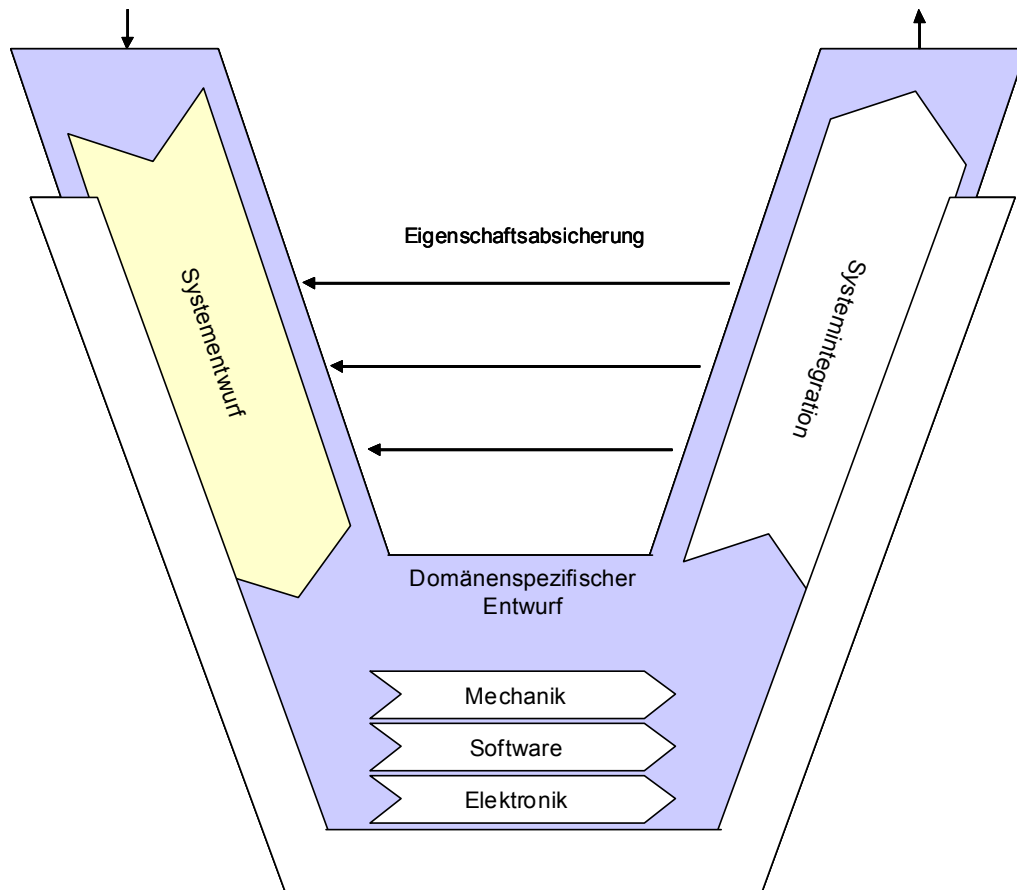


Abb. 2.10: V-Modell nach VDI 2206, nach /8/

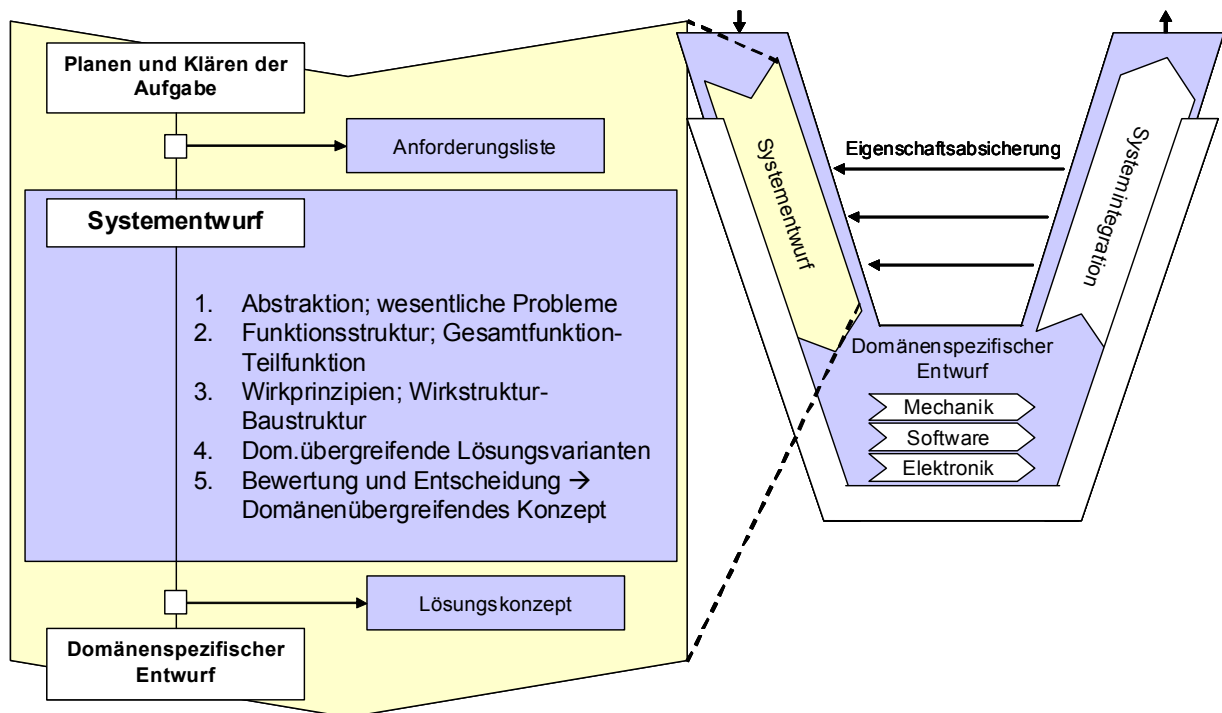


Abb. 2.11: Zum Verständnis der Terminologie der VDI-Richtlinie 2206, nach /8/

3 Genauigkeit und Fehlerverhalten in Geräten

3.1 Grundlagen / Einführung

Nach DIN 1319 Grundbegriffe der Messtechnik ist zwischen Fehlern und Abweichungen in der Gerätefunktion zu unterscheiden. Abweichungen bzw. Unsicherheiten von Maßen und damit von geometrischen Größen wirken sich auch in Form von Abweichungen von der angestrebten Gerätefunktion aus. Abbildung 3.1 zeigt dies am Beispiel eines Positioniersystems mit rotatorischem Motor und nachgeschaltetem Spindel-Mutter-System als Rotations-Translations-Umformer.

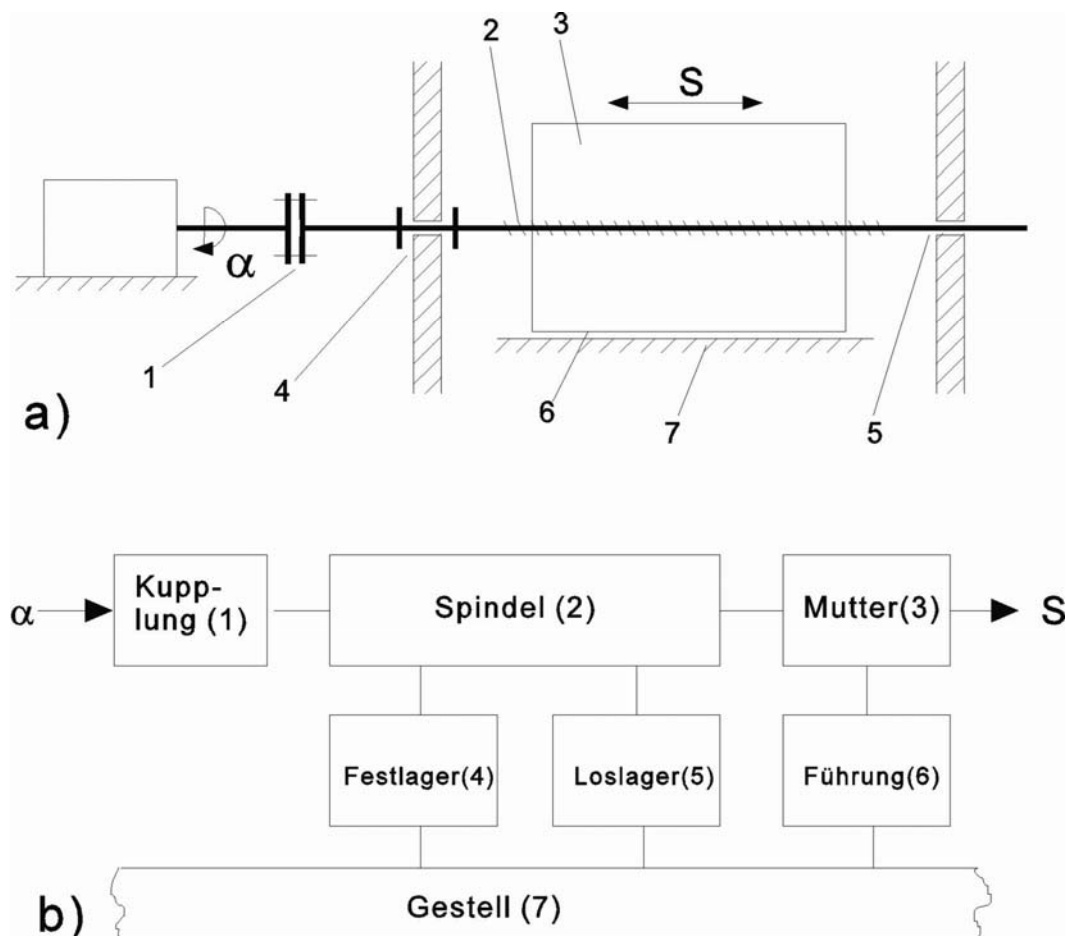


Abb. 3.1: Struktur und Beziehungen zur Umwelt an einem Positioniersystem
a) Struktur; b) Beziehungen zueinander und zur Umwelt

Betrachtet man die innere Struktur dieses Positioniersystems und seine Beziehungen zur Umwelt in ihren Auswirkungen auf die Gerätefunktion, so kann man folgende Abweichungen und gegebenenfalls auch Fehler unterscheiden:

- Abweichungen der Eingangsgröße $\Delta\alpha$
(beispielsweise Abweichungen des Messsignals des Motorgebers oder in der Ausregelung der Position)

- Abweichungen innerer Größen / innerer Zustandsgrößen
(beispielsweise Spiel in der Spindellagerung in axialer und radialer Richtung, axiales Spiel zwischen Spindel und Mutter, Schiefstellung der Spindellagerung zum Gestell, Spindelsteigungsfehler, Verdrehspiel in der Führung der Mutter im Gestell usw.)
- Abweichungen äußerer Größen/Umweltbedingungen - äußere Störgrößen
(beispielsweise die Auswirkungen von Wärmedehnungen auf die Spindel, von Feuchte/Korrosion auf die Reibung und damit die Lageregelung, von Lastschwankungen auf die Lageregelung usw.)

Diese Abweichungen führen letztlich zu Abweichungen der Ausgangs- oder Zielgröße von ihrem Nennwert und lassen sich allgemein nach Abbildung 3.2 darstellen.

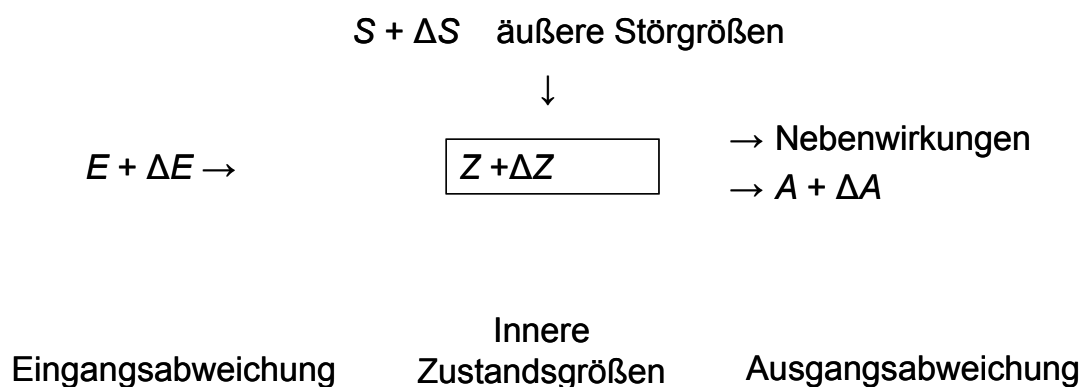


Abb. 3.2: Einflüsse auf die Gerätefunktion

Die Ermittlung dieser einzelnen Einflüsse ist am fertigen Gerät im Allgemeinen problemlos. Versetzt man sich jedoch in die Geräteentwicklung, wo die Gestalt und damit die Geometrie noch nicht feststehen, wird die Problematik der Vorausbestimmung von Fehlereinflüssen und Auswirkungen von Störgrößen auf die Gerätefunktion deutlich.

3.2 Ableitung von Fehlerfaktoren für Wirkprinzip und Anordnung/Gestalt

Eine Hilfe bei der Vorausbestimmung des Geräteverhaltens hinsichtlich systematischer oder zufälliger Abweichungen bieten Fehlerfaktoren, die auch bereits aus dem Wirkprinzip und damit in einer frühen Phase der Geräteentwicklung, nämlich während des Konzipierens, abgeleitet werden können:

a) Auswirkungen systematischer Abweichungen - lineares Fortpflanzungsgesetz

Handelt es sich um systematische, also in Wirkungsrichtung und ursächlichem Zusammenhang bekannte Einflüsse auf die Gerätefunktion $y = y(x_1, x_2, \dots, x_n)$, so lassen sich diese in ihren Auswirkungen auf die Ausgangsgröße y durch eine Reihenentwicklung $\Delta y = f(\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_n)$ beschreiben. Da hier nur relativ kleine Abweichungen und keine prinzipiellen Fehler zu erwarten sind, müssen zunächst nur Glieder 1. Ordnung berücksichtigt werden.

Es folgt

$$\rightarrow \Delta y = \frac{\partial y}{\partial x_1} \Delta x_1 + \frac{\partial y}{\partial x_2} \Delta x_2 + \dots + \frac{\partial y}{\partial x_n} \Delta x_n = \sum_{i=1}^n \frac{\partial y}{\partial x_i} \Delta x_i \quad (3.1)$$

wobei die Faktoren $\frac{\partial y}{\partial x_i}$ ganz allgemein als Fehlerfaktoren bezeichnet werden sollen.

Bildet man $\Delta y/y$, so spricht man in der Messtechnik auch vom relativen Fehler. Die Einzelabweichungen addieren sich arithmetisch zur Gesamtabweichung. Bezieht man die Schreibweise aus Abbildung 3.2 ein, so folgt allgemein für die Abweichungen der Gerätefunktion vom Nennwert

$$\Delta A = \sum_{i=1}^n \frac{\partial A}{\partial E_i} \Delta E_i + \sum_{i=1}^m \frac{\partial A}{\partial Z_i} \Delta Z_i + \sum_{i=1}^k \frac{\partial A}{\partial S_i} \Delta S_i \quad (3.2)$$

Fehlerfaktoren

der
Eingangs-
größen

der inneren
Zustands-
größen

der äußeren
Störgrößen

b) Auswirkungen zufälliger Abweichungen - quadratisches Fehlerfortpflanzungsgesetz

Bezieht man deterministisch nicht erfassbare, also zufällige Abweichungen mit ein, muss man statistische Verteilungen des Auftretens der einzelnen Abweichungen berücksichtigen. Sind genügend viele Einflussfaktoren ohne Dominanz einzelner zu erwarten, werden Normalverteilungen vorherrschen, Abb. 3.3.

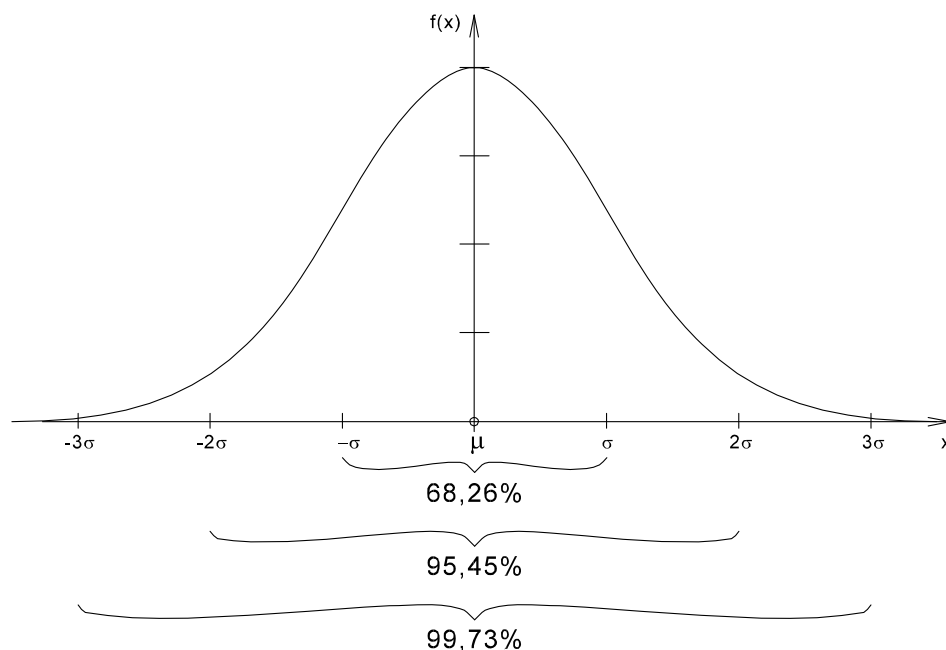


Abb. 3.3: Normalverteilung

Die Werte streuen um einen Mittelwert μ ($\bar{x}$ bei Betrachtung von Stichproben statt der Gesamtheit aller Größen) mit einer Standardabweichung σ (s bei Stichprobe)

$$\mu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N a_i \quad \text{mit} \quad \sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (a_i - \mu)^2}. \quad (3.3)/(3.4)$$

σ^2 wird auch als Varianz bezeichnet.

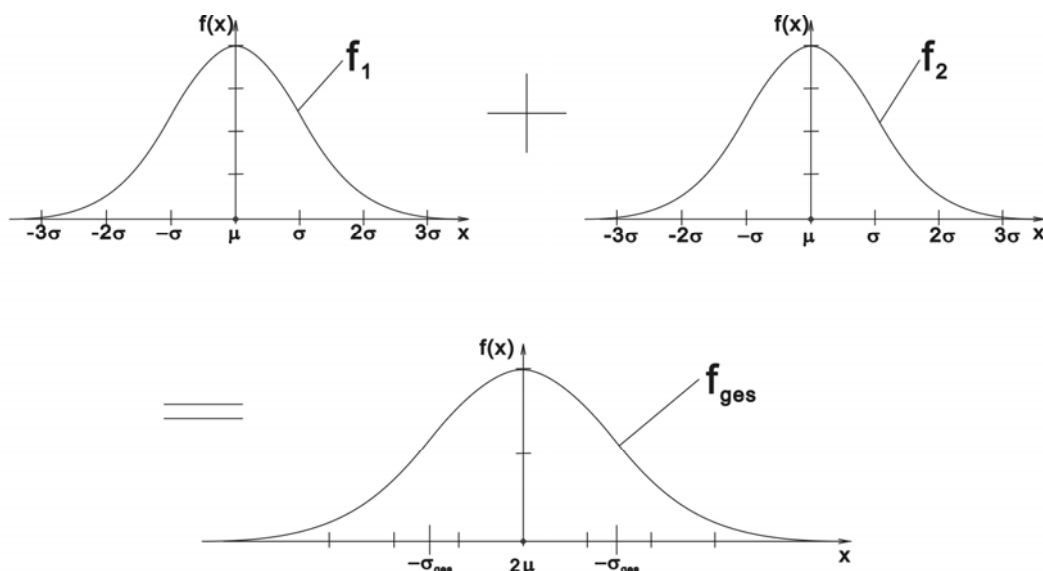
Überlagert man mehrere solcher Normalverteilungen zu einer resultierenden Größe, also mehrere Abweichungen von Stör- oder Zustandsgrößen zur Abweichung der Gerätefunktion, ergibt sich wieder eine neue Normalverteilung mit

$$\mu_{ges} = \sum_{i=1}^n \mu_i \quad \text{und} \quad \sigma_{ges} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial y}{\partial x_i} \right)^2 \sigma_i^2}, \quad (3.5)$$

was auch als quadratisches Fehlerfortpflanzungsgesetz (Gauß'sches)

$$\sigma_y^2 = \left(\frac{\partial y}{\partial x_1} \right)^2 \sigma_{x1}^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial x_2} \right)^2 \sigma_{x2}^2 + \dots = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial y}{\partial x_i} \right)^2 \sigma_{xi}^2 \quad (3.6)$$

bezeichnet wird. Auch hier sind die gleichen Fehlerfaktoren $\frac{\partial y}{\partial x_i}$ für die Auswirkung der einzelnen Einflussgrößen wie bereits bei den systematischen Abweichungen zu erkennen. Abbildung 3.4 verdeutlicht diese Zusammenfassung am Beispiel der Überlagerung zweier identischer Normalverteilungen mit $\frac{\partial y}{\partial x_i} = 1$.



$$\text{für } \mu_1 = \mu_2 = \mu \quad \text{und} \quad \sigma_1 = \sigma_2 = \sigma \quad \text{gilt:} \quad \mu_{ges} = \mu_1 + \mu_2 = 2\mu \quad \text{und} \quad \sigma_{ges} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} = \sqrt{2} \sigma$$

Abb. 3.4: Überlagerung zweier identischer Normalverteilungen

3.3 Maßnahmen zur Verbesserung des Fehlerverhaltens

Ausgehend von den Fehlerfaktoren ist zunächst **prinzipiell** zu entscheiden, ob das Geräteverhalten verbessert oder letztlich eine Korrektur der Abweichungen nach deren Auftreten vorgenommen werden soll. Tafel 3.1 zeigt eine Übersicht über mögliche Maßnahmen zur Beeinflussung des Fehlerverhaltens, bevor dies in den Folgeabschnitten vertieft wird.

Tafel 3.1: Maßnahmen zur Beeinflussung des Fehlerverhaltens

Maßnahme	Wirkung auf welche Störgröße	technisch ökonomischer Aufwand
1. Minimierung des Fehlerfaktors durch günstige Prinzipwahl bzw. Gestaltung - Wahl invarianter Anordnungen - Wahl innozenter Anordnungen - fehlerminimierte Anordnungen	innere äußere	gering (Einfall nötig)
2. Justageprozesse einfügen	innere	sehr hoch (meist manuell)
3. Kompensation von Fehlereinflüssen vorsehen (gegenläufige Wirkmechanismen)	innere äußere	mittel bis niedrig
4. Geeignete Toleranzfestlegung	innere	u. U. hoch
5. Rechnerische Fehlerkorrektur	Eingangsgrößen, innere Störgrößen, äußere Störgrößen, soweit sensorisch zu erfassen	hoch bis sehr hoch (Aufwand zur Erfassung)

Die aufgezeigten Maßnahmen greifen in unterschiedlichen Phasen der Geräteentwicklung an. Während die Minimierung durch invariante oder innozente Anordnungen durch Wahl eines geeigneten Wirkprinzips bereits in der Konzeptphase realisierbar ist, sind andere Maßnahmen durch bewusste Ausnutzung des verfügbaren Entwurfs- und Gestaltungsspielraumes in der Entwurfs- und Ausarbeitungsphase noch umsetzbar.

Die Bedeutung der rechnerischen Korrektur wächst mit den Möglichkeiten der Rechentechnik, soweit es sich um sensorisch erfassbare Einflüsse handelt. So verzeichnet man beispielsweise tendenziell eine zunehmende Ausnutzung auch nichtlinearer Wirkprinzipie und korrigiert die Nichtlinearitäten und damit Abweichungen durch Ablegen von Fehlerkurven im Rechner.

3.3.1 Minimierung der Fehlerfaktoren

a) Invariante Anordnung

Von invarianten Anordnungen spricht man, wenn

$$\frac{\partial y}{\partial x_i} = 0 \quad (3.7)$$

gilt. Abweichungen der Einflussgröße x_i besitzen somit keine Auswirkung auf die Gerätefunktion y . Üblicherweise ist eine Invarianz meist nur für eine oder wenige Einflussgrößen x_i zu realisieren, da eine allgemein gegen verschiedenste innere und äußere Störgrößen invariante Konstruktion kaum vorstellbar ist. Eingangsabweichungen sind selbstverständlich nicht beeinflussbar.

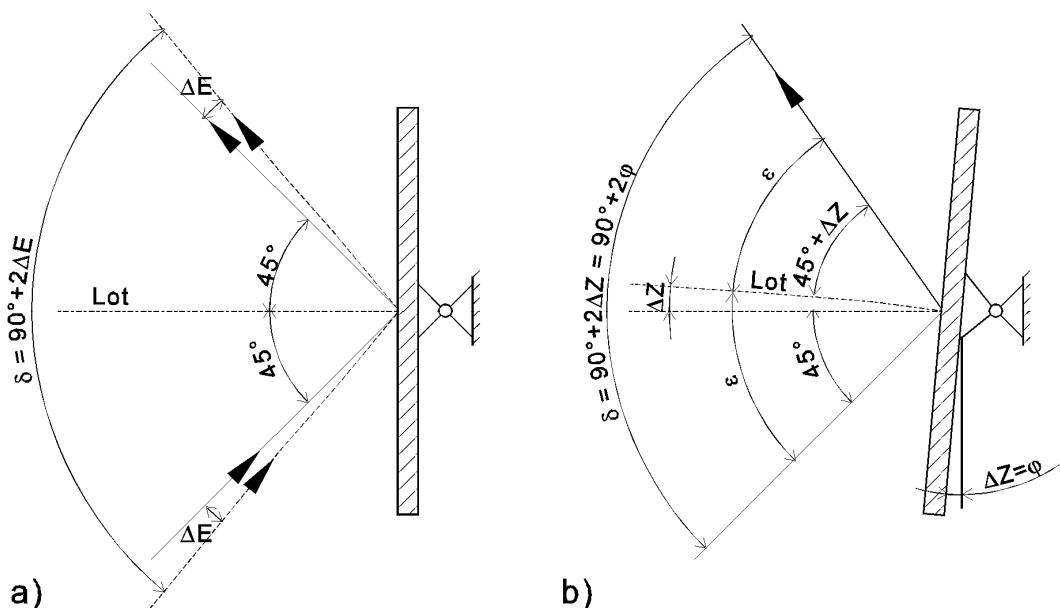


Abb. 3.5: 90°-Strahlablenkung an einem Spiegel
a) bei Änderung des Eingangswinkels; b) bei Kippung des Spiegels

Invariante Anordnungen sind durch gezielte Analyse der Fehlerfaktoren und Suche nach Auslöschungsmöglichkeiten sowohl schon auf der Ebene des Wirkprinzips als auch noch durch die konkrete geometrische Gestaltung zu realisieren. Abbildung 3.5 zeigt den Gedankengang am Beispiel einer Strahlablenkung um 90°. Zunächst wäre es naheliegend, dafür einen Spiegel einzusetzen. Allerdings lenkt ein Spiegel den Strahl bei einer Änderung des Winkels um $\Delta E = \varphi$ zum Einfallslot insgesamt um $2 \Delta E = 2\varphi$ bezogen auf den Eingangsstrahl ab. Gleiches Ergebnis folgt für eine Kippung des Spiegels um $\Delta Z = \varphi$ als innere Störgröße. Für die gesamte Strahlablenkung δ folgt bei

Reflexion an einem Spiegel
$$\delta = 2 \varepsilon = 90^\circ + 2 \varphi,$$

wobei ε über $\varepsilon = 45^\circ + \varphi$ als Winkel zwischen einfallendem Strahl und Einfallslot bereits die Spiegelstellung in Bezug zum Einfallstrahl und damit die innere Zustandsgröße φ beschreibt.

Aus der einfachen Beziehung $\Delta \delta = \frac{\partial \delta}{\partial \varphi} \Delta \varphi = 2 \Delta \varphi$ folgt als Fehlerfaktor $\frac{\partial \delta}{\partial \varphi} = 2$, wenn keine weiteren Einflussgrößen (z. B. Temperaturänderung und daraus resultierende Kippungen) berücksichtigt werden.

Ein solcher Fehlerfaktor ist in dieser Form nicht zu beeinflussen. Man muss also nach anderen funktionellen Zusammenhängen zur Realisierung der gleichen Ablenkung suchen, Abbildung 3.6.

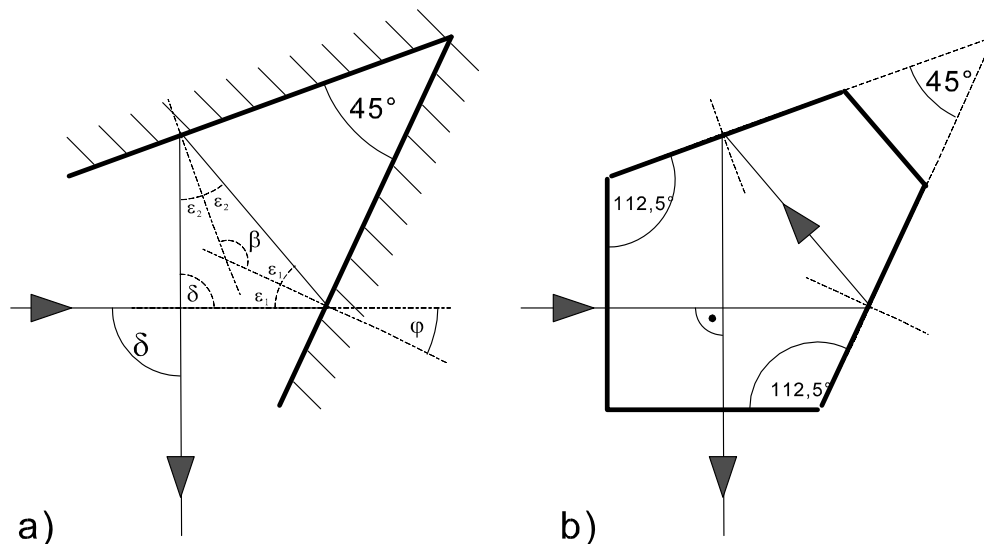


Abb. 3.6: Invariante 90°-Ablenkung (invariant gegen Drehung um eine senkrechte Achse dazu)
a) invariante Anordnung mit Doppelspiegel; b) praktische Realisierung als Pentaprisma

Eine zweifache Ablenkung zeigt in Bezug auf die Strahlablenkung δ beispielsweise

$$\delta = 180^\circ - 2\varepsilon_1 - 2\varepsilon_2$$

mit $\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + 135^\circ = 180^\circ$ bei festem Winkel von 45° zwischen den Spiegelflächen und damit $\beta = 135^\circ$ als Schnittwinkel der Lote.

Somit ergibt sich

$$\begin{aligned}\delta &= 180^\circ - 2\varepsilon_1 - 2(45^\circ - \varepsilon_1) \\ \delta &= 90^\circ - 2\varepsilon_1 + 2\varepsilon_1 = 90^\circ\end{aligned}$$

Die Fehlerfaktoren $\frac{\partial \delta}{\partial \varepsilon_1}$ und damit $\frac{\partial \delta}{\partial \varphi_1}$ sind Null, wobei ε_1 wegen $\varepsilon_1 = \varphi$ wiederum ein

Maß für die Stellung φ des Doppelspiegels zum einfallenden Strahl darstellt. Somit ist die Doppelspiegelanordnung bzw. allgemein eine Mehrfachspiegelung mit gerader Spiegelzahl invariant gegen Kippungen. Technisch ausgenutzt wird dies beispielsweise in Pentaprismen zur exakten 90°-Ablenkung, wie sie als Zubehör für Laserinterferometer zur definierten Messung in zwei senkrechten Achsen angeboten werden.

Während im obigen Fall eine Invarianz nur bezüglich Drehung um eine senkrecht zum Strahl stehende Achse besteht, kann man gleichen Gedanken folgend auch Invarianz gegenüber Kippungen um alle drei Raumachsen erreichen. Abb. 3.7 zeigt

dazu ein rhombisches Prisma zur Realisierung eines parallelen Strahlenversatzes und ein Tripelprisma, genutzt beispielsweise wiederum in Laserinterferometern zur Strahlrücklenkung. Mechanische Anwendungen verdeutlicht Abb. 3.8.

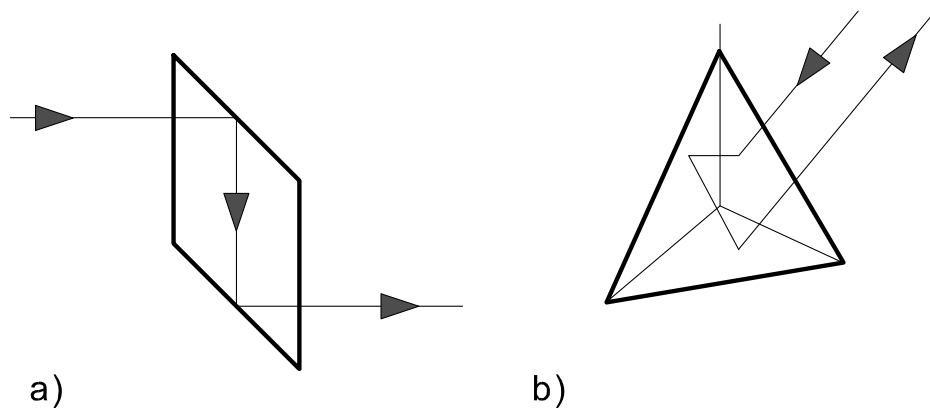


Abb. 3.7: Gegen beliebige Kippungen invariante Strahlumlenkung

a) rhombisches Prisma; b) Tripelprisma

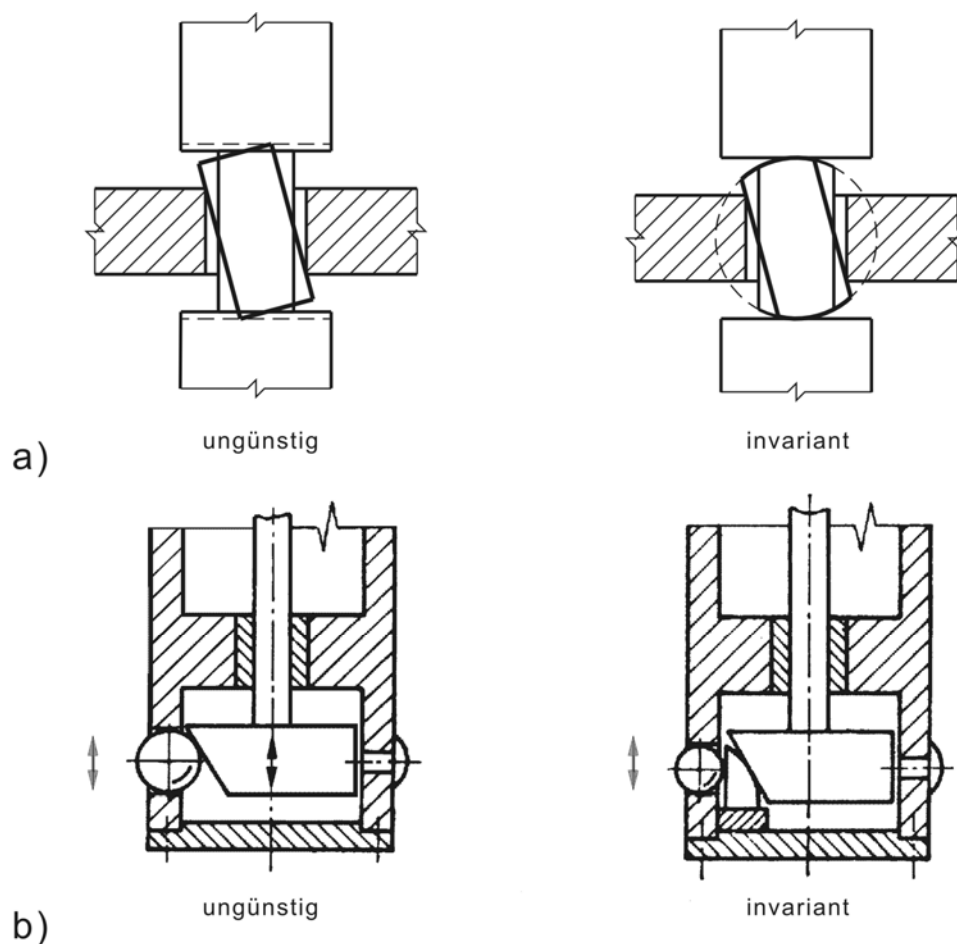


Abb. 3.8: Spielinvariante Bewegungsübertragung, nach /9/

a) Übertragungsglied in einem Feinzeiger;

b) Bohrungsmessgerät (dargestellt sind spielbedingte Bewegungen und deren Übertragung)

b) Innozente Anordnung

In der oben dargestellten Reihenentwicklung für die Gerätefunktion sind nur Abweichungen erster Ordnung aufgenommen. Praktisch kommen natürlich auch Abweichungen höherer Ordnung vor, die jedoch wegen der ohnehin kleinen Absolutwerte dann häufig vernachlässigbar sind. Allgemein gilt beispielsweise für die Abweichungen durch innere Zustandsgrößen in der Reihenentwicklung

$$\Delta A = K_1 \Delta Z + K_2 (\Delta Z)^2 + K_3 (\Delta Z)^3 \dots \quad (3.8)$$

Das klassische Beispiel dafür ist das aus der Messtechnik bekannte Abbesche Komparatorprinzip. Dieses besagt: Eine fluchtende Anordnung von Maßstab und Prüfling führt bei Verkippungen nur zu Abweichungen/Fehlern höherer Ordnung und ist deshalb parallelen Anordnungen vorzuziehen. An einem Messschieber nach Abb. 3.9. ist leicht zu zeigen, dass wegen der parallelen Anordnung von Maßstab und Prüfling Fehler erster Ordnung auftreten (nur erstes Glied der Reihenentwicklung des Tangens dargestellt).

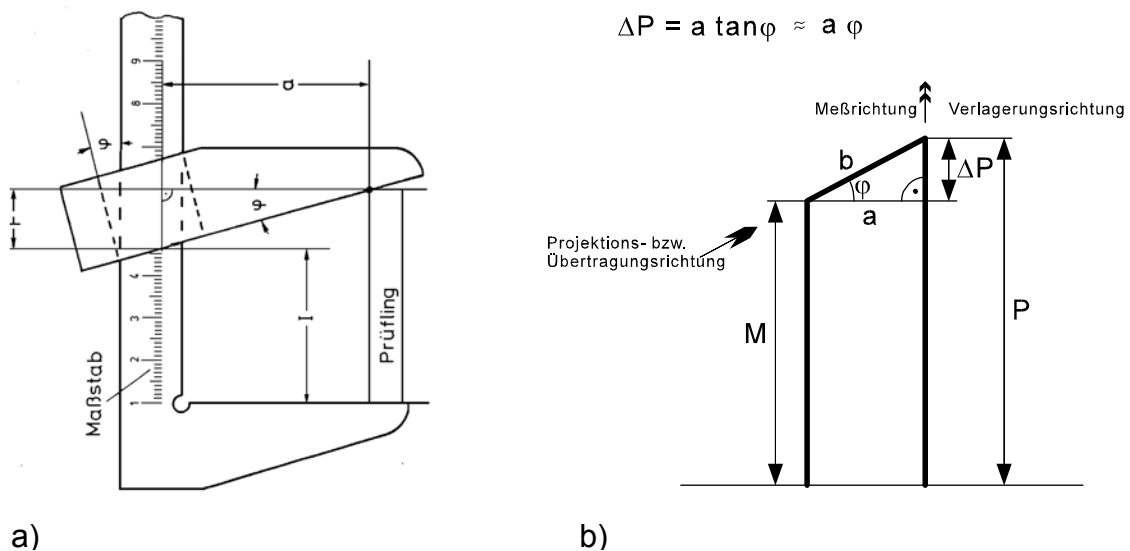


Abb. 3.9: Messfehler an einer Schieblehre (Maßstab und Prüfling liegen parallel)

a) konkreter Aufbau; b) abstrahierte Struktur

M Maßstab; P Prüfling; ΔP Messfehler

Ordnet man dagegen Maßstab und Prüfling hintereinander an (Abb. 3.10), so verbleiben nur Abweichungen 2. Ordnung. Das gilt natürlich nicht nur für Messaufgaben, sondern auch allgemein für Übertragungsfunktionen in Geräten.

Eine Hilfestellung bei der schnellen Einschätzung des Fehlerverhaltens liefert die grafische Veranschaulichung in Form von Mess-, Verlagerungs- und Projektionsrichtungen, die in den Abbildungen 3.9 und 3.10 bereits eingetragen sind.

Für die Messtechnik gilt: Stehen mögliche Verlagerungsrichtungen vom Messobjekt (oder Maßstab) parallel zur Projektionsrichtung und senkrecht zur Messrichtung, bleiben die Abweichungen von höherer Ordnung.

Für Übertragungsfunktionen allgemein gilt: Fehlerauswirkungen bleiben dann klein (2. Ordnung), wenn eine mögliche Verlagerung (Spiel) eine Bewegungsrichtung senkrecht zur Übertragungsbewegung aufweist. Abbildung 3.10 und 3.11 veranschaulichen dies an einem Höhenmesser und an einer Mitnehmerkupplung.

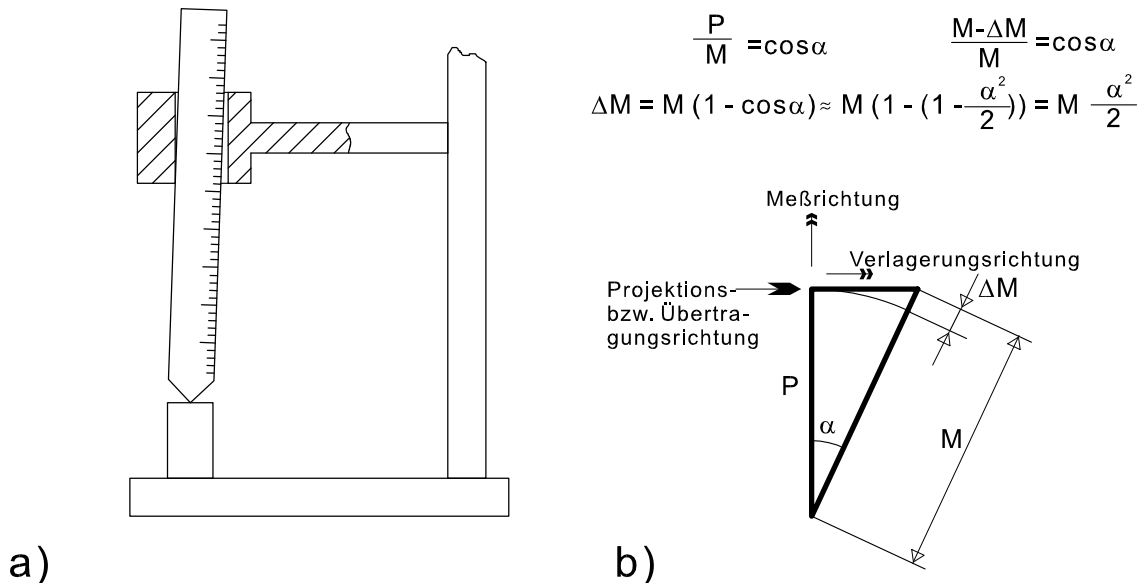


Abb. 3.10: Messfehler an einem Höhenmesser (Maßstab und Prüfling liegen fluchtend)

a) konkreter Aufbau; b) abstrahierte Struktur

M Maßstab; P Prüflingshöhe (Verschiebung des Maßstabes); ΔM Messfehler

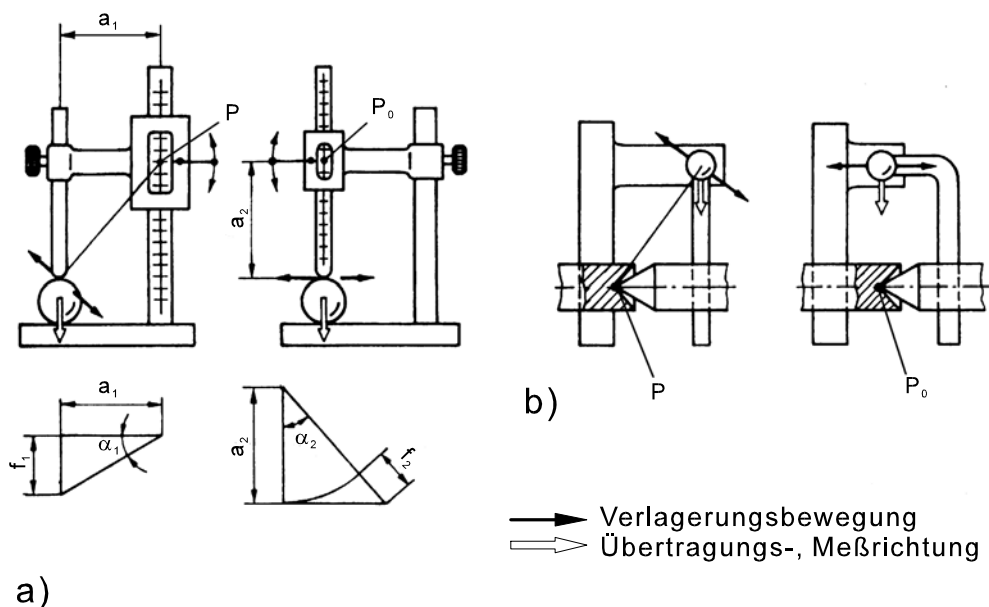


Abb. 3.11: Beispiel für innozente Anordnungen, aus /9/

a) Höhenmesser, f_1 Messfehler erster Ordnung: $\tan \alpha_1 = f_1/a_1$; $f_1 = a_1 \hat{\alpha}_1$;

f_1 Messfehler zweiter Ordnung: $\cos \alpha_2 = a_2/(a_2 + f_2)$; $f_2 = a_2 \hat{\alpha}_2^2/2$;

b) Mitnehmerkupplung

P (P_0) Kipp-Punkt bei Fehler erster (zweiter) Ordnung

c) Fehlerminimierte Anordnung

Auch die bisher behandelten Anordnungen sind hinsichtlich ihrer Abweichungen in der Gerätefunktion minimiert, hier soll jedoch unter dieser Überschrift eine durch mathematische Optimierung der Fehlerfaktoren realisierte Anordnung verstanden werden.

Auch hier zeigt wiederum die Messtechnik klassische Beispiele auf. Abb. 3.12 verdeutlicht eine in Messmaschinen häufig genutzte Anordnung nach Eppenstein. Ziel ist es dabei, eine innozente Messanordnung zu realisieren, bei der das Abbesche Komparatorprinzip verletzt werden darf. Die Notwendigkeit einer solchen Anordnung wird sofort verständlich, wenn man bedenkt, dass Messmaschinen mit 5 Metern und mehr Messlänge eine mindestens doppelt so große Baulänge aufweisen müssten. Dies würde die Vorteile der Abbeschen Anordnung durch neue Abweichungen, die aus der Baulänge resultieren (z. B. Unebenheiten in Fundament und Justage, Verformungen), schnell wieder aufheben.

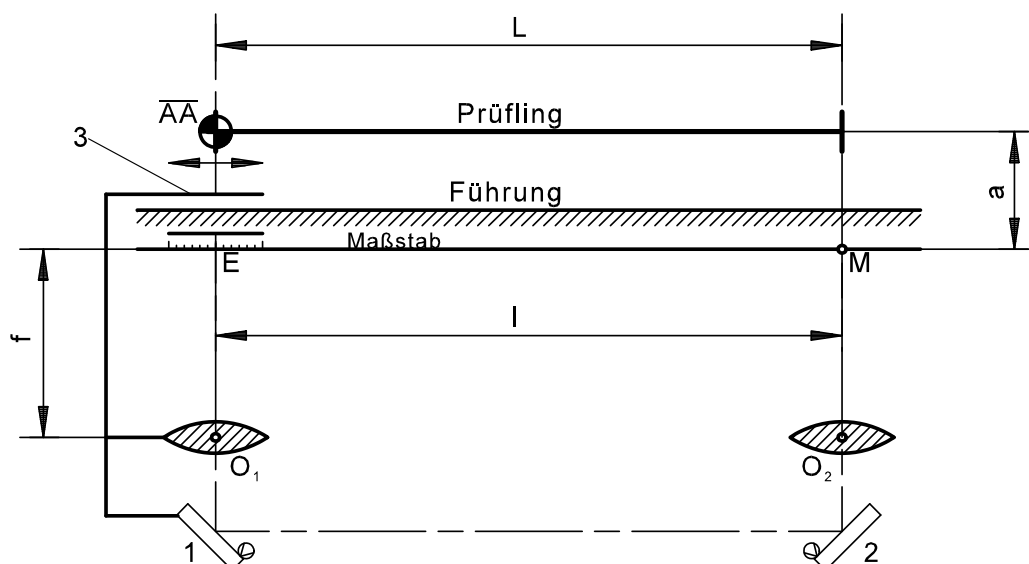


Abb. 3.12: Messanordnung nach Eppenstein, nach /9/

Der Prüfling befindet sich zwischen zwei vertikalen Messflächen und der Maßstab an der Messmaschine parallel zum Prüfling. Das Objektiv O_1 mit der Brennweite f bildet den Punkt E des Maßstabs (Ende des angetasteten Prüflings) nach unendlich und über die Einzelspiegel 1 und 2 sowie das Objektiv O_2 auf die Marke M des Maßstabs ab (Anfang des dort angelegten Prüflings).

Die Länge L des Prüflings soll der Länge l des Maßstabs entsprechen. Der mittels Führung verschiebbare Messschlitten 3 enthält die eine Messfläche sowie die Leseinheit (O_1 und l) und gestattet, unterschiedlich lange Prüflinge zu vermessen. Infolge von Führungsfehlern kippt der Messschlitten um die Achse AA , so dass Messfehler entstehen.

In Abbildung 3.13 ist der infolge Verkippung des Messschlittens entstehende Messfehler Δx dargestellt. Es gilt:

$$\Delta \delta = 2\omega (\text{Spiegel}) \quad ; \quad \overline{EF} = \overline{BB'} \quad ; \quad \Delta x = \overline{EF} - \overline{E'F}$$

$$\sin \omega = \frac{\overline{EF}}{\alpha + f} \quad ; \quad \overline{BE} + \overline{B'F} \quad ; \quad \Delta x = (\alpha + f) \sin \omega - \overline{B'F} \tan \Delta \delta$$

$$\tan \Delta \delta = \frac{\overline{E'F}}{\overline{B'F}} \quad ; \quad \cos \omega = \frac{\alpha + \overline{BE}}{\alpha + f}$$

$$\Delta x = (\alpha + f) \sin \omega - [\cos \omega (\alpha + f) - \alpha] \tan 2\omega.$$

Da die Verkippungen ω klein sind, kann man $\sin \omega$, $\cos \omega$ und $\tan 2\omega$ durch die Anfangsglieder der Reihenentwicklung ersetzen, so dass $\Delta x \approx (a - f) \hat{\omega} + (a + f) \hat{\omega}^3$ als Näherung gilt. Für $a = f$ verbleibt lediglich ein sehr kleiner Messfehler $\Delta x \approx (a + f) \hat{\omega}^3$.

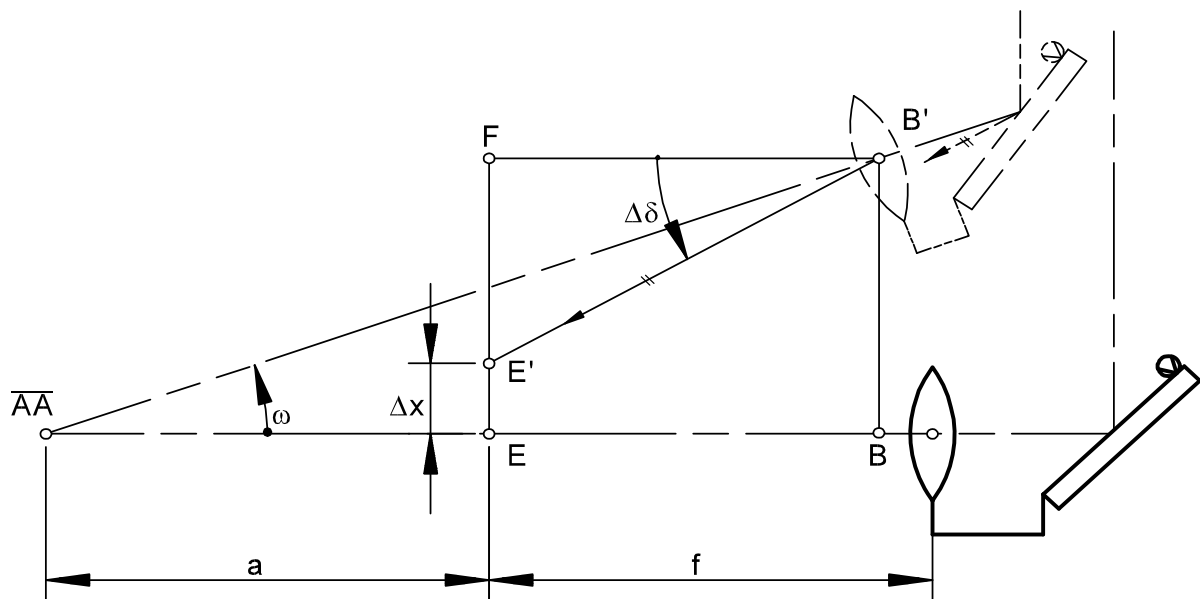


Abb. 3.13: Messfehler der Anordnung nach Eppenstein bei Verkippung, nach /9/ (überhöht dargestellt)

Allgemein ergeben sich für die Minimierung von Fehlerfaktoren natürlich auch die weithin bekannten Maßnahmen zur konstruktiven Gestaltung, wie

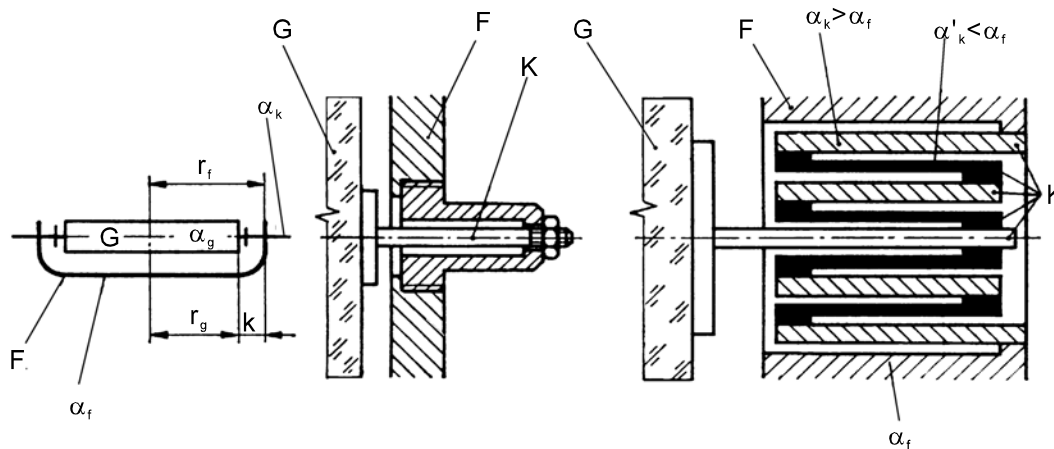
- Vermeidung von Überbestimmtheit
- kurzer Kraftfluss, bewusste Kraftflussführung
- klare Funktionstrennung

- Realisierung einer belastungsangepassten Gestalt (Prinzip gleicher Gestaltfestigkeit)
- Verminderung von Verformungen, abgestimmte Verformungen
- Kraftausgleich.

3.3.2 Kompensation

Grundgedanke ist hier die Ausnutzung gegenläufiger Änderungen in der Übertragungsfunktion. Beispiele stellen insbesondere Kompensatoren der thermischen Ausdehnung dar, wo unterschiedliche Materialien mit verschiedenen Ausdehnungskoeffizienten so kombiniert werden, dass eine gegenseitige Auslöschung der Änderungen erreicht wird.

Abb. 3.14 zeigt hierzu optische Kompensationsfassungen im Prinzipaufbau. Zunächst wäre ein Fassungswerkstoff mit gleichem Ausdehnungskoeffizienten wie Glas naheliegend. Durch verschiedene Nickelanteile im Stahl lassen sich die Ausdehnungskoeffizienten in weiten Bereichen variieren. Solche Werkstoffe sind jedoch meist relativ teuer und auch schlecht bearbeitbar. Bei Einsatz in Umgebungen mit sehr großen Temperaturschwankungen oder bei großen Glasteilen (ab 500 mm in astronomischen Großgeräten) nutzt man deshalb auch dargestellte Kompensationsfassungen.



a)

b)

Abb. 3.14: Kompensationsfassung, aus [9/

a) prinzipieller Aufbau; b) raumsparende Anordnung durch geschachteltes Hintereinanderschalten zweier Kompensationswerkstoffe

G Glasteil; F Fassung; K Kompensatorlänge; r_g Radius des Glasteiles; r_f Radius der Fassung;

k Kompensationslänge;

Längentemporausdehnungskoeffizienten: α_g Glas; α_f Fassungswerkstoff; α_k bzw. α'_k

Kompensationswerkstoff

Da der Ausdehnungskoeffizient von Glas meist kleiner als der üblicher Fassungswerkstoffe ist, wird zwischen Glas und Fassung ein dritter Werkstoff eingefügt mit

$$\alpha_{\text{Glas}} < \alpha_{\text{Fassung}} < \alpha_{\text{Kompensator}} \quad .$$

Die Länge k des Kompensationsteils folgt dann aus

$$k = r_g (\alpha_f - \alpha_g) / (\alpha_k - \alpha_f)$$

Eine weitere Verkürzung der Baulänge ermöglicht ein Ineinanderschachteln.

3.3.3 Justage

Unter Justage versteht man:

- das Ändern eines Kennwertes, z. B. eines Übertragungsfaktors mittels einer Stellvorrichtung
- das Vergleichen der eingetretenen Wirkung möglichst am Geräteausgang mit einer Zielgröße
- und das anschließende Sichern des Justageergebnisses.

Vergleichsweise einfach zu beherrschen und damit automatisierbar sind dabei *einfache Justierkreise*, die in einem geschlossenen Justierkreis/-vorgang kontinuierlich bis zum Endergebnis justiert werden können (Anzeige des Justageergebnisses ist stets möglich, so dass kontinuierlich auf eine Zielgröße eingestellt werden kann).

Es entstehen jedoch auch *nicht geschlossene* oder *gekoppelte Justierkreise*, die nur durch Sukzessivjustierung in mehreren („blinden“) Schritten zu justieren sind. Von *nicht geschlossenen* Kreisen spricht man, wenn das Ergebnis der Justage nicht sofort ablesbar ist, sondern erst beispielsweise nach einer Zwischenmessung. Dies tritt immer dann auf, wenn man Vergleichsmessungen nutzen muss, also nur die Abweichung zu einem Normal als Messwert vorliegen hat (z. B. beim Passameter zur Dicken- bzw. Durchmesser-messung). Dies erschwert den Justiervorgang erheblich. *Gekoppelte Justierkreise* dagegen beeinflussen sich gegenseitig. Justagen in einem Kreis ändern die Einstellung im zweiten und umgekehrt. Hier gilt es nach Maßnahmen zu suchen, die eine wenigstens teilweise entkoppelte Justage erlauben.

Generell eignet sich die Justage nur für die Beeinflussung innerer Störgrößen. Da Justagevorgänge jedoch meist schwer automatisierbar sind und einen vergleichsweise großen Zeitbedarf erfordern, sollte man Justagen nur dort vorsehen, wo andere Maßnahmen mit vertretbarem Aufwand nicht zum Erfolg führen. Der Justageprozess selbst erfolgt zwar während oder nach der Montage, ist aber innerhalb der Geräteentwicklung zu projektieren und durch Justagepläne, -vorschriften und Hilfsmittel vorzubereiten.

3.3.4 Toleranzfestlegung

Eine besondere Bedeutung bei der Analyse der Genauigkeit und des Fehlerverhaltens eines Gerätes besitzen die Toleranzfestlegungen. Im Gegensatz zu bisher betrachteten Störgrößen sind alle Geometrien und damit mindestens auch alle geometriebasierten Gerätefunktionen toleranzbehaftet. Innere Störgrößen und damit toleranzbedingte Abweichungen der Gerätefunktion sind also prinzipiell zu erwarten. Gleiches trifft auch für analoge elektrische Funktionen zu, da auch elektrische Bauteile Toleranzen aufweisen.

An dieser Stelle soll deshalb zunächst allgemein im Sinne von Genauigkeit und Fehlerverhalten auf diese Problematik eingegangen werden, ein eigener Abschnitt widmet sich dann speziell der Toleranzrechnung.

Die Toleranzfestlegung sollte bewusst unter dem Gesichtspunkt der entstehenden Auswirkungen auf die Gerätefunktion vorgenommen werden. Als grundlegende Regeln sind dabei zunächst zu beachten:

- Sichern einer funktionsgerechten Bemaßung (und damit auch Tolerierung), d. h. funktionswichtige Flächen und Maße sind direkt und eng und nicht als Kettenmaß oder Schließmaß einer Kette zu wählen.
- Realisierung einer eindeutigen Bemaßung (keine Mehrfachmaßstellen).
- Vermeidung/Einschränkung von Toleranzketten.

Dabei sollte jedoch die Grundregel

Toleriere so eng wie nötig, und so grob wie möglich!

nicht außer Acht gelassen werden, da enge Toleranzen enorme Kosten verursachen.

Die gewählten Toleranzen lassen sich schließlich in ihren Auswirkungen auf die Gerätefunktion auch durch eine Toleranzrechnung gezielt untersuchen, die eine Anwendung o. g. Fehlerbetrachtungen und Fehlerfaktoren darstellt. Darauf wird im Abschnitt 4 eingegangen.

3.3.5 Rechnerische Korrektur

Bekannte, sensorisch erfassbare und messbare, systematisch auftretende Abweichungen (Nichtlinearitäten) können über Korrekturkurven softwaremäßig ausgeglichen werden. Die Bedeutung dieser Maßnahmen wächst rasant, wegen der stark wachsenden Rechengeschwindigkeiten einerseits und der Verbilligung von Mikrorechen- und Speichertechnik andererseits. Damit können zunehmend auch (reproduzierbare) mechanische Übertragungsfunktionen mit ausgeprägten Nichtlinearitäten oder anderen störenden Einflüssen korrigiert werden. Dies ermöglicht unter Umständen die Nutzung bisher wegen zu hoher Nichtlinearitäten nicht einsetzbarer, meist sehr preiswerter, mechanischer Lösungen.

Insbesondere wenn ohnehin ein Mikrorechner für funktionelle Aufgaben zur Anwendung kommt, sind die zusätzlichen Aufwände für Sensorik, Fehlerkurvenablage und Fehlerkurvenverrechnung meist akzeptierbar.

Beispiele dazu sind:

- rechnerische Korrektur in mechanisch antastenden Messsystemen, wie Kreisbahnkorrektur bei Oberflächentastern und Taster-Durchbiegungs-Korrektur in Messmaschinen,
- Temperatur-, Luftdruck- und Luftfeuchte-Korrektur der Wellenlänge in Interferometern.

Es sei jedoch nochmals betont, dass trotz aller Möglichkeiten zur nachträglichen Beeinflussung der Genauigkeit und des Fehlerverhaltens eines Gerätes die Wahl des Wirkprinzips selbst zunächst die größten Einflusspotentiale besitzt und sekundäre Maßnahmen nachrangig sein sollten.

4 Toleranzrechnung/-analyse

4.1 Ausgangssituation

Bauteile und deren Geometrien sind nicht ideal genau herstellbar. Es treten fertigungsbedingt stets Abweichungen vom Nennmaß auf, die in Form zulässiger Toleranzen von Maßen, Formen und Lagen festgelegt werden müssen, wobei Funktion und Ökonomie zu wahren sind.

Gleichzeitig jedoch werden auch die Kosten ganz massiv durch die Toleranzfestlegung beeinflusst. Beide Aspekte sind jedoch gegensätzlich. So sichern kleine Toleranzen die Funktion, bewirken dabei jedoch hohe Kosten. Effektive, alle Reserven ausschöpfende Methoden zur Analyse und Synthese der Toleranzfestlegungen sind also zwingend notwendig.

Auf Maß- und Toleranzsysteme sowie die Bemaßung und Tolerierung selbst soll hier nicht eingegangen werden, die Auswirkungen auf beispielsweise das Schließmaß stehen im Mittelpunkt.

Grundproblem:

Alle Maße sind toleranzbehaftet. Spätestens durch die Montage verschiedener Bauteile miteinander entstehen Maß- und damit Toleranzketten. Eine solche Maßkette darf nicht geschlossen sein, dies hätte eine Überbestimmtheit zur Folge. Das zunächst offene Glied einer Maßkette (Schlussmaß oder Schließmaß) ist damit abhängig von den anderen Kettengliedern, muss jedoch funktionell bestimmten Anforderungen genügen.

Zur Sicherung der funktionellen Anforderungen an das Schließmaß bieten sich verschiedene Wege:

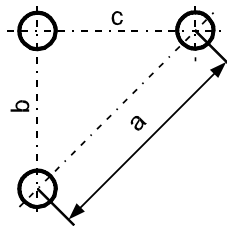
- Das Schließmaß kann über separate Justage- oder Abgleich- bzw. Abstimmvorgänge eingestellt werden.
- Die Bauteile werden ausgemessen und so kombiniert, dass die Schließmaßvorgaben erfüllt werden (selektive Montage), bzw. die ausgemessenen Bauteile werden in Maßgruppen sortiert und den Maßgruppen zugeordnet montiert (Gruppenaustauschbarkeit, wie in Wälzlagern).
- In einfachen Fällen lassen sich definierte Zustände durch federnde Anlagen erreichen.
- Die Auswirkungen auf das Schließmaß werden rechnerisch ermittelt und durch gezielte Toleranzfestlegungen berücksichtigt.

Nachfolgend soll nur die letzte Methode vertieft werden.

4.2 Methoden zur Toleranzrechnung – Übersicht

Die bereits behandelten linearen und quadratischen Fehlerfortpflanzungsgesetze finden sich auch bei den verschiedenen Methoden zur Toleranzrechnung wieder, wobei jedoch die Fehlerfaktoren häufig zu Eins werden. Man spricht deshalb auch zunächst von linearen und nichtlinearen Maßketten:

- a) lineare Maßkette: $\pm N_0 = \pm N_1 \pm N_2 \pm \dots = \sum k_i N_i$
(Einzelmaße voneinander unabhängig, Fehlerfaktoren mit Betrag eins)
- b) nichtlineare Maßkette: $N_0 = f(N_i)$
(funktioneller Zusammenhang zwischen den Einzelmaßen als Fehlerfaktor)
z. B. $a = f(b, c)$



Man unterscheidet unabhängig davon zwei Methoden der Toleranzrechnung:

I **Arithmetische Toleranzrechnung** (vollständige Austauschbarkeit) **(Maximum-Minimum-Methode / Extremwertmethode)**

Grundlage: Lineares Fehlerfortpflanzungsgesetz (systematische Fehler)

$$T_0 = \left| \frac{\partial f}{\partial M_1} \right| \cdot T_1 + \left| \frac{\partial f}{\partial M_2} \right| T_2 + \dots \quad (4.1)$$

a) lineare Toleranzketten
$$T_0 = T_1 + T_2 + \dots = \sum_{i=1}^m T_i \quad (4.2)$$

mit
$$\left| \frac{\partial f}{\partial M_i} \right| = 1 \quad (4.3)$$

b) nichtlineare Toleranzketten
$$T_0 = \sum_{i=1}^m \left| \frac{\partial f}{\partial M_i} \right| T_i \quad (4.4)$$

mit
$$\left| \frac{\partial f}{\partial M_i} \right| \neq 1 \text{ bzw. beliebig.} \quad (4.5)$$

II Statistische bzw. wahrscheinlichkeitstheoretische Methode (unvollständige Austauschbarkeit)

Grundlage: Quadratisches Fehlerfortpflanzungsgesetz (zufällige Fehler)

$$\sigma_0^2 = \left(\frac{\partial f}{\partial M_1} \right)^2 \sigma_1^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial M_2} \right)^2 \sigma_2^2 + \dots \quad (4.6)$$

$T_i = 2 \cdot h_i \cdot \sigma_i$ in Abhängigkeit der Verteilungsfunktion

a) lineare Toleranzketten $\sigma_0 = \sqrt{\sum \sigma_i^2} \quad (4.7)$

mit $\left| \frac{\partial f}{\partial M_i} \right| = 1$

b) nichtlineare Toleranzketten $\sigma_0 = \sqrt{\sum \left(\frac{\partial f}{\partial M_i} \right)^2 \sigma_i^2} \quad (4.8)$

mit $\left| \frac{\partial f}{\partial M_i} \right| \neq 1$ bzw. beliebig.

Bei kleinen Losgrößen und/oder weniggliedrigen Ketten ist die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von ungünstigsten Kombinationen von Extremwerten nicht vernachlässigbar, so dass dieser Fall im Rahmen der Berechnungsmethode berücksichtigt werden muss. Deshalb eignet sich hierfür nur die Maximum-Minimum-Methode oder Extremwertmethode, die mit der Auswirkung systematischer Fehler vergleichbar ist.

Bei hohen Losgrößen und vielgliedrigen Ketten ($i \geq 4$) ist die Wahrscheinlichkeit für ungünstigste, extremale Kombinationen jedoch äußerst gering, so dass hier unter Berücksichtigung von statistischen Verteilungen mit der statistischen oder wahrscheinlichkeitstheoretischen Methode gerechnet werden kann. Dies ermöglicht unter Akzeptanz einer geringen Überschreitungquote dann deutlich größere Einzeltoleranzen (50 ... 60 % größer) bzw. geringere Bauteilkosten als bei der Extremwertmethode auftreten, gleiche Schlusstoleranz vorausgesetzt.

4.3 Arithmetische Toleranzrechnung (Maximum-Minimum-Methode / Extremwertmethode)

Ausgangspunkt der arithmetischen Toleranzrechnung ist die Berücksichtigung auch der ungünstigsten Kombination der Einzelmaße. Man geht also von einer gewissen, nicht vernachlässigbaren Wahrscheinlichkeit dafür aus, dass bei Maßketten alle Glieder gleichzeitig an der Grenze des Toleranzfeldes liegen und dabei die für das Schließmaß ungünstigsten Kombinationen von Größt- und Kleinstwerten auftreten können. Bei kleinen, weniggliedrigen Ketten und geringen Stückzahlen ist dies auch zu erwarten.

Im Ergebnis einer sich darauf begründenden Toleranzanalyse und -synthese ergeben sich folgende Vorteile:

- eine vollständige Austauschbarkeit innerhalb aller Bauteillose,
- eine einfach organisierbare Montage, die ohne Auswählen und Nacharbeiten zu den vorausgerechneten Ergebnissen führen muss (fehlerfrei, auch bei niedrig qualifiziertem Personal),
- eine einfache Lagerhaltung und ein einfacher Service,
- eine einfache, überschaubare Rechenmethode.

Diese werden jedoch durch Nachteile erkauft:

- Bei vertretbar kleinen Einzeltoleranzen wird im Allgemeinen bei vielgliedrigen Ketten die Schließtoleranz schnell recht hoch, so dass sich qualitative und funktionelle Parameter verschlechtern.
- Umgekehrt erfordern vorgegebene Schließtoleranzen insbesondere bei vielgliedrigen Ketten meist sehr kleine Einzeltoleranzen und verursachen hohe Fertigungskosten.
- Praktisch werden dadurch sehr enge (zu enge) Toleranzen provoziert.

Trotzdem sollte wegen der deutlichen Vorteile zunächst diese Methode angestrebt werden. Ergeben sich jedoch funktionelle oder kostenbedingte Probleme müssen dann andere, nämlich statistische Methoden genutzt werden.

Die Vorgehensweise der arithmetischen Toleranzanalyse und -synthese ist in Tafel 4.1 formelmäßig aufbereitet. Dargestellt sind Gleichungen für lineare Maßketten, die partiellen Ableitungen (Fehlerfaktoren) werden betragsmäßig zu Eins. Den Ausgangspunkt bilden dabei zunächst das Aufstellen einer Maßkette mit beliebigem Richtungssinn und das Ablesen einer Ausgangsgleichung als vorzeichenbehaftete Summe der einbezogenen Einzelmaße. Wichtig für die Vorzeichenfestlegung ist ein Umstellen der Ausgangsgleichung in die Form $\sum M_i = 0$.

Mit Hilfe der angegebenen Gleichungen lassen sich nun, aufgegliedert in die drei Maßbestandteile Nennmaß N_i , Toleranzmittenabweichung E_{Ci} vom Nennmaß und Toleranz T_i , die gesuchten Maße ermitteln. Dabei ist zu unterscheiden, ob das Schließmaß M_0 als Auswirkung der unabhängigen Einzelmaße und -toleranzen auf das abhängige Schlussglied gesucht ist oder ein beliebiges Maß der Kette M_i so zu bestimmen ist, damit ein funktionell vorgegebenes Schlussmaß erfüllt wird. Praktisch sind u. U. auch zunächst mehrere Einzelmaße und insbesondere deren Toleranzen noch frei wählbar.

Tafel 4.1 Tabellenmethode zur arithmetischen Toleranzrechnung**Voraussetzungen:**

1. Lineare Maßketten, Einzelmaße unabhängig voneinander.
2. Maß- bzw. Toleranzkette darf nicht geschlossen sein.
3. Schließmaß ist nichtbemaßtes Glied einer Kette und von anderen Gliedern abhängig!

Aufgaben:

Grundaufgabe 1: Schließmaß M_0 und dessen Toleranz T_0 gesucht.

Grundaufgabe 2: Beliebiges Maß M_n , T_n bei gegebenem Schließmaß und Toleranz des Schließmaßes gesucht.

Grundgleichungen:

Ausgangsbeziehung $\sum k_i M_i = 0$ (Kette durch M_0 geschlossen)

Grundaufgabe 1	Grundaufgabe 2
Schließmaß M_0 , T_0 gesucht	Schließmaß M_0 , T_0 gegeben, beliebiges Maß M_n , T_n der Kette gesucht
$N_0 = -\frac{1}{k_0} \sum_{i=1}^m k_i N_i$ m = Anzahl der Einzelmaße k_i = Richtungskoeffizienten N_i = Nennmaße	$N_n = -\frac{1}{k_n} \left[\sum_{i=0}^{n-1} k_i N_i + \sum_{i=n+1}^m k_i N_i \right]$ n = gesuchtes Einzelmaß
$T_0 = \sum_{i=1}^m T_i$	$T_n = T_0 - \sum_{i=1}^{n-1} T_i - \sum_{i=n+1}^m T_i$
! Wichtig: Schließtoleranz = $\sum$ der Einzeltoleranzen	
$E_{C_0} = -\frac{1}{k_0} \sum_{i=1}^m k_i E_{C_i}$	$E_{C_n} = -\frac{1}{k_n} \left[\sum_{i=0}^{n-1} k_i E_{C_i} + \sum_{i=n+1}^m k_i E_{C_i} \right]$
$M_0 = N_0 + E_{C_0} \pm T_0 / 2$ (($= C_0 \pm T_0 / 2$))	$M_n = N_n + E_{C_n} \pm T_n / 2$ (($= C_n \pm T_n / 2$))

T liegt symmetrisch zu C bzw. E_C ! Index 0 = Schlussglied; k_i = Richtungskoeffizienten, beliebig zuordenbar, aber innerhalb einer Kette mit festem Richtungssinn, entspricht Vorzeichen in Gleichung $\sum k_i M_i = 0$.

Abbildung 4.1 verdeutlicht die einzelnen Maßbestandteile nochmals bildlich.

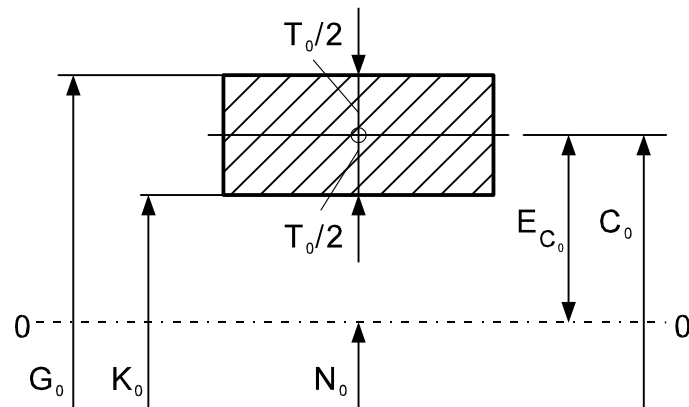


Abb. 4.1: Maßbestandteile

Diese Tabellenmethode scheint recht aufwendig, zumal aus der Anschauung heraus die Aufgabenstellung auch recht einfach direkt lösbar wäre, wie nachstehend verdeutlicht wird, Tafel 4.2.

Tafel 4.2 Direkte Berechnung von Größt- und Kleinstmaß bei arithmetischer Toleranzrechnung

1. Ausgangsgleichung

$$\sum_{i=0}^m k_i M_i = 0$$

2. Umstellen nach M_0

$$M_0 = -\frac{1}{k_0} \sum_{i=1}^m k_i M_i$$

3. Größt- und Kleinstmaße berechnen

Größtmaß G_0 des Schlussmaßes M_0 = Summe der Größtmaße G_i der positiven Glieder der Gleichung *minus* Summe der Kleinstmaße K_i der negativen Glieder der Gleichung
(Kleinstmaß K_0 analog)

$$G_0 = \sum_{i=1}^n G_i - \sum_{i=n+1}^m K_i (= N_0 + E_{C_0} + T_0 / 2)$$

$$K_0 = \sum_{i=1}^n K_i - \sum_{i=n+1}^m G_i (= N_0 + E_{C_0} + T_0 / 2)$$

$$T_0 = G_0 - K_0$$

Die Fehlerhäufigkeit dieser anschaulichen Methode ist jedoch insbesondere bei der Ermittlung von einzelnen Kettenmaßen bei gegebenem Schließmaß sehr hoch (Grundaufgabe 2), während das formalisierte Vorgehen der Tabellenmethode problemlos und auch rechnergestützt ausgeführt und ebenfalls bei der statistischen Berechnung genutzt werden kann.

Nachfolgend sei ein Beispiel zur Nutzung der Tabellenmethode dargestellt.

Beispiel 1:

Aufgabenstellung:

Abbildung 4.2a verdeutlicht die Montage eines Wälzlagers an einem Wellenzapfen mit axialer Sicherung. Gesucht sind das axiale Spiel und dessen Schwankungsbreite.

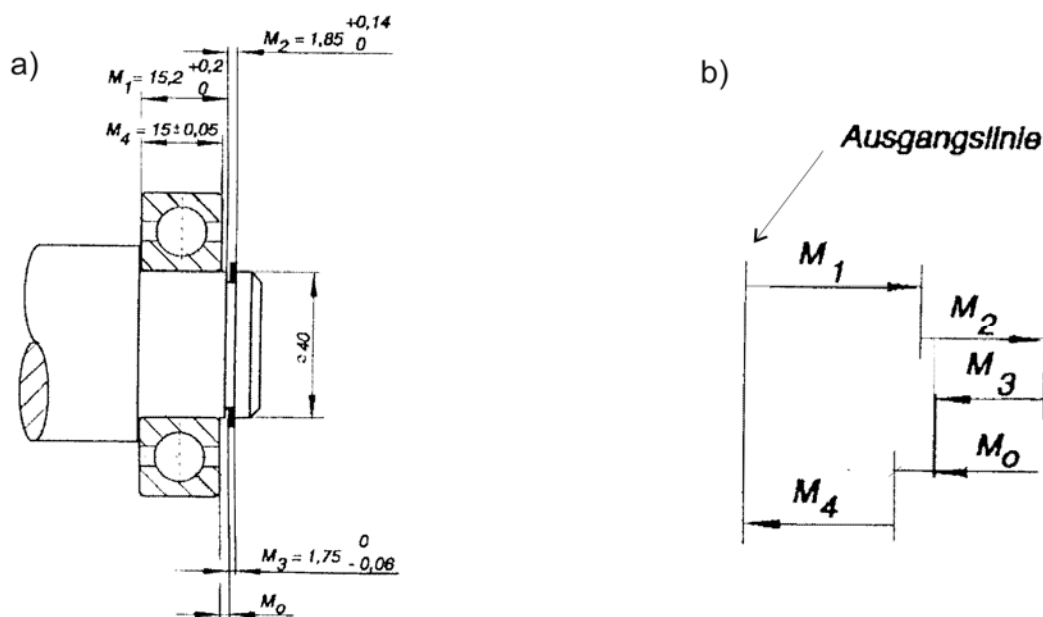


Abb. 4.2: Wälzlagermontage auf einem Wellenzapfen, Beispiel aus [11/

a) Anordnung; b) Maßkette

Lösung:

1. Welches ist das Schließmaß der Kette?
Zunächst ist stets nach dem abhängigen Kettenglied zu suchen, das das Schließmaß der Kette darstellt. Dieses und nur dieses sollte dann mit M_0 bezeichnet werden. Hier ist das axiale Spiel die abhängige Größe, M_0 ist folglich gesucht - Grundaufgabe 1. Das Schließmaß ist in einer Zeichnung i. Allg. nicht bemaßt.
2. Aufstellen der Maßkette
Ausgehend von einer beliebigen, in die Maßkette zu zeichnenden Maßbezugs-
linie ist ein geschlossener Linienzug über bekannte oder gesuchte Einzelmaße
und das Schlussglied zu bilden. Dazu sollte ein Richtungssinn beliebig einge-
führt werden. Abbildung 4.2b zeigt ein Beispiel.

3. Ausgangsgleichung

Das vorzeichenbehaftete Durchlaufen der Maßkette liefert eine Gleichung, die in der Form $\sum M_i = 0$ die Ausgangsgleichung darstellt.

Hier folgt aus der Maßkette: $M_1 + M_2 - M_3 - M_0 - M_4 = 0$

Die Vorzeichen stellen die Richtungskoeffizienten k_i für die einzelnen Maße bei linearen Maßketten dar.

4. Tabelle

In Tabellenform sollten die Maßbestandteile – soweit bekannt – aufbereitet werden.

i	M_i	N_i	K_i	E_{ci}	T_i
0	?	?	- 1	?	?
1	$15,2^{+0,2}$	15,2	+ 1	+ 0,1	0,2
2	$1,85^{+0,14}$	1,85	+ 1	+ 0,07	0,14
3	$1,75^{-0,06}$	1,75	- 1	- 0,03	0,06
4	$15,0 \pm 0,05$	15,0	- 1	0	0,1

5. Gleichungen:

$$N_0 = -\frac{1}{k_0} \sum_{i=1}^4 k_i N_i = -\frac{1}{-1} (1 \cdot 15,2 + 1 \cdot 1,85 - 1 \cdot 1,75 - 1 \cdot 15,0) = 0,3$$

$$E_{C0} = -\frac{1}{k_0} \sum_{i=1}^4 k_i E_{ci} = -\frac{1}{-1} (1 \cdot 0,1 + 1 \cdot 0,07 - 1 \cdot (-0,03) - 0) = 0,2$$

$$T_0 = \sum_{i=1}^4 T_i = 0,2 + 0,14 + 0,06 + 0,1 = 0,5$$

$$M_0 = N_0 + E_{C0} \pm \frac{T_0}{2} = 0,3 + 0,2 \pm 0,25 = 0,5 \pm 0,25$$

6. Ergebnis: $M_0 = 0,5 \pm 0,25$
Spiel 0,25 ... 0,75 mm

Beispiel 2:**Aufgabenstellung:**

Abbildung 4.2a verdeutlichte bereits die Montage eines Wälzlagers an einem Wellenzapfen mit axialer Sicherung. Gesucht waren zunächst das axiale Spiel und dessen Schwankungsbreite. Ergebnis war $M_0 = 0,5 \pm 0,25$, Spiel $0,25 \dots 0,75$ mm.

Nun soll das Spiel insgesamt verschoben werden auf $M_0 = 0,3 \pm 0,25$ bzw. auf ein Spiel $0,05 \dots 0,55$ mm. Dafür ist ein angepasstes Maß M_1 gesucht, da dies am einfachsten zu ändern ist.

Lösung:

1. Welches ist das Schließmaß der Kette?
Zunächst ist immer nach dem abhängigen Kettenglied zu suchen, welches das Schließmaß der Kette darstellt. Dieses und nur dieses sollte dann mit M_0 bezeichnet werden.
Hier ist das axiale Spiel weiterhin die abhängige Größe. M_0 ist folglich das Schließmaß. Gesucht ist aber nun M_1 nach Grundaufgabe 2.
2. Aufstellen der Maßkette
Ausgehend von einer beliebigen, in die Maßkette zu zeichnenden Maßbezugslinie ist ein geschlossener Linienzug über bekannte oder gesuchte Einzelmaße und das Schlussglied zu bilden. Dazu sollte ein Richtungssinn beliebig eingeführt werden. Abbildung 4.2b zeigt ein Beispiel. Dies gilt wie bisher auch.
3. Ausgangsgleichung
Das vorzeichenbehaftete Durchlaufen der Maßkette liefert eine Gleichung, die in der Form $\sum M_i = 0$ die Ausgangsgleichung darstellt, ebenfalls wie bisher.

Es folgt aus der Maßkette wiederum: $M_1 + M_2 - M_3 - M_0 - M_4 = 0$
Die Vorzeichen stellen die Richtungskoeffizienten k_i für die einzelnen Maße dar.
4. Tabelle
In Tabellenform sollten die bekannten Maßbestandteile aufbereitet werden. Hier ist nun M_0 bekannt und M_1 unbekannt, im Unterschied zu Grundaufgabe 1.

i	M_i	N_i	K_i	E_{ci}	T_i
0	$0,3 \pm 0,25$	0,3	- 1	0	0,5
1	?	?	+ 1	?	?
2	$1,85^{+0,14}$	1,85	+ 1	+ 0,07	0,14
3	$1,75_{-0,06}$	1,75	- 1	- 0,03	0,06
4	$15,0 \pm 0,05$	15,0	- 1	0	0,1

5. Gleichungen, nun für Grundaufgabe 2:

$$N_1 = -\frac{1}{k_1} \sum_{i=0;2}^4 k_i N_i = -\frac{1}{1} (-1 \cdot 0,3 + 1 \cdot 1,85 - 1 \cdot 1,75 - 1 \cdot 15,0) = 15,2$$

$$E_{C1} = -\frac{1}{k_1} \sum_{i=0;2}^4 k_i E_{ci} = -\frac{1}{1} (-1 \cdot 0 + 1 \cdot 0,07 - 1 \cdot (-0,03) - 0) = -0,1$$

$$T_1 = T_0 - \sum_{i=2}^4 T_i = 0,5 - (+0,14 + 0,06 + 0,1) = 0,2$$

$$M_1 = N_1 + E_{C1} \pm \frac{T_1}{2} = 15,2 - 0,1 \pm 0,1 = 15,1 \pm 0,1$$

6. Ergebnis: $M_1 = 15,1 \pm 0,1$
für Spiel 0,05 ... 0,55 mm
Bitte Probe machen!

4.4 Statistische Toleranzrechnung

Gegenwärtig zeichnen sich für viele Geräte zwei gegenläufige Tendenzen ab. Einerseits werden immer genauere Gerätefunktionen gefordert, die selbst bei höchster Fertigungsgenauigkeit kaum realisierbar sind. Andererseits sind die durch eine extrem genaue Fertigung entstehenden Kosten nicht umlegbar (Justage oder Abstimmearbeitsgänge sind nicht vertretbar). Lösungen für diesen Widerspruch könnten erzielt werden durch Auslesepaarungen, durch selektive Montage oder Einbeziehung statistischer und wahrscheinlichkeitstheoretischer Ansätze. Auf Letzteres soll deshalb näher eingegangen werden.

Der Kern der statistischen Toleranzrechnung bzw. der wahrscheinlichkeitstheoretischen Ansätze besteht in der Einbeziehung von statistischen Verteilungen:

- Einerseits werden die Abmaße nicht gleich häufig auftreten, sondern extremale Abweichungen von Nennmaßen weniger häufig anzutreffen sein als Istmaße in der Nähe des Nennmaßes, vgl. Abb. 4.3.
- Andererseits wird die Wahrscheinlichkeit für ungünstigste Kombinationen solcher ohnehin wenig wahrscheinlicher Extremwerte bei vielgliedrigen Ketten damit sehr klein.

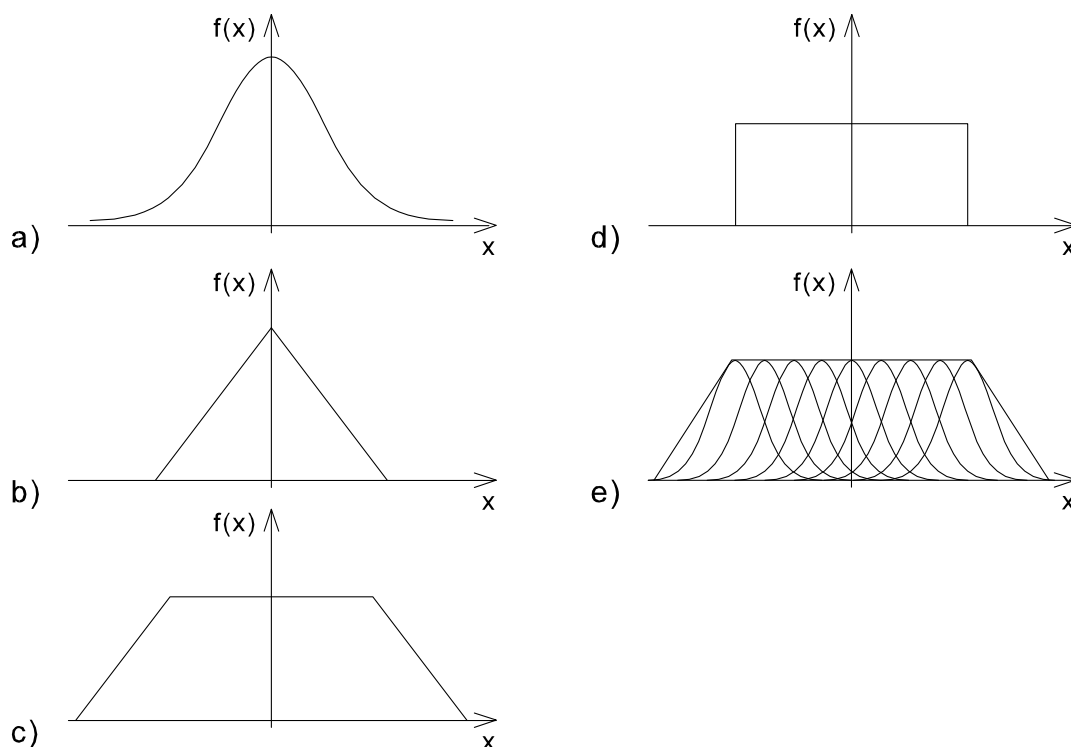


Abb. 4.3: Praktisch zu erwartende Verteilungsfunktionen

a) Normalverteilung; b) Dreieckverteilung; c) Trapezverteilung; d) Rechteckverteilung;
e) Entstehung einer Trapezverteilung bei Durchlaufen einer Normalverteilung

Kennt man die Verteilung von Maßen aus der Analyse der Fertigung, so kann man mathematische Verteilungsgesetze zu deren Nachbildung nutzen und mit diesen die Auswirkung auf das Schließmaß bestimmen, d. h. eine dem quadratischen Fehlerfortpflanzungsgesetz entsprechende Rechenmethode wählen.

4.4.1 Statistische Grundbegriffe

Die Analyse einer Fertigung (eines Fertigungsloses) hinsichtlich bestimmter interessierender Maße und deren Abweichungen von der Zielgröße Nennmaß führt zunächst für eine Stichprobe n zu einer Häufigkeitsverteilung, einem Histogramm $h(x)$ mit der relativen Häufigkeit

$$h_{\text{rel}}(x) = \frac{v}{n} = \frac{\text{Anzahl des Eintreffens eines Wertes}}{\text{Stichprobenanzahl}} \quad (4.9)$$

Da Maße beliebige Werte annehmen können, sollte das gesamte Spektrum möglicher Maße zunächst in bestimmte Klassen einer festzulegenden Klassenbreite aufgeteilt werden. Das Wiederfinden eines Maßes in einer bestimmten Klassenbreite stellt damit ein diskretes Ereignis im Sinne des Eintreffens eines solchen Messwertes dar. Die günstigste Vorgehensweise dazu soll hier nicht vertieft werden, dies ist Aufgabe der statistischen Prozesskontrolle und wird meist automatisiert rechnergestützt ablaufen.

Ein solches Histogramm weist einen Mittelwert $\bar{x}$ und Standardabweichungen s dazu auf. Ausgehend von diesen empirischen Histogrammen lassen sich für die Gesamtheit aller Elemente (Fertigungslos) nun für die Nachbildung geeignete mathematische Verteilungsfunktionen ermitteln [31]. Abbildung 4.4 verdeutlicht die Ermittlung eines Histogrammes und die zugehörige mathematische Verteilungsdichtefunktion. Tafel 4.3 zeigt die wesentlichsten statistischen Grundbegriffe und deren Definitionen.

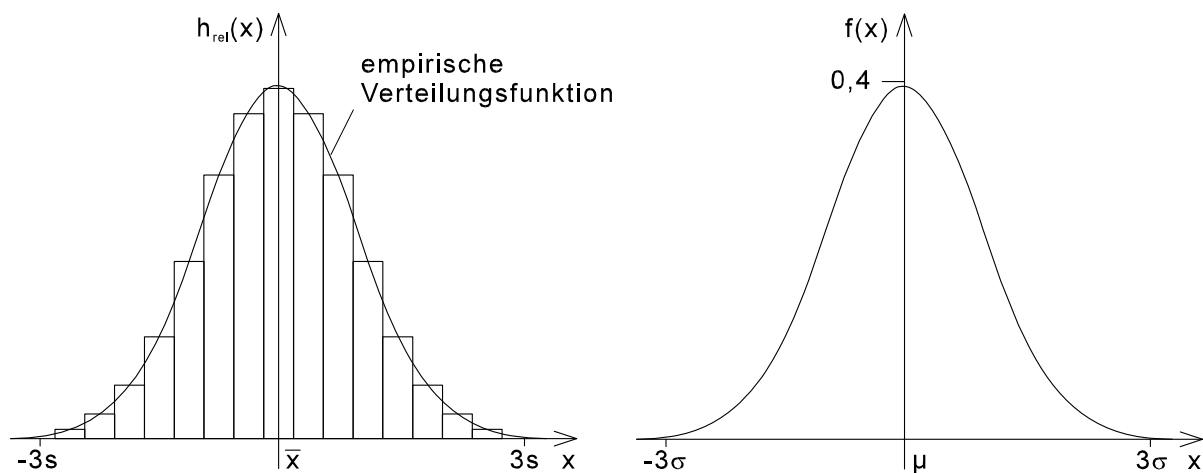


Abb. 4.4: Histogramm und zugehörige mathematische Verteilungsdichtefunktion

Tafel 4.3 Statistische Grundbegriffe

Stichprobe n Stück		Grundgesamtheit N	
Histogramm	$h_{rel}(x) = \frac{v}{n}$ (relative Häufigkeit)	Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion $f(x)$	
$n \rightarrow \infty$		führt zu	$h \rightarrow f$
Mittelwert:		Mittelwert:	
$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$		$\mu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$ (4.10)	
Streuung/ empirische Standardabweichung::		Standardabweichung:	
$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$		$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2}$ (4.11)	
Empirische Varianz:		Varianz:	
$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$		$\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x - \mu)^2$ (4.12)	

Praktisch zu erwartende Verteilungsfunktionen zeigte bereits Abbildung 4.3. Während die Normalverteilung (Gaußsche Glockenkurve) bei sehr vielen statistisch wirkenden Einflussfaktoren ohne dominierende Einflussgröße auf das Fertigmaß und bei großen Stückzahlen entstehen wird, bildet sich zuvor bei geringen Stückzahlen zunächst eine Dreieckverteilung heraus.

Andere Verteilungen stellen sog. Mischverteilungen dar, die beispielsweise durch wandernde Normalverteilungen entstehen können. Typisch dafür sind spanabhebende Fertigungsverfahren, bei denen der Werkzeugverschleiß nicht korrigiert wird, oder nur diskontinuierlich kurz vor dem Herauslaufen der Messwerte aus dem Toleranzband.

Eine ganz besondere Rolle nimmt die Normalverteilung ein

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{1}{2} \frac{(x-\mu)^2}{\sigma^2}} \quad \text{mit} \quad \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) dx = 1 \quad . \quad (4.13)$$

Abbildung 4.5 verdeutlicht die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion $f(x)$ und die zugehörige Verteilungsfunktion $F(x) = \int_{-\infty}^x f(x) dx$ für die Normalverteilung.

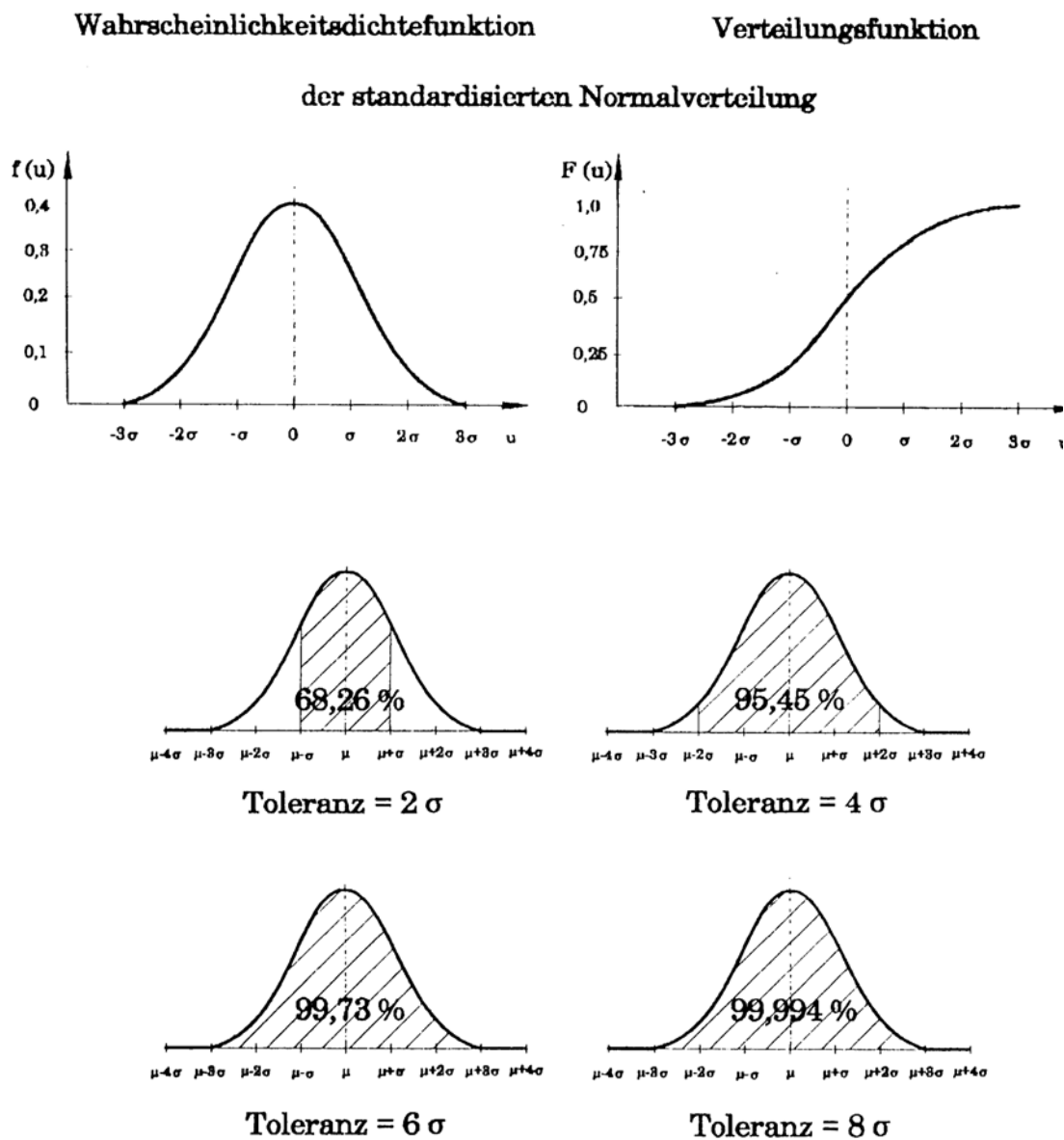


Abb. 4.5: Normalverteilung, aus /11/

Bedeutsam sind die Spannweiten	$\pm 1 \sigma, \pm 2 \sigma, \pm 3 \sigma; \pm 4 \sigma; \pm 5 \sigma.$
Innerhalb eines Bereiches um μ von	$\pm 1 \sigma$ befinden sich 68,26 %
	$\pm 2 \sigma$ 95,45 %
	$\pm 3 \sigma$ 99,73 %
	$\pm 4 \sigma$ 99,994 %
	$\pm 5 \sigma$ 99,99994 % aller Maße.

4.4.2 Grundlagen der statistischen Toleranzrechnung

Basis der statistischen Toleranzrechnung ist der „Zentrale Grenzwertsatz“ der Wahrscheinlichkeitsrechnung/Statistik:

- Danach ist eine Zufallsgröße dann annähernd normalverteilt, wenn diese als Summe einer großen Anzahl unabhängiger Summanden aufgefasst werden kann, von denen jeder zur Summe nur einen unbedeutenden Beitrag liefert.

Betrachten wir dazu zunächst nur zwei Summanden, also noch keine große Zahl von Komponenten. Wenn beide Summanden, es seien Maße mit Nennmaß 10,0 mm und 12,0 mm, gleichverteilt mit ihren Istmaßen einen Toleranzbereich von beispielsweise 0 bis + 0,3 mm überdecken, wird sich bei Hintereinanderreihung zweier Maße schon keine gleichmäßige Verteilung (Rechteckverteilung) zwischen 22,0 und 22,6 mm mehr ergeben.

Dazu folgendes Experiment:

Zu jedem der Maße seien je vier Istmaße 10,0, 10,1, 10,2 und 10,3 mm bzw. 12,0, 12,1, 12,2 und 12,3 mm jeweils viermal als Istwerte vorhanden. Die Istmaße sind also gleichverteilt unter Berücksichtigung der hier genutzten Auflösung von 0,1 mm beim Messen. Kombinieren wir nun möglichst gleichmäßig diese gleichverteilten Istmaße, so erhalten wir entsprechend Bild 4.6 eine Dreieckverteilung um ein Maß 22,3 mm herum. Selbst bei diesem Beispiel ist bereits eine Tendenz zur Normalverteilung zu erkennen.

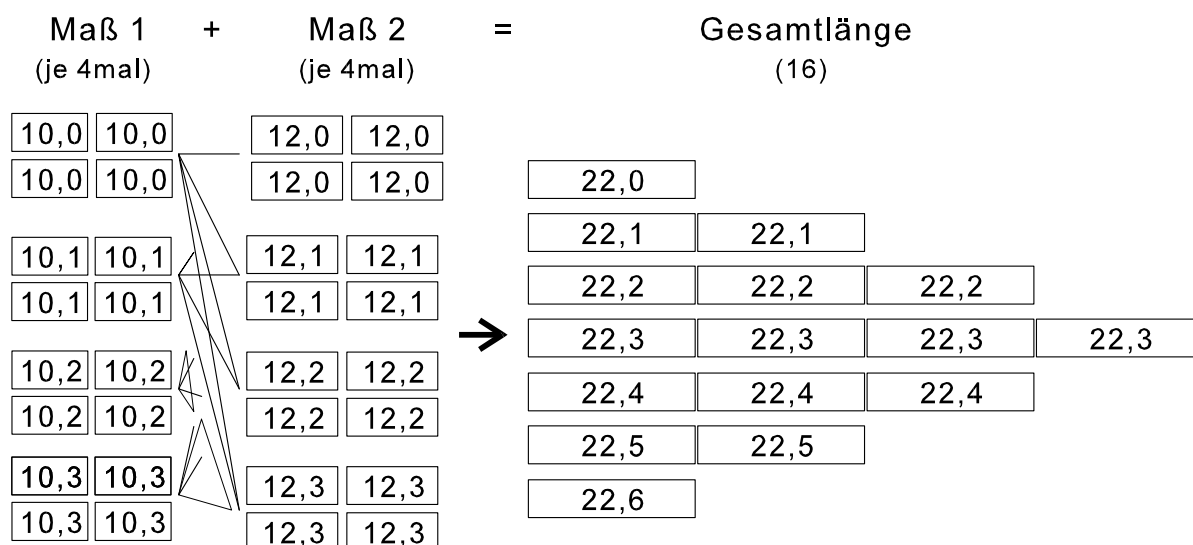


Abb. 4.6: Aneinanderreihung zweier gleichverteilter Maße

Mathematisch handelt es sich bei diesem Vorgang um eine Faltung von Verteilungen mit

$$P(x) = \int_{y=-\infty}^{\infty} P_1(x-y)P_2(y)dy, \quad (4.14)$$

wobei $P(x)$ die durch P_1 und P_2 entstehende neue Verteilung darstellt.

Das Ergebnis einer solchen Faltung nähert sich umso mehr einer Normalverteilung an, je öfter gefaltet wird, Abbildung 4.7. Mehrfache Faltungen hintereinander streben also gegen eine Normalverteilung.

Faltung von Verteilungen Ergebnis

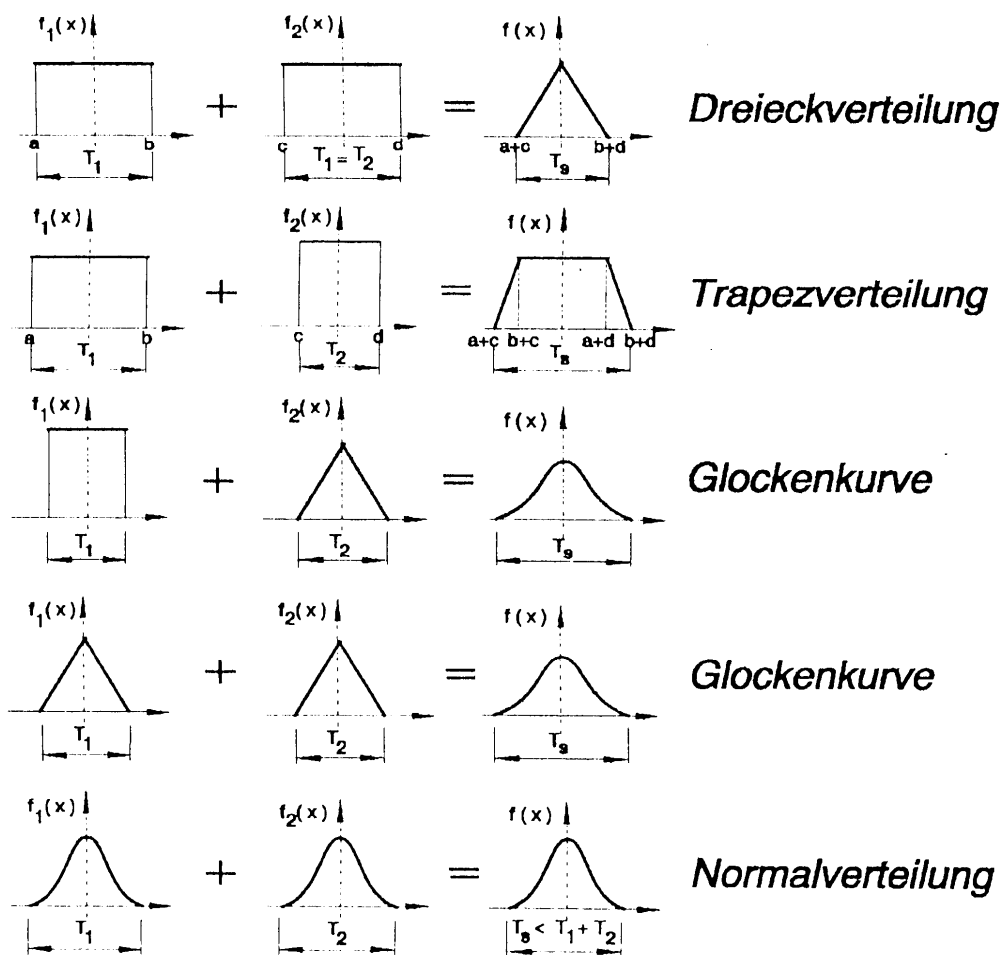


Abb. 4.7: Faltung verschiedener Verteilungen, aus /11/

Für die Kerngrößen Mittelwert und Standardabweichung der neuen Verteilung folgt dann

$$\mu_{ges} = \sum_{i=1}^N \mu_i \quad (\text{Mittelwertsatz}) \quad (4.15)$$

und

$$\sigma_{ges} = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 \sigma_i^2} \quad (\text{Fehlerfortpflanzungsgesetz}) \quad (4.16)$$

Es gilt also das quadratische Fehlerfortpflanzungsgesetz

$$\sigma_{ges}^2 = \left(\frac{\partial f}{\partial x_1} \right)^2 \sigma_{x1}^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2} \right)^2 \sigma_{x2}^2 + \dots \quad (4.17)$$

4.4.3 Vorgehensweise bei der statistischen Toleranzrechnung

Voraussetzung für die statistische Toleranzrechnung ist zunächst eine Analyse der Fertigung, um Kenntnisse über die tatsächlich auftretenden oder zu erwartenden Verteilungen und Verteilungsgesetze der einzelnen Istmaße zu erlangen.

Während dies vor einigen Jahrzehnten noch mit erheblichen zusätzlichen Aufwänden verbunden war, sind diese Werte heute quasi als Abfallprodukt aus der Statistischen Prozesskontrolle (SPC) verfügbar (vergleiche Abschnitt 4.5). Dies gilt jedoch nur für laufende Produktionen, bei Neuentwicklungen fehlen diese Daten zwangsläufig. Sie müssen also zunächst aus früheren, ähnlichen Produktionszyklen abgeschätzt werden.

Außerdem sollte man diese Methoden nur bei vielgliedrigen Ketten ($i \geq 4$) und vertretbar großen Fertigungsstückzahlen ($n > 50$) nutzen, da bei zu kurzen Ketten der Effekt ausbleibt und bei zu geringen Stückzahlen sich noch keine charakteristischen Verteilungen ausgebildet haben.

Zusätzlich zu den bei der arithmetischen Toleranzrechnung benötigten Werten, wie Nennmaß, Toleranz und Toleranzmittenabweichung, kommt also die Verteilungsfunktion hinzu, die durch ihre jeweilige Standardabweichung charakterisiert werden muss. Der Mittelwert der Verteilung liegt bei den i. Allg. symmetrischen Verteilungen bei $N_i + E_{Ci}$.

Schließlich muss noch ein Zusammenhang zwischen den verteilungsspezifischen Größen, also den Standardabweichungen σ_i , und den konstruktiven Größen, den Toleranzen T_i hergestellt werden. Für Verteilungen, die nicht unendlich sind (Dreieck, Rechteck, Trapez, ...), wird sinnvoller Weise die Breite der Verteilung gleich der Toleranzbreite sein, so dass die statistischen Größen Standardabweichung σ bzw. Varianz σ^2 nun in fester berechenbarer Relation zur Toleranz T stehen.

In den Tafeln 4.4 und 4.5 sind die Daten für die wesentlichen Verteilungen unter Nutzung der Gleichung 4.11 aufbereitet. Zur Kennzeichnung der Beziehung zwischen Toleranz und Standardabweichung wird ein Faktor h_i (in der Literatur auch manchmal als Kehrwert c_i) eingeführt, mit

$$T_i = 2h_i\sigma_i \quad \text{bzw.} \quad T_i / 2 = h_i\sigma_i \\ (\text{oder} \quad c_i T_i / 2 = \sigma_i). \quad (4.18)$$

Für die unendliche Normalverteilung ist der durch die Toleranzbreite T zu erfassende Bereich beispielsweise als $\pm 3\sigma$ -Grenze festzulegen (auch andere Grenzen sind möglich). Praktisch fließen in diese Wahl natürlich die Ergebnisse der Fertigungskontrolle ein, die die auftretenden Fertigungsstreuungen in Relation zu den vorgegebenen Toleranzfeldbreiten aufzeigen und somit eine Aussage über die zu erwartende Einhaltung oder Überschreitung der gewünschten Toleranzgrenzen geben.

Die Verteilung des Schließmaßes M_0 ist wegen des zentralen Grenzwertsatzes nun i. Allg. eine Normalverteilung. Damit gilt bei nichtlinearen Maßketten

$$\sigma_0 = \sqrt{\sum \left(\frac{\partial f}{\partial M_i} \right)^2 \sigma_i^2} = \sqrt{\sum \left(\frac{\partial f}{\partial M_i} \right)^2 \left(\frac{T_i}{2h_i} \right)^2} = \sqrt{\sum \left(\frac{\partial f}{\partial M_i} \right)^2 \left(\frac{c_i T_i}{2} \right)^2} \quad (4.19)$$

bzw. bei linearen Maßketten mit $\left| \frac{\partial f}{\partial M_i} \right| = 1$

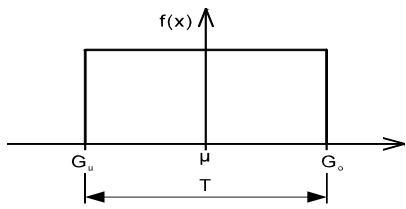
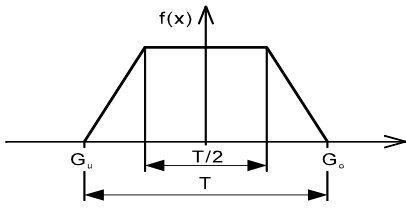
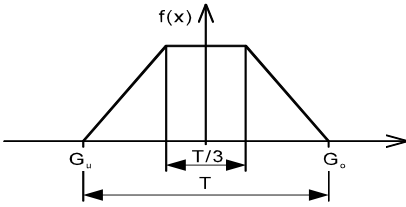
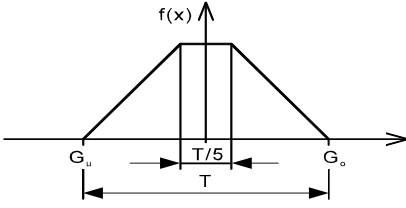
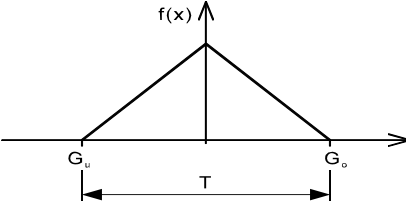
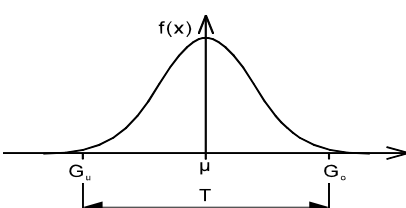
$$\sigma_0 = \sqrt{\sum \sigma_i^2} = \sqrt{\sum \left(\frac{T_i}{2h_i} \right)^2} = \sqrt{\sum \left(\frac{c_i T_i}{2} \right)^2} \quad (4.20)$$

Die Verteilung des Schlussmaßes (Normalverteilung) ist theoretisch nach positiven und negativen Werten hin nicht begrenzt. Praktisch können wegen der Tatsache, dass im Einzelmaß auftretende Toleranzüberschreitungen als Ausschuss aussortiert werden, natürlich maximal Grenzwerte auftreten, wie sie die Extremwertmethode ergibt. Jedoch ist die Wahrscheinlichkeit dafür sehr klein, betrachtet man das Absinken der Normalverteilung über der Entfernung vom Mittelwert.

Ziel der statistischen Methode ist gerade die Ausnutzung dieser geringen Wahrscheinlichkeiten, die letztlich eine zusätzliche Einengung des Toleranzfeldes des Schließmaßes ermöglichen. Dies bedeutet jedoch gleichzeitig das Zulassen einer gewissen Überschreigungsquote und damit die Notwendigkeit einer abschließenden Fertigungskontrolle.

Es ist also festzulegen, welche statistische Sicherheit für das Einhalten einer bestimmten Schließmaßtoleranz notwendig ist. Üblicherweise sind dies $\pm 2\sigma$, $\pm 3\sigma$ oder $\pm 4\sigma$ -Grenzen.

Tafel 4.4 Parameter ausgewählter Verteilungen, nach /11/

Verteilung	Varianz	Spannweite/ Toleranz
Rechteck- verteilung 	$\sigma^2 = \frac{T^2}{12}$	$T = 2 \cdot \sqrt{3} \cdot \sigma = 2 \cdot 1,732 \cdot \sigma$
Trapez- verteilung 1 	$\sigma^2 = \frac{10 \cdot T^2}{192}$	$T = 2 \cdot \sqrt{\frac{48}{10}} \cdot \sigma = 2 \cdot 2,1909 \cdot \sigma$
Trapez- verteilung 2 	$\sigma^2 = \frac{5 \cdot T^2}{108}$	$T = 2 \cdot \sqrt{\frac{27}{5}} \cdot \sigma = 2 \cdot 2,3238 \cdot \sigma$
Trapez- verteilung 3 	$\sigma^2 = \frac{13 \cdot T^2}{300}$	$T = 2 \cdot \sqrt{\frac{75}{13}} \cdot \sigma = 2 \cdot 2,4019 \cdot \sigma$
Dreieck- verteilung 	$\sigma^2 = \frac{T^2}{24}$	$T = 2 \cdot \sqrt{6} \cdot \sigma = 2 \cdot 2,4495 \cdot \sigma$
Normal- verteilung 	$\sigma^2 = \frac{T^2}{36}$	$T = 2 \cdot 3 \cdot \sigma$ (außerhalb der Toleranz liegen 0,27 % aller Teile)

Tafel 4.5 Parameter für ausgewählte Verteilungen, nach /11/

(t Risikofaktor, n Anzahl der Glieder der Maßkette; r und T_S gelten nur bei jeweils gleichen Verteilungen)

Verteilung	h_i	c_i	Reduktionsfaktor	Statistische Schließ- toleranz für $t = 3$
Rechteck- verteilung	1,7321	0,5774	$r_{RV} = \frac{t}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{n}}$	$T_S = 1,7321 \sqrt{\Sigma T_{si}^2}$
Trapezver- teilung 1	2,1909	0,4564	$r_{TV_1} = \frac{\sqrt{10} \cdot t}{\sqrt{48} \cdot \sqrt{n}}$	$T_S = 1,3694 \sqrt{\Sigma T_{si}^2}$
Trapezver- teilung 2	2,3238	0,4303	$r_{TV_2} = \frac{\sqrt{5} \cdot t}{\sqrt{27} \cdot \sqrt{n}}$	$T_S = 1,2910 \sqrt{\Sigma T_{si}^2}$
Trapezver- teilung 3	2,4019	0,4163	$r_{TV_3} = \frac{\sqrt{13} \cdot t}{\sqrt{75} \cdot \sqrt{n}}$	$T_S = 1,2490 \sqrt{\Sigma T_{si}^2}$
Dreieck- verteilung	2,4495	0,4082	$r_{DV} = \frac{2 \cdot t}{2 \cdot \sqrt{3} \cdot \sqrt{n}}$	$T_S = 1,2247 \sqrt{\Sigma T_{si}^2}$
Normal- verteilung	3,0000	0,3333	$r_{KV} = \frac{t}{3 \cdot \sqrt{n}}$	$T_S = 1,0000 \sqrt{\Sigma T_{si}^2}$

Berechnet man die prozentualen Anteile einer Normalverteilung, die außerhalb einer $\pm t\sigma$ -Grenze liegen, so ergeben sich die in Tafel 4.6 angegebenen Werte. Zur besseren Unterscheidung gegenüber den Einzelwerten h_i bei den Verteilungen der Einzelmaße wurde statt h_0 zur Herausstellung des Normalverteilungs-Charakters des Schlussmaßes der Risikofaktor t (Funktion der Student-Verteilung) eingeführt, der abhängig von der gewählten Überschreitungquote p nicht nur die Betrachtung eines

$\pm 3 \sigma_0$ breiten, sondern beliebig breiten Anteils der Normalverteilung mit $\frac{T_0}{2} = t\sigma_0$

erlaubt. Die zugehörige Überschreitungquote p für das Schlussmaß zeigt Tafel 4.6.

Tafel 4.6 Überschreitungs- bzw. Ausfallquote p und Risikofaktor t bei einer Normalverteilung

$p \%$	31,7	10	5	4,55	1	0,5	0,27	0,1
t	1	1,65	1,96	2	2,58	2,81	3	3,37

Mit

$$\sigma_0 = \frac{T_0}{2t} = \sqrt{\Sigma \left(\frac{T_i}{2h_i} \right)^2} \quad (4.21)$$

folgt damit für die Schlusstoleranz für beliebige Verteilungen der Einzelmaße

$$T_{0\,stat} = t \sqrt{\Sigma \left(\frac{T_i}{h_i} \right)^2} = t \sqrt{\Sigma (c_i T_i)^2} \quad (4.22)$$

Die Faktoren h_i bzw. c_i für ausgewählte Verteilungen enthält Tafel 4.5 ($c_i = 1/h_i$).

Sonderfall: Alle Einzelmaße sind **normalverteilt** ($h_i = 3$ und $T_i = 6 \sigma_i$).

Damit folgt für eine Überschreitungsquote $p = 0,27 \%$ ($t = 3$ entsprechend $\pm 3 \sigma$ der Normalverteilung)

$$T_{0\,stat} = \sqrt{\Sigma T_i^2}. \quad (4.23)$$

Praktisches Vorgehen:

Man nutzt die gleiche formalisierte Vorgehensweise wie bei der arithmetischen Toleranzrechnung. Die Tabelle wird jedoch um je eine Spalte zum Verteilungscharakter und zu den Werten h_i oder c_i erweitert.

Statt der Beziehung $T_0 = \Sigma T_i$ gelten jedoch obige Gleichungen für $T_{0\,stat}$.

Bewertung der Ergebnisse:

Vorteile: Die statistische Schlusstoleranz ist häufig um 50 ... 60 % kleiner als die lineare. Eine lineare Schlusstoleranz kann folglich um den Reduktionsfaktor r mit

$$r = \frac{T_{0\,stat}}{T_{0\,arithm}} \quad (4.24)$$

verkleinert, bzw. alle Einzeltoleranzen T_i können um einen Erhöhungsfaktor e mit $e = 1/r$ vergrößert werden. Tafel 4.7 enthält für den Sonderfall, dass alle Einzelmaße gleiche Verteilungen und gleich große Toleranzen besitzen, die Faktoren r und e .

Tafel 4.7 Reduktionsfaktoren r für die Schließtoleranz bzw. Erweiterungsfaktoren e für die Einzeltoleranzen, wenn alle Einzelmaße die gleiche Verteilung mit gleich großen Toleranzen aufweisen, nach /11/

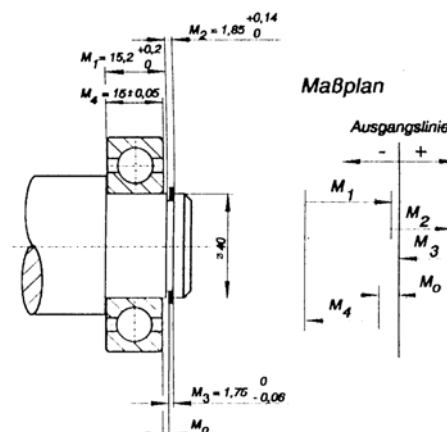
Anzahl Einzelmaße k	2		4		6		8		10	
Reduktions- u. Erweiterungsfaktor	r	e	r	e	r	e	r	e	r	e
Rechteckverteilung			0,866	1,154	0,707	1,414	0,612	1,633	0,547	1,828
Trapezverteilung 1	0,968	1,033	0,684	1,461	0,559	1,788	0,484	2,066	0,433	2,309
Trapezverteilung 2	0,912	1,096	0,645	1,550	0,527	1,897	0,456	2,192	0,408	2,450
Trapezverteilung 3	0,883	1,132	0,624	1,602	0,509	1,964	0,441	2,267	0,394	2,538
Dreieckverteilung	0,866	1,154	0,612	1,633	0,499	2,004	0,433	2,309	0,387	2,583
Normalverteilung	0,707	1,414	0,500	2,000	0,408	2,450	0,353	2,832	0,316	3,164

Nachteile: Die Ergebnisse der statistischen Toleranzrechnung lassen einen kleinen, wählbaren Prozentsatz p an Maßüberschreitungen für das Schlussmaß zu. Bei Montageprozessen bedeutet dies zunächst einen zusätzlichen Prüfschritt, jedoch nicht unbedingt das Auftreten von Ausschuss. Im Allgemeinen wird bei erneuter Montage mit anderer Einzelteilekombination die Funktion trotzdem realisierbar sein.

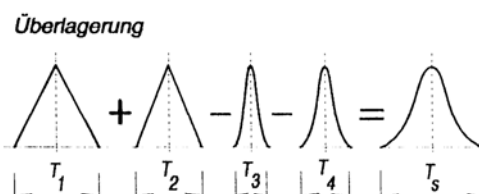
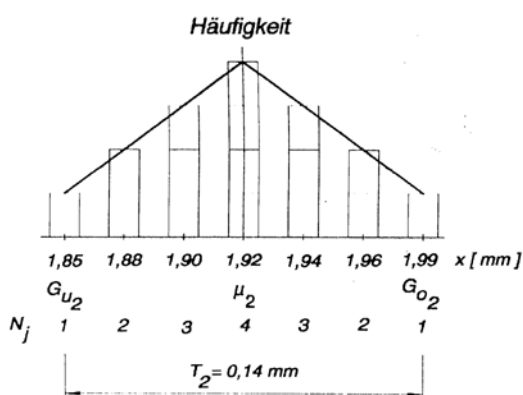
Die statistische Methode setzt vielgliedrige Ketten ($m \geq 4$) und hohe Stückzahlen der Komponenten ($n \geq 50$) voraus. Die Fertigungsstreuungen müssen analysiert oder zumindest mit ausreichender Sicherheit abschätzbar sein. Die Berechnungsmethode ist allerdings wenig anschaulich und relativ aufwendig, insbesondere wenn man die gewonnenen Reserven zur Toleranzerweiterung nutzen möchte.

Beispiel 3: Das Rechenbeispiel aus Abschnitt 4.3 soll nun statistisch betrachtet werden, Abbildung 4.8.

Montagesituation:



Dreiecksverteilung der
Einstichbreite:



Normalverteilung
der Breite
der Sicherungsringe:

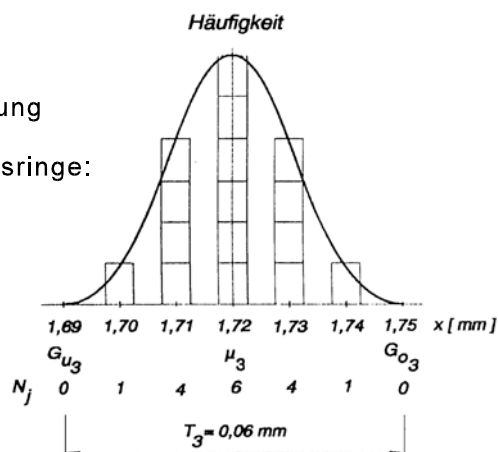


Abb. 4.8: Lagersitz bei statistischer Toleranzrechnung, aus [11/

Zu den Schritten 1 bis 3 siehe zunächst nochmals Abschnitt 4.3. Für die Tabelle und die Gleichungen gilt nun neu:

4. Tabelle

i	M _i	N _i	K _i	E _{ci}	T _i	Verteilung	h _i	t
0	?	?	-1	?	?	Normal		3,0
1	15,2 ^{+0,2}	15,20	+1	+0,10	0,20	Dreieck	2,4495	
2	1,85 ^{+0,14}	1,85	+1	+0,07	0,14	Dreieck	2,4495	
3	1,75 ^{-0,06}	1,75	-1	-0,03	0,06	Normal	3,0	
4	15,0 ± 0,05	15,00	-1	0	0,10	Normal	3,0	

5. Gleichungen

$$N_0 = \frac{1}{k_0} \sum_{i=1}^4 k_i N_i = -\frac{1}{-1} (1 \cdot 15,2 + 1 \cdot 1,85 - 1 \cdot 1,75 - 1 \cdot 15,0) = 0,3$$

$$E_{C0} = -\frac{1}{k_0} \sum_{i=1}^4 k_i E_{ci} = -\frac{1}{-1} (1 \cdot 0,1 + 1 \cdot 0,07 - 1 \cdot (-0,03) - 0) = 0,2$$

$$T_{0stat} = t \sqrt{\sum \left(\frac{T_i}{h_i} \right)^2} = 3,0 \sqrt{\left(\frac{0,2}{2,4495} \right)^2 + \left(\frac{0,14}{2,4495} \right)^2 + \left(\frac{0,06}{3} \right)^2 + \left(\frac{0,1}{3} \right)^2}$$

$$T_{0stat} = 0,32$$

$$M_{0stat} = N_0 + E_{C0} \pm \frac{T_{0stat}}{2} = 0,3 + 0,2 \pm 0,16 = 0,5 \pm 0,16$$

Die dabei angenommenen Verteilungen sind für die Maße 1 und 2 Dreieckverteilungen, für die Maße 3 und 4 Normalverteilungen. Dreieckverteilungen wurden bei den manuell spanend zu fertigenden Maßen gewählt, Normalverteilungen bei der Wälzlager- und Sicherungsringdicke, da diese Teile als Normteile in sehr großen Stückzahlen gefertigt werden.

Die statistisch ermittelte Schließtoleranz liegt hier bei 64 % derjenigen nach arithmetischer Toleranzrechnung. Diese Einsparung könnte beispielsweise auf die Einzeltoleranzen aufgeteilt werden, um diese zu entfeinern und damit Kosten zu reduzieren. Da man dabei die Normteile nicht beeinflussen kann, kommt hier nur die Erweiterung der Maße 1 und 2 in Frage.

Führt man eine entsprechende Rechnung mit $e = 1/r$ aus, folgt beispielsweise für T_1 statt 0,2 mm dann 0,32 mm und für T_2 statt 0,14 mm dann 0,23 mm bei annähernd gleichem Erweiterungsfaktor.

Abb. 4.9 zeigt für o. g. statistisches Rechenbeispiel eine beispielhafte Simulation von während der Vorlesung von Studierenden willkürlich zusammengesetzten Maßen (Baugruppen) und die dabei real erzielte Häufigkeitsverteilung. Bei nur 16 Baugruppen bildet sich die gewünschte Normalverteilung noch nicht sauber aus. Deshalb wurde auch eine Mindeststückzahl von 50 empfohlen.

Simulation einer Statistischen Toleranzrechnung

Ergebnisse

Baugruppe	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
+ M ₁	15,30	15,27	15,20	15,33	15,40	15,33	15,36	15,30	15,30	15,24	15,36	15,33	15,27	15,27	15,24	15,30
+ M ₂	1,94	1,99	1,92	1,96	1,92	1,90	1,90	1,88	1,88	1,96	1,94	1,92	1,92	1,90	1,85	1,94
? M ₃	1,71	1,73	1,73	1,72	1,72	1,71	1,71	1,73	1,74	1,71	1,72	1,70	1,72	1,72	1,72	1,73
? M ₄	15,00	14,99	15,00	15,00	14,99	15,00	15,01	15,01	14,99	15,03	14,99	15,01	14,97	15,01	15,00	15,00
= Schließmaß M ₀	0,53	0,54	0,39	0,57	0,61	0,52	0,54	0,44	0,45	0,46	0,59	0,54	0,50	0,44	0,37	0,51

Größtmaß

$$M_{0 \max} = 0,61$$

Kleinstmaß

$$M_{0 \min} = 0,37$$

Schließtoleranz

$$T_0 = M_{0 \max} - M_{0 \min} = 0,24$$

Mittelwert

$$\bar{x} = \frac{1}{i} \sum M_{0i} = 0,5000$$

Standardabweichung

$$s = \sqrt{\frac{1}{i} \sum (M_{0i} - \bar{x})^2} = 0,0669$$

$$3s = 0,2007$$

Häufigkeitsverteilung

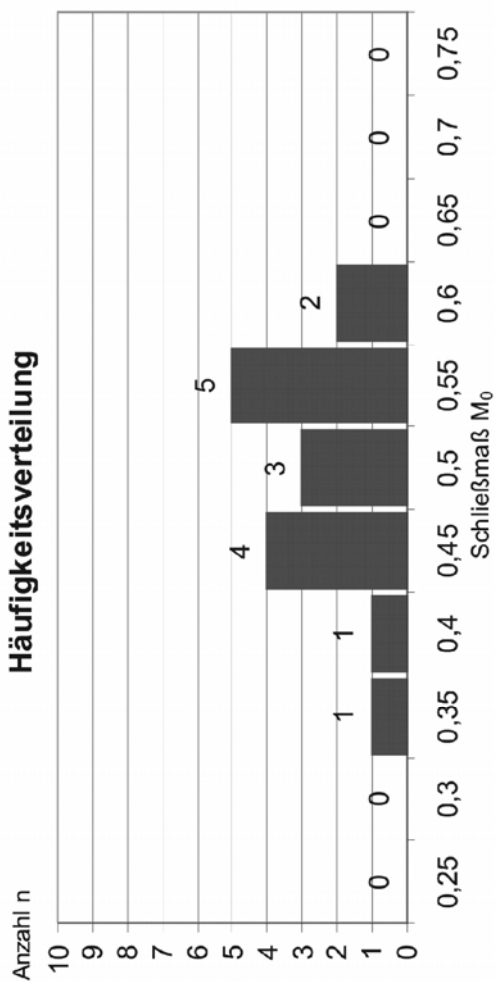


Abb. 4.9 Beispielhafte Simulation während der Vorlesung durch Studierende

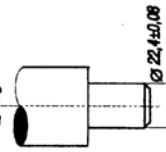
4.5 Ermittlung statistischer Merkmale im Fertigungsprozess

Grundlage der statistischen Toleranzrechnung sind die ständige Überwachung und statistische Analyse des Fertigungsprozesses, um Aussagen über Verteilungen der Istmaße zu erhalten. Durch statistische Prozesskontrolle, die heute in Großserien und Massenfertigungen selbstverständlich ist, erfolgt eine solche ständige Analyse der Fertigung. Ziel ist hierbei zunächst die Überwachung und Regelung der Qualität der Fertigung, also das rechtzeitige Eingreifen in die Fertigung und der Nachweis der Stabilität der Fertigung gegenüber dem Kunden. Die Verteilungen und deren Kennwerte werden jedoch dabei ohnehin ermittelt, so dass die Werte für statistische Toleranzrechnungen auch verfügbar sind.

Wellenzapfen - Außendurchmesser $22,4 \pm 0,08$ mm

Meßwerte (von 50 Wellen)

$G_U = 22,32$
 $G_O = 22,48$



(Angegeben sind nur die Nachkommastellen)

Nr	Wert	Nr	Wert	Nr	Wert	Nr	Wert	Nr	Wert	Nr	Wert	Nr	Wert	Nr	Wert	Nr	Wert	Nr	Wert
1	48	6	41	11	43	16	43	21	40	26	41	31	39	36	45	41	37	46	42
2	37	7	42	12	42	17	32	22	38	27	38	32	41	37	42	42	43	47	44
3	38	8	36	13	50*	18	40	23	41	28	43	33	49*	38	36	43	45	48	40
4	45	9	40	14	40	19	39	24	43	29	35	34	41	39	38	44	41	49	38
5	43	10	35	15	39	20	41	25	46	30	42	35	44	40	40	45	39	50	43

Ergebnis: angenommen 48
verworfen * 2

Strichliste		Σ	%	Häufigkeit
Klassen				
1	22,32 - 22,34	I	1	2
2	22,34 - 22,36	II	2	4
3	22,36 - 22,38	III	4	8
4	22,38 - 22,40	IIII	9	18
5	22,40 - 22,42	IIIIII	14	28
6	22,42 - 22,44	IIIIIIII	11	22
7	22,44 - 22,46	IIII	5	10
8	22,46 - 22,48	II	2	4

4 % verworfen

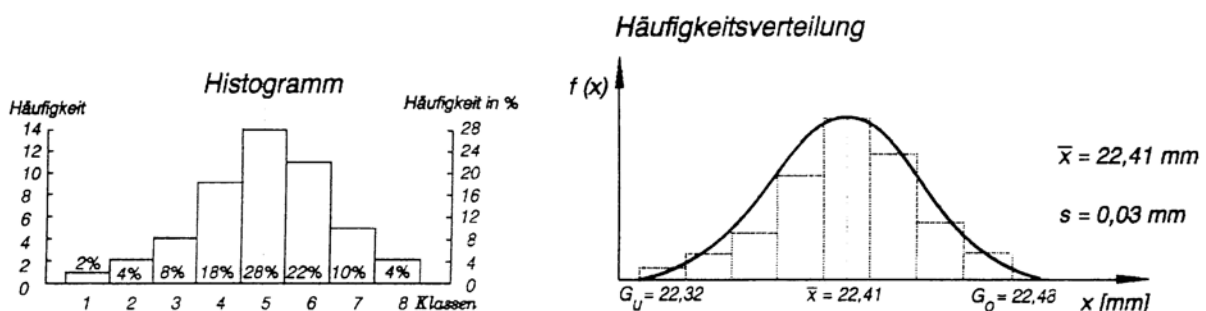


Abb. 4.10: Ermittlung von Verteilungen im Fertigungsprozess, hier am Beispiel des Drehens eines Wellenzapfens, aus /11/

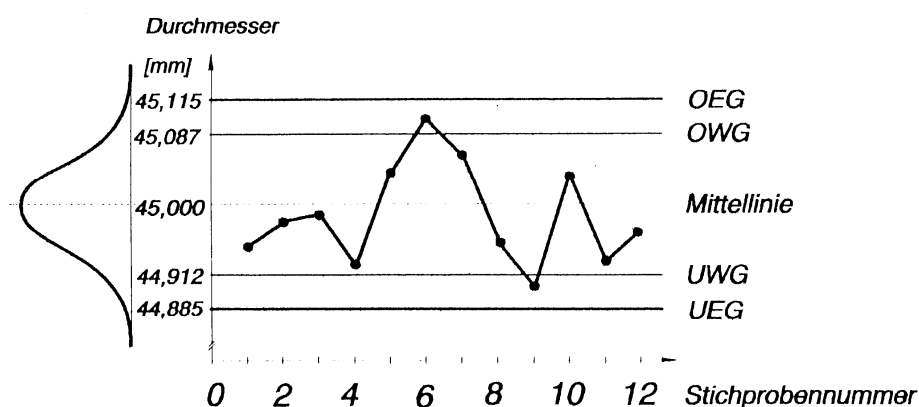
Das Prinzip besteht zunächst darin, alle auftretenden Istmaße zu erfassen, in Klassen festzulegender Breite einzuordnen und so die Häufigkeit des Auftretens bestimmter Maßklassen zu ermitteln. Daraus lässt sich dann ein Histogramm zeichnen, aus dem letztlich eine Verteilungsfunktion ermittelt wird, Abb. 4.10.

Dies erfolgt heute nicht mehr von Hand, wie dargestellt, sondern über spezielle SPC-Rechner, die neben der Messwertaufnahme und -speicherung auch die statistische

Weiterverarbeitung übernehmen, Abb. 4.11. Man spricht dabei auch von sogenannten Qualitätsregelkarten, wobei wegen der Fülle der Messwerte meist nicht Einzelmesswerte sondern bereits Mittelwerte $\bar{x}$ genutzt werden, über die dann erneut gemittelt wird (XQQ, d. h. x quer quer).

Prinzip der Qualitätsregelkarte

Mittelwert - QRK



Datenausgabe eines SPC-Messwerterfassungssystems (Fa. Promess)

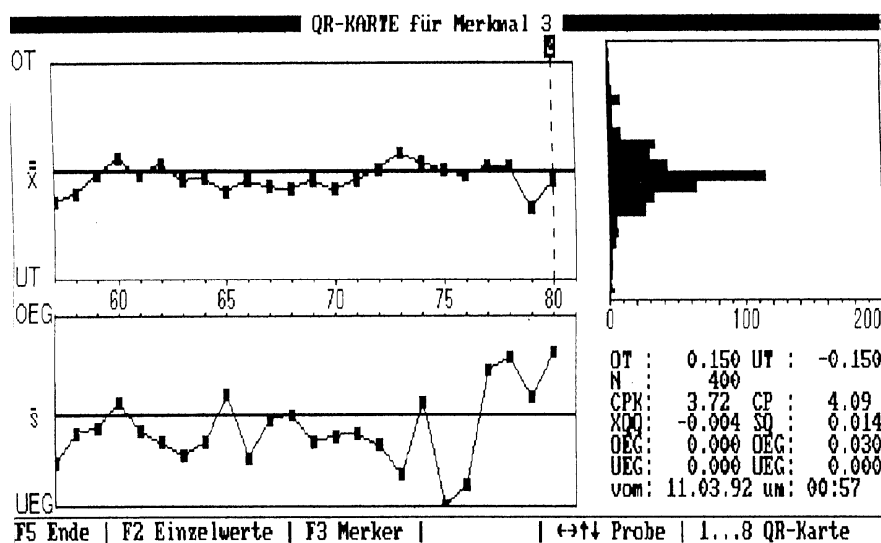


Abb. 4.11: Ermittlung von Messwerten mittels SPC-Messwerterfassungssystemen, aus /11/

Kenngrößen für die Stabilität des Fertigungsprozesses sind beispielsweise

- die Prozessfähigkeit $C_p = \frac{T}{6\hat{s}} \geq 1$, (4.25)

die zum Ausdruck bringt, ob die 6σ - bzw. $6s$ -Grenze kleiner als die Toleranzfeldbreite T ist. Dann ist der Prozess **fähig**, in 99,73 % der Maße die Toleranz einzuhalten bzw. liefert 0,27 % Überschreitungsquote.

- und der Prozessfähigkeitsindex
$$C_{pk} = \frac{\min(G - \bar{\bar{x}}, \bar{\bar{x}} - K)}{3\hat{\sigma}} \geq 1, \quad (4.26)$$

der zusätzlich die $\pm 3\sigma$ - bzw. $\pm 3s$ -Grenze an den Mittelwert der Messwerte bindet, um ein Wegdriften zu erkennen, Abb. 4.12.

Der Trend beispielsweise in der Automobilindustrie geht zu $C_{pk} = 1,67$ bzw. der $\pm 5\sigma$ -Grenze für die Einhaltung der Parameter; d. h. 99,99994 % aller Istmaße liegen innerhalb des Toleranzbandes und müssen nicht als Ausschuss oder Nacharbeit aussortiert werden.

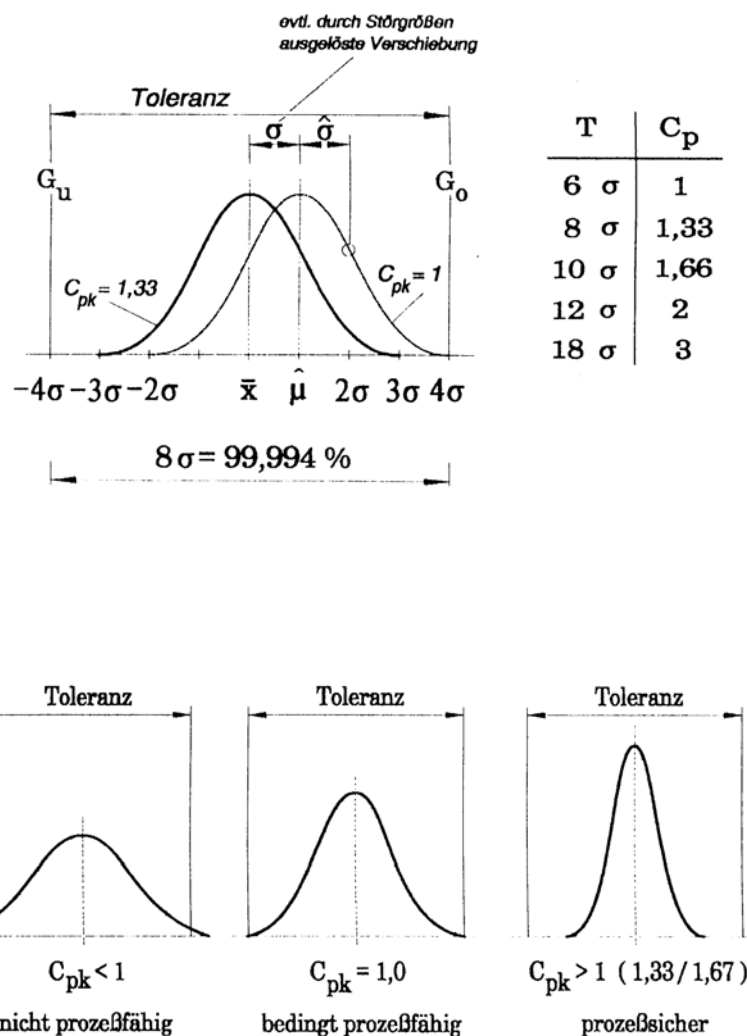


Abb. 4.12: Prozessfähigkeit und Prozessfähigkeitsindex, aus /11/

Aus der Lage der Verteilung innerhalb der Toleranzbreite lassen sich Schwächen, aber auch Reserven in der Tolerierung erkennen. So sind beispielsweise Prozesse mit einem $C_{pk} = 1$ recht kritisch und sollten, falls nicht durch Maßnahmen in der Fertigung zu verbessern, durch Toleranzerweiterung entschärft werden. Reserven zur Toleranzentfeinerung beispielsweise für kritische Fälle bieten dagegen Prozesse mit hohen C_{pk} -Werten. Hier ist also eine Rückkopplung aus der Fertigung in die Konstruktion angebracht, um nicht nur Toleranzen zu fordern, sondern vielmehr auch das in der Fertigung Machbare besser zu verteilen.

5 Sicherheitstechnik im Gerätebau

5.1 Einführung

Der Begriff Sicherheit ist umgangssprachlich sehr weit gefasst. Man spricht von sicher im Sinne von gefahrenfrei, aber auch im Sinne von zuverlässig. Die Begriffe seien deshalb zunächst abgegrenzt.

Betriebssicherheit: Vermeidung von Schäden (materiellen Schäden) am Gerät selbst und in unmittelbarer Umgebung (Betriebsstätte) während des Betriebes.

Arbeitssicherheit: Vermeidung von Gefährdungen des Menschen bei Benutzung von Geräten.

Umweltsicherheit: Vermeidung von Schädigungen der Umwelt durch den Betrieb des Gerätes.

Zuverlässigkeit: Fähigkeit des Gerätes, innerhalb gegebener Grenzen für Belastung, Umgebungsbedingungen usw. während einer bestimmten Zeit den Verwendungszweck erfüllen zu können, ausgedrückt als Wahrscheinlichkeit dafür, dass die Funktion gewährleistet bleibt.

Insofern ist die Zuverlässigkeit eines Gerätes bzw. von Teilen des Gerätes (z. B. von Schutzeinrichtungen) eine wichtige Voraussetzung für die Sicherheit des Gerätes, aber keine hinreichende Bedingung, Abb. 5.1. Hinsichtlich der Sicherheitstechnik sollen hier vorwiegend Beispiele aus dem Bereich der Arbeits- und Betriebssicherheit, also dem Schutz von Bediener und Gerät, behandelt werden.

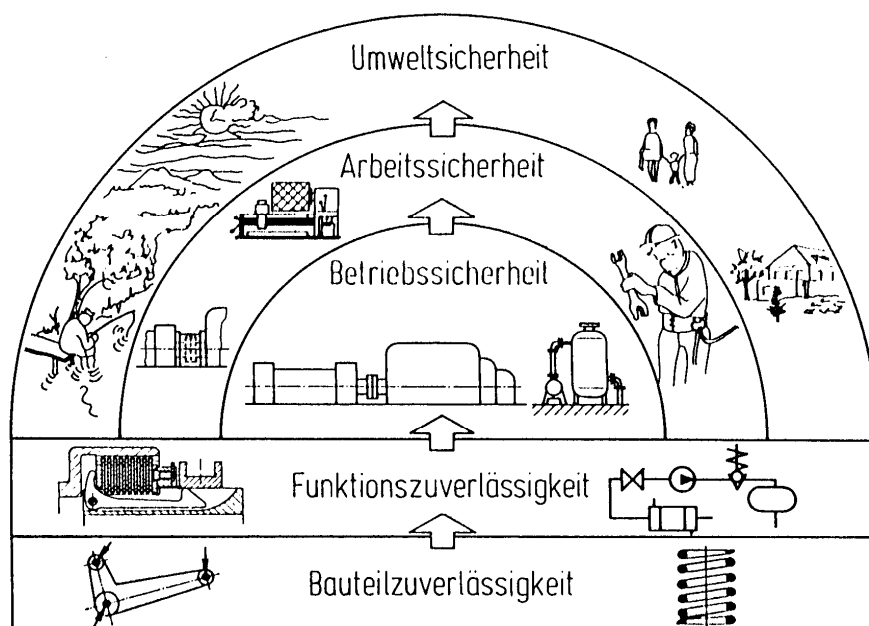


Abb. 5.1: Zusammenhang zwischen Zuverlässigkeit und Sicherheit, aus [3/]

5.2 Grundsätzliches Herangehen in der Sicherheitstechnik

Sicherheit ist stets relativ, d. h. eingebunden in den aktuellen Stand der Technik und auch in Abhängigkeit der gesellschaftlichen Akzeptanz zu sehen. Man bedenke nur den hohen Sicherheitsstand moderner Kraftfahrzeuge und die trotzdem erschreckend hohe Zahl von Verkehrstoten (3.606 im Jahr 2012).

Sicherheit kann deshalb nicht als Freisein von gefährlichen Zuständen definiert werden, sondern

Sicherheit bedeutet, dass das Risiko für einen Schaden/eine Gefährdung/einen schwerwiegenden Fehler kleiner als ein akzeptierbares Grenzkrisiko bleibt.

Wobei dieses

Grenzkrisiko als größtes noch vertretbares Risiko für das Auftreten eines Schadens / Fehlers /einer Gefährdung jeweils in Abhängigkeit vom Stand der Technik, dem gesellschaftlichen Umfeld, aber auch der Häufigkeit des Eintretens und des Schadensumfanges beim Eintreffen zu definieren ist.

Die **grundsätzliche Zielstellung** in der Sicherheitstechnik besteht darin, technische Erzeugnisse so zu realisieren, dass sie bei ordnungsgemäßer Aufstellung und bei bestimmungsgemäßer Verwendung keine Gefahren / keine gefährlichen Zustände verursachen bzw. das Risiko dafür kleiner einem zu definierenden Grenzkrisiko bleibt. Wie ein gefährlicher Zustand zu definieren ist, hängt vom Stand der Technik und der gesellschaftlichen Akzeptanz ab; beispielsweise Feuer, Übertemperatur, hohe Schwingungs- und Geräuschbelastung, Spannungen an berührbaren Teilen, Ausfall von sicherheitsrelevanten Teilen und vieles mehr können einen gefährlichen Zustand kennzeichnen. Häufig wird in diesem Zusammenhang auch vom Fehler als dem Ereignis gesprochen, das zu einem Schaden / zu einer Gefährdung führt.

Hinsichtlich der **Herangehensweise** dabei sind Prioritäten zu setzen:

1. Priorität: Der gefährliche Zustand kann prinzipiell unter den eingegrenzten Aufstellungs- und Verwendungsbedingungen am Gerät nicht auftreten. Meist ist eine solche vollständige Sicherheit jedoch weder technisch realisierbar, noch wirtschaftlich vertretbar.

2. Priorität: Im „einfachen Fehlerfall“ darf noch kein gefährlicher Zustand auftreten, es ist also noch mindestens eine zweite Sicherheit vorhanden, wobei beim Rückfall auf eine, dann nur noch „einfache“ Sicherheit

- a) das Gerät selbständig in einen solchen Zustand fallen muss,
- oder b) das Gerät den Rückfall anzeigen muss,
- oder c) der Fehler innerhalb einer planmäßigen Wartung erkannt werden muss.

Sind noch zwei weitere Sicherheiten vorhanden, greifen diese Maßnahmen entsprechend später.

Der erste (einfache) Fehler führt also noch nicht zu einem gefährlichen Zustand, es muss jedoch auf den Rückfall auf einfache Sicherheit reagiert werden. Man geht dabei davon aus, dass die Wahrscheinlichkeit dafür, dass zwei Fehler gleichzeitig unabhängig voneinander auftreten, sehr gering ist. Folgefehler sind allerdings dem ersten Fehlerfall zuzuordnen.

Sicherheit ist nur über bewusstes Handeln zu erzielen, dies erfordert beispielsweise fehlerhafte Geräte außer Betrieb zu setzen, Bedienungsanleitungen zu beachten, Sicherheitseinrichtungen (z. B. auch elektrische Schutzwirkungen) regelmäßig zu überprüfen und zu warten.

5.3 Grundsätzliche Methoden der Sicherheitstechnik

Man kann drei Methoden der Sicherheitstechnik unterscheiden, die jedoch in ihrer Wertigkeit und ihrem Nutzen sehr verschieden sind (3-Stufen-Methode). Dabei ist auch eine Kombination der drei Methoden für verschiedene Gefährdungen möglich.

I Unmittelbare Sicherheitstechnik

Das Gerät ist im Rahmen der gesetzten Anwendungsgrenzen vollständig sicher.

II Mittelbare Sicherheitstechnik

Vom Gerät gehen Gefährdungen aus. Die Sicherheit wird durch zusätzliche Hilfsmittel in Form von Schutzeinrichtungen/Schutzsystemen mit mindestens zwei Sicherheiten realisiert.

III Hinweisende Sicherheitstechnik

Die Gefahrenpotentiale bzw. Gefährdungsbereiche werden nur benannt und kenntlich gemacht sowie Bedingungen für eine gefahrlose Nutzung angegeben (z. B.: Achtung Laser, Schutzbrille tragen!). Hierzu zählen auch Vorschriften für Bedienung, Lagerung, Transport und Aufstellung.

Wenngleich diese hinweisende Sicherheitstechnik als alleinige Maßnahme sehr kritisch zu bewerten ist, wird sie insbesondere dort Anwendung als alleinige Maßnahme finden, wo nur eingewiesenes, mit den Gefahren vertrautes Fachpersonal Zugang zu bestimmten Gefahrenquellen hat. Als zusätzliche Maßnahme ist sie natürlich in Bedienungsanleitungen zum Hinweis auf mögliche Gefährdungen weit verbreitet.

Bei der Lösung technischer Aufgaben, der Entwicklung von Geräten treffen viele einschränkende, sich oft auch widersprechende Forderungen aufeinander. Dies trifft natürlich auch auf die Sicherheitstechnik zu. Hohe Sicherheitsanforderungen führen meist zu komplizierten und teuren Systemen, andererseits sind Havarien, Unfälle und Verletzungen volkswirtschaftlich wesentlich kostspieliger.

Ausgangspunkt bei der Realisierung von sicheren Systemen ist zunächst das Erkennen von Gefahrenpotentialen (Tafel 5.1) und somit eine Risikobeurteilung, vgl. a. das zusätzlich verfügbar gemachte Material Lehrmodul 5, Schmauder TU Dresden.

Tafel 5.1 Typische Gefahrenquellen der verschiedenen Energiearten

Energieart	Gefahrenquelle
Mechanisch	Relativbewegung Mensch - Maschine, mechanische Schwingung, Staub
Akustisch	Lärm, Geräusche
Hydraulisch	Flüssigkeitsstrahlen
Pneumatisch	Gasstrahlen, Druckwellen
Elektrisch	Stromdurchgang durch Körper, elektrostatische Entladungen
Optisch	Blendung, Ultraviolettstrahlung, Lichtbogen
Thermisch	Heiße/kalte Teile, Strahlung, Entflammung
Chemisch	Säuren, Laugen, Gifte, Gase, Dämpfe
Radioaktiv	Kernstrahlung, Röntgenstrahlung

Eine **Risikobeurteilung** erfordert folgende Schritte:

- Festlegung der Grenzen und der bestimmungsgemäßen Verwendung des Gerätes / der Maschine
- Identifizierung von Gefährdungen und der zugehörigen Gefährdungssituationen
- Risikoeinschätzung für jede identifizierte Gefährdung und Gefährdungssituation
- Risikobewertung und Treffen von Entscheidungen über die Notwendigkeit zur Risikominderung.

Anschließend folgt die **Risikominderung** durch:

- Inhärent sichere Konstruktion (Unmittelbare Sicherheitstechnik)
- Technische und ergänzende Schutzmaßnahmen (Mittelbare Sicherheitstechnik)
- Benutzerinformationen (Hinweisende Sicherheitstechnik)

5.3.1 Unmittelbare Sicherheitstechnik

Unter unmittelbarer Sicherheitstechnik (inhärent sichere Konstruktion) versteht man zunächst

1. Das Prinzip des „Sicheren Bestehens“ (Safe-Life-Verhalten)

Alle Bauteile sind so beschaffen und ihr Zusammenwirken erfolgt so, dass alle möglichen Einsatzfälle im Rahmen der Anwendungsgrenzen und in der vorgesehenen Einsatzzeit ohne Schaden/Gefährdung ablaufen. Eine solche Gestaltung wird zunächst immer angestrebt. Sie setzt jedoch beispielsweise voraus,

- dass alle zu erwartenden Belastungen und Einsatzbedingungen genügend genau bekannt sind,
- ausreichend genaue Auslegungs- und Berechnungsmethoden existieren, die obige Belastungen berücksichtigen,
- die Werkstoffkennwerte für die genutzten Materialien exakt bekannt sind und im Fertigungsprozess auch erreicht werden,
- in der Fertigung gleichbleibende Qualität gesichert ist,
- fehlerhafte Teile und Baugruppen durch Eingangs- und Endkontrollen erkannt werden.

Es ist naheliegend, dass der Stand der Technik der allgemeinen Anwendung dieses Prinzips noch nicht immer gerecht werden kann. Ist eine aus sich heraus sichere Gestaltung nicht oder ökonomisch nicht vertretbar zu erreichen, lassen sich Gefährdungen durch entsprechende Gestaltung jedoch u. U. trotzdem unmittelbar vermeiden.

2. Das Prinzip des „Beschränkten Versagens“ (Fail-Safe-Verhalten)

Der offensichtlich nicht vollständig zu vermeidende Fehler soll zu keinem gefährlichen Zustand führen können. Voraussetzung ist zunächst die Kenntnis des zu erwartenden Schadens, der Schadensstelle und des Schadensverlaufes sowie der daraus resultierenden Wirkungen. Durch entsprechende konstruktive Gestaltung ist nun sicherzustellen, dass die Funktion, gegebenenfalls eingeschränkt, auch im Fehlerfall aufrechterhalten bleibt bzw. noch mindestens so lange ermöglicht ist, bis das Gerät gefahrlos außer Betrieb gesetzt wird. Der Fehlerfall muss natürlich angezeigt oder zumindest deutlich erkennbar sein.

Abbildung 5.2 zeigt eine solche Gestaltung (nach [3]) am Beispiel eines sphärischen Gummigelenkes in einer elastischen Kupplung. Ein erster Anriss (Zustand 1) beeinträchtigt die Funktion noch nicht, erst nach weiteren Größenordnungen von Lastspielzahlen führt der Rissfortschritt zum deutlichen Absinken der Federsteife (Zustand 2), was vom Nutzer durch Absinken der kritischen Drehzahl erkannt würde. Selbst ein völliger Abriss (3) kann keinen gefährlichen Zustand hervorrufen.

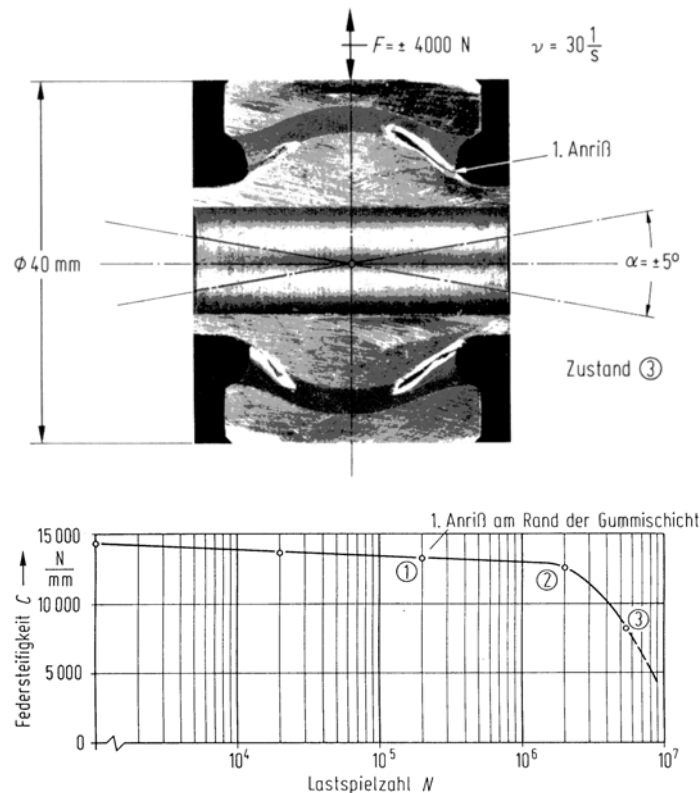


Abb. 5.2: Fail-Safe-Verhalten eines sphärischen Gummigelenkes, aus [3/]

3. Das Prinzip der „Redundanten Anordnung“

Eine Mehrfachanordnung gefährdeter Bauteile, die die gleiche Funktion ständig parallel mit übernehmen (heiße oder aktive Redundanz) oder nur bei Ausfall des primären Elementes aktiv werden (kalte oder passive Redundanz), bewirkt insgesamt nach außen hin ebenfalls eine unmittelbare Sicherheit. Der Ausfall eines primären Bauelementes/Systems darf dabei von sich aus natürlich keine Gefährdung bewirken, sondern nur in Folge des Ausfallens seiner Funktion, die dann jedoch sekundär aufrecht erhalten wird.

Redundante Anordnungen vervielfachen natürlich die Kosten, werden also nicht bei allen sicherheitsrelevanten Bauteilen und Systemen zum Einsatz kommen können. Beispiele sind zweifache oder dreifache Bremsleuchten am KFZ oder auch Zweikreisbremssysteme.

5.3.2 Mittelbare Sicherheitstechnik

Die mittelbare Sicherheitstechnik nutzt

Schutzsysteme, die eine Gefährdung zunächst sensorisch erfassen und danach eine Schutzreaktion ausüben, oder

Schutzeinrichtungen, die ohne eine Schutzreaktion sofort wirksam sind (z. B. Verriegelung einer Zentrifuge als Einschaltenschutz, Überdruckventile im Schnellkochtopf, Verkleidungen, ...).

In der Literatur wird die Gestaltung von Schutzeinrichtungen und -systemen sehr breit behandelt, hier seien einige wesentliche Grundforderungen an die Gestaltung von Schutztechnik aufgelistet.

Grundforderungen an Schutztechnik:

- zuverlässig wirkend,
(erprobtes Wirkprinzip mit erprobten Komponenten)
- zwangsläufig wirkend,
Schutzeinrichtung muss sofort, während und bis zum Aufheben des gefährlichen Zustandes bestehen, (Abb. 5.3)
- nicht umgehbar,
(willkürliche und unwillkürliche Veränderungen sollen nicht möglich sein)
- Schutzeinrichtungen selbst dürfen keine Gefährdung bewirken.
- Ruhestromprinzip nutzen,
Schutzsysteme sollen nicht nur im Gefahrenfall ansprechen, sondern auch dann, wenn ein Fehler in ihnen selbst auftritt. Dazu dient das Ruhestromprinzip: Energie liegt im Ruhezustand an/Strom fließt - gespeicherte Energie wird im Havariefall zur Reaktion genutzt.
- Bistabilität vorsehen (vgl. auch Abb. 5.3),
(eindeutiges Schaltverhalten ohne indifferente Zwischenzustände realisieren)
- Wiederanlaufsperr vorsehen,
(neue geordnete Inbetriebnahme soll erzwungen werden, indem System nicht ohne äußere Reaktion wieder anlauft)
- Schutzorgane selbst müssen hinsichtlich der Schutzwirkung prüfbar sein, die Prüfung darf aber zu keiner Gefährdung führen.
- Wirkung von Resonanzen, von thermischen Ausdehnungen, von Eigenspannungen, von Verschleiß, Abrieb, Korrosion beachten.
- Fehlbedienungen durch ergonomische Gestaltung vermindern,
- Anforderungen während Transport, Aufstellen und Service vorhersehen,
(z. B. Kranösen vorsehen, Gewichtskennzeichnung an schweren abschraubbaren Teilen)
- Risiken bei nicht bestimmungsgemäßem Gebrauch mindestens durch Hinweis in Bedienungsanleitung aufzeigen.

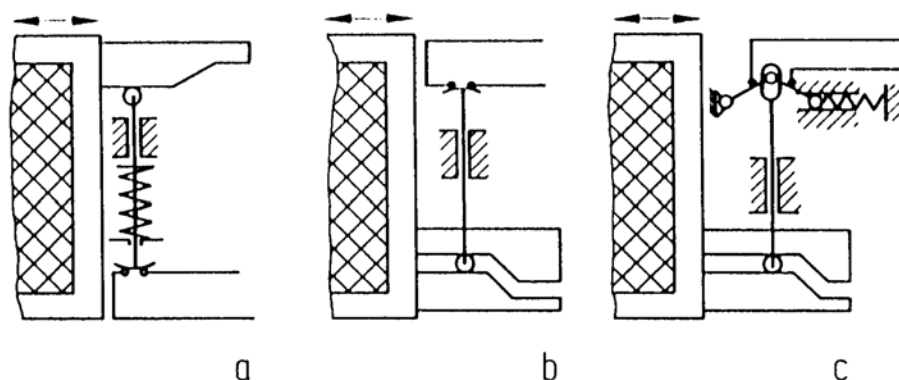


Abb. 5.3: Gestaltung eines Grenztasters an einem Schutzgitter, aus [3]
a) nicht zwangsläufig wirkend (nur kraftschlüssige Führung)
b) Zwangsläufigkeit durch Formschluss gesichert,
c) Zwangsläufigkeit durch Formschluss kombiniert mit bistabilem Verhalten

5.4 Methoden zur Erkennung von Gefährdungspotentialen

Mögliche Gefährdungspotentiale resultieren aus

- konstruktiven Fehlern
- Fertigungs- und Montage-Fehlern
- Einflüssen innerer und äußerer Störgrößen (Toleranzen, Temperatur, Klima)
- unerwarteten Eingangsgrößen (Belastungen, Stößen, Schwingungen)

Ein wesentliches Problem stellt zunächst das Erkennen der möglichen Gefährdungspotentiale dar. Hilfreich sind hier formalisierte Vorgehensweisen, um einerseits möglichst alle Gefährdungspotentiale zu erfassen, andererseits aber diese hinsichtlich ihrer Wirkungen und der Einflussmöglichkeiten zu bewerten.

Fehlermöglichkeit- und Einflussanalyse (FMEA)

An erster Stelle ist hier die FMEA zu nennen, die eine formalisierte und systematische Fehlererfassung ermöglicht, daran die Analyse der Fehlerursache und -auswirkungen anschließt und dies durch Risiko-Prioritätszahlen auch quantitativ bewertet, Tafel 5.2. Unterschieden wird dabei meist zwischen einer Konstruktions-FMEA, die konstruktive Lösungen bewertet und einer Prozess-FMEA für den Fertigungsablauf.

Fehlerbaumanalyse / Gefährdungsbaumanalyse

Basis der qualitativen Gefährdungsanalyse mit Hilfe des Fehler- oder Gefährdungsbaumes ist die vollständige Funktionsstruktur aus der Konzeptphase einschließlich der konstruktiven Umsetzung aus der Entwurfsphase. Alle Funktionen werden nacheinander negiert und Gründe für die mögliche Nichterfüllung gesucht, Folgen analysiert und Maßnahmen zur Verbesserung abgeleitet. Andere Methoden nutzen auch Checklisten, die abgearbeitet werden, um Fehler zu vermeiden.

Tafel 5.2 Beispiel eines FMEA-Formblattes, aus /3/

 Fehler-Möglichkeiten und Einfluß-Analyse		Konstruktions-FMEA ☒ Prozeß-FMEA ☐		Name/Abteilung/Lieferant/Telefon Institut für Maschinenkonstruktion - Konstruktionstechnik		Teil-Benennung Kurvenzylinder						
TU-Berlin		Erstellt durch (Name/Abt./Telefon) Hr. Wende										
Fehler-Ort/Merkmal	Fehler-Art	Fehler-Auswirkung	Fehler-Ursache	Derzeitiger Zustand			Verbesserter Zustand					
				Kontroll-Maßnahmen	A	B		E	RPZ			
Welle	Bruch der Welle	Totalausfall	Belastungsart nicht korrekt erkannt		3	10	10	300	Auftretende Belastung durch geeigneten Berechnungsansatz erfassen	1	10	100
Lagerung	Spiel in der Lageranordnung	unexakte Funktionserfüllung	Lockern der Wellenmutter im Bertrieb (Seißbeanspruchung)		3	8	10	240	Zusätzliche Sicherung der Wellenmutter	1	8	80
	Dichtung durchlässig	frühzeitiger Lagerverschleiß	Dichtung genügt nicht den Anforderungen		2	5	10	100	Radialwellendichtring nach DIN verwenden	1	5	50
Welle-Nabe-Verbindung (Flanschschaubverbindung)	Reibschluß nicht ausreichend	Querbeanspruchung der Schrauben	Auslegungsfehler (Nichtberücksichtigung der Reibwerte)		2	6	10	120	Ausreichenden Sicherheitsbewert berücksichtigen	1	6	60
	Passungsgenauigkeit	Fügen nicht möglich bzw. Zentrierung nicht ausreichend	Konstruktionsfehler		2	5	1	10	Toleranzrechnung überprüfen	1	5	5
Kurvenzylinder	Bruch der Schrauben	Totalausfall	Belastungsart nicht korrekt erkannt		3	10	10	300	Geeigneten Berechnungsansatz für den vorliegenden Belastungsfall verwenden	1	10	100
	Flächenpressung zu groß	Pittings (Grübchen) in der Lauffläche	zu hohe Flächenpressung durch den Hebel		7	8	10	560	Geeignete Werkstoffpaarung Angepaßte Geometrie	2	8	160

A: Auftreten

Wahrscheinlichkeit des Auftretens
 (Fehler kann vorkommen)

 unwahrscheinlich = 1
 sehr gering = 2 - 3
 gering = 4 - 6
 mäßig = 7 - 8
 hoch = 9 - 10

B: Bedeutung

Auswirkungen auf den Kunden

 kaum wahrnehmbare Auswirkungen
 unbedeutender Fehler (geringe Belästigung des Kunden)
 mäßig schwerer Fehler
 schwerer Fehler (Verärgerung des Kunden)
 äußerst schwerwiegender Fehler

E: Entdeckung

Wahrscheinlichkeit der Entdeckung
 (vor Auslieferung an Kunden)

 hoch = 1
 mäßig = 2 - 5
 gering = 6 - 8
 sehr gering = 9
 unwahrscheinlich = 10

RPZ: Risiko-Prioritätszahl

 hoch = 1000
 mittel = 125
 keine = 1

5.5 Sicherheitsgerechte Gestaltung elektrischer Geräte

Neben den vielfältigen, sehr verschiedenen mechanischen Gefährdungspotentialen treten in Geräten meist auch elektrische Gefährdungen auf. Diese sind weit weniger vielfältig, da sich mögliche Gefährdungen stets auf Körperströme und damit auf die Berührung spannungsführender Teile eingrenzen lassen. Auf der elektrischen Seite können Maßnahmen zur sicherheitsgerechten Gestaltung von Geräten also allgemeingültig formuliert werden, was bei mechanischen Problemen wegen der großen Vielfalt nicht gelingt. Eine Vertiefung dieses Problemkreises ist deshalb angebracht.

5.5.1 Gefährdungspotential Körperströme

Ein gemeinsames Gefährdungspotential aller elektrischen Geräte besteht in einem möglichen Stromfluss durch den menschlichen Körper, bedingt durch Berührung spannungsführender Teile.

Drei Pegel sind als Grenzwerte hierbei zu nennen:

die Spürbarkeitsgrenze	von ca. 0,5 mA~
die Loslassgrenze	von ca. 10 mA~
die Grenze für einsetzendes Herzkammerflimmern	von ca. 30 mA~

Während Ströme unterhalb der Spürbarkeitsgrenze, für die teils auch 0,25 mA angegeben werden, nicht zu bemerken sind, besteht oberhalb der Loslassgrenze die Gefahr, dass ein Loslassen der berührten Teile nicht mehr möglich ist. Störungen der Herzfunktion sind ab 30 mA~ zu erwarten. Diese Grenzen gelten insbesondere für Wechselstrom, der das größte Gefahrenpotential aufweist (bei Frequenzen von $16\frac{2}{3}$ bis 60 Hz und für Durchströmungszeiten von mehr als einer Herzperiode, also von mehr als einer Sekunde). Für kürzere Zeiten sind deutlich größere Ströme zulässig.

Das gegenwärtig anerkannte Strom-Gefährdungsdigramm zeigt Abbildung 5.4. Im Bereich 1 tritt normalerweise keine Wirkung auf. Im Bereich 2 ist ein Loslassen normalerweise immer möglich. Im Bereich 3 besteht üblicherweise noch keine Gefahr des Herzkammerflimmerns, jedoch bei längerer Zeit die Gefahr eines Atemstillstandes. Im Bereich 4 ist mit 50 %iger Wahrscheinlichkeit Herzkammerflimmern zu erwarten. In Sonderfällen (z. B. Herzoperationen) gelten noch weit schärfere Grenzen (10 μ A~).

Gleichströme sind dagegen wesentlich ungefährlicher, weil keine Verkrampfungen eintreten und damit Loslassen möglich ist.

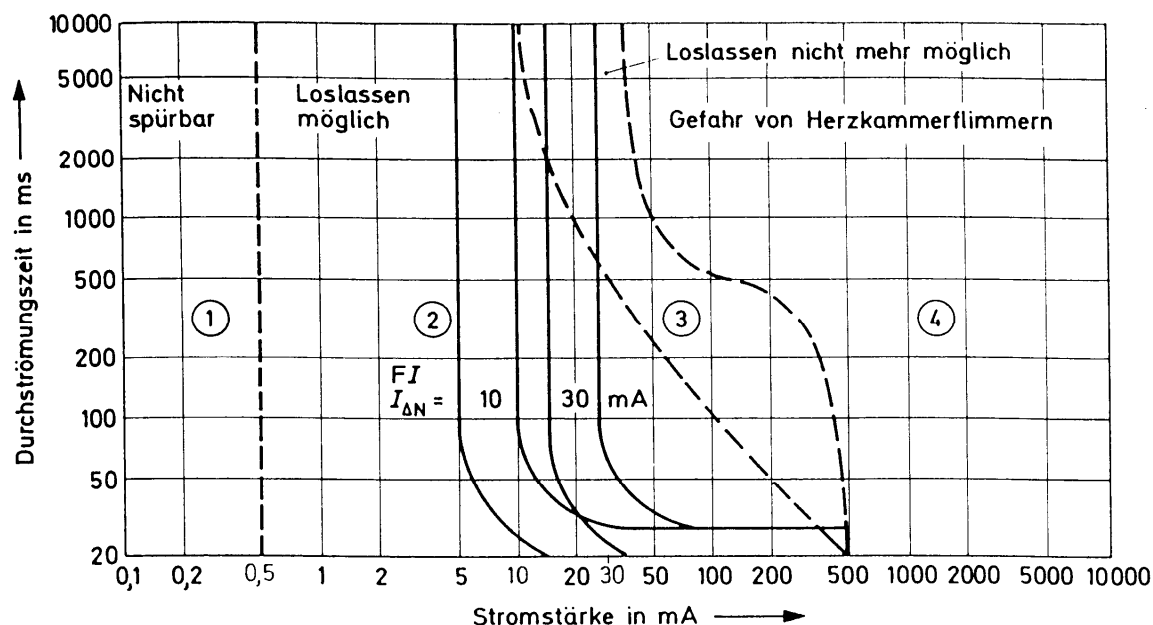


Abb. 5.4: Strom-Gefährdungsdiagramm, aus /20/

Über den Widerstand des menschlichen Körpers lassen sich die für das Auftreten entsprechender Körperströme kritischen Spannungen berechnen. Der Körperwiderstand einer intakten Haut liegt etwa bei 100 k Ω , der bei fehlender, defekter Haut etwa bei 500 Ω bis 1000 Ω , wobei je nach Fließweg diese Widerstände nur einen Orientierungswert darstellen.

Abbildung 5.5 zeigt zulässige Berührungsspannungen in Abhängigkeit von der Einwirkungszeit bei ungeöffneter Haut.

Es lassen sich so also Grenzen für Schutzmaßnahmen ableiten, beispielsweise sollten FI-Schutzschalter (Erläuterung später) bei Strömen ab 30 mA in höchstens 30 ms die Stromzufuhr unterbrechen. Andererseits sind aber bei sehr kleinen Spannungen (bis maximal 25 V oder 60 V) keine Gefährdungen vorhanden.

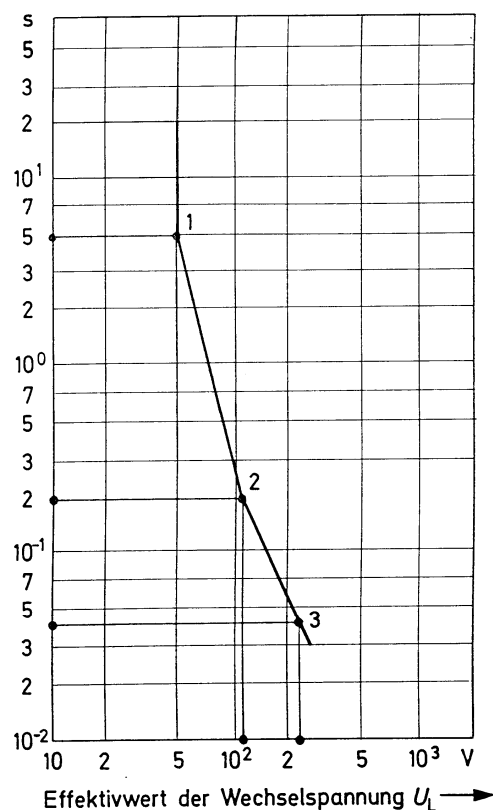


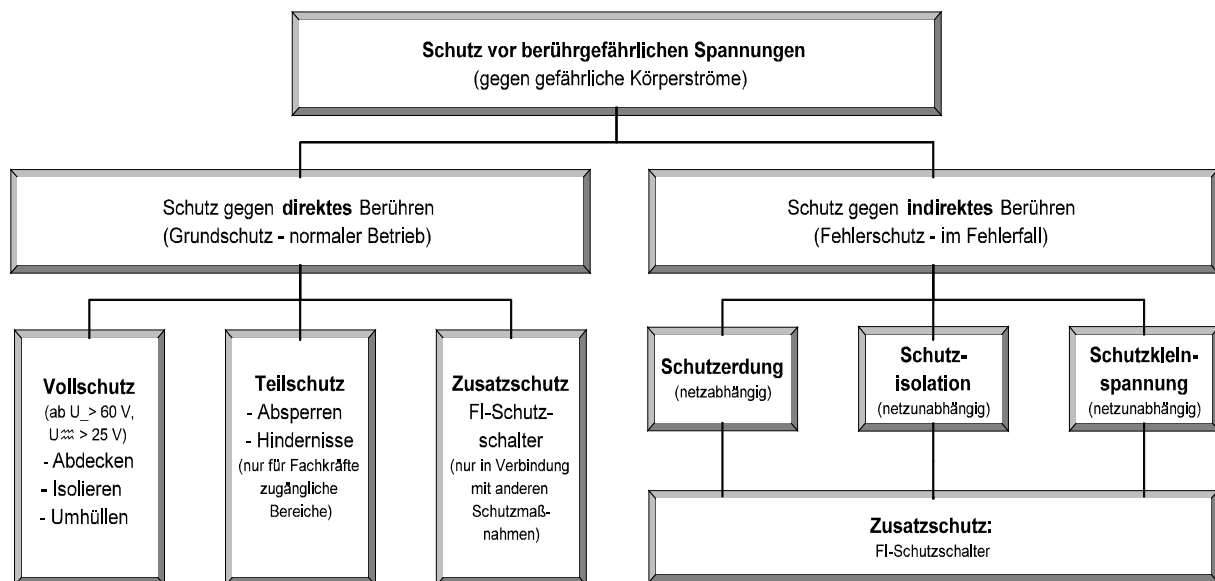
Abb. 5.5 Höchstzulässige Dauer von Berührungsspannungen, aus [20/

1. für Zeiten größer 5 s sind 50 V zulässig
2. bis 0,2 s sind 110 V zulässig
3. bis 40 ms sind 250 V zulässig
(FI-Schutzschalter)

5.5.2 Maßnahmen zum Schutz vor berührungsgefährlichen Spannungen in und an Geräten

Eine ausführliche, umfassende Darstellung enthält dazu VDE 0100 mit einer Vielzahl spezieller Festlegungen /22/ bzw. die harmonisierte EG-Richtlinie 73/23 EWG (Niederspannungsrichtlinie /29/). Eine für die Belange der Geräteseite, also nicht für Installationen, vereinfachte Übersicht enthält Tafel 5.3.

Tafel 5.3 Maßnahmen zum Schutz gegen berührgefährliche Spannungen /21/



Dabei ist zu unterscheiden zwischen einem

Grundschutz oder Schutz gegen **direktes Berühren**, also dem Berühren von spannungsführenden Teilen im normalen Betriebsfall, und einem

Fehlerschutz oder Schutz gegen **indirektes Berühren**, also dem Berühren von betriebsmäßig nicht unter Spannung stehenden Teilen im Fehlerfall.

5.5.2.1 Schutz gegen direktes Berühren (Grundschutz)

Unter Schutz gegen direktes Berühren versteht man einen Grundschutz gegen direktes Berühren betriebsmäßig unter Spannung stehender Teile im normalen, fehlerfreien Zustand (Isolierung, Abdeckung, . . .).

Ein Schutz gegen direktes Berühren ist nicht erforderlich

- für $U < 25 \text{ V}$ bzw. 60 V .
- für mögliche Entladungsenergien $< 350 \text{ m J}$.

Ein solcher Schutz wird realisiert durch:

Isolierung, d. h. durch vollständiges Umgeben aktiver Teile mit einem nur durch Zerstörung entfernbaren Isoliermaterial (Lacke und Farben sind nicht als Isolierung zulässig).

Abdeckung/Umhüllung, wobei diese mindestens eine Schutzart IP2Y gewährleisten muss, d. h. vor dem Eindringen mit dem Finger (Prüffinger) mit mehr als 12 mm Durchmesser schützt und nur mit einem Werkzeug zu entfernen ist.

Eingeschränkt genutzt werden auch

Absperrn und das Erzwingen bestimmter Abstände, insbesondere dann, wenn beispielsweise Räume oder räumliche Bereiche nur für Fachkräfte zugänglich sind (durch Gitter, Hindernisse als Absperrung bzw. genügend große Abstände zwischen unterschiedlichen Potentialen (2,5 m), die ein gleichzeitiges Berühren unmöglich machen).

Zusätzlich zu den o. g. Maßnahmen ist ein

Zusatzschutz durch Fehlerstromschutzeinrichtungen/-schaltungen möglich, die einen Strom durch den menschlichen Körper auf kurze Zeiten (≤ 30 ms) und sehr kleine Ströme (≤ 30 mA) begrenzen.

Hinsichtlich der Ausführungsvorschriften für die einzelnen Maßnahmen sei auf die Literatur verwiesen, beispielsweise VDE 0110 Teil 1 Isolationskoordination dielektrischer Betriebsmittel /27/.

Prinzipiell besteht beispielsweise bei der Isolierung das Ziel, dass Isolierstoffe und deren Kriechstrecken parallel zu einer möglichen Luftstrecke höhere Spannungsfestigkeit realisieren als die Luftstrecke. Neben dem Isoliermaterial selbst müssen also auch mögliche Kriechstrecken bedacht und bewusst lang gestaltet werden.

An dieser Stelle sei auch der Begriff der **Schutzart** eingeführt, der zwei Aspekte überdeckt:

- den Schutz von Personen gegen Berührung unter Spannung stehender oder auch bewegter Teile
- den Schutz des Gerätes gegen Eindringen von Fremdkörpern, Staub und Wasser.

Die **Schutzart** wird in folgender Form auf Typenschildern von Geräten gekennzeichnet

Kurzzeichen und Schutzgrad

I P

x

y

|

|

0 . . . 8 (9K) Schutz gegen Wasser

0 . . . 6 Schutz gegen Berühren und Fremdkörper

Dabei sind zwei Normen zu betrachten, die sich leider auch leicht in den Schutzgraden unterscheiden. Für Geräte allgemein gilt DIN EN 60529 VDE 0470-1 /24/ (als Ersatz für die alte VDE 0470) und für Straßenfahrzeuge gilt DIN 40050-9 /25/, Tafeln 5.4 bis 5.6. So sieht die DIN 40050-9 zusätzlich zu o. g. Ziffern auch einen ergänzenden Buchstaben K für Straßenfahrzeuge vor und definiert beim Wasserschutz zusätzlich die Ziffer 9K. Der höchste Schutzgrad nach DIN EN 60529 ist somit IP 68, nach DIN 40050-9 jedoch IP 69K. DIN EN 60529 erlaubt ebenfalls weitere Buchstaben, was aber kaum genutzt wird. Bei der Angabe des IP-Codes ist deshalb zu empfehlen, die Bezugsnorm anzugeben. Dies wird aber nicht konsequent umgesetzt.

Tafel 5.4 Schutzgrade für Berührungs- und Fremdkörperschutz nach DIN 60529 VDE 0470-1 /24/ sowie nach DIN 40050-9 (vereinfacht)

Erste Kennziffer x		Schutzzumfang	
DIN 60529	DIN 40050 Teil 9	Benennung	Erklärung
0	0	Kein Schutz	Kein besonderer Schutz von Personen gegen zufälliges Berühren unter Spannung stehender oder sich bewegender Teile. Kein Schutz des Betriebsmittels gegen Eindringen von festen Fremdkörpern.
1	1	Schutz gegen große Fremdkörper	Schutz gegen zufälliges großflächiges Berühren unter Spannung stehender und innerer sich bewegender Teile, z. B. mit der Hand / dem Handrücken, aber kein Schutz gegen absichtlichen Zugang zu diesen Teilen. Schutz gegen Eindringen von festen Fremdkörpern mit einem Durchmesser größer als 50 mm.
2	2	Schutz gegen mittelgroße Fremdkörper	Schutz gegen Berühren mit den Fingern unter Spannung stehender oder innerer sich bewegender Teile, Prüffinger Durchmesser 12 mm. Schutz gegen Eindringen von festen Fremdkörpern mit einem Durchmesser größer als 12,5 mm.
3	3	Schutz gegen kleine Fremdkörper	Schutz gegen Berühren unter Spannung stehender oder innerer sich bewegender Teile mit Werkzeugen, Drähten oder ähnlichem von einer Dicke größer als 2,5 mm. Schutz gegen Eindringen von festen Fremdkörpern mit einem Durchmesser größer als 2,5 mm.
4	4	Schutz gegen drahtförmige oder kernförmige Fremdkörper	Schutz gegen Berühren unter Spannung stehender oder innerer sich bewegender Teile mit Werkzeugen, Drähten oder ähnlichem von einer Dicke größer als 1 mm. Schutz gegen Eindringen von festen Fremdkörpern mit einem Durchmesser größer als 1 mm.
5	5K	Schutz gegen Staubablagerung	Vollständiger Schutz gegen Berühren unter Spannung stehender oder innerer sich bewegender Teile. Schutz gegen schädliche Staubablagerungen. Das Eindringen von Staub ist nicht vollkommen verhindert, aber der Staub darf nicht in solchen Mengen eindringen, dass die Arbeitsweise beeinträchtigt wird.
6	6K	Schutz gegen Staubeintritt	Vollständiger Schutz gegen Berühren unter Spannung stehender oder innerer sich bewegender Teile. Schutz gegen Eindringen von Staub.

Der Schutz gegen Berühren und Fremdkörper wird in den Schutzarten IP 2y (z. B. IP 24) durch einen speziellen, gelenkigen Prüffinger mit einem Durchmesser von 12 mm und einer Länge von 80 mm geprüft.

Tafel 5.5 Schutzgrade für Wasserschutz nach DIN 60529 VDE 0470-1 /24/ sowie nach DIN 40050-9 (vereinfacht)

Zweite Kennziffer y		Schutzzumfang	
DIN 60529	DIN 40050 Teil 9	Benennung	Erklärung
0	0	Kein Schutz	Kein besonderer Schutz
1	1	Schutz gegen senkrecht fallendes Tropfwasser	Wassertropfen, die senkrecht fallen, dürfen keine schädliche Wirkung haben.
2	2	Schutz gegen schräg fallendes Tropfwasser	Wassertropfen, die in einem beliebigen Winkel bis 15° zur Senkrechten fallen, dürfen keine schädliche Wirkung haben.
3	3	Schutz gegen Sprühwasser	Wasser, das in einem beliebigen Winkel bis 60° zur Senkrechten fällt, darf keine schädliche Wirkung haben.
4	4	Schutz gegen Spritzwasser	Wasser, das aus allen Richtungen gegen das Betriebsmittel spritzt, darf keine schädliche Wirkung haben.
	4K	Schutz gegen Spritzwasser mit erhöhtem Druck	Wasser, das mit erhöhtem Druck aus allen Richtungen gegen das Betriebsmittel spritzt, darf keine schädliche Wirkung haben.
5	5	Schutz gegen Strahlwasser	Ein Wasserstrahl, der aus allen Richtungen gegen das Betriebsmittel gerichtet wird, darf keine schädliche Wirkung haben.
6	6	Schutz gegen starkes Strahlwasser	Ein starker Wasserstrahl, der aus allen Richtungen gegen das Betriebsmittel gerichtet wird, darf keine schädliche Wirkung haben.
	6K	Schutz gegen starkes Strahlwasser mit erhöhtem Druck	Ein starker Wasserstrahl mit erhöhtem Druck, der aus allen Richtungen gegen das Betriebsmittel gerichtet wird, darf keine schädliche Wirkung haben.
7	7	Schutz beim zeitweiligen Untertauchen	Wasser darf nicht in schädlichen Mengen eindringen, wenn das Betriebsmittel unter den festgelegten Druck- und Zeitbedingungen in Wasser zeitweilig untergetaucht wird, z. B. bei vorübergehender Überflutung durch schwere See.
8	8	Schutz beim dauernden Untertauchen	Wasser darf nicht in schädlichen Mengen eindringen, wenn das Betriebsmittel unter einem festgelegten Druck und für unbestimmte Zeit unter Wasser getaucht wird.
	9K	Schutz gegen Wasser bei Hochdruck-/ Dampfstrahl-Reinigung	Wasser, das aus jeder Richtung unter stark erhöhtem Druck gegen das Betriebsmittel gerichtet wird, darf keine schädliche Wirkung haben.

Tafel 5.6 Einsatzbeispiele für Schutzarten in Geräten nach DIN 60529 VDE 0470-1 /24/

Anwendungs- klasse	Einsatzbedingungen	Beispiele für Einsatzorte	Schutzgrad
1 Leicht geschützt	- trockene Innenräume ohne Kondenswasserbildung	Büros, Wohn- und Geschäftsräume, Verkaufsräume	IP 00 ¹⁾ , IP 10, IP 20
2 Mäßig geschützt	- Innenräume, in denen Kondenswasser auftreten kann - Betrieb der Geräte in Landfahrzeugen - Geräte, die einen höheren Berührungs- und Fremdkörperschutz, als in Anwendungsklasse 1 angegeben, haben müssen	Küchen, Kühlräume, Keller, geschlossene Ställe	IP 30, IP 40, IP 41, IP 22
3 Mittelstark geschützt	- Außenräume, zeitweiliger Betrieb im Freien	Wetterschutzräume, Zelte, überdachte Flächen, im Tagebau	IP 34, IP 43, IP 44
4 Stark geschützt	- ständiger Betrieb im Freien	Orte, an denen ständig die Witterungseinflüsse wirksam werden	IP 54, IP 56, IP 65, IP 66
5 Total geschützt	- zeitweilige oder ständige Überflutung von Wasser		IP 67, IP 68

¹⁾ IP 00, IP 10 für elektrische Geräte nur unter Sonderbedingungen zulässig; z. B. Wechselspannungen kleiner 25 V und Gleichspannungen kleiner 60 V.

Neben diesen Schutzarten gibt es darüber hinaus noch weit schärfere Anforderungen in Form des Schlagwetter- und Explosionsschutzes nach VDE 0170/0171, die die mögliche Zündquellen als Gefahrenpotential einbeziehen.

5.5.2.2 Schutz gegen indirektes Berühren (Fehlerschutz)

Unter Schutz gegen indirektes Berühren wird der Schutz gegen das Auftreten von berührungsgefährlichen Spannungen an betriebsmäßig nicht unter Spannung stehenden Teilen verstanden, d. h., zuvor ist ein erster Fehlerfall am Grundschutz (also beispielsweise der Basisisolation) eingetreten. Im Sinne der Sicherheitstechnik stellt sich also hier die Frage der 2. Sicherheit. Die Klassifizierung des Schutzes gegen indirektes Berühren erfolgt in Form von Schutzklassen, Tafel 5.7.

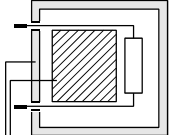
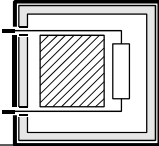
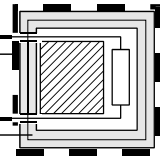
Die **Schutzklasse 0** ist dabei dem Grundschutz gleichzusetzen und in Deutschland nicht zulässig, da keine 2. Sicherheit vorhanden ist. In manchen Ländern ist sie dann zulässig, wenn die Aufstellungsumgebung des Gerätes frei von Erdpotentialen ist. Neben der für die Funktion des Gerätes notwendigen Betriebsisolation, die Kurzschlüsse im Gerät verhindert, existiert hierbei nur eine Basisisolation als Grundschutz.

Schutzerdung - Schutzklasse I

Die Sicherheit im Fehlerfall (Körperschluss, d. h. äußere Metallteile stehen unter Spannung) wird durch niederohmige Verbindung zugänglicher Metallteile mit einem netzseitigen Schutzleiter PE (Potentialausgleich) erreicht. Durch den netzseitigen,

niederohmigen Schutzleiteranschluss $R_{SL} \leq 0,15 \, \Omega$ bleibt der Spannungsabfall zwischen Metallteilen und Potentialausgleich (Erde) selbst bei größeren Strömen noch so gering, dass keine Gefährdung entsteht (bei $160 \, A \Rightarrow 24 \, V$). Zu berücksichtigen ist dabei zusätzlich, dass im Netz bei solch hohen Strömen dann auch Leitungsschutzschalter (Sicherungen) auslösen.

Tafel 5.7 Schutzmaßnahmen gegen indirekte Berührung (Fehlerschutz)

Merkmal	Schutzklasse			
	0 in Deutschland nicht zulässig	I Schutz- erdung	II Schutz- isolierung	III Schutzklein- spannung
Hauptschutz- merkmal	nur Basisiso- lierung	Schutzleiter- anschluss	doppelte (zu- sätzliche) Iso- lierung	Versorgung mit Schutzklein- spannung
Prinzip- anordnung	 Betriebsisolation (für Funktion des Gerätes nötig) Basisisolation (gegen direktes Be- rühren) 1. Sicherheit Kein Schutzleiter- anschluss!	 Metallteile über Schutzleiter ge- erdet (bestimmte Anforder- ungen an Schutzleiter - Querschnitt - Zugentlastung - Befestigung -) 2. Sicherheit Schutzleiteran- schluss!	 Zusatzisolation (doppelte Isolierung unabhängig von Basisisolation) oder verstärkte Isolation (z.B. aus mehreren Lagen) äußere Metallteile sind möglich (Bohrmaschine, Scherkopf bei Elektro- rasierer) Kein Schutzleiter- anschluss!	$U \approx \leq 50 \, V$ $U_{-} \leq 120 \, V$ Batterieversor- gung oder Ver- sorgung über Trenntrafo vom Netz (Sicher- heitstrafo) Auch im Feh- lerfall dürfen keine höheren Spannungen auftreten kön- nen! Anschluss an Schutzklein- spannung
Voraussetzung für Gewähr- leistung der Sicherheit	Umgebung frei von Erdpoten- tialen	Anschluss an einen Schutz- leiter	keine	Anschluss an Schutzklein- spannung
Kurzzeichen				

Der Fehler selbst (Körperschluss) bewirkt einen Fehlerstrom über den Schutzleiter PE. Die 2. Sicherheit besteht in der Eingrenzung der möglichen Spannungswerte durch eine niederohmige Schutzleiterverbindung. Ein Abschalten vom Netz erfolgt nicht zwangsweise, sondern hängt von der Höhe des Fehlerstromes und damit von dem noch in Reihe liegenden Teil des Nutzwiderstandes und der Auslöseschwelle der Überstromschutzeinrichtungen (Sicherungen) ab. Der Fehler kann also auch un-

erkannt bleiben, Zusatzmaßnahmen wie FI-Schutzschalter oder regelmäßige Kontrolle der Geräte hinsichtlich ihrer elektrischen Sicherheit sind angebracht und teils vorgeschrieben.

Die erwähnten Überstromschutzeinrichtungen (Sicherungen) sind zunächst nur für den Sachschutz konzipiert, sie schützen vor thermischer Überlastung des Gerätes (Gerätesicherung, Motorstrom-Schutzschalter, ...) oder vor thermischer Überlastung des Leitungsnetzes (Leitungsschutzschalter, -sicherungen), Abbildungen 5.6 und 5.7

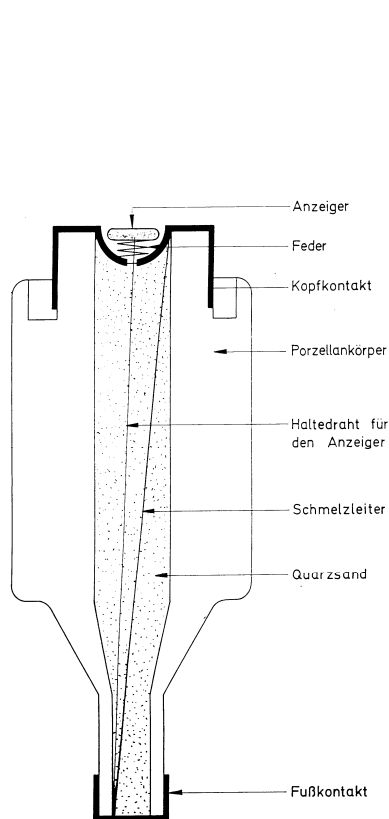


Abb. 5.6 Schmelzsicherung, aus /20/ (Überstromschutzeinrichtung)

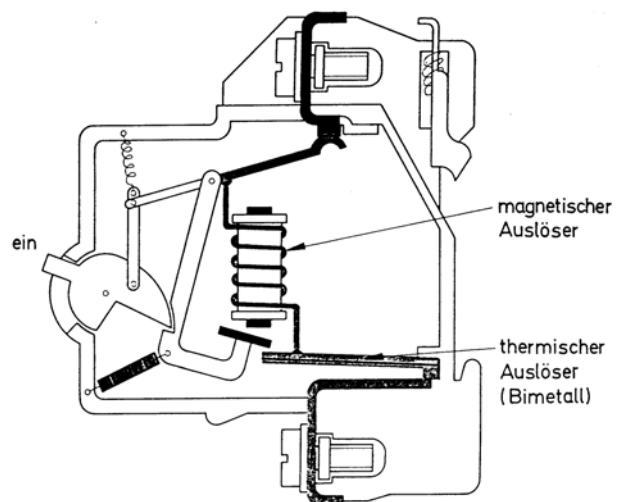
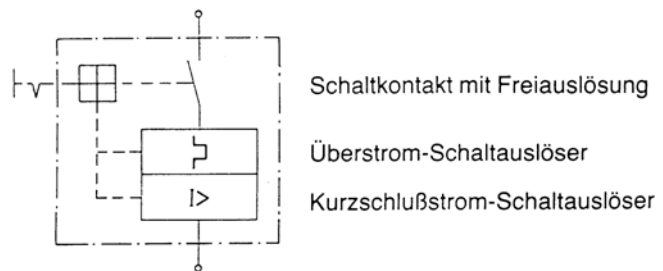


Abb. 5.7 Leitungsschutzschalter, aus /20/ (Überstromschutzeinrichtung)

An die Gestaltung der Schutzleiteranschlüsse im Gerät werden hohe Forderungen gestellt:

- Mindestquerschnitte 2,5 mm² Cu oder 4 mm² Al,
- Zugentlastung, mechanisch geschützt,
- Voreilend beim Herstellen einer Verbindung, nachteilig beim Lösen/Abreißen,
- Schraubverbindungen für Schutzleiteranschlüsse dürfen keine anderen Funktionen mit übernehmen,
- je Verbindung ist nur 1 Leiter zulässig,
- Sicherung gegen Lockern nötig,
- Leitwert möglicher Verbindungen muss dem Querschnitt des Schutzleiters entsprechen,
- Farbe grün/gelb,
- für Schraubengröße zur Befestigung mindestens M 4,

- Zeichen für Schutzleiter an Verbindungsstelle.



Die Schutzklasse I wirkt nur über intakte Schutzleiteranschlüsse im Netz, nicht aus sich heraus. Sie ist für tragbare Geräte nicht zulässig, jedoch für ortsveränderliche.

Schutzisolierung - Schutzklasse II

Die 2. Sicherheit in der Schutzklasse II wird durch eine unabhängige zweite Isolierung (Zusatz- oder doppelte Isolierung) zusätzlich zur Basisisolierung erreicht. Äußere Metallteile außerhalb dieser Zusatzisolierung sind dabei zulässig, wenn sie keine Verbindung nach innen besitzen, also die Zusatzisolierung dadurch nicht umgangen wird. Eine verstärkte mehrlagige Isolierung erfüllt den gleichen Zweck.

Die Schutzisolierung muss lückenlos sein und einen Isolationswiderstand von größer/gleich 1,5 MΩ bei 4000 V Prüfspannung sichern. Gerät und Netzstecker dürfen dann keinen Schutzleiteranschluss besitzen. Da diese Schutzmaßnahme an keine äußeren Bedingungen (z. B. Schutzleiteranschluss) gebunden ist, wirkt sie bereits aus sich heraus.

Schutzkleinspannung - Schutzklasse III

Bei der Schutzmaßnahme Schutzkleinspannung ist sicherzustellen, dass auch im Fehlerfall keine höheren Spannungen auftreten als

$$U \leq 50 \text{ V} \text{ bzw. } 120 \text{ V}.$$

Beispielsweise kann durch kurzschlussfeste Sicherheitstransformatoren auch im Fehlerfall von einer zuverlässigen Netztrennung ausgegangen werden, so dass höhere Spannungen nicht zu befürchten sind. Erfüllt sind diese Grenzen im Allgemeinen bei Batteriebetrieb. Auch Zusammenschaltungen mehrerer solcher Geräte dürfen nicht zu höheren Spannungen führen und Stecker nicht in Netzdosen passen. Schutzleiteranschlüsse sind nicht zulässig. Zwingend vorgeschrieben ist Schutzkleinspannung bei Spielzeugen, Körpersonden, Dentalgeräten und Ähnlichem. Ein Grundsicherheit ist jedoch unabhängig davon trotzdem ab 25 V- bzw. 60 V. nötig.

In diesem Zusammenhang sei auch der Begriff der Funktionskleinspannung erwähnt, für den gleiche Spannungsgrenzen gelten. Hier resultieren die Spannungsgrenzen jedoch aus funktionellen, nicht aus sicherheitstechnischen Aspekten. Anwendungsgebiete sind Einbauelemente in übergeordneten Systemen (Schaltschränke). Dabei sind Schutzleiteranschlüsse und auch weniger sichere Netztrennungen zulässig, da die Funktionskleinspannung nicht als Schutzmaßnahme gilt. Nach außen ist dann meist eine Schutzterdung anzutreffen.

Zusätzliche netzseitige Schutzmaßnahme - FI-Schutzschalter

Neben dem geräteseitigen Schutz durch Realisierung von Schutzklassen bietet sich zusätzlich die Möglichkeit, als Zusatzschutz einen **Fehlerstrom-Schutzschalter** einzusetzen. Ein solcher Fehlerstrom-Schutzschalter (Abb. 5.8) erfasst die Summe aus hin- und rückfließendem Strom an einem einzelnen Verbraucher/Gerät oder an einem ganzen Netzabschnitt. Dazu wird um die Zuleitungen ein Wandlerkern angeordnet, in dem bei von Null verschiedener Stromsumme ein Magnetfeld generiert wird, das letztlich über weitere Bauteile eine Netztrennung auslöst.

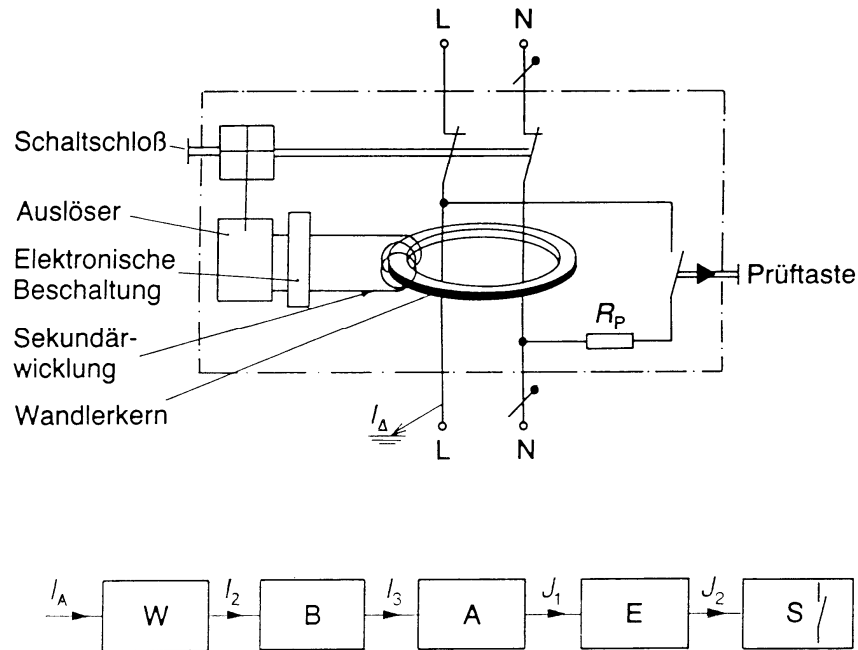


Abb. 5.8: Wirkungsweise eines FI-Schutzschalters, aus /20/

Der Fehlerstrom-Schutzschalter muss also Hin- und Rückleiter umfassen, darf keinesfalls jedoch auch einen möglichen Schutzleiter einbeziehen, da in diesem abfließende mögliche Fehlerströme genau wie über andere Wege abfließende Ströme ja als „fehlende Stromanteile“ detektiert werden sollen, Abb. 5.9.

Die Schaltschwellen ($t \leq 30 \text{ ms}$, $I \leq 30 \text{ mA}$) sichern ein Schalten noch vor Auftreten von Gefährdungen. Als alleiniger Schutz ist dieser FI-Schalter jedoch nicht zulässig.

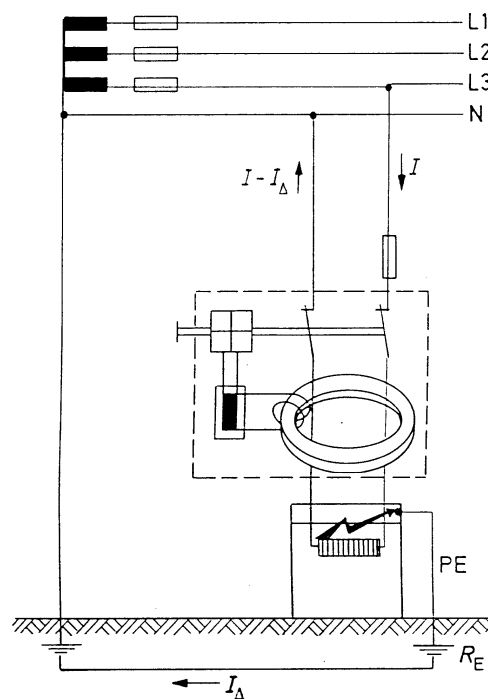


Abb. 5.9: Fehlerstromschutzschalter am TT-Netz, dargestellt ist das Auftreten eines Körperschlusses, aus /20/

5.6 Gesetzliche Regelungen

Im Rahmen der Sicherheitstechnik sind auch die entsprechenden gesetzlichen Regelungen zu beachten. Hier soll nur auf wesentliche Aspekte hingewiesen werden.

5.6.1 Produktsicherheitsgesetz (ProdSG)

Historie: Das **Gesetz über technische Arbeitsmittel** von 1986 bzw. 1993, kurz auch **Gerätesicherheitsgesetz** genannt, wurde im Rahmen der europäischen Harmonisierung 2004 mit dem Gesetz zur Neuordnung der Sicherheit von technischen Arbeitsmitteln und Verbraucherprodukten überarbeitet und im **Gesetz über technische Arbeitsmittel und Verbraucherprodukte** zusammengefasst, kurz **Geräte- und Produktsicherheitsgesetz (GPSG)**.

Seit 01.12.2011 gilt die neue Bezeichnung: **Gesetz über die Bereitstellung von Produkten auf dem Markt (Produktsicherheitsgesetz ProdSG)**.

Wirkung: Es verpflichtet die Hersteller zur Gefahrenfreiheit der Maschinen und Geräte, die durch sie auf den Markt gebracht werden und schafft die Möglichkeit zur Überprüfung der Produkte bei anerkannten Prüfstellen. Zusätzlich existieren parallel dazu diverse weitere Bestimmungen, beispielsweise Unfallverhütungsvorschriften der Berufsgenossenschaften. Auf diese soll hier jedoch nicht eingegangen werden.

Kernpunkt: Kernpunkt des Produktsicherheitsgesetz, wie auch der gesamten Sicherheitstechnik, ist die Frage der **Definition der Gefahrenfreiheit**. Wie bereits erwähnt, ist hierbei sowohl der aktuelle Stand der Technik als auch das jeweilige gesellschaftliche Umfeld entscheidend.

Gefahrenfreiheit nach altem Gerätesicherheitsgesetz: Das frühere Gerätesicherheitsgesetz hob als Kernaussage auch die jeweils allgemein anerkannten Regeln der Technik de facto auf Gesetzesniveau. Anforderungen an Geräte aus diesem früheren Gerätesicherheitsgesetz, gleichzeitig auch zu prüfende Sicherheitsvoraussetzungen einer Bauartprüfung für dieses Gerät, waren im Kern:

- Das Erzeugnis sollte nach den allgemeinen Regeln der Technik sowie der Arbeitsschutz- und Unfallverhütungsvorschriften so beschaffen sein, dass Benutzer oder Dritte bei bestimmungsgemäßer Verwendung gegen Gefahren aller Art für Leben oder Gesundheit soweit geschützt sind, wie es die Art der bestimmungsgemäßen Verwendung gestattet.

Gefahrenfreiheit nach neuem Produktsicherheitsgesetz (ProdSG): Das ProdSG genau wie bereits das GPSG versucht nun abweichend davon, die konkreten sicherheitstechnischen Anforderungen zu definieren und in das Gesetz aufzunehmen. So gilt nun sinngemäß als Voraussetzung für das Bereitstellen eines Erzeugnisses auf dem Markt:

- **Das Erzeugnis muss den in den Rechtsverordnungen bzw. im Gesetz enthaltenen sicherheitstechnischen Anforderungen entsprechen, so dass Benutzer oder Dritte bei bestimmungsgemäßer Verwendung gegen Gefahren aller Art für Leben oder Gesundheit soweit geschützt sind, wie es die Art der bestimmungsgemäßen Verwendung gestattet.**

Dabei gilt zusätzlich:

- **Gefahren durch falsche Aufstellung und falsche Nutzung sind durch entsprechende Hinweise zur Aufstellung und Regeln zur Verwendung in Form einer Gebrauchsanweisung zu benennen und zu verhindern.**

Möglichkeiten zur Prüfung: Der Hersteller kann die Einhaltung dieser Anforderungen im Wege einer Bauartprüfung durch eine benannte Prüfstelle prüfen lassen und dies durch Kennzeichnung des Gerätes mit dem GS-Zeichen (geprüfte Sicherheit) dokumentieren, ohne dass dadurch jedoch die rechtliche Verantwortung berührt wird. Bei bestimmten Gerätegruppen wird per Gesetz zusätzlich eine Stückprüfung vorgeschrieben, beispielsweise durch den TÜV, bei bestimmten medizinisch-technischen Geräten sogar eine Abnahme durch einen Sachverständigen (TÜV) und eine Prüfzeichenvergabe darüber (Einzelabnahme).

Der Geltungsbereich dieses Gesetzes betrifft:

- Verwendungsfertige technische Arbeitsmittel und Verbraucherprodukte (keine Einbaugruppen), Werkzeuge, Arbeitsgeräte, Maschinen, Beleuchtungseinrichtungen, Lüfter, Klimageräte, Heizungen, Haushaltsgeräte, Sportgeräte, Spielzeuge.

Es gilt nicht für:

- Fahrzeuge, Betriebsmittel auf Schiffen, Eisenbahnen, Flugzeuge,
- atomrechtliche und Bundeswehr-Systeme, Betriebsmittel für explosive Atmosphäre und Arbeitsmittel, die ihrer Bauart nach ausschließlich zur Verwendung für militärische Zwecke bestimmt sind,
- Medizinprodukte im Sinne des Medizinproduktegesetzes,
- Elektroradiologische und elektromedizinische Betriebsmittel,
- Gebrauchte Produkte
- Lebensmittel, Futtermittel, lebende Pflanzen und Tiere,
- Tanks
- Lasten- und Personenaufzüge,
- Haushaltssteckvorrichtungen (Steckdosen), E-Zähler.

Es gilt auch nicht, soweit in anderen Rechtsvorschriften entsprechende oder weitergehende Anforderungen an die Gewährleistung von Sicherheit und Gesundheit vorgesehen sind, z. B. im **Medizinproduktegesetz (MPG)**. Aber die Vorgehensweise dort ist ähnlich. Deshalb wird zunächst allgemein das Produktsicherheitsgesetz (ProdSG) diskutiert und auf das Medizinproduktegesetz (MPG) später eingegangen.

Die Sicherstellung der Anforderungen zur Gefahrenfreiheit erfolgt im Rahmen einer Konformitätsbewertung und CE-Kennzeichnung.

5.6.2 Europäische Harmonisierung – CE-Kennzeichen

Im Rahmen der europäischen Harmonisierung wurden die Sicherheitsaspekte, beispielsweise bei Geräten, in die Form einer **Konformitätsbewertung** überführt. Dies bedeutet, dass der Hersteller eine Erklärung (Konformitätserklärung) über die Berücksichtigung aller für dieses Produkt zutreffenden Gesetze und Normen abgeben muss. Neben Sicherheitsaspekten fließen hier auch andere Aspekte ein, beispielsweise die elektromagnetische Verträglichkeit.

Durch die Konformitätsbewertung muss der Hersteller für jedes Produkt vor dem erstmaligen Inverkehrbringen bzw. dem Bereitstellen auf dem Markt nachweisen, dass die in Richtlinien und Gesetzen enthaltenen grundlegende Sicherheitsanforderungen an sein Produkt erfüllt werden. Die Dokumentation dazu erfolgt i. Allg. durch die CE-Kennzeichnung.

Wesentliches Ziel ist dabei die **Schaffung eines europäischen Binnenmarktes**, d. h. nach einer Konformitätsbewertung und CE-Kennzeichnung in einem europäischen Land gilt ein freier Warenverkehr in der gesamten EU. Weitere länderspezifische Auflagen entfallen.

Zusammengefasst sind diese Regelungen in EG-Richtlinien, die teils auch sehr detaillierte Sicherheitsanforderungen (auch zur elektrischen Sicherheit) enthalten.

Für Maschinen und Geräte gelten

- EG-Maschinenrichtlinie 2006/42/EG
- Niederspannungsrichtlinie 2006/95/EG
- EMV-Richtlinie 2004/108/EG
- EG-Spielzeugrichtlinie...

Für Medizinprodukte gelten

- Richtlinie 90/385/EWG für aktive implantierbare Medizinprodukte
- Richtlinie 98/79/EG für In-vitro-Diagnostika
- Richtlinie 93/42/EWG für sonstige Medizinprodukte.

Insgesamt verbergen sich dahinter fast 700 Normvorhaben. Diese Richtlinien werden durch nationale Gesetze umgesetzt. Insbesondere sind hier zu nennen:

- **Produktsicherheitsgesetz (ProdSG)** vom 01.12.2011
- **Medizinproduktegesetz (MPG)** vom 07.08.2002

Dabei gilt neuerdings mit diesen Gesetzen und Richtlinien die **Vermutung**, dass bei gesetzes- und normenkonformer Gestaltung das Produkt den Anforderungen der EG-Richtlinien entspricht und damit sicher ist. Auf allgemein anerkannte Regeln der Technik wird nicht mehr zusätzlich abgehoben, dadurch aber eine ständige Aktualisierung erforderlich!

Die Einhaltung aller zutreffenden Normen wird durch die bereits genannte Konformitätserklärung bestätigt und durch Anbringung des CE-Kennzeichens am Produkt verdeutlicht. Die CE-Kennzeichnung hat also keinen Gütezeichencharakter wie das GS-Zeichen, sondern dient allein als formaler Nachweis der Übereinstimmung mit EG-Richtlinien. Das CE-Kennzeichen wird nicht vergeben, vielmehr hat der Hersteller die

Pflicht zur Konformität und damit Kennzeichnung. Die Kennzeichnung dient weniger dem Verbraucher, vielmehr der Dokumentation gegenüber der aufsichtsführenden Behörde. Eine Zertifizierung nach ISO 9000 und folgende wird zusätzlich angestrebt und unterstützt die Konformitätsbewertung erheblich.

Die Konformitätserklärung ist für bestimmte Produktgruppen und besondere Aspekte zwingend vorgesehen, wie für Spielzeuge, einfache Druckbehälter, Maschinen, Bauprodukte, elektromagnetische Verträglichkeit (EMV), persönliche Schutzausrüstungen, aktive implantierbare medizinische Geräte, Gasverbrauchseinrichtungen, nicht-selbsttätige Waagen, Telekommunikations-Sendeeinrichtungen usw. Die CE-Kennzeichnung gilt dabei nur, von Ausnahmen abgesehen, für Endprodukte und nicht für eingebaute Komponenten.

Vorgehensweise bei einer Konformitätsbewertung: Im Rahmen einer solchen Konformitätsbewertung sind zunächst die geltenden Regeln zu ermitteln, eine Gefahrenanalyse vorzunehmen und die Ausführung der sicherheitstechnischen Lösungen zu dokumentieren. Eine Bauartprüfung ist derzeit bei Maschinen und Geräten nicht generell vorgesehen.

Prinzipielle Schritte bei einer Konformitätsbewertung sind:

- Ermittlung der geltenden gesetzlichen Regelungen/Richtlinien
- Gefahrenanalyse, Risikoermittlung, Risikobewertung
- Realisierung von Schutzmaßnahmen sowie Prüfmaßnahmen
- Hinweis auf Gefährdungen durch Bedienungsanleitung
- Dokumentation der vorgenommenen Schutzmaßnahmen
- Speicherung der Unterlagen zur Dokumentation
- Konformitätserklärung abgeben
- CE-Kennzeichen anbringen

Bei der Konformitätsbewertung müssen die Sicherheitsanforderungen der EU-Richtlinien eingehalten werden. Diese sind meistens recht allgemein gefasst, so dass konkrete technische Anforderungen aus Regelwerken abgeleitet werden müssen, die die allgemein anerkannten Regeln der Technik widerspiegeln. Dies können deutsche Normen, europäische Normen, Normen eines Mitgliedstaates der EU oder Richtlinien von Verbänden sein.

Die Abbildungen 5.10 bis 5.13 zeigen zunächst einige Illustrationen zur Vorgehensweise.



Abb. 5.10: Vorgehensweise bei einer Konformitätsbewertung, nach M. Schmauder, TU Dresden

	Mechanische Faktoren		Vibrationen		Gefahrstoffe
	Elektrische Faktoren		Schall		Strahlungen
	Thermische Faktoren		Brände, Explosionen		Physische Belastung/ Arbeitsschwere
	Klima		Farbe		Beleuchtung
	Psychische Belastungen				

Abb. 5.11: Gefährdungsfaktoren, nach M. Schmauder, TU Dresden

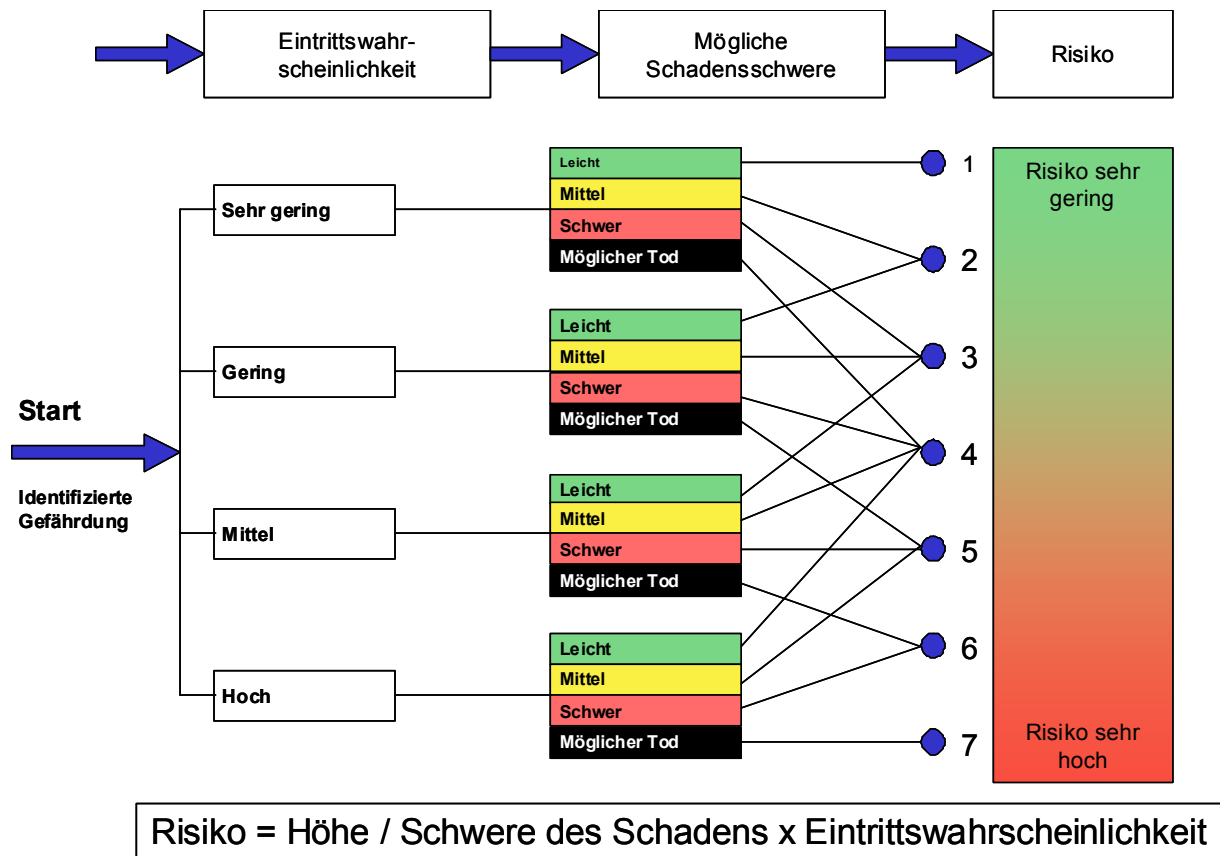


Abb. 5.12: Verfahren einer Risikobestimmung, nach M. Schmaucher, TU Dresden

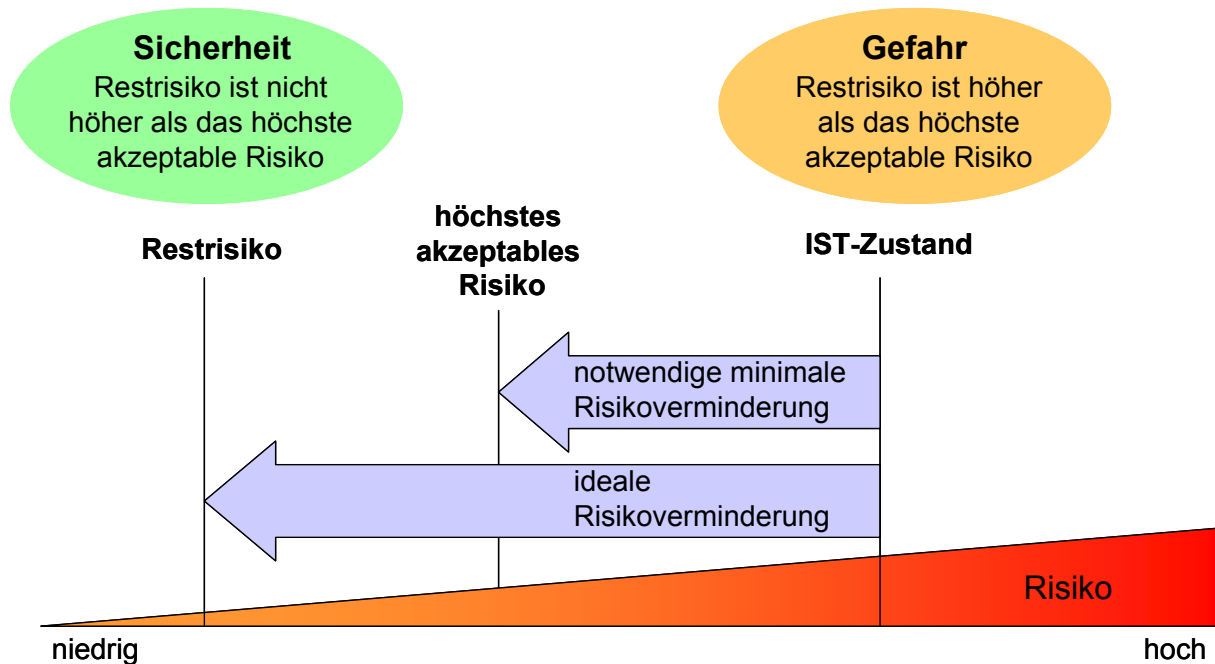


Abb. 5.13: Risikobewertung, nach M. Schmaucher, TU Dresden

In den Normen oder Gesetzen werden die **Konformitätsbewertungsverfahren** je nach dem konkreten Produktrisiko (Klassifizierung der Produkte) spezifiziert. Es können auch externe Benannte Stellen (z. B. TÜV) nötig werden, beispielsweise für eine

- Bauartprüfung
- Stückprüfung
- Einzelabnahme.

In den Richtlinien werden je nach Risiko jeweils **Modulsysteme** (Einzelmodule und deren Kombinationen) für die Konformitätsbewertungsverfahren festgelegt, siehe Abb. 5.14. Je höher das Risiko ist, umso mehr müssen Benannte Stellen eingeschaltet werden, dann ersichtlich an einer vierstellige Nummer hinter dem CE Zeichen. Bei geringem Risiko kann die Konformitätsbewertung allein durch den Hersteller ohne eine Benannte Stelle durchgeführt werden.

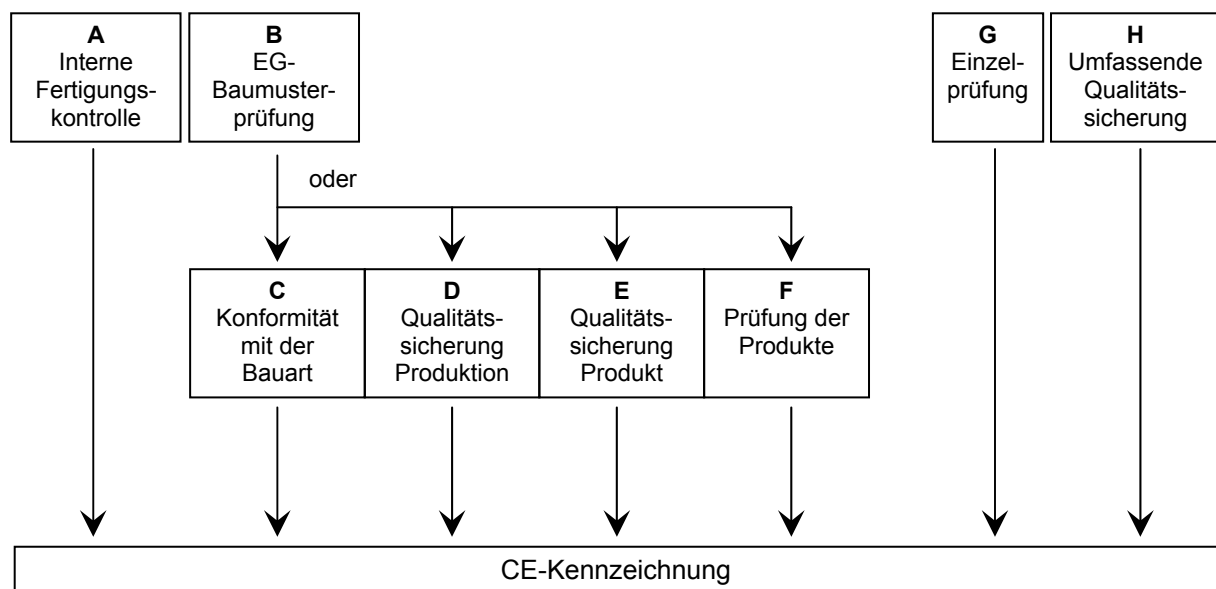


Abb. 5.14: Modulsystem für Konformitätsbewertungsverfahren (allgemein)

Die Module A bis H (Auswahl) bedeuten im Detail:

A Interne Fertigungskontrolle:

Interne Entwurfs- und Produktionskontrolle durch Hersteller. Dieses Modul erfordert keine Einschaltung einer Benannten Stelle.

B EG-Baumusterprüfung:

Baumusterprüfung durch eine Benannte Stelle mit EG-Baumusterprüfbescheinigung in Produktentwurfsstufe. Muss durch ein Modul (C bis F) ergänzt werden, das eine Bewertung in der Fertigungsstufe vorsieht.

C Konformität mit der Bauart:

In Fertigungsstufe auf Modul B folgend. Stellt sicher, dass das Produkt der Bauart entspricht. Die Einschaltung einer Benannten Stelle ist bei diesem Modul nicht erforderlich.

D Qualitätssicherung Produktion:

In Fertigungsstufe auf Modul B folgend. Beruht auf Qualitätssicherungsnorm EN ISO 9001, wobei eine Benannte Stelle eingeschaltet wird, die für die Zulassung und Kontrolle des vom Hersteller festgelegten Qualitätssicherungssystems für Herstellung, Endabnahme und Prüfung verantwortlich ist.

E Qualitätssicherung Produkt:

In Fertigungsstufe auf Modul B folgend. Beruht auf der Qualitätssicherungsnorm EN ISO 9001, wobei eine Benannte Stelle eingeschaltet wird, die für die Zulassung und Kontrolle des vom Hersteller festgelegten Qualitätssicherungssystems für Endabnahme und Prüfung verantwortlich ist.

F Prüfung der Produkte:

In Fertigungsstufe auf Modul B folgend. Eine Benannte Stelle prüft die Konformität mit der Bauart und stellt eine Konformitätsbescheinigung aus.

G Einzelprüfung:

In Entwurfs- und Fertigungsstufe. Jedes Produkt wird von einer Benannten Stelle untersucht, die eine Konformitätsbescheinigung ausstellt. Nicht für Serienfertigung.

H Umfassende Qualitätssicherung:

In Entwurfs- und Fertigungsstufe. Beruht auf der Qualitätssicherungsnorm EN ISO 9001, wobei eine benannte Stelle eingeschaltet wird, die für die Zulassung und Kontrolle des vom Hersteller festgelegten Qualitätssicherungssystems für Entwurf, Herstellung, Endabnahme und Prüfung verantwortlich ist. Meist genutzte Methode für Serienfertigung.

Im Ergebnis einer Konformitätsbewertung entstehen:

- die Konformitätserklärung des Herstellers über die Übereinstimmung mit den aufzulistenden EG-Regeln sowie die technische Dokumentation des Erzeugnisses,
- die Konformitätsbescheinigung über eine formale Prüfung der Erklärung,
- die CE-Kennzeichnung.

Exakterweise ist zu unterscheiden, ob eine **Konformitäts- oder eine Herstellererklärung nach der Maschinenrichtlinie** nötig ist. Bisher wurde verallgemeinert nur von der Konformitätserklärung gesprochen. Die Konformitätserklärung und die Herstellererklärung sind grundlegende Bestandteile des CE-Kennzeichnungsverfahrens. Ob der Hersteller am Ende des Konformitätsbewertungsverfahrens eine Konformitäts- oder eine Herstellererklärung ausstellen muss, ist abhängig von der betreffenden Maschine.

Die Konformitätserklärung muss jeder verwendungsfertigen Maschine beigelegt werden. Mit der Konformitätserklärung bestätigt der Hersteller verbindlich, dass sein Produkt die wesentlichen Anforderungen der geltenden Richtlinien einhält.

Konformitätserklärung: Die Konformitätserklärung muss enthalten:

- Angaben zum Produkt (Seriennummer, Typ, Baujahr), Abb. 5.15,
- Angaben zum Hersteller (Name und Anschrift),
- ggf. Angaben zur benannten Stelle,

- ggf. bei Baumusterprüfung die Nummer der EG-Baumusterbescheinigung,
- die eingehaltenen Richtlinien,
- die angewandten Normen,
- die Unterschrift durch einen Bevollmächtigten des Herstellers und Angaben zum Unterzeichner.

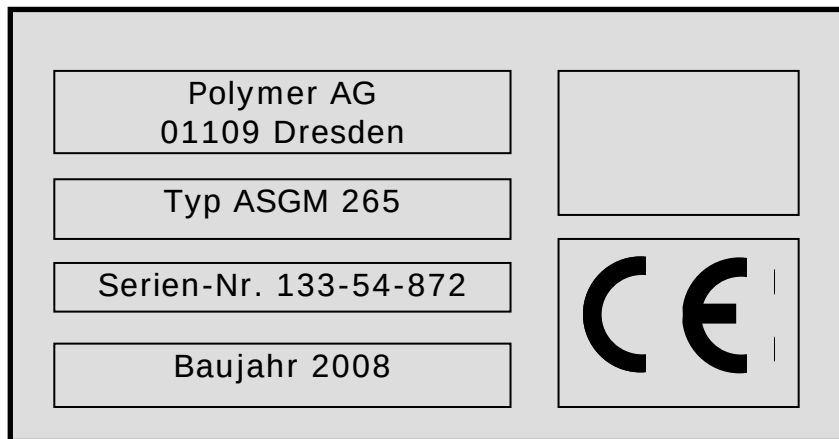


Abb. 5.15: CE-Kennzeichen auf Typschild

Herstellererklärung: Für Maschinenkomponenten, die nicht selbständig funktionieren und zum Einbau in eine andere Maschine bestimmt sind, muss der Hersteller eine Herstellererklärung ausstellen. Mit dieser Erklärung bestätigt der Hersteller verbindlich, dass sein Produkt die wesentlichen Anforderungen der geltenden Richtlinien einhält. Solche Maschinenkomponenten dürfen keine CE-Kennzeichnung tragen.

Die **Herstellererklärung** muss folgende Angaben enthalten:

- Angaben zum Produkt (Seriennummer, Typenbezeichnung, Baujahr),
- Angaben zum Hersteller (Name und Anschrift),
- ggf. Angaben zur benannten Stelle,
- ggf. bei Baumusterprüfung die Nummer der EG-Baumusterbescheinigung,
- die eingehaltenen Richtlinien,
- die angewandten Normen,
- den Hinweis, dass die Inbetriebnahme solange untersagt ist, bis die Maschine, in die die Maschinenkomponente eingebaut werden soll, den wesentlichen Anforderungen der Richtlinien entspricht,
- die Unterschrift und Angaben zum Unterzeichner.

Ab 01.01.1996 wurde parallel auch das EMV-Gesetz im Rahmen der EG-Richtlinien verbindlich. Der Nachweis der elektromagnetischen Verträglichkeit für alle neu auf den Markt gebrachten Erzeugnisse ist dadurch erforderlich geworden. Durch Anbringen des CE-Kennzeichens wird dies ebenfalls mit bestätigt.

GS-Kennzeichnung: Die **GS-Kennzeichnung** ist dort, wo sie eine umfassendere Sicherheit bewirkt, beispielsweise durch eine Bauartprüfung, weiterhin möglich. Unterschiede zeigt Tafel 5.8.

Tafel 5.8 Unterschiede zwischen GS- und CE-Kennzeichnung

Wirkungsfeld	GS-Prüfzeichen	CE-Kennzeichnung
Anbringepflicht	freiwillig	zwingend
Anerkennung	Deutschland	EU-Staaten
Haftung	Personenschutz	Personen-, Haustier-, Güteschutz
Rechtsrelevanz	beim Inverkehrbringen	bei Bereitstellung für den Markt
Sicherheitsniveau	allg. anerkannte Regeln der Technik und bestimmungsgemäßer Gebrauch	Übereinstimmung mit den grundlegenden Sicherheitsanforderungen der EG-Richtlinien
Voraussetzungen	Bauartprüfung	Konformitätsbewertung des Produkts und Konformitätserklärung

5.6.3 Medizinproduktegesetz (MPG)

Gesetzliche Regelung: Gesetz über Medizinprodukte (Medizinproduktegesetz - MPG), Neufassung vom 7. August 2002 mit diversen nachfolgenden Änderungen zur Umsetzung der Richtlinien zur europäischen Harmonisierung (RL 90/385/EWG, 93/42/EWG, 98/79EG).

Definition Medizinprodukte (vereinfacht): Produkte zur medizinisch-therapeutischen oder diagnostischen Verwendung für Menschen, wobei die Hauptwirkung nicht pharmakologisch, immunologisch oder metabolisch ist, sondern physikalisch (gilt also nicht für Arzneimittel).

Zunächst ist es hierbei wichtig, eine Einteilung in die von europäischen Richtlinien vorgegebenen Klassen vorzunehmen. Dabei gelten folgende Unterscheidungen:

Aktive Implantate (aktiv bedeutet energetisch betrieben)

RL 90 385/EWG, sehr hohes Risikopotential, Beispiele: Herzschrittmacher

In-vitro-Diagnostika

RL 98/79EG, z. B. Labormessgeräte sowie Messgeräte für den Heimanwender (beispielsweise Blutzuckermessgerät), aufgeteilt in verschiedene Listen

Sonstige Medizinprodukte

RL 93/42EWG, nach Risiko klassifiziert in vier Klassen (I, IIa, IIb, III)

Klasse III sehr hohes Risiko, z. B. Herzkatheder, Stent, Hüftprothese

Klasse IIb hohes Risiko, z. B. Infusionspumpen, Röntgengeräte

Klasse IIa mittleres Risiko, z. B. Zahnfüllung, Hörgeräte, Ultraschallgeräte

Klasse I geringes Risiko, z. B. Rollstühle, Fieberthermometer ...

(weitere Unterteilung: Klasse I steril, Klasse I mit Messfunktion)

Konformitätsbewertungsverfahren bei Medizinprodukten:

Medizinprodukte Klasse I ohne Zusatz: Keine Einschaltung von Benannten Stellen. Hersteller führt Konformitätsverfahren in eigener Verantwortung durch. Zu prüfen sind grundlegende Anforderungen an die Sicherheit, Leistungsfähigkeit, Design und

Produktion. Vergleichbar zu Maschinen und Geräten allgemein.
Abschluss: CE-Kennzeichnung

In eigener Verantwortung der Hersteller wird ein Konformitätsbewertungsverfahren wie folgt durchgeführt.

- Ermittlung der geltenden gesetzlichen Regelungen/Richtlinien
- Gefahrenanalyse/Risikoanalyse, Risikoermittlung,
- Risikobewertung, Risikomanagement aufzeigen
- Hinweis auf Gefährdungen durch Bedienungsanleitung
- Technische Dokumentation erstellen und für Überprüfung durch
- Behörden bereithalten
- ggf. erfolgt eine Inspektion durch Kontrollbehörden
- Konformitätserklärung abgeben
- **CE-Kennzeichnung**, eigenständige Anbringung.

Medizinprodukte hörerer Klassen (ab I steril oder I mit Messfunktion, IIa, IIb, III und Aktive Implantate und In-vitro-Diagnostika teilweise): Konformitätsbewertung erfolgt abhängig von der Risikoklassifizierung unter Beteiligung einer Benannten Stelle (z. B. TÜV). Benannte Stellen führen vorgeschriebene Prüfungen durch und erteilen erforderliche Bescheinigungen. Hersteller können sich an eine Benannte Stelle ihrer Wahl wenden. Verantwortung bleibt trotzdem beim Hersteller.
Abschluss: CE-Kennzeichnung mit vierstelliger Nummer der benannten Stelle.

Es gilt generell auch hier die Konformitätsvermutung bei Einhaltung der harmonisierten Normen. Weitere Rechtsverordnungen, Regeln, spezifische Aspekte und strafrechtliche Aspekte. Zur Kontrolle der Einhaltung der Richtlinien sind zuständig

- Bundesinstitut für Arzneimittel und Medizinprodukte
- Paul-Ehrlich-Institut,
- physikalisch-technische Bundesanstalt
- Onlineerfassungssystem beim Deutschen Institut für medizinische Dokumentation und Information, www.DIMDI.de.

Besonderheiten bei Medizinprodukten:

1. Im Rahmen der Konformitätsbewertung ist nicht nur die **Produktsicherheit** sondern zusätzlich die **medizinisch-technische Leistungsfähigkeit** nachzuweisen, wie beispielsweise in der Produktbeschreibung/Werbung ausgelobt. Dies erfolgt über eine **klinische Bewertung** (nach Zustimmung der Ethikkommission und Genehmigung durch die zuständige Bundesbehörde).

2. Für die meisten Produktklassen von Medizingeräten sind **externe Stellen** einzubeziehen für einen zertifizierten Nachweis der Produktsicherheit **und** Leistungsfähigkeit.

3. Es gibt zudem eine **Meldepflicht von Vorkommnissen** oder Rückrufen an staatliche Überwachungseinrichtungen (Bundesinstitut für Arzneimittel und Medizinprodukte BfArM).

Eine weitere Problematik ist die Zulassung außerhalb EU, z. B. durch die amerikanische Bundesgesundheitsbehörde FDA (Food & Drug Administration).

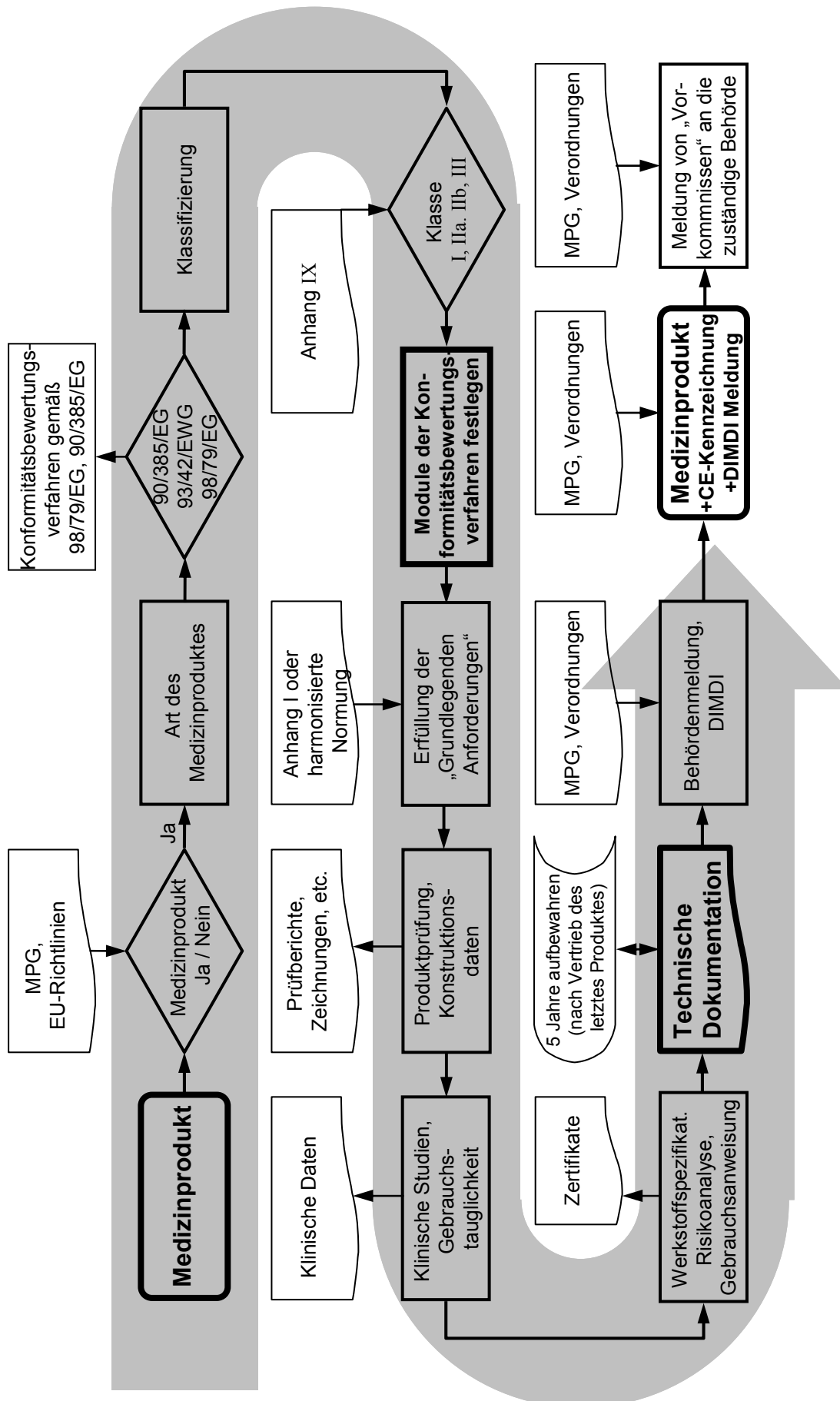


Abb. 5.16: Beispiel eines Zulassungsverfahrens für Medizinprodukte, nach Uni Duisburg, IPE, Prof. Fischer

5.6.4 Produkthaftung

Neben den weithin bekannten Gewährleistungsansprüchen gegenüber Händlern oder Herstellern besteht eine aus sicherheitstechnischen Aspekten relevante Produkthaftung, Tafel 5.9. Die **Produkthaftung** stellt dabei die zivilrechtliche Haftung für Folgen eines fehlerhaften Produktes dar, also nicht für Schäden am Produkt (Gewährleistung), sondern für Schäden durch Nutzung des Produktes.

Tafel 5.9 Unterschiede zwischen Gewährleistung und Produkthaftung, /19/

	Gewährleistung	Produkthaftung
Definition	Haftung für die Erfüllung vertraglicher Pflichten	Haftung für Folgeschäden
Sachverhalt abstrakt	Abnehmer erhält nicht den vereinbarten Gegenwert für sein Geld	Abnehmer oder Dritter erleidet an sonstigen Rechtsgütern außerhalb der gelieferten Sache einen Schaden
anspruchsberechtigt	nur der Vertragspartner *	jedermann
Anspruchsvoraussetzungen	Lieferung eines mangelhaften Produktes	Lieferung eines mangelhaften Produktes und zusätzliche Voraussetzungen *
Rechte des Anspruchsstellers	Nachbesserung, Ersatzlieferung, Minderung, Wandlung *	Schadenersatz
Risiko für Beklagten	auf Wert des Liefergegenstandes beschränkt *	der Höhe nach unbegrenzt
Verjährung	kurze Frist *	teilweise lange Fristen
vertraglicher Haftungsausschluss	nur sehr bedingt möglich	grundsätzlich unmöglich *
Haftplichtversicherung	unmöglich	möglich *
* für den Beklagten günstigere Regelung		

Mit dem seit 1990 geltenden Produkthaftungsgesetz tritt damit neben die Zusagehaftung (durch Kaufvertrag), die schuldhaftige Vertragsverletzung und die deliktsrechtliche Produkthaftung ein weiterer gesetzlicher Haftungsanspruch, Tafel 5.10.

Tafel 5.10 Vergleich zwischen deliktsrechtlicher Produkthaftung und Produkthaftungsgesetz, nach /19/

		Deliktsrechtliche Produkthaftung	Produkthaftungsgesetz
Haftung	generell	nur bei Verschulden *	unabhängig vom Verschulden
	des Herstellers	für fremde Fehler nur bei fehlerhafter Auswahl, Kontrolle oder Vorgaben *	uneingeschränkt für fremde Fehler aus vorgelagerten Bereichen
	des Händlers	nur für Vertriebsfehler *	für alle Fehler des Produktes, aber volle Entlastungsmöglichkeit
	des EG-Importeurs	grundsätzlich nur für Vertriebsfehler *	für alle Fehler wie ein Hersteller
Beweislast für Herkunft des Fehlers		grundsätzlich beim Kläger *	beim Beklagten
Verjährung		3 Jahre ab Kenntnis / spätestens nach 30 Jahren *	3 Jahre ab Kenntnis/ spätestens nach 10 Jahren
Haftungsausschluss		möglich *	unmöglich
* für den Beklagten günstigere Regelung			

Einige wesentliche neue Aspekte, die Auswirkungen auch für den Geräteentwickler haben, seien genannt:

- Anspruchsberechtigt ist jedermann, der einen Schaden durch das Produkt erleidet.
- Es muss kein Verschulden des Herstellers vorliegen, d. h. auch wenn die mögliche Gefährdung bei aller Sorgfalt nicht erkennbar war, greift die Haftung.
- Auch Zulieferungen und Importe werden gleichberechtigt berücksichtigt. Hersteller oder Händler haften immer voll (Händler können jedoch auf Hersteller innerhalb der EU verweisen).
- Die Beweislast liegt beim Beklagten.

Für den Hersteller ergibt sich durch das Produkthaftungsgesetz eine wesentliche Haftungsverschärfung, Tafel 5.11.

Tafel 5.11 Vergleich zwischen deliktsrechtlicher Produkthaftung und Produkthaftungsgesetz, nach /19/

		Deliktsrechtliche Produkthaftung	Produkthaftungsgesetz
Ersatzpflichtiger Schaden	Sachschaden	jeder	nur von Privaten *
	Schaden am gelieferten Produkt	unter Umständen zu ersetzen	nicht zu ersetzen *
	Selbstbehalt	ohne	bei Sachschaden € 575,- *
	Schadenhöhe	unbegrenzt	bei Personenschaden € 80 Mio. *
	Schmerzensgeld	zu ersetzen	nicht zu ersetzen *
Beweislast für Herkunft des Fehlers		grundsätzlich beim Kläger *	beim Beklagten
Verjährung		3 Jahre ab Kenntnis/ spätestens nach 30 Jahren *	3 Jahre ab Kenntnis/ spätestens nach 10 Jahren
Haftungsausschluss		möglich *	unmöglich
* für den Beklagten günstigere Regelung			

6 Zuverlässigkeit im Gerätebau

6.1 Einführung

Der Begriff Zuverlässigkeit ist zunächst zu spezifizieren.

Zuverlässigkeit kennzeichnet die **Wahrscheinlichkeit** dafür, dass ein technisches System innerhalb vorgegebener Grenzen/Einsatzbedingungen und während einer bestimmten Zeitdauer den durch den Verwendungszweck bedingten Anforderungen genügt und nicht ausfällt.

Eine absolute Zuverlässigkeit existiert folglich nicht. Sie ist immer gebunden an

- festgelegte Betriebs- und Umweltbedingungen, innere und äußere Arbeitsbedingungen,
- festgelegte Beanspruchungsgrenzen,
- ein bereits vorhandenes Lebensalter,
- eine bestimmte Betriebsdauer.

Andere Begriffe, wie Sicherheit, Genauigkeit, Güte und Qualität, werden zwar umgangssprachlich oft auch im Zusammenhang mit Aspekten der Zuverlässigkeit gebraucht, hier ist jedoch der Wahrscheinlichkeitsaspekt der Zuverlässigkeit ganz deutlich demgegenüber abzuheben und zu trennen. Bild 5.1 zeigte beispielsweise bereits, dass Bauteil- und Funktionszuverlässigkeit natürlich die Grundlage für die Sicherheit von Geräten bilden, Zuverlässigkeit und Sicherheit aber unterschiedliche Gebiete sind.

Auch der Begriff der Verfügbarkeit muss hier deutlich abgegrenzt werden, da dabei Reparaturen und dadurch bedingte Stillstandszeiten mit eingehen. Verfügbarkeit kennzeichnet lediglich das Verhältnis zwischen der Zeitdauer, die ein System ordnungsgemäß nutzbar ist, und der Gesamtzeit oder Kalenderzeit. Verfügbarkeit stellt also eine andere Betrachtungsweise von Ausfällen und deren Auswirkungen dar.

6.2 Kennziffern und Charakterisierung der Zuverlässigkeit

Ein zentraler Begriff für Zuverlässigkeitsbetrachtungen ist der **Ausfall**. Ein Ausfall bezeichnet ein Ereignis, das dadurch gekennzeichnet ist, dass ein Gerät/System seine vorgesehene Funktion nicht mehr erfüllen kann und durch einen unvorhergesehenen äußeren Eingriff wieder hergestellt werden muss.

Dazu gehört nicht eine planmäßige vorbeugende Instandhaltung, beispielsweise ein vorbeugender Wechsel von Bauteilen wie bei Kfz-Wartungen üblich. In der Gerätetechnik sind solche vorbeugenden Wartungen eher selten.

Der Zeitpunkt eines Ausfalls und damit die Lebensdauer eines konkreten Systems oder Bauelementes ist **nicht** vorhersehbar, stattdessen wird die Lebensdauer der Gesamtheit dieser Elemente oder Systeme als Zufallsgröße in Form der Ausfallcharakteristik mit wahrscheinlichkeitstheoretischen und statistischen Methoden interpretiert.

KENNGRÖßEN:**Ausfallwahrscheinlichkeit** (Fehlerfunktion oder Unzuverlässigkeitsfunktion)

$$F(t) = P(T \leq t) \approx \frac{n_0 - n_g(t)}{n_0} = \frac{n_a(t)}{n_0} \quad (6.1)$$

Sie gibt die Wahrscheinlichkeit dafür an, dass die Lebensdauer T eines Elementes/Systems zum jeweiligen Zeitpunkt t kleiner als t ist, d. h. die Wahrscheinlichkeit für einen Ausfall. Ein Schätzwert dafür ist die Ausfallhäufigkeitssumme, also das Verhältnis von der Zahl der ausgefallenen Systeme zum Anfangsbestand (a - ausgefallen, g - gut). Das Ereignis Ausfall ist dabei in Form von Ausfallkriterien zu definieren. Ist beispielsweise eine kleine Leistungsminderung bereits ein Ausfall?

Überlebenswahrscheinlichkeit

$$R(t) = P_{\bar{u}}(T > t) \approx \frac{n_g(t)}{n_0} = \frac{n_0 - n_a(t)}{n_0} \quad \text{mit} \quad R(t) = 1 - F(t) \quad (6.2)$$

Sie gibt als zur Ausfallwahrscheinlichkeit komplementäre Zuverlässigkeitsfunktion die Wahrscheinlichkeit dafür an, dass die Lebensdauer T zum jeweiligen Zeitpunkt größer als die aktuelle Zeit t ist, das System also noch ordnungsgemäß funktioniert.

Der Begriff der Überlebenswahrscheinlichkeit wird dabei überwiegend für nicht reparierbare Systeme oder Elemente genutzt. Bild 6.1 zeigt beide komplementäre Kenngrößen in allgemeiner Form.

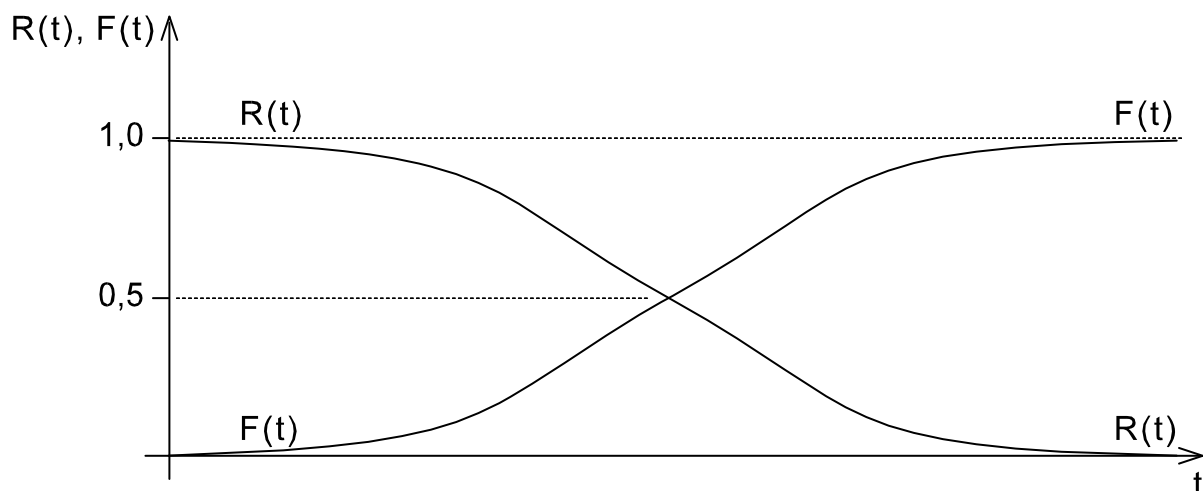


Abb. 6.1: Ausfall- und Überlebenswahrscheinlichkeit qualitativ

Ausfallwahrscheinlichkeitsdichte (zugehörige Dichtefunktion)

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = - \frac{dR(t)}{dt} \quad (6.3)$$

Sie kennzeichnet die Wahrscheinlichkeit dafür, dass der Ausfall zum Zeitpunkt t (besser zwischen t und $t + dt$) auftritt. Aus Abschnitt 4.4 sind einige Verteilungsfunktionen und deren Dichtefunktion bereits bekannt, allerdings gilt hier eine Zeitabhängigkeit.

Ermittelt werden obige Verteilungsfunktionen, indem man zunächst Ausfallhäufigkeiten und zugehörige Summenhäufigkeiten experimentell bestimmt und anschließend geeignete mathematische Verteilungsfunktionen dafür sucht, Bild 6.2. Die Lebensdauer oder auch andere, der Zeit gleichwertige Größen (im Bild die Lastwechselzahl) werden dabei zunächst in Klassen aufgeteilt.

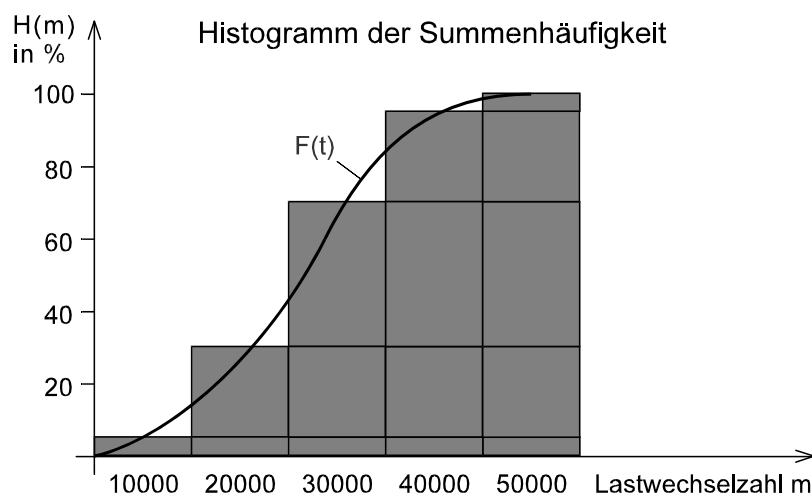
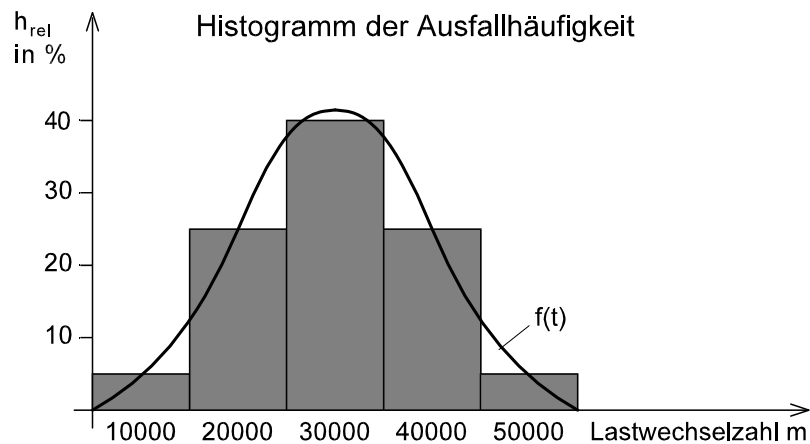


Abb. 6.2: Beispiel zur Ermittlung von Dichte- und Verteilungsfunktionen, hier Ausfall eines Bauteils durch Wechselbeanspruchung als Funktion der Lastwechselzahl, nach /31/

Als Anzahl der Klassen wählt man i. Allg. $\sqrt{n}$, mit n als Gesamtzahl der Ausfälle der Elemente. Für diese Klassen wird jeweils die Zahl der Ausfälle n_K in dieser Klasse oder die relative Größe, die **Ausfallhäufigkeit**

$$h = h_{rel} = \frac{\text{Anzahl der Ausfälle in einer Klasse } K}{\text{Gesamtzahl der Ausfälle}} = \frac{n_K}{n} \quad (6.4)$$

an einer Auswahl von Elementen experimentell ermittelt und grafisch dargestellt.

Die Gesamtzahlen der Ausfälle zu jedem Zeitpunkt bzw. zu jeder erbrachten Lastwechselzahl können nun auch als **Summenhäufigkeit** dargestellt werden:

$$H(m) = \sum_{i=1}^m h_{rel}(i) \quad (6.5)$$

Die Ausfallwahrscheinlichkeit in Form der Fehlerfunktion $F(t)$ bildet mathematisch $H(m)$ als Grenzwertbetrachtung ab, die Ausfallwahrscheinlichkeitsdichtefunktion $f(t)$ bildet h_{rel} ab. Für die Abbildung geeignete Verteilungsfunktionen werden zunächst aus Erfahrung ausgewählt und die Parameter dieser Verteilung für die konkreten Ausfallcharakteristiken geschätzt bzw. mathematisch angenähert. Anschließend ermittelt man durch Anpassungstests, ob bestimmte beobachtete Werte den gewählten mathematischen Verteilungen widersprechen.

Eine weitere Kenngröße ist die **Ausfallrate** λ

$$\lambda = \frac{f(t)}{R(t)} = - \frac{\frac{dR(t)}{dt}}{R(t)} = - \frac{1}{R(t)} \frac{dR(t)}{dt} \quad (6.6)$$

Sie charakterisiert den zeitlichen Verlauf der Ausfälle in Bezug auf die überlebenden Systeme. Charakteristische Ausfallraten λ verdeutlicht Bild 6.3. Die Ausfallrate hat die Maßeinheit 1/h. Damit ergeben sich praktisch sehr kleine Werte in der Größenordnung von beispielsweise $\lambda = 10^{-9} \dots 10^{-6}$ 1/h.

Deshalb wird insbesondere bei elektronischen Bauelementen mit konstanten Ausfallraten (siehe Exponentialverteilung) die Ausfallrate auch häufig in FIT (Failure in Time) angegeben, mit FIT = 10^{-9} 1/h. Ein FIT bedeutet damit einen Ausfall in 10^9 h.

Ausfallzahlen über die gesamte Nutzungszeit hinweg werden dagegen allgemein häufig in ppm (parts per million) angegeben.

Oftmals zeigt sich mehr oder weniger ausgeprägt eine typische Badewannenkurve für vorwiegend elektronische oder auch viele mechanische Systeme. Nach Inbetriebnahme treten Frühausfälle auf, bedingt durch unerkannt gebliebene Material-, Fertigungs- oder Montagefehler. Durch ein zeitlich begrenztes Einlaufen beim Hersteller, unter Umständen auch bei verschärften Beanspruchungen (burn in), versucht man, diesen Bereich noch beim Hersteller zu belassen. Anschließend stellt sich über eine gewisse Zeit oft ein annähernd konstantes Ausfallverhalten ein, man spricht auch von Zufallsausfällen. Durch Alterung und Verschleiß steigt die Ausfallrate gegen Ende der Lebensdauer jedoch wieder an.

Die Ausfallrate ist genau wie andere Zuverlässigkeitskenngrößen eine Funktion der Betriebszeit, des erreichten Lebensalters, der Beanspruchung und des gewählten Ausfallkriteriums.

$$\lambda = \lambda(t, T_L, B, A) \quad (6.7)$$

$$\lambda = \lambda(\text{Betriebszeit}, \text{Lebensalter}, \text{Beanspruchung}, \text{Ausfallkriterium})$$

Weitere wichtige Kenngrößen beziehen sich auf die konkreten zu erwartenden Betriebszeiten.

Der **Erwartungswert** E gibt die mittlere Betriebszeit bis zum ersten Ausfall an (MTTF-Wert, mean time to failure bzw. MTTF mean time to first failure) bzw. die mittlere Betriebszeit zwischen zwei Ausfällen (MTBF-Wert, mean time between failure), wenn Reparaturen zugelassen werden.

Der Erwartungswert berechnet sich nach

$$E(t) = MTTF = \theta = \int_0^{\infty} t f(t) dt = \int_0^{\infty} R(t) dt (= MTBF). \quad (6.8)$$

Der Erwartungswert für den MTBF-Wert bzw. MTTF-Wert lässt sich auch als Verhältnis zwischen Betriebsdauer und Zahl der Ausfälle schätzen.

Für die wichtige Exponentialverteilung gilt $E = t_m = T = 1/\lambda$ mit T als charakteristische Lebensdauer und zugleich mittlerer Lebensdauer t_m sowie Kehrwert der konstanten Ausfallrate λ .

Allgemein ist die charakteristische Lebensdauer T aber als die Zeit definiert, zu der 63,2 % aller Teile ausgefallen sind (e^{-1}), was in o. g. Gleichung für den Spezialfall der reinen Exponentialverteilung zutrifft.

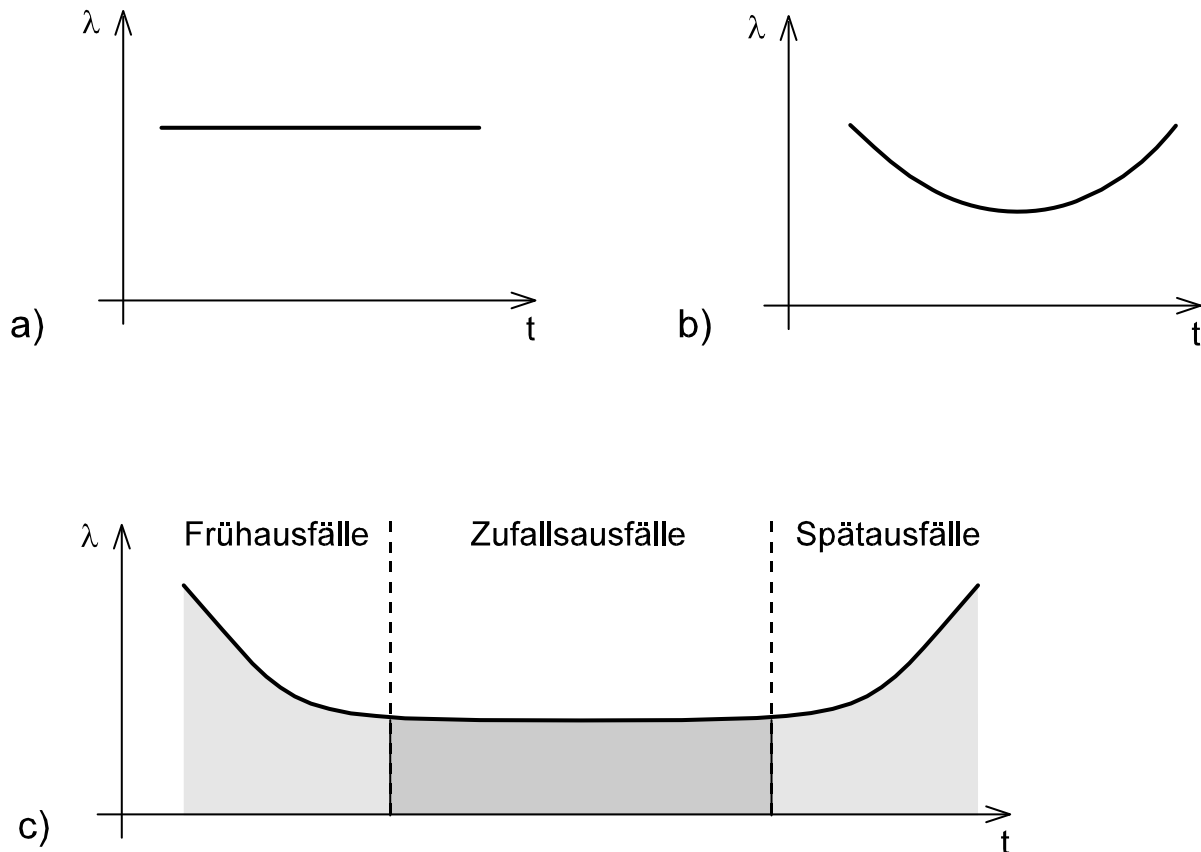


Abb. 6.3: Beispiele für charakteristische Ausfallraten

a) konstante Ausfallrate (z. B. elektronische Bauelemente bei Zufallsausfällen)

b) typische Ausfallrate mechanischer Bauelemente

c) typische Badewannenkurve (z. B.: Gesamtlebenszyklus elektrischer oder mechanischer Systeme)

In diesem Zusammenhang ist nun auch die **Verfügbarkeit** für den Anwender zu quantifizieren:

$$V = \frac{T}{T + T_A} = \frac{\text{(mittlere Zeit zwischen zwei Ausfällen)}}{\text{mittlere Zeit zwischen zwei Ausfällen} + \text{Ausfalldauer}} \quad (6.9)$$

Die Verfügbarkeit hängt damit auch von subjektiven Größen, wie der Kundendienstorganisation, der Dauer der Fehlersuche und der reinen Zeit für die Fehlerbeseitigung ab.

Häufig genutzt werden auch die **B_1 -** und **B_{10} -Quantile**, Zeiten zu denen 1 % bzw. 10 % Ausfälle erreicht sind. Diese Werte stellen einzelne Punkte der Verteilungen dar.

6.3 Charakteristische Verteilungsfunktionen

Bei der Abbildung von praktisch vorkommenden Häufigkeitsverteilungen haben sich insbesondere nachfolgende Verteilungsfunktionen bewährt:

- Exponentialverteilung
- Gaußsche Normalverteilung
- Logarithmische Normalverteilung
- Weibull-Verteilung.

6.3.1 Exponentialverteilung

Viele Elemente oder Systeme zeigen zumindest über eine längere Zeit eine konstante Ausfallrate, insbesondere trifft dies auf alle elektronischen Bauelemente und komplett elektronische Baugruppen zu. Auch Systeme, die durch Austausch defekter Teile erneuert werden, zeigen solche Verteilungen.

Die einfachste mathematische Abbildung dafür ermöglicht die Exponentialverteilung (Bild 6.4) mit

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad \text{als Überlebenswahrscheinlichkeit} \quad (6.10)$$

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad \text{als Ausfallwahrscheinlichkeit} \quad (6.11)$$

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad \text{als Dichtefunktion} \quad (6.12)$$

$$\lambda(t) = \text{konst.} \quad \text{als Ausfallrate} \quad (6.13)$$

$$\text{mit } \lambda = 1/T = 1/t_m \quad \text{als Zusammenhang zur charakteristischen Lebensdauer und zugleich mittleren Lebensdauer} \quad (6.14)$$

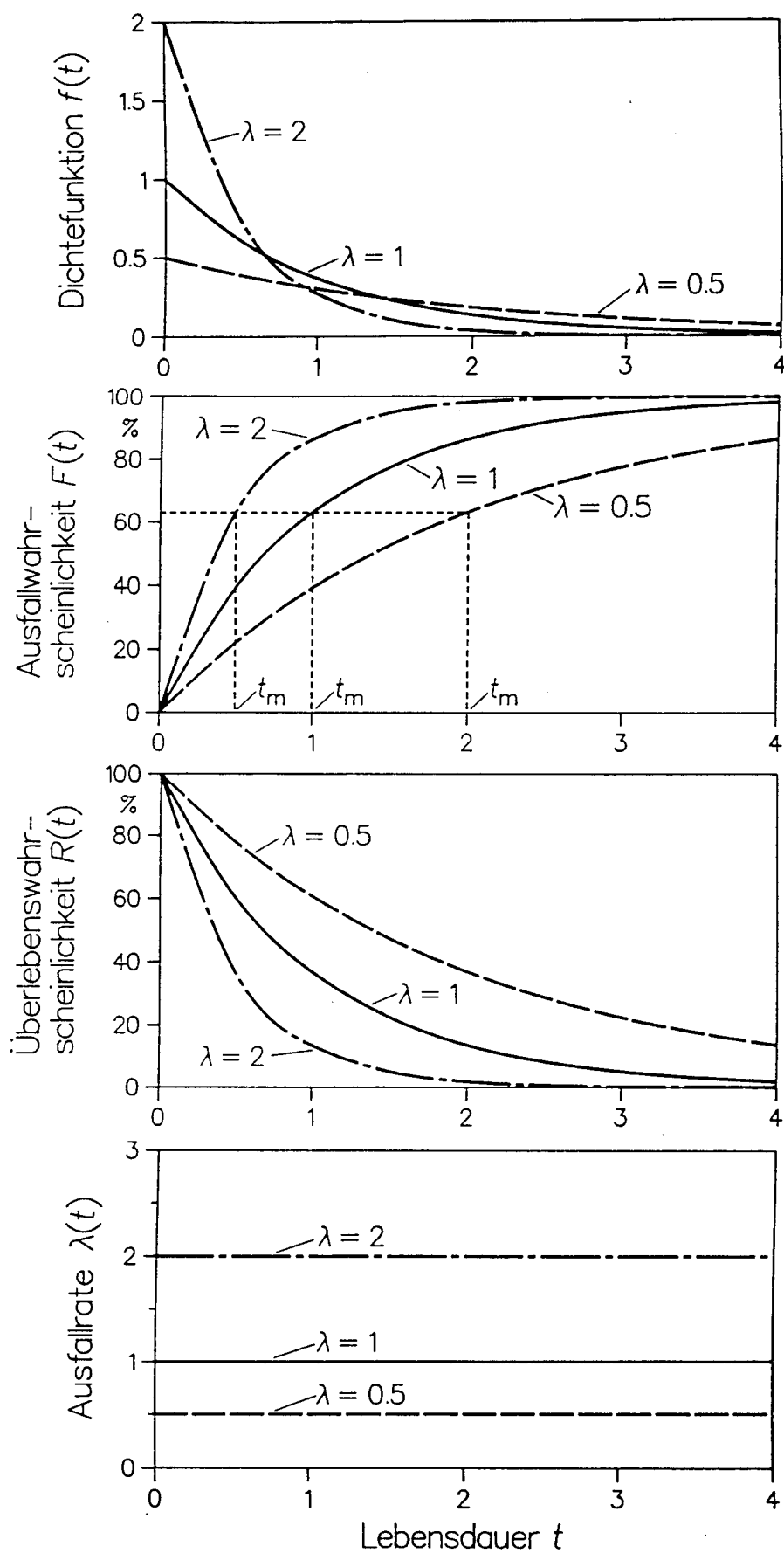
Die **statistische Variable** ist die Zeit t (Beanspruchungszeit, Lastwechsel, Anzahl der Betätigungen, ...), λ ist der **Lage und Formparameter** in einem.

Das Lebensalter der Bauelemente wirkt sich hier nicht auf deren Ausfallrate aus. Die Exponentialverteilung ist sehr einfach handhabbar und bietet sich deshalb häufig als erster Versuch für die Beschreibung an.

Für die Exponentialverteilung gilt als Spezialfall, wie bereits weiter oben angeführt:

$$E = MTTF = MTBF = t_m = T = 1/\lambda$$

mit T als charakteristischer und zugleich mittlerer Lebensdauer t_m sowie der konstanten Ausfallrate λ . Allgemein sei nochmals erwähnt, dass die charakteristische Lebensdauer T als die Zeit definiert ist, zu der 63,2 % aller Teile ausgefallen sind (e^{-1}), was in o. g. Gleichung zutrifft.

**Abb. 6.4:** Funktionen der Exponentialverteilung, aus /31/

6.3.2 Gaußsche Normalverteilung

In der Natur und auch in der Technik ist als gänzlich andere Verteilungsdichtefunktion insbesondere die Normalverteilung anzutreffen. Natürliche Alterungsprozesse, das Zusammentreffen sehr vieler, einzeln nicht dominierender Einflussgrößen (vgl. statistische Tolerierung) aber auch das Verhalten bei Ermüdungsbrüchen führt häufig zu dieser Verteilung.

In normierter Form lauten die Funktionen (Bild 6.5) dann

$$R(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_t^{\infty} e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}} dt \quad (6.15)$$

$$F(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_0^t e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}} dt \quad (6.16)$$

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (6.17)$$

$$\text{mit } \lambda = \lambda(t)$$

Der Mittelwert μ ist der **Lageparameter** und entspricht hier der mittleren Lebensdauer t_m . Zusätzlich tritt die bereits eingeführte Standardabweichung σ als **Formparameter** auf. Die **statistische Variable** ist wieder die Zeit t (Beanspruchungszeit, Lastwechsel, Anzahl der Betätigungen, ...), ohne weiter darauf spezifisch hinzuweisen.

Gebräuchlich ist auch die logarithmische Form, die sog. logarithmische Normalverteilung mit

$$f(t) = \frac{1}{t\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\lg t - \mu)^2}{2\sigma^2}} \frac{1}{h}, \quad (6.18)$$

wobei dies eine zugeschnittene Größengleichung ist und nur für σ , t und μ in Stunden gilt.

Im Vergleich zur statistischen Toleranzrechnung müssen bei den Normalverteilungen hier natürlich die Bereiche für $t < 0$ ausgeschlossen werden.

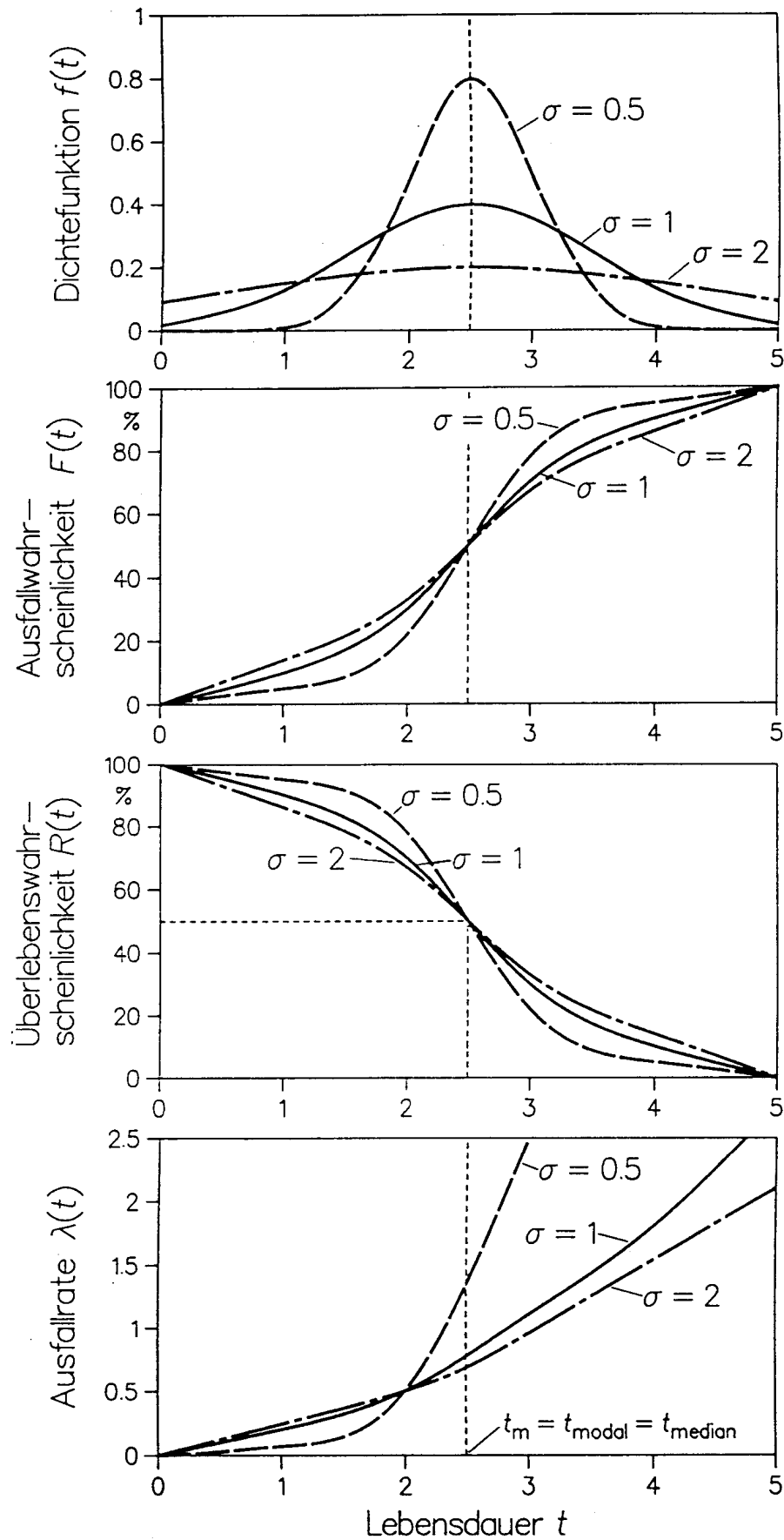


Abb. 6.5: Funktionen der Normalverteilung, aus /31/

6.3.3 Weibull-Verteilung

Diese von dem schwedischen Ingenieur Weibull für die Beschreibung von Bruchfestigkeiten eingeführte Verteilung enthält sowohl die Normal-, die logarithmische Normalverteilung als auch die Exponentialverteilung als Sonderfälle. Sie hat insbesondere für die Behandlung mechanischer Systeme weite Verbreitung gefunden. In der zweiparametrischen Form lauten die Verteilungen

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{T}\right)^b} \quad (6.19)$$

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{T}\right)^b} \quad (6.20)$$

$$f(t) = \frac{b}{T} \left(\frac{t}{T}\right)^{b-1} e^{-\left(\frac{t}{T}\right)^b} \quad (6.21)$$

$$\lambda(t) = \frac{b}{T} \left(\frac{t}{T}\right)^{b-1} \quad (6.22)$$

und in der dreiparametrischen Form

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t-t_0}{T-t_0}\right)^b} \quad (6.23)$$

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-t_0}{T-t_0}\right)^b} \quad (6.24)$$

$$f(t) = \frac{b}{T-t_0} \cdot \left(\frac{t-t_0}{T-t_0}\right)^{b-1} e^{-\left(\frac{t-t_0}{T-t_0}\right)^b} \quad (6.25)$$

$$\lambda(t) = \frac{b}{T-t_0} \cdot \left(\frac{t-t_0}{T-t_0}\right)^{b-1} \quad (6.26)$$

Hier ist der **Lageparameter** T wiederum die charakteristische Lebensdauer, also die Zeit, zu der 63,2 % aller Teile ausgefallen sind (e^{-1}). b stellt als **Formparameter** die Ausfallsteilheit dar. In der dreiparametrischen Form ist zusätzlich t_0 als eine ausfallfreie Zeit vorhanden, eine Verschiebung der t -Achse.

Hier ist die charakteristische Lebensdauer T nur für den Spezialfall $b=1$ mit dem MTTF bzw. MTBF-Wert identisch, anderenfalls nicht. Abb. 6.6 zeigt die Abhängigkeit des MTBF-Wert/Erwartungswertes in Abhängigkeit des Formparameters.

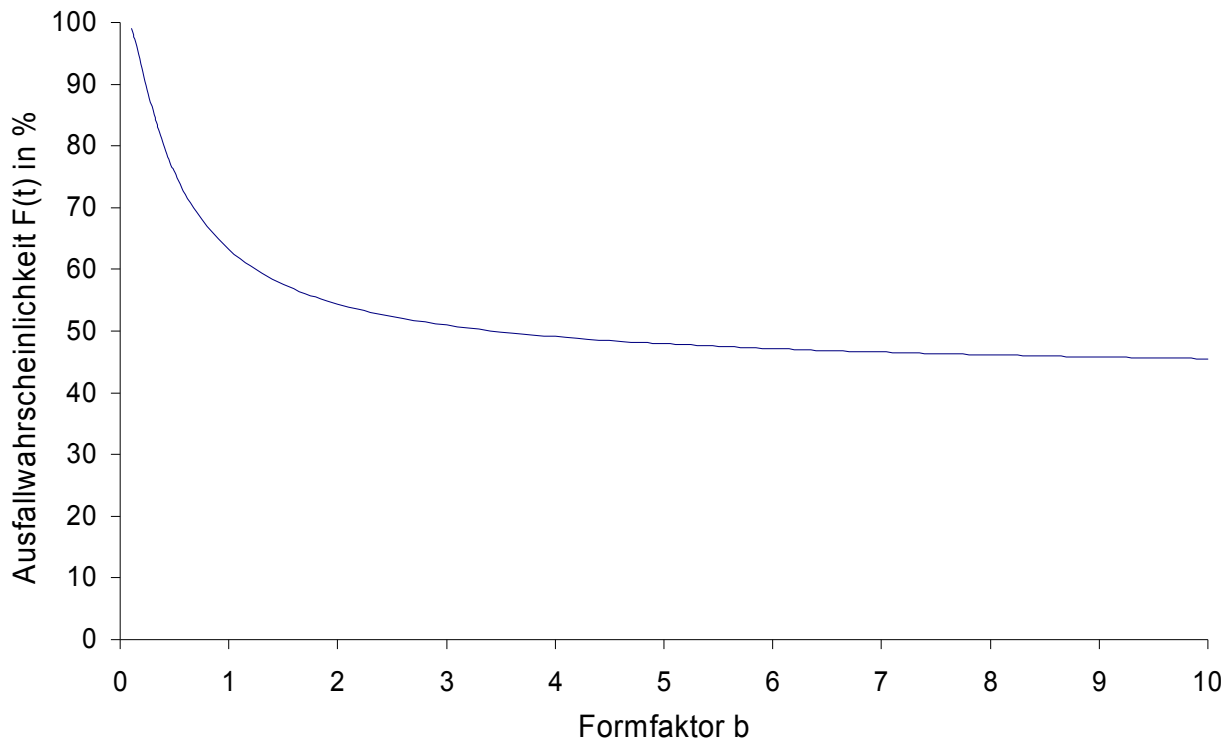


Abb. 6.6: MTBF-Wert in Abhängigkeit des Formparameters b einer Weibull-Verteilung

Bild 6.7 zeigt einige charakteristische Verläufe von Weibull-Verteilungen. Die Ausfallrate ist zunächst zeitabhängig.

Für $b = 1$ wird jedoch eine konstante Ausfallrate und damit eine Exponentialfunktion nachgebildet.

$b < 1$ beschreibt eine fallende Ausfallrate, beispielsweise Frühausfälle.

$b > 1$ beschreibt dagegen eine steigende Ausfallrate, beispielsweise Spätausfälle.

$b = 3,25 \dots 3,5$ nähert eine Normalverteilung an.

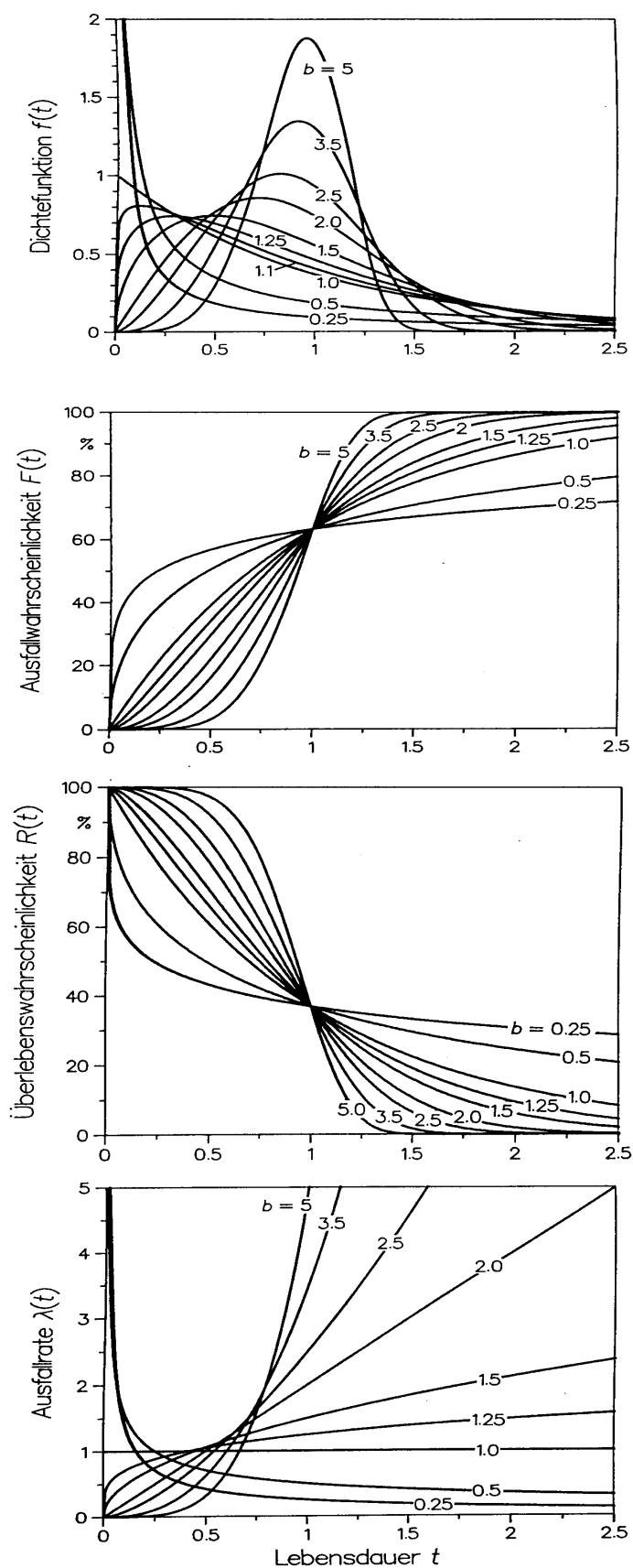


Abb. 6.7: Funktionen der Weibull-Verteilung, aus [31]; (Charakteristische Lebensdauer $T=1$, ausfallfreie Zeit $t_0=0$)

Diese zunächst äußerst komplizierte Verteilung kann mittels eines speziellen Wahrscheinlichkeitsnetzes (Abb. 6.8) jedoch vergleichsweise leicht gehandhabt werden. Dies ermöglicht dann auch eine getrennte Ermittlung der beiden Parameter b und T , wenn beispielsweise eine zweiparametrische Weibull-Verteilung dargestellt wird. Für die zweiparametrische Weibull-Verteilung gilt nämlich die Darstellungsform einer Geraden im entsprechenden Wahrscheinlichkeitsnetz:

$$\ln \ln \frac{1}{1 - F(t)} = b \ln t - b \ln T. \quad (6.27)$$

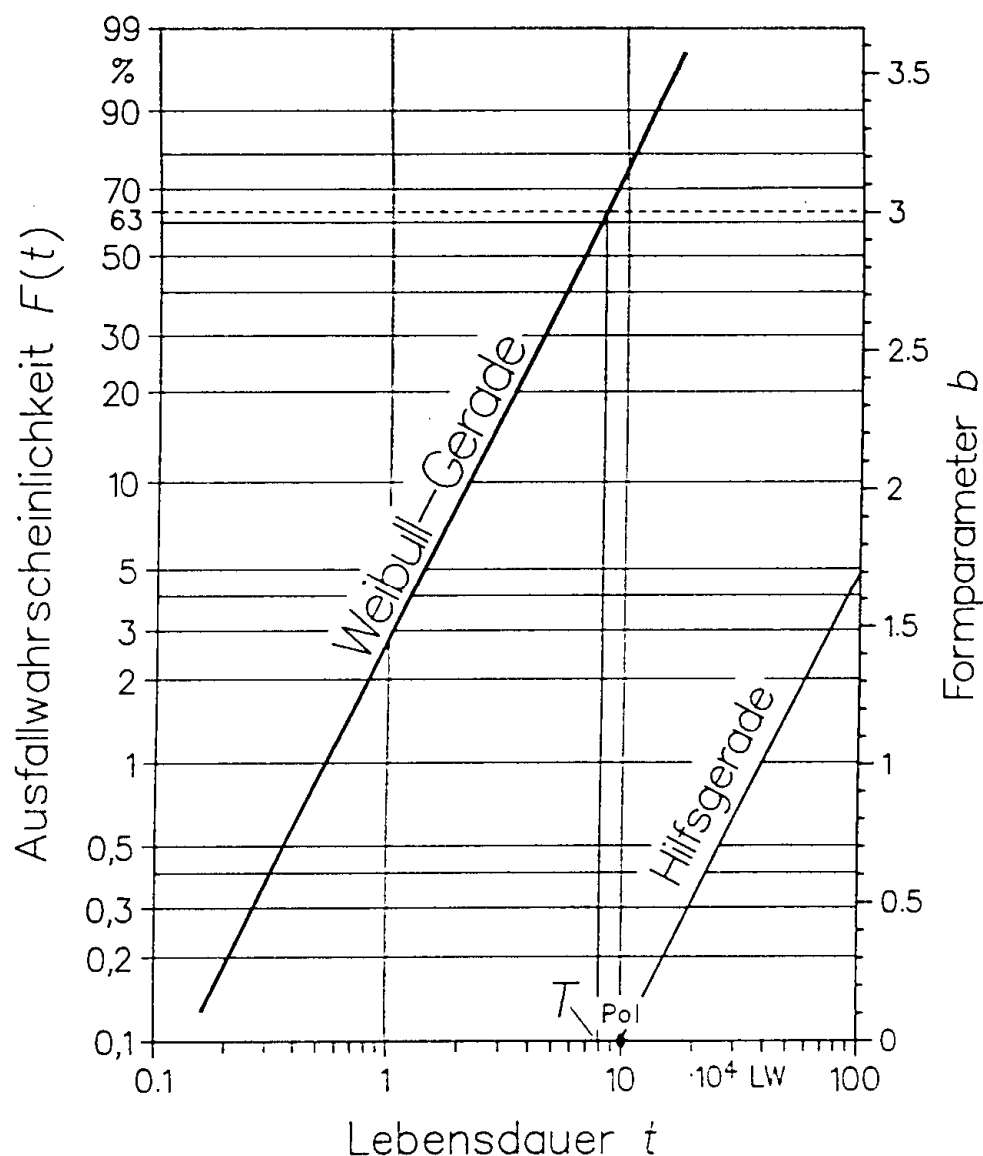


Abb. 6.8: Wahrscheinlichkeitsnetz für Weibull-Verteilungen, aus /31/

Auf die konkrete grafische Ermittlung und Darstellung von Verteilungsfunktionen wird in der Übung am Beispiel der Weibull-Verteilung vertieft eingegangen, dies soll hier deshalb nur ganz knapp erläutert werden.

Zunächst erhält man durch Auftragen von Ausfallzeiten und zugehörigen Ausfallwahrscheinlichkeiten im Wahrscheinlichkeitsnetz für eine beispielsweise zweiparametrische Verteilung eine Gerade, Abb. 6.9. Eine sehr grobe Möglichkeit zur Ermittlung der zugehörigen Ausfallwahrscheinlichkeiten zu jedem Ausfallzeitpunkt bietet die Näherungsgleichung Gl. (6.1). Es gibt aber weitere, besser geeignete Methoden, siehe Übung.

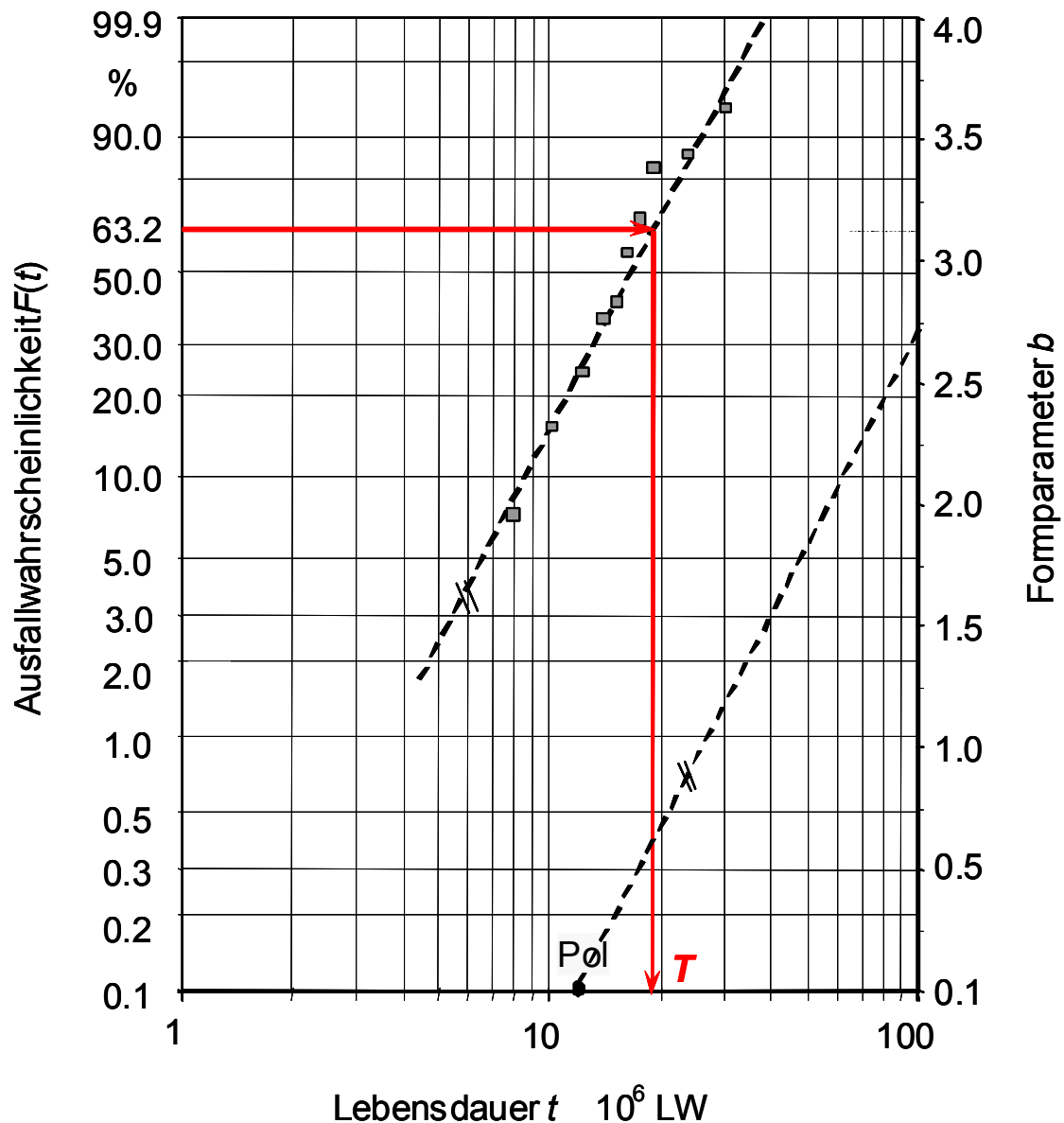


Abb. 6.9: Weibull-Ausgleichs-Gerade und Ermittlung der Parameter T und b beispielhaft, nach /31/ bzw. Institut für Maschinenelemente (IMA) der Universität Stuttgart

Neben den reinen Kennlinien ist aber auch die Angabe von Vertrauensbereichen nötig, die Streuungen der Größen einbeziehen. Abb. 6.10 zeigt eine Ausfallfunktion mit einem 90 % Vertrauensbereich, d. h. außerhalb dieser Grenzen liegen jeweils 5 % der Ausfälle oberhalb bzw. unterhalb. Damit ergeben sich aber beispielsweise auch Schwankungsbereiche für die charakteristische Lebensdauer T nach Abb. 6.10.

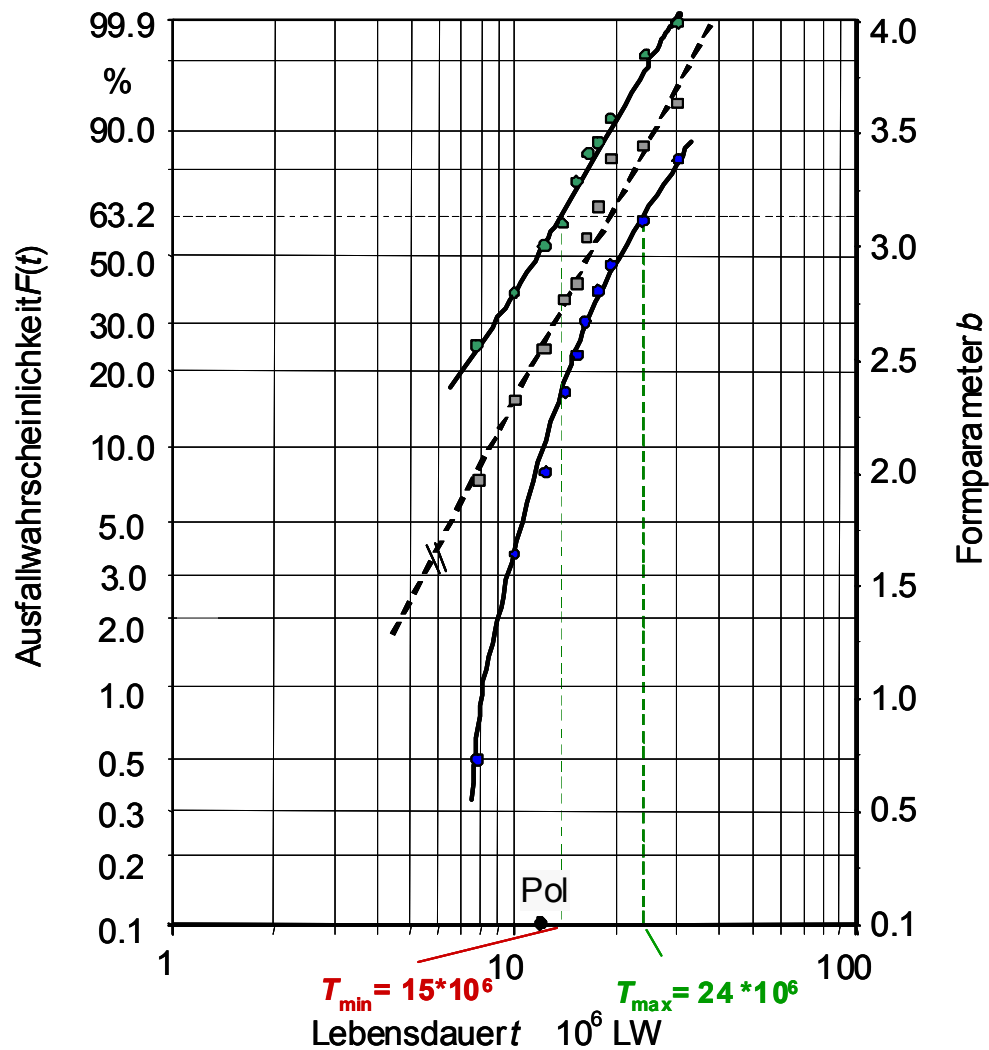


Abb. 6.10: Vertrauensbereich mit Minimal- und Maximalwerten von T beispielhaft, nach /31/ bzw. Institut für Maschinenelemente (IMA) der Universität Stuttgart

Entsprechend Abb. 6.11 lassen sich damit auch die Schwankungsbereiche der Formparameter b ermitteln. Damit sind alle Parameter der zweiparametrischen Weibull-Verteilung mit der zugehörigen Schwankungsbreite für einen Vertrauensbereich von 90 % bestimmt. Es entsteht so eine gewisse Unschärfe in den Aussagen. Eine ausführliche Darstellung dazu bietet z. B. /31/.

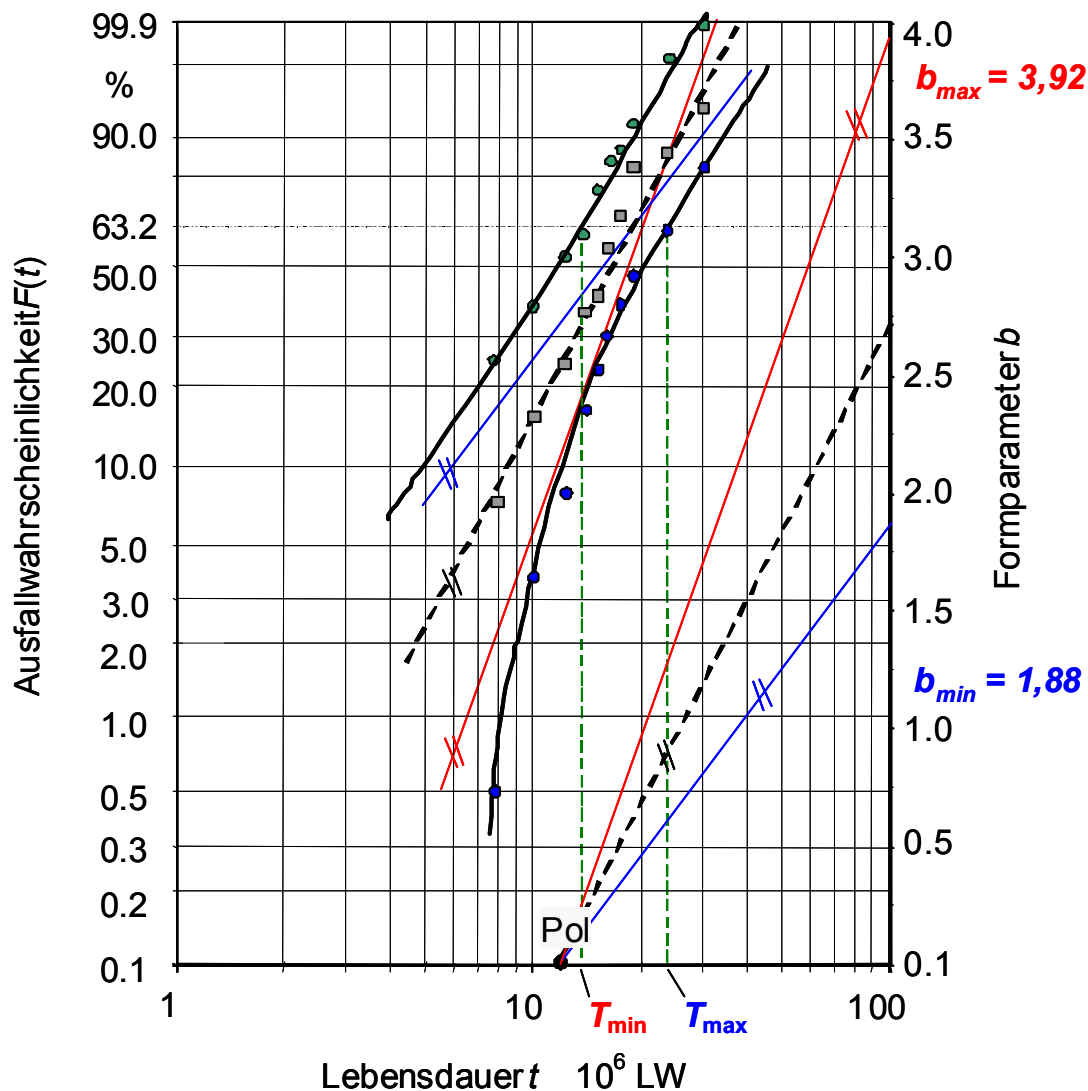


Abb. 6.11: Vertrauensbereich mit Minimal- und Maximalwerten von T und b beispielhaft, nach /31/ bzw. Institut für Maschinenelemente (IMA) der Universität Stuttgart

Eine ganz andere Frage ist die der Verfügbarkeit all dieser Kennwerte. Eine Recherche von Katalogangaben zu Lebensdauerwerten sowohl für feinwerktechnische Motoren als auch Getriebe ergab beispielsweise eine sehr heterogene praktische Datenlage hinsichtlich konkreter Lebensdauerangaben. Wie groß dabei die Verunsicherung sein kann, soll nachfolgend am Beispiel bürstenbehafteter Kleinantriebe verdeutlicht werden. Ausgangspunkt ist dafür die o. g. Befragung von Motorherstellern.

Nur wenige Hersteller benannten überhaupt konkrete Zahlenwerte, allerdings blieb der Bezug diese Zahlenwerte meistens sogar noch unklar. Auf Nachfrage gaben einige Hersteller an, dass ihre Angaben einer ausfallfreien Zeit (t_0) entsprechen, andere verstanden unter ihren Werten die mittlere Lebensdauer (t_m) bzw. den $MTTF$ -Wert (Mean Time To Failure) und wieder andere machten keine weitere Spezifikation.

Eine Visualisierung dieser Zuverlässigkeitsangaben (t_0 , $MTTF$ und B_{10}) zeigt Abb. 6.12. Unter Annahme einer zweiparametrischen Weibull-Verteilung mit einem

Formparameter $b = 2$ und einer Kennwertangabe von 3.000 h wurden die Ausfallwahrscheinlichkeiten in einem Weibullnetz aufgetragen. Handelt es sich bei den Angaben um eine ausfallfreie Zeit t_0 , so entsteht automatisch eine dreiparametrische Weibull-Verteilung.

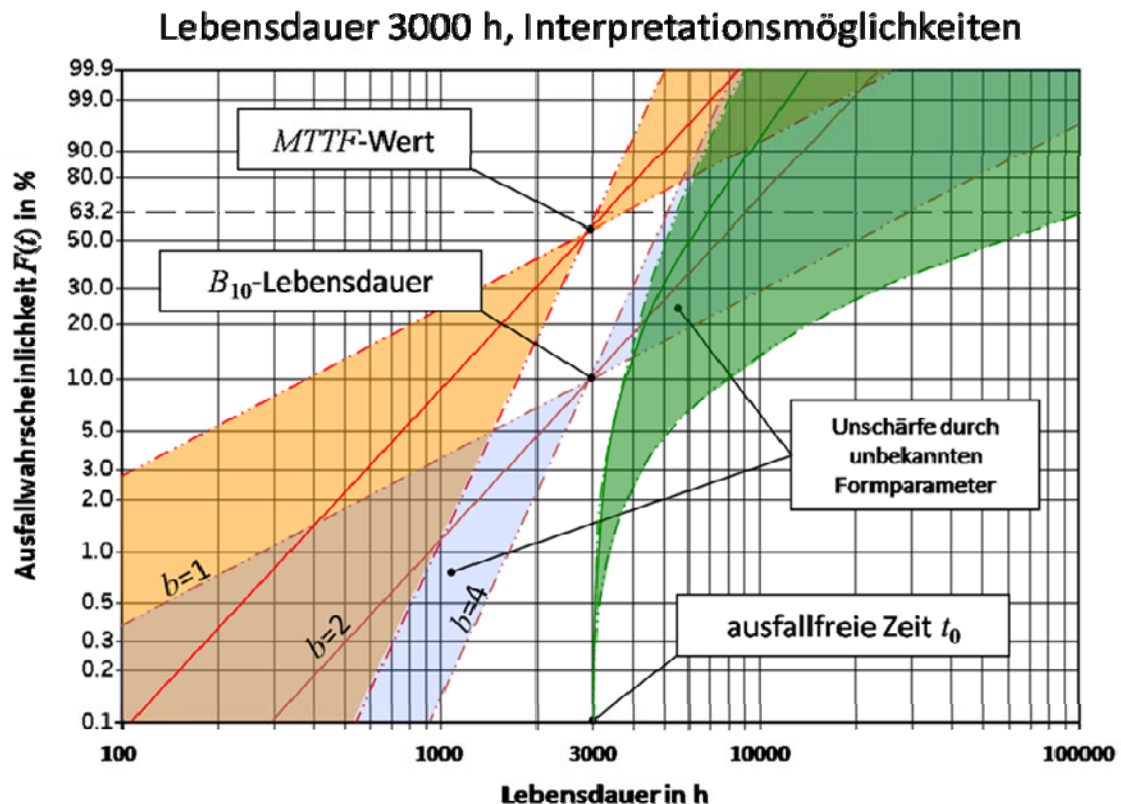


Abb. 6.12: Interpretationsspielraum für Zuverlässigkeitsdaten als Folge unvollständiger Katalogangaben

Bei Betrachtung der Kennlinien ist zu erkennen, dass ohne jegliche Angabe zum Formparameter b und zur Charakterisierung des Kennwertes keine informative Aussage über die Ausfallwahrscheinlichkeit getroffen werden kann. Eine Katalogangabe von 3.000 h als Lebensdauer für einen DC-Kleinstmotor bedeutet im Fall der Angabe als ausfallfreie Zeit, dass kein Motor vor diesem Zeitpunkt ausfällt. Das sich daran anschließende Ausfallverhalten ist abhängig vom Formparameter. In der Abbildung ist ein beispielhafter weiterer Verlauf der dann dreiparametrischen Weibull-Verteilung für $b = 2$ eingetragen. Weil keine Eingrenzung erfolgt, sind andere Formparameter jedoch auch möglich. Der weitere Verlauf bleibt somit unklar.

Stellt die Angabe jedoch einen B_{10} -Wert dar, ist damit zu rechnen, dass innerhalb der ersten 3.000 Stunden 10 % der Motoren ausfallen. Wann erste Ausfälle zu erwarten sind und welches Ausfallverhalten sich danach einstellt, ist wiederum vom Formparameter und in diesem Fall auch noch stark von der Art der Weibull-Verteilung (zwei- oder dreiparametrisch) abhängig. Im Falle einer dreiparametrischen Verteilung wäre wiederum eine ausfallfreie Zeit anzusetzen. In der Abbildung sind dabei zur Verdeutlichung der Spannweite des Ausfallverhaltens vor und nach einer Betriebszeit von

3.000 h beispielhaft nur zwei weitere zweiparametrische Weibull-Verteilungen mit $b = 1$ bzw. $b = 4$ eingetragen. Deutlich wird auch hier die sehr hohe Unsicherheit bezüglich früherer und späterer Ausfälle und damit auch bezüglich der Werte anderer Quantile.

Soll die Lebensdauerangabe gar einem $MTTF$ -Wert entsprechen, liegt die Ausfallwahrscheinlichkeit zu dieser Zeit (3.000 h als $MTTF$ -Wert) je nach zu Grunde liegender Verteilung und damit dem Formparameter b sogar bei 45 % - 65 %, für $b = 1$ bei 63,2 %, vgl. Abb. 6.6. Dies ist eine Größenordnung, bis zu der diese Komponenten oder Systeme wohl nur selten betrieben werden, da zu diesem Zeitpunkt bereits viel zu viele Ausfälle aufgetreten sind. Über das Ausfallverhalten zu früheren und damit den interessierenden Zeitpunkten kann hier kaum eine Aussage getroffen werden, sowohl Formparameter als auch Art der Verteilung müssten dazu bekannt sein. Der einzige hier gegebene Wert, der $MTTF$ -Wert, liegt viel zu weit von den praktisch interessierenden Ausfallwahrscheinlichkeiten entfernt. In der Abbildung deuten die Kennlinien einer zweiparametrischen Verteilung mit $b = 2$ und weitere Linien mit $b = 1$ bzw. $b = 4$ beispielhaft die Situation auch für vorgelagerte Ausfälle an.

Anhand dieser Beispiele sieht man sehr anschaulich, wie wenig Aussagekraft solche Katalogdaten besitzen, wenn die Bezugsgrößen und die Verteilungen nebst Verteilungsparametern nicht konkret angegeben sind.

6.4 Zuverlässigkeit von Systemen

6.4.1 Rechnerische Ermittlung der Systemzuverlässigkeit

Den Ausgangspunkt für die Betrachtung von Systemen bilden die Zuverlässigkeit und das Ausfallverhalten der Einzelelemente. Randbedingungen dabei sind die funktionellen Beanspruchungen sowie die Umgebungsbedingungen allgemein.

Dabei ist zu beachten, dass in Mechanik und Elektronik sehr unterschiedliche Ebenen als Bauelement definiert werden. In der Elektronik stellen auch sehr komplexe Systeme, wie ein Mikroprozessor, oft nur ein einzelnes Bauelement dar, das hinsichtlich seines Ausfallverhaltens unter vorgegebener Last bei bestimmten Umgebungsbedingungen untersucht werden kann. Zuverlässigkeitskenngrößen, meist die hier konstante Ausfallrate λ , sind den Bauelemente-Katalogen zu entnehmen. Eine Leiterplatte als ein übergeordnetes System kann aus den Einzelelementen dann berechnet werden.

In der Mechanik sind üblicherweise Bauelemente jedoch auf wesentlich tieferer Ebene definiert, eine Schraube, ein Zahnrad, eine Welle. Für sich allein ist deren Ausfallverhalten gar nicht zu ermitteln, erst die Belastungen und Rückwirkungen zwischen diesen Bauelementen führen letztlich zum Ausfall. Das System Getriebe beispielsweise muss als Ganzes untersucht und nicht in die einzelnen Elemente zerlegt werden. Bestenfalls sind einzelne Getriebestufen dann die unterste Ebene.

Zur Ermittlung der Zuverlässigkeit von Systemen nutzt man häufig logische Systeme als Ersatzschaltung, sogenannte **Boolesche Modelle**. Ausgangspunkt sind zunächst die Zuverlässigkeiten der einzelnen Elemente, wobei die Definition der untersten Ebene so erfolgen sollte, dass das Ausfallverhalten dieser Elemente dann voneinander unabhängig ist. Hinsichtlich der Zuverlässigkeit ist dann zwischen zwei logischen Grundmodellen zu unterscheiden, dem Serien- oder Parallelsystem, Bild 6.13. Praktisch treten natürlich beliebig verknüpfte Systeme auf.

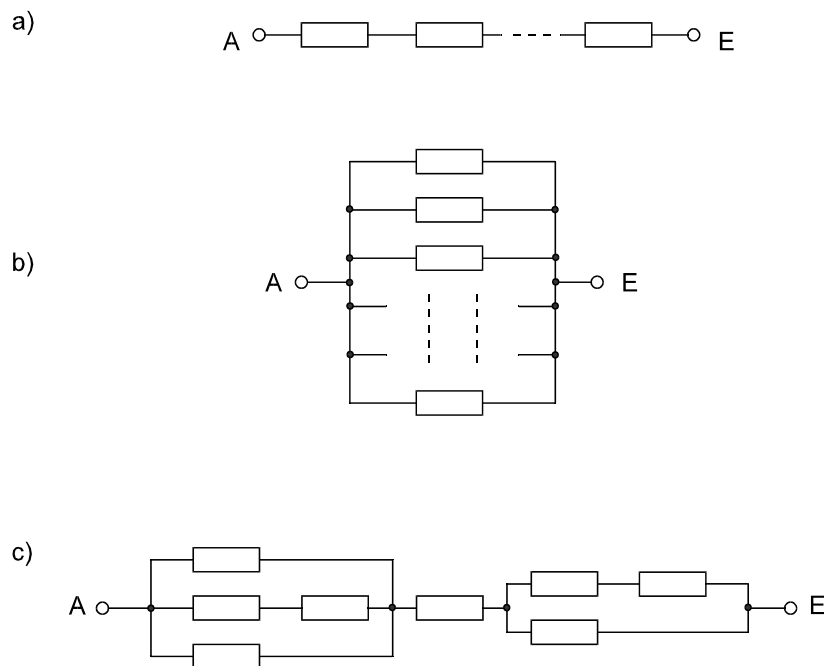


Abb. 6.13: Boolesches Modell zur Analyse der Systemzuverlässigkeit

- a) Serienschaltung
- b) Parallelschaltung
- c) reale Verknüpfungen (Beispiel)

Ein **Seriensystem** liegt dann vor, wenn der Ausfall eines Elementes bereits zum Systemausfall führt. Es gilt

$$R_s(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t) \quad \text{mit} \quad R_s < R_i \quad (6.28)$$

Für Seriensysteme lässt sich unter Nutzung der Definition der Ausfallrate auch zeigen, dass

$$\lambda_s(t) = \sum_{i=1}^n \lambda_i(t) \quad (6.29)$$

gilt, die Systemausfallrate also als Summe der Element-Ausfallraten darstellbar ist.

Ein **Parallelsystem** liegt vor, wenn erst der Ausfall aller logisch parallel liegenden Elemente einen Systemausfall bedingt. Es gilt dann

$$F_s(t) = \prod_{i=1}^n F_i(t) \quad (6.30)$$

bzw.

$$R_s(t) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i(t)) \quad (6.31)$$

mit

$$F_s < F_i \quad \text{bzw.} \quad R_s > R_i$$

Es liegt also eine gewisse Redundanz vor, die ständig im Einsatz ist (heiße Redundanz) oder nur bei Versagen eines Elementes in Eingriff kommt (kalte Redundanz). Der ökonomische Aufwand begrenzt natürlich den Redundanzgrad (Anzahl der parallelen Elemente). Sicherheitsaspekte können jedoch auch zwingend Redundanzen erfordern.

Achtung: Die physikalischen Anordnungen sind für eine Entscheidung über Serien- oder Parallelsysteme nicht relevant. Relevant für die Einordnung in die grundsätzliche Systemstruktur ist die logische Verknüpfung, die zu einem Ausfall führt.

Während die rechnerische Ermittlung der Systemzuverlässigkeit für elektronische Systeme über konstante Ausfallraten meist sehr gut anwendbar ist, treten bei mechanischen Systemen eine Reihe von Erscheinungen auf, die eine exakte mathematische Erfassung zumindest erschweren. So zeigen mechanische Systeme:

- während der Nutzung meist eine systematische Schädigung, beispielsweise durch Verschleiß und Abnutzung und damit zeitabhängige Ausfallraten,
- zeitlich vergleichsweise kurze Abschnitte mit $\lambda = \text{konstant}$ in der Badewannenkurve,
- starke gegenseitige Beeinflussung der Elemente untereinander, so dass einerseits stets der Gesamtzusammenhang (Einbauverhältnisse, Verschleiß, Umwelt ...) und damit meist bereits eine Baugruppe als einzelnes Element betrachtet werden muss und dadurch andererseits geeignete allgemeingültige Daten für mechanische Systeme meist fehlen. Dagegen sind Zuverlässigkeitsdaten für Elektronik-Bauelemente Katalogangaben.

Generelles Vorgehen bei der Zuverlässigkeitsanalyse:

1. Quantitative Analyse zur Bestimmung der zuverlässigkeitskritischen Systemelemente. Angezeigt ist eine Systemreduzierung durch Klassifizierung der Elemente in sogenannte **ABC-Teile**.

A-Teile sind risikoreich, werden definiert beansprucht, eine Lebensdauerberechnung ist möglich und weitgehend abgesichert. Das Ausfallverhalten sei bekannt.

B-Teile sind ebenfalls risikoreich, eine Lebensdauerberechnung ist jedoch nicht möglich, das Ausfallverhalten muss geschätzt oder durch Vorversuche ermittelt werden (überwiegend für Komponenten, die Reibung und Verschleiß erfahren).

C-Teile sind risikoneutral, werden in aller Regel nicht rechnerisch ausgelegt, es treten nur Zufallsausfälle auf. Sie sind nicht ursächlich für Systemausfälle.

2. Versuche, Berechnungen, Erfahrungswissen nutzen zur Ermittlung der Ausfallzeiten der einzelnen Komponenten.
3. Aufstellen eines Modells (Boolesches Modell).
4. Prüfung von Möglichkeiten zur Raffung von Lebensdauertests. Voraussetzung ist, dass der Schadensmechanismus sich bei erhöhter Belastung nicht ändert und der Zusammenhang zwischen der Belastung und dem Ausfallverhalten bekannt ist.
5. Eingrenzung der Systemmodellierung auf die wesentlichsten Elemente.
6. Berechnung der Systemzuverlässigkeit zeichnerisch, rechnerisch als Zusammenfassung von verschiedenen Serien- und Parallelsystemen.

6.4.2 Weitere Methoden zur Ermittlung von Zuverlässigkeitsangaben

Wegen o. g. Probleme bei der Berechnung mechanischer Systeme haben sich eine Reihe weiterer Methoden zur Ermittlung von Zuverlässigkeitsangaben bewährt:

a) Ingenieurtechnische Verfahren

Ausfall-Effekt-Analyse. (FMEA/failure mode and effect analysis). Mit Hilfe eines Logiktests werden die Auswirkungen aller möglichen Bauelementeschäden und Ausfälle auf das System untersucht. Das Ziel ist die Ableitung von Schutzmaßnahmen, die Aufdeckung von Schwachstellen sowie die Aufstellung einer Liste von Normalschäden als Grundlage für die Instandhaltung, vgl. Tafel 5.2 in Abschnitt 5.4.

Fehlerbaummethode. Ausgehend vom Systemausfall wird unter Anwendung logischer Verknüpfungen die Systemstruktur so dargestellt, dass bei bekannter Wahrscheinlichkeit von Bauelementeausfällen die Systemzuverlässigkeit abgeschätzt werden kann (vom Fehlerbaum bestehen Analogien zum Booleschen Modell). Mit diesem Verfahren lassen sich Schwachstellen ermitteln sowie qualitative und quantitative Zuverlässigkeitsaussagen ableiten.

Technische Diagnostik. Anhand messbarer Parameter des technischen Systems oder Bauelementes wird eine Einschätzung des vorhandenen Schadens und der noch zu erwartenden Lebensdauer vorgenommen (Beispiele: Rausch- und Oberwel-

lenmessungen an elektrischen Widerständen, Geräuschmessungen an Lagern). Anwendung finden Verfahren der technischen Diagnostik sowohl für Selektionstests zur Aussonderung potentiell unzuverlässiger Elemente noch vor ihrem Einsatz als auch zur Überwachung in Betrieb befindlicher Erzeugnisse. Einschränkend muss bemerkt werden, dass die Verfahren meist sehr aufwendig sind und für viele Schadensfälle sich noch im Erprobungsstadium befinden.

Technische Kausalanalyse. Untersuchung ausgefallener Systeme bzw. Bauelemente nach den aufgetretenen Schäden und Aufdeckung der Kausalkette Belastung Schaden Ausfall einschließlich schädigender Einflüsse bei der Herstellung.

Checklistenmethode. Programm zur Sicherung der Zuverlässigkeit eines Erzeugnisses von der Entwicklung bis zur Nutzung. Es beinhaltet ingenieurtechnische, mathematische und experimentelle Methoden sowie Fragen der Qualitätskontrolle, Lager- und Transportvorschriften, Bedienungs- und Wartungsanleitungen.

b) Experimentelle Methoden

Betriebsversuche. Nutzung der Erzeugnisse bei Nennbeanspruchung unter Simulation möglichst vieler, real auftretender Einflussfaktoren mit dem Ziel der Ermittlung von Zuverlässigkeitskenngrößen oder dem Nachweis einer bestimmten Mindestzuverlässigkeit.

Forcierte Tests. Tests bei Erhöhung der Belastung über die Nennwerte zur Zeitraf-
fung der gesamten Nutzungs- oder Lebensdauer sowie für sogenannte Selektions-
tests zur Vermeidung von Frühausfällen.

Stresstests. Tests bei Belastungen nahe den Beanspruchungsgrenzen des Erzeug-
nisses zur Ermittlung von Sicherheitsfaktoren sowie zur Schwachstellenanalyse und
Erkundung von Ausfallursachen.

Hinweis: Zur Gewinnung von Zuverlässigkeitsaussagen mit hoher statistischer Si-
cherheit sind die angeführten experimentellen Methoden nach Verfahren der statisti-
schen Versuchsplanung zu organisieren. Für die Ermittlung quantitativer Zuverläs-
sigkeitskenngrößen sind forcierte Tests und Stresstests wegen der weitgehend un-
geklärten Zusammenhänge zwischen Lebensdauer und Belastung bei mechanischen
Elementen jedoch nicht zu empfehlen.

6.4.3 Möglichkeiten zur Beeinflussung der Zuverlässigkeit durch den Kon- strukteur

Die Zuverlässigkeit eines Systems wird durch eine ganze Reihe von Einflussfaktoren
bestimmt, Abbildungen 6.14 und 6.15.

Nicht alle davon sind vom Entwickler bzw. Konstrukteur beeinflussbar, allerdings ist
vielen der Hauptausfallursachen durchaus bereits in der Entwicklung durch geeigne-
te konstruktive Lösungen entgegenzuwirken.

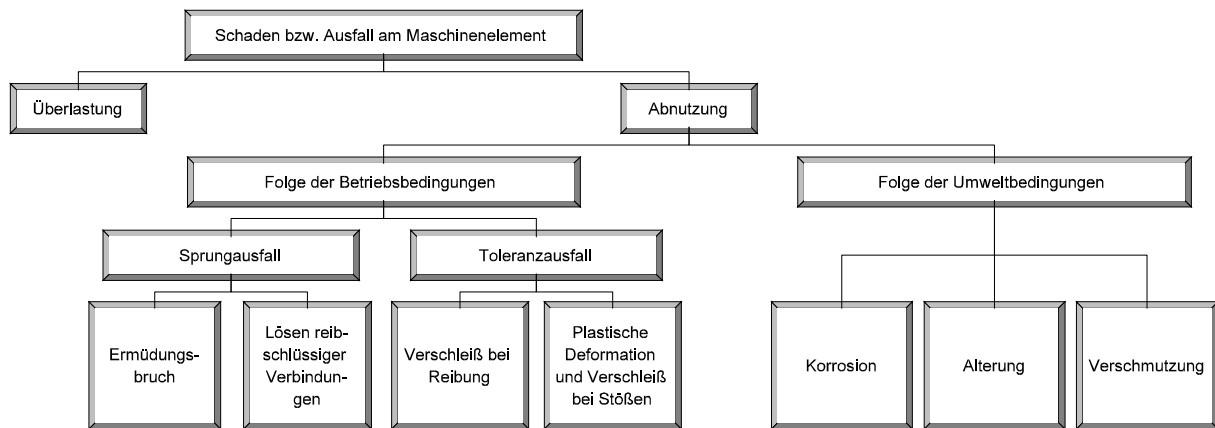


Abb. 6.14: Hauptausfallursachen bei mechanischen Konstruktions- bzw. Maschinenelementen

Konstruktiv sind beispielsweise folgende Aspekte zu berücksichtigen:

- Ein exaktes Lastenheft sollte auch Zuverlässigkeitsfragen berücksichtigen.
- Beanspruchungen sollten möglichst exakt bekannt sein bzw. durch Simulationen ermittelt werden.
- Umweltbedingungen beachten!
- Möglichst frühzeitig sind sowohl rechnerische als auch andere Methoden zur Ermittlung von Zuverlässigkeitsangaben im Entwicklungsprozess einzubeziehen.
- Wenige Risikoteile, wenige Einzelteile insgesamt sichern die Zuverlässigkeit.
- Aus Zuverlässigkeitssicht sind gewisse Sicherheiten in der Dimensionierung (Überdimensionierung) und kleine Betriebsdauern sinnvoll.
- Redundanzen einbauen!
- Leichte Austauschbarkeit von Verschleißteilen sichern!
- Die Bedienung sollte narrensicher sein!
- Umfangreiche Funktionstests, Dauerversuche, Prüfstands- und Felderprobungen machen Schwachstellen vorab sichtbar.
- Die Auswertung von Garantie- und Kulanzstatistiken zeigt Schwachstellen bereits ausgelieferter Erzeugnisse auf.
- Teilweise können Verschleiß- und Alterung auch konstruktiv kompensiert oder ausgeglichen werden.

In der Fertigung:

- Sollten Frühausfälle durch Voraltern (mit ausgewählter Beanspruchung) Einlaufen (mit Beanspruchung wie sie bei Nutzung zu erwarten ist) oder Einbrennen (durch erhöhte Beanspruchung) beim Hersteller vorweggenommen werden (möglichst auf Bauelementeebene und nicht nach der Endmontage).
- Ein Qualitätssicherungssystem sichert eine stabile Fertigung.

Im Service:

- kann durch vorbeugenden Ersatz gefährdeter Bauteile die Lebensdauer verlängert und eine konstante Ausfallrate erzielt werden.

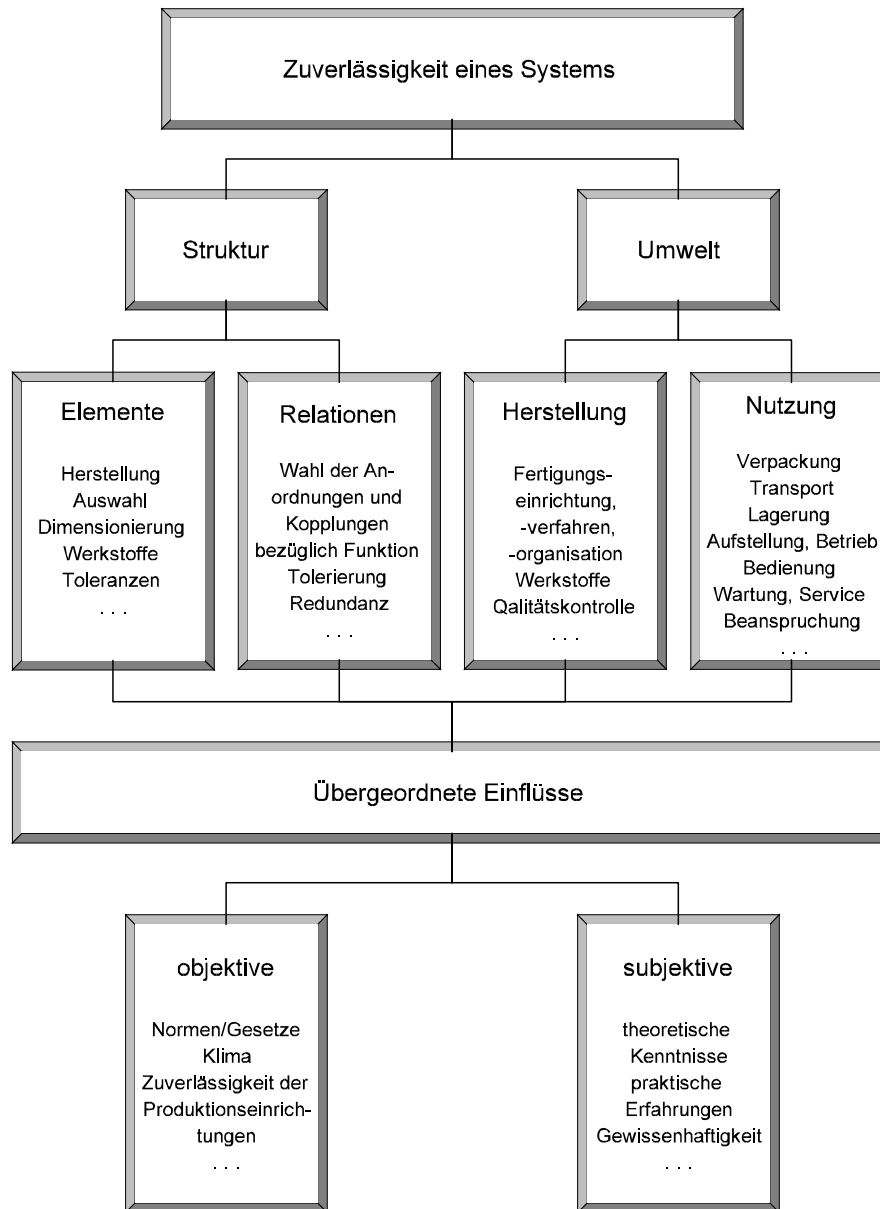


Abb. 6.15: Ausgewählte Einflussfaktoren auf die Zuverlässigkeit

7 Schwingungs- und Lärminderung im Gerätebau

Im Sinne der bereits in Bild 1.2 (Abschnitt 1) betrachteten Auswirkungen von Geräten auf Mensch und Umwelt sollen hier weitere für Geräte wichtige Aspekte behandelt werden, nämlich Fragen von Schwingungen und Geräuschen in Geräten und deren Erzeugung sowie Vermeidung bzw. Minderung.

7.1 Einführung

In Geräten sind eine Vielzahl von statischen und auch dynamischen Wechselwirkungen zwischen Kräften/Momenten und Bewegungen anzutreffen. Statische Beanspruchungen und auch die für die Gerätefunktion erforderlichen dynamischen Beanspruchungen sollen hier nicht betrachtet werden. Sie bilden meist die Grundlage für die Dimensionierung der Bauelemente. Neben solchen „großen“ Bewegungen entstehen jedoch in Geräten auch unerwünschte „kleine“ Bewegungen, also eine nicht erwünschte Dynamik. Da Geräte, ihre Baugruppen und deren Einzelteile massebehaftet und mehr oder weniger elastisch sind, handelt es sich stets um schwingungsfähige Systeme, die durch äußere Kräfte und Momente angeregt werden können.

Ursachen solcher mechanischer Schwingungen können sein:

- äußere Einflüsse, wie beispielsweise
 - Schwingungsübertragung über die Aufstellfläche, das Fundament, das Gebäude
 - Luftbewegungen, u. a.
- innere Einflüsse, wie beispielsweise
 - gewollte Bewegungsvorgänge im Gerät
 - Unwuchten rotierender Teile
 - Anregung von Resonanzen
 - Fertigungsungenauigkeiten und Spiel in Übertragungssystemen, u. a.

Solche Schwingungen können sich auswirken (Abb. 7.1):

a) auf das Gerät

- in Form nicht vorhergesehener Materialbeanspruchungen, die zu einer Verringerung der Lebensdauer und der Zuverlässigkeit oder im Extremfall zur Schädigung oder Zerstörung führen können (z. B. bei Resonanzerscheinungen)
- in Form zusätzlicher Verformungen, die zu einer Beeinträchtigung der Genauigkeit und der Gerätefunktion selbst führen (z. B. Schwingungen in Elektromotoren, Rotoren, Turbinen)

b) auf das Umfeld (Umwelt)

- in Form der Beeinträchtigung anderer Geräte (z. B. durch Schwingungsübertragung auf den Aufstellort)
- in Form von Körperschall, der zur Geräuschabstrahlung und u. U. als Lärm zur Beeinträchtigung des Menschen führt
- in Form einer direkten Schwingungsübertragung auf den Menschen als Ganzkörperschwingungen oder Hand-/Arm-Schwingungen, die akute oder chronische Gesundheitsschäden bewirken können.

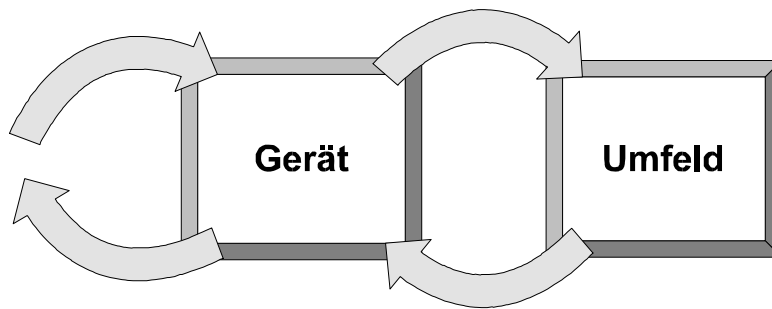


Abb. 7.1: Entstehung und Wirkung von Schwingungen

⇔ Wirkungsrichtungen der Schwingung

Gegenwärtig verschärft sich diese Problematik durch gegenläufige Entwicklungen, wie zunehmende Arbeitsgeschwindigkeiten von Geräten und damit verbundene höhere Dynamik auf der einen Seite und wachsende Sensibilisierung und Verschärfung der zulässigen Grenzwerte auf der anderen Seite.

Typisch auftretende Schwingungsformen sind (Abb. 7.2):

- periodische (stationäre) Vorgänge, z. B.
 - harmonische Schwingungen (Differenzieren, Integrieren führt wieder zu einer harmonischen Schwingung)
 - allgemeine periodische Signale
- nicht periodische (nichtstationäre) Vorgänge
 - Stöße
 - Sprungfunktionen
 - ab- oder aufklingende Schwingungen, z. B. An- und Auslaufvorgänge
- stochastische Signale.

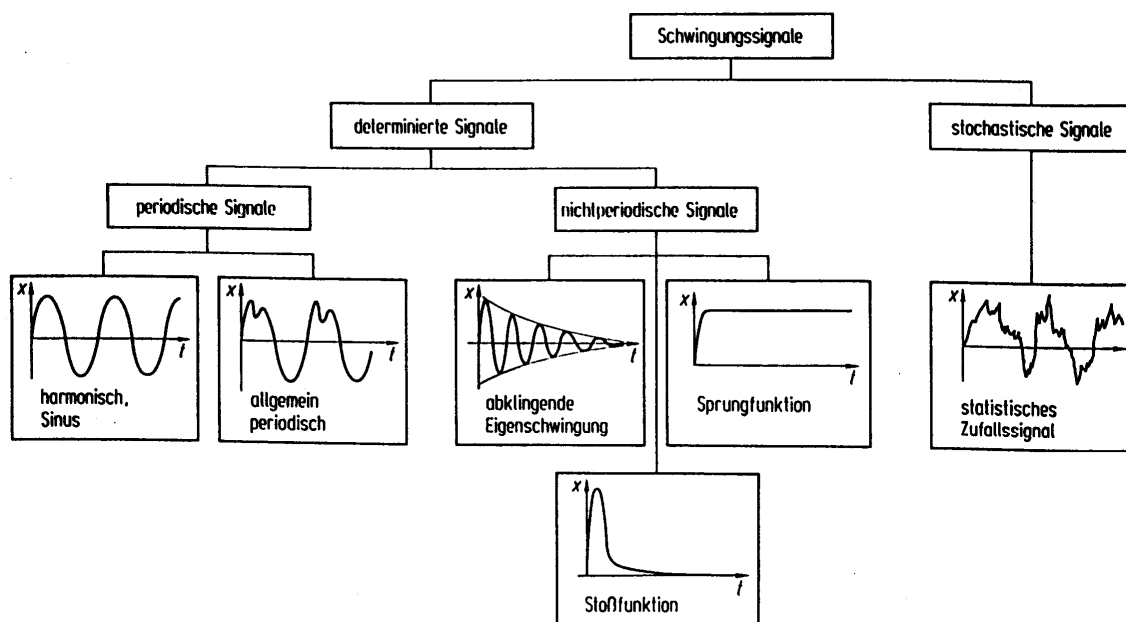


Abb. 7.2: Übliche Schwingungsformen (Dubbel: Taschenbuch Maschinenbau), aus /40/

Die typischen Frequenzen mechanischer Schwingungen liegen dabei im Bereich zwischen 0,1 bis höchstens 1 kHz, Abb. 7.3, wobei Schwingungen zwischen 0,1 und 100 Hz durch den Tastsinn spürbar sind. Die dabei auftretenden Beschleunigungen können sehr unterschiedlich sein, Tafel 7.1.

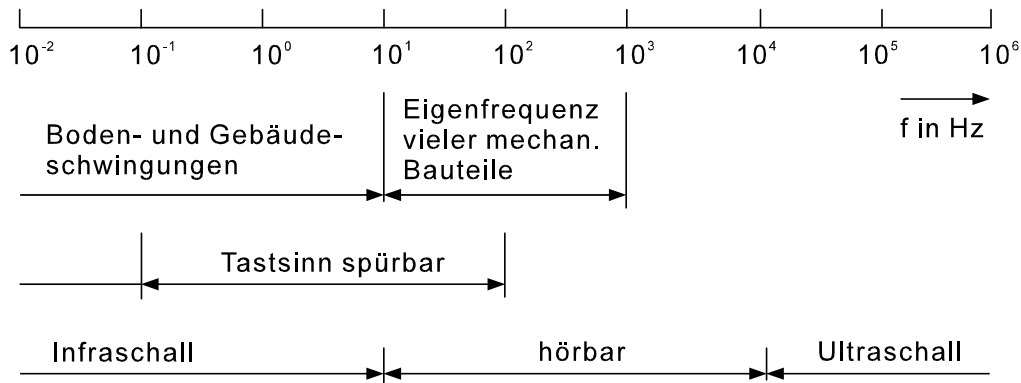


Abb. 7.3: Typische Frequenzen mechanischer Schwingungen

Tafel 7.1 Typische Stoßbelastungen in Geräten, nach /9/

Belastungsart	Maximale Beschleunigung in g	Bemerkungen
Lochen (Stanzen)	10	Locher der EDV
Sondergeräte	100	Militärtechnik
Abdruck/Anschlag	1000 (100 ... 1000)	Typenhebel-Schreibmaschine Mosaikdrucker
Belastbarkeit des Menschen	10	(zum Vergleich)
Prüfbelastung von Geräten und Elementen	15 bzw. 60	
Erdbeben	1	mittlere Stärke
Fundamentstöße Metallische Schläge	100 10 000	Stanzen, Schmieden, Rammen, Kolbenkompressoren
Stoßprüfmaschinen	500	
Beschleunigungsaufnehmer	20 000	

Schwingungen selbst werden in vielen anderen Lehrveranstaltungen auch betrachtet, deshalb soll hier vorwiegend auf eine spezielle Art Schwingungen, auf Schall, dessen Erzeugung und Minderung eingegangen werden.

7.2 Grundlagen der Geräusentstehung und -ausbreitung in Geräten

Erzeugnisse der Feinwerktechnik sind im Allgemeinen weniger lärmintensiv als beispielsweise Werkzeugmaschinen oder Kfz. Gesundheitsschädliche Grenzen werden selten überschritten. Allerdings findet man Erzeugnisse der Feinwerktechnik meist in sehr geräuscharmer Umgebung, so dass die Uhr im Schlafzimmer, der Lüfter des PCs am Arbeitsplatz oder die Motorgeräusche des Antriebs eines DVD-Laufwerkes trotzdem sehr stören können.

7.2.1 Kenngrößen des Schalls und seiner Ausbreitung

Zunächst sind einige neue Begriffe aufzubereiten.

Schall bezeichnet mit dem Gehör wahrnehmbare Schwingungen eines Mediums; der Hörbereich liegt dabei zwischen **16 Hz und 16 kHz**.

Man unterscheidet:

- Luftschall (Schwingungen in Luft und Gasen),
- Flüssigkeitsschall (Schwingungen meist in Wasser oder Öl) und
- Körperschall (Schwingungen in festen Körpern).

Ausbreitungsursache für den Schall ist also das Vorhandensein schwingungsfähiger Systeme in Form von

- Luftteilchen und ihrer Kompressibilität
- Massen und Elastizitäten in festen Körpern bzw.
- massebehafteter elastischer Flüssigkeiten.

Lärm sei dabei als ein störendes Geräusch mit in der Regel hohem Pegel definiert.

Betrachten wir zunächst den **Luftschall**. Luftteilchen schwingen um ihre ortsfeste Ruhelage (es wird keine Strömung betrachtet) mit der

Schallschnelle v , der Schwinggeschwindigkeit der Teilchen, die im Allgemeinen vergleichsweise niedrig ist. Die Amplituden der Schwingungen liegen nur im Mikrometerbereich.

$$v = v_a \cos(\omega t + \varphi_0) = dx/dt$$

Dem statischen, atmosphärischen Luftdruck wird dadurch ein Wechseldruck überlagert, der

Schalldruck p als die wichtigste und messtechnisch erfassbare Größe.

$$p = p_a \cos(\omega t + \varphi_0)$$

Betrachtet werden zunächst nur die Effektivwerte der Summe aller Schalldruckanteile der verschiedenen Frequenzen

als **(Gesamt-)Schallschnelle v** ,
dem Effektivwert der Schwinggeschwindigkeit der Teilchen,

als **(Gesamt-)Schalldruck p** ,
dem Effektivwert des Schalldrucks.

Diese longitudinalen Schwingungen (in Ausbreitungsrichtung schwingend) werden sich in Form einer Kugelwelle von der Quelle ausbreiten und eine Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Welle aufweisen,

die **Schallgeschwindigkeit c** .

Beispielsweise ist der Schalldruck in Raum und Zeit dann

$$p(x,t) = p_a \cos (x/\lambda - \omega t - \varphi).$$

Für die Schallgeschwindigkeit in Luft gilt etwa $c = 340 \text{ m/s}$, für die Körperschallgeschwindigkeit in Metallen ca. 6.000 m/s .

Für die Wellenlängen λ gilt

$$\begin{aligned} \text{bei } 20 \text{ Hz: } & \lambda = 17,2 \text{ m} \\ \text{bei } 1 \text{ kHz: } & \lambda = 34,3 \text{ cm} \\ \text{bei } 16 \text{ kHz: } & \lambda = 2,1 \text{ cm} \end{aligned}$$

Schallschnelle v und Schalldruck p werden durch Betrag und Phasenlage charakterisiert, so dass man einen komplexen Wellenwiderstand, die **Impedanz Z** erhält, mit

$$Z = \frac{p}{v} \left[\frac{\text{Ns}}{\text{m}^3} \right], \quad (7.1)$$

auch Feldimpedanz oder Schallkennimpedanz genannt.

In Luft gilt

$$Z_0 = \frac{p}{v} = \rho \cdot c = 408 \frac{\text{Ns}}{\text{m}^3} \quad (7.2)$$

für die Kennimpedanz Z_0 bei vorgegebener Dichte ρ der Luft und der Schallgeschwindigkeit in Luft von $c = 340 \text{ m/s}$.

Der Schalldruck p als Wechseldruck bewirkt einen Geräuscheindruck beim Menschen in Abhängigkeit

- vom Abstand von der Quelle,
- von der Richtcharakteristik der Quelle und auch
- von der Raumgröße und Raumbeschaffenheit.

Häufig entsteht ein Luftschall jedoch nicht direkt, sondern zunächst wird Körperschall angeregt, der sich über die mechanische Struktur des Gerätes ausbreitet und dann von bestimmten Bauteilen bzw. Elementen als Luftschall abgestrahlt wird.

Es soll deshalb für den **Körperschall** zusätzlich eine

mechanische Impedanz

$$z = \frac{F}{v} \left[\frac{\text{Ns}}{\text{m}} \right] \quad (7.3)$$

bzw.

mechanische Admittanz

$$h = \frac{1}{z} = \frac{v}{F} \quad \left[\frac{m}{Ns} \right] \quad (7.4)$$

eingeführt werden, die auch bereits den möglichen Anregungsmechanismus als Kraft- oder Geschwindigkeitsanregung mit erkennen lässt.

Während Luftschall eine sich kugelförmig ausbreitende Longitudinalwelle darstellt, schwingen die Teilchen in festen Körpern in allen Schwingungsformen. Es sind also Longitudinal-, Transversal- oder auch Torsionswellen möglich.

Der Schalldruck umfasst in der Wahrnehmbarkeit des Menschen eine Spannweite von sechs Zehnerpotenzen. Der Effektivwert der **Hörschwelle** bei einer Frequenz von 1000 Hz liegt bei

$$\tilde{p}_{HS} = 2 \cdot 10^{-4} \mu\text{bar} = 2 \cdot 10^{-5} \frac{N}{m^2} = 20 \mu\text{Pa} = p_0 \quad (7.5)$$

und dient als **Bezugsschalldruck** p_0 .

Der zweite Grenzwert, die **Schmerzgrenze**, liegt dagegen bei

$$\tilde{p}_{SG} = 2 \cdot 10^2 \mu\text{bar} = 20 \frac{N}{m^2} = 20 \text{Pa}. \quad (7.6)$$

Für eine bessere Handhabung dieses großen Dynamikumfangs bietet sich eine logarithmische Darstellung in Form des **Schalldruckpegels** L_p an:

$$L_p = 10 \lg \left(\frac{\tilde{p}^2}{p_0^2} \right) \text{dB} \quad (7.7)$$

bzw.

$$L_p = 20 \lg \left(\frac{\tilde{p}}{p_0} \right) \text{dB}. \quad (7.8)$$

Maßeinheit ist dezi Bel, abgekürzt dB (Bel für lg und dezi für 0,1, also 0,1 lg). Es gelten damit folgende Grenzen:

Hörschwelle entspricht 0 dB,
Schmerzgrenze entspricht 120 dB,
Dynamikumfang bei einem kHz damit 120 dB.

Abb. 7.4 veranschaulicht diesen Umfang durch Beispiele für das zugehörige Geräuschempfinden und die Auswirkungen auf den Menschen.

Das Ohr empfindet ebenfalls logarithmisch. 10 dB Erhöhung werden als Verdopplung wahrgenommen. Normale Sprache liegt bei einem Schalldruck von 1 μbar . Das Ohr löst also ein Millionstel des Luftdruckes noch fein auf.

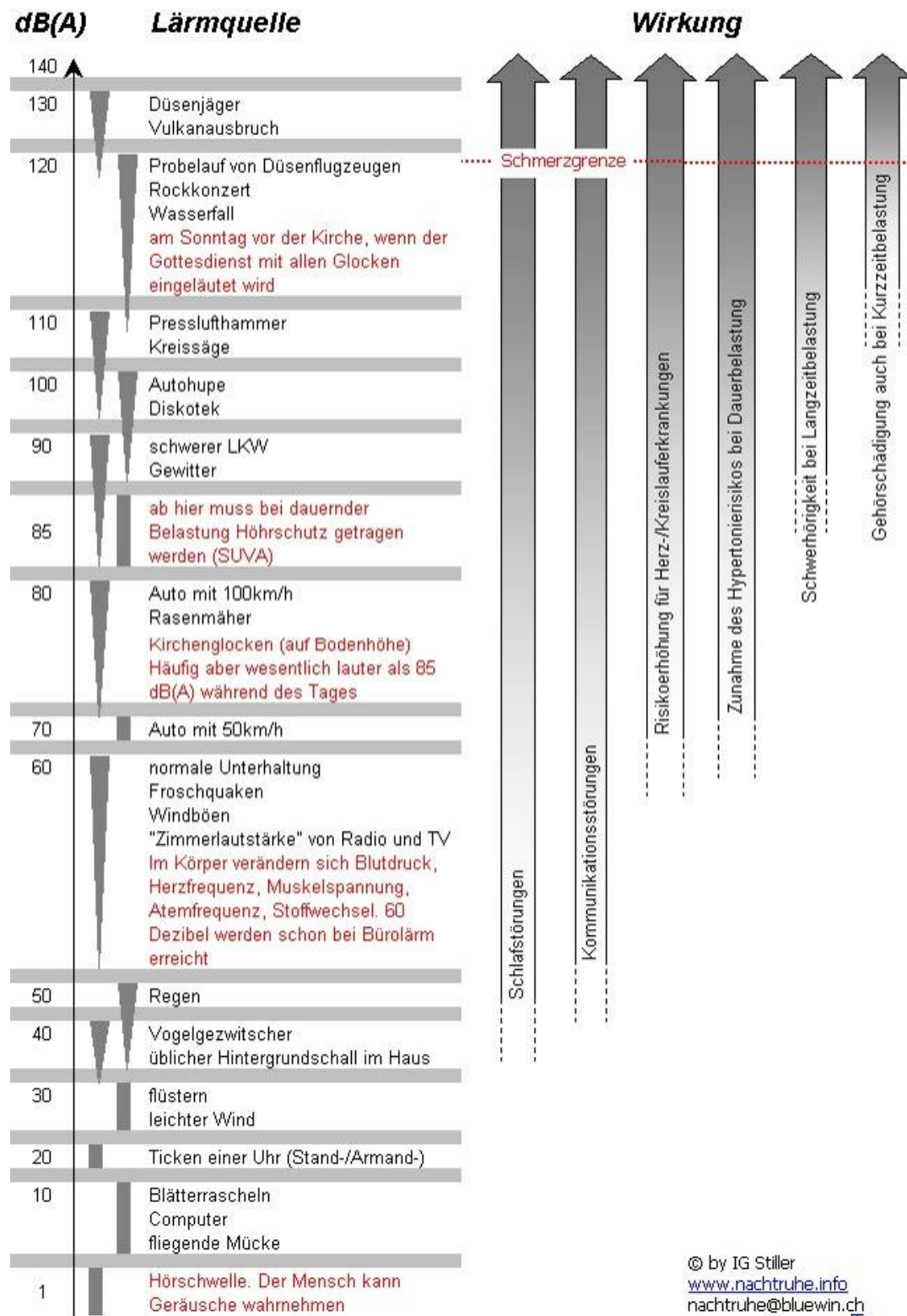


Abb. 7.4: Geräuschempfinden und Wirkung

Der Schalldruck ist jedoch nur in Verbindung mit Entfernungs- und Richtungsangaben zur Kennzeichnung einer Geräuschquelle aussagefähig, da die Höhe des Pegels vom Abstand von der Quelle, deren Richtcharakteristik und dem umgebenden Raum abhängt, wie bereits betont. Aus diesem Grunde sind weitere Kenngrößen zur Charakterisierung der Schallemission von Geräten nötig. Dazu dienen die

Schalleistung P

$$P = p \cdot v \cdot A \quad (7.9)$$

bzw. der **Schallleistungspegel**

$$L_W = 10 \lg \frac{P}{P_0} \text{ dB}, \quad (7.10)$$

wobei die Bezugsschalleistung $P_0 = 10^{-12}$ W eine Leistung kennzeichnet, die auf einer Kugelhüllfläche von 1m^2 gerade einen Schalldruck von $p_0 = 20 \text{ }\mu\text{Pa}$ erreicht, also die Hörschwelle.

Mit der Schalleistung bzw. dem Schallleistungspegel L_W steht ein objektiver und damit vergleichbarer Wert als maschinenspezifische Größe zur Verfügung, der nicht von den Messbedingungen und vom Umfeld abhängt. Allerdings sind P bzw. L_W nicht direkt messbar. Die Ermittlung des Schallleistungspegels L_W erfolgt durch Messung und Mittelwertbildung der Schalldruckpegel auf Hüllflächen im Messabstand r zur Quelle. Beispielsweise gilt für eine Halbkugel als Hüllfläche

$$L_W = \bar{L}_p + 20 \lg \left(\frac{r}{r_g} \right) \text{ dB} + 8 \text{ dB}, \quad (7.11)$$

mit $r_g = 1\text{m}$ als Bezugsgröße. Vergleiche dazu /69/ (früher DIN 45635) bzw. Abschnitt 7.2.4.

Die abgestrahlte akustische Leistung ist im Vergleich zur Nutzleistung aber meist verschwindend gering und ohne Einfluss auf den Wirkungsgrad, Tafel 7.2.

Tafel 7.2 Typische Schalleistungen

Geräuschquelle	Schalleistung	Schallleistungspegel
Blätterrauschen	10^{-9} W	30 dB
Büro	10^{-6} W	60 dB
normale Unterhaltung	10^{-5} W	70 dB
lautes Radio	0,1 W	110 dB
großes Orchester	10 W	130 dB
Strahltriebwerk	100 000 W	170 dB
Rakete	40 000 000 W	196 dB

In jüngster Zeit wird zunehmend mit der Vektorgröße **Schallintensität** / gearbeitet

$$I = \frac{P}{A} = p \cdot v. \quad (7.12)$$

Dies stellt die auf die Fläche bezogene Leistung als Effektivwert der Summe der Anteile dar

$$I_{\text{eff}} = I = \sqrt{\sum I_{\text{eff}}^2}, \text{ wobei eigentlich gilt } i(t) = p(t) \cdot v(t). \quad (7.13)$$

Da die Schallintensität ein Vektor ist, lassen sich Geräusche damit gerichtet bewerten. Fremdgeräusche, die in eine Hüllfläche hinein- und wieder herausgehen, heben sich dann auf und stören die Messungen nicht, weshalb diese Größe von großem Interesse ist.

Auch hier wird wieder eine logarithmische Größe als **Schallintensitätspegel** L_I eingeführt

$$L_I = 10 \lg \frac{|I|}{I_0} \text{ dB}, \quad (7.14)$$

auch Schallstärkepegel oder Schallpegel genannt.

Neben den genannten physikalischen Kenngrößen des Schallfeldes gibt es weitere Schallfeldkenngrößen zur Geräuschbeurteilung:

Psychoakustische Größen (Hörwahrnehmung)

Lautheit in sone

Tonalität in tu

Rauigkeit in asper

Schärfe in acum

als lineare Größen (auch für Qualitätssicherung, Erkennung von Änderungen in der Fertigung)

Psychologische Größen (Hörbewertung)

Musik oder Lärm?

7.2.2 Rechnung mit Pegelgrößen

Die Rechnung mit Pegelgrößen ist etwas ungewohnt, Tafel 7.3 verdeutlicht deshalb Addition, Subtraktion und Mittelwertbildung von Pegeln. Einprägsames Ergebnis von Pegelrechnungen sind beispielsweise folgende Aussagen:

1. Zwei gleiche Quellen führen zu einer Erhöhung des Schalldruckpegels um +3 dB, 10 gleiche Quellen um +10 dB, 100 gleiche Quellen um +20 dB.
2. Die Addition eines um 6 dB geringeren Pegels führt lediglich zu einer gerade noch wahrnehmbaren Gesamtpegelerhöhung von +1 dB. Maßnahmen zur Lärm-minderung sind also nur an der stärksten Geräuschquelle sinnvoll!
3. Subjektiv wird eine Erhöhung des Pegels um 10 dB als Lautstärkeverdopplung empfunden. Es liegt jedoch eine 10fache Schallenergie vor.

Tafel 7.3 Rechnung mit Pegelgrößen, aus /38/

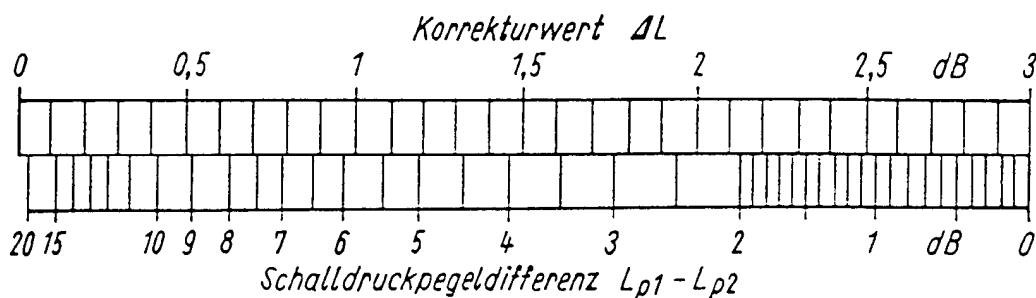
- 1. Pegeladdition** (bei Überlagerung mehrerer inkohärenter Schalldrücke zur Bestimmung des Gesamtpegels)

$$L_{p_{ges}} = 10 \lg \left(\sum_{v=1}^n \frac{p_v^2}{p_0^2} \right) \text{ dB} = 10 \lg \left(\sum_{v=1}^n 10^{\frac{L_{pv}}{10}} \right) \text{ dB}.$$

Vereinfachtes Verfahren: Für zwei Schalldrücke gilt

$$L_{p_{ges}} = 10 \lg 10^{\frac{L_{p1}}{10}} \left(1 + 10^{-\frac{L_{p1} - L_{p2}}{10}} \right) \text{ dB} = (L_{p1} + \Delta L) \text{ dB}.$$

Bestimmung von ΔL aus nachstehendem Nomogramm:

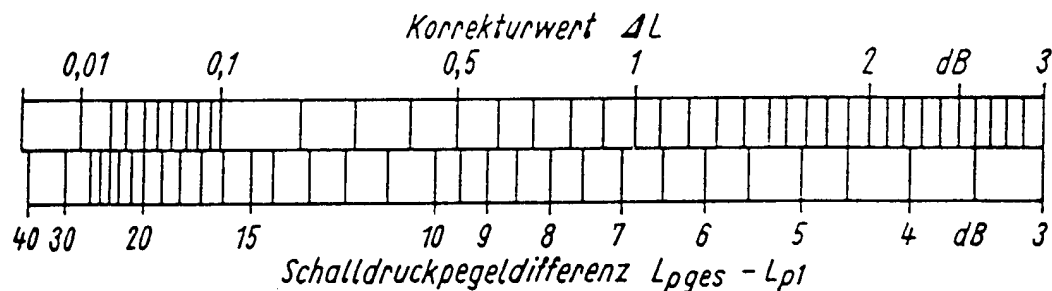


- 2. Pegelsubtraktion** (zum rechnerischen Ausschalten eines unerwünschten Anteils, z. B. des Störpegels), Rechnung analog Addition.

Vereinfachtes Verfahren:

$$L_{p2} = \left[L_{p_{ges}} + 10 \lg \left(1 - 10^{-\frac{L_{p_{ges}} - L_{p1}}{10}} \right) \right] \text{ dB} = (L_{p_{ges}} - \Delta L) \text{ dB}.$$

Bestimmung von ΔL aus nachstehendem Nomogramm:



- 3. Mittelwertbildung** mehrerer (inkohärenter) Pegel

$$L_{pm} = 10 \lg \left(\frac{1}{n} \cdot \sum_{v=1}^n \frac{p_v^2}{p_0^2} \right) \text{ dB} = 10 \lg \left(\frac{1}{n} \cdot \sum_{v=1}^n 10^{\frac{L_{pv}}{10}} \right) \text{ dB}.$$

Näherungsformel, wenn die Differenz der einzelnen Pegel kleiner als 10 dB ist:

$$L_{pm} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{v=1}^n L_{pv} \text{ dB}.$$

7.2.3 Frequenzabhängigkeit der Schallwahrnehmung durch den Menschen

Der Lautstärkeindruck ist innerhalb des Hörbereiches von 16 Hz ... 16 kHz stark frequenzabhängig. Die maximale Empfindlichkeit des Menschen liegt im Frequenzbereich von 2 ... 5 kHz bei etwa 4 kHz mit einer Abnahme der Empfindlichkeit zu tiefen Frequenzen hin bis zu -50 dB bei 20 Hz und zu hohen Frequenzen bis zu -20 dB bei 8 kHz.

Derartig drastische subjektive Einflüsse müssen bereits bei der Erfassung von Schallkenngrößen berücksichtigt werden. Eine solche frequenzabhängige Bewertung (Filterung) erfolgt üblicherweise durch eine dem menschlichen Hörempfinden sehr nahekommende A-Bewertung, Abb. 7.5.

Ziel ist nicht eine möglichst gute Annäherung, sondern eine reproduzierbare Angabe in Form des **A-bewerteten Schalldruckpegels** L_{pA} in dB(A). Es gibt auch weitere Bewertungskurven, beispielsweise D für Fluglärm. Unabhängig davon ist der Charakter des Geräusches auch von großem Einfluss auf die Wahrnehmung durch den Menschen. Vergleiche hierzu die bereits genannten psychoakustische Größen.

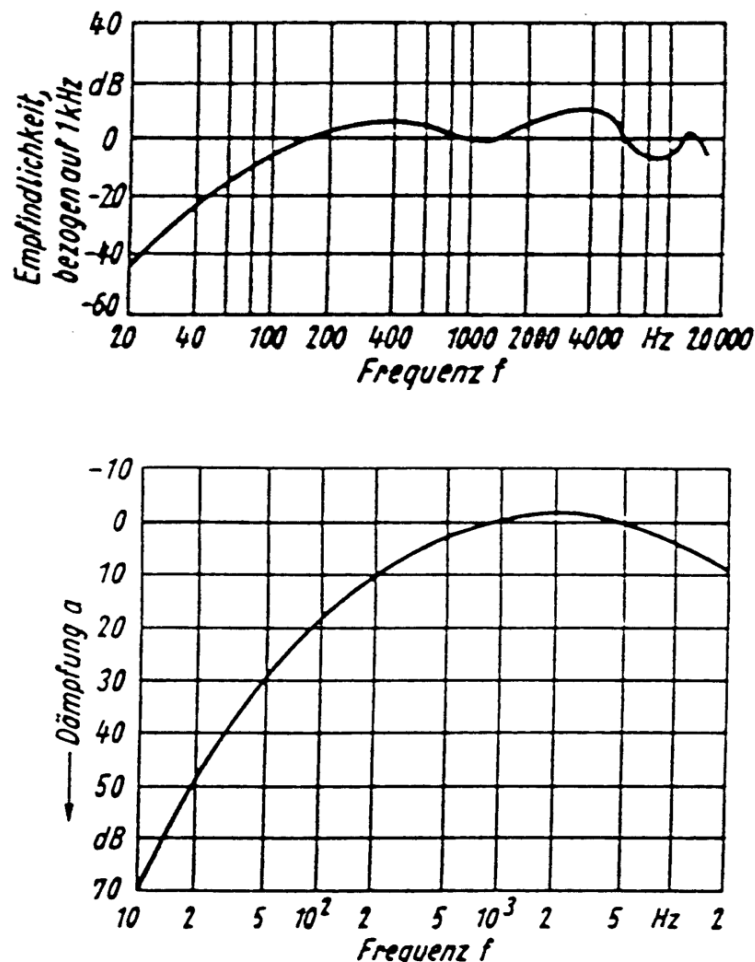


Abb. 7.5: Frequenzempfindlichkeit und -bewertung, aus [38/
 oben: Hörempfindlichkeit des Menschen
 unten: Frequenzbewertungskurve A nach DIN IEC 651

7.2.4 Mess- und Auswerteverfahren

7.2.4.1 Vorbemerkungen

Zunächst ist bei Messaufgaben zu entscheiden, ob die **Emission** einer Schallquelle (also die Geräuscherzeugung) oder die **Immission** auf den Menschen (also die Lärmeinwirkung) gemessen werden soll. Dazu dienen meist folgende Messgrößen:

- Messung der **Emission** der Schallquelle als **abgestrahlte Schalleistung** L_{WA} (berechnet aus gemessenen Schalldrücken)
- oder in Form des **arbeitsplatzbezogenen Emissionswertes** (in Ohrnähe am Arbeitsplatz) L_{pAem}
- Messung der **Immission** auf den Menschen als **A-bewerteter Schalldruckpegel** L_{pA} oder in Weiterverarbeitung zu einem **Beurteilungspegel** L_r (vgl. Abschnitt 7.2.5).

Ganz andere Messgrößen sind beispielsweise für eine Geräteanalyse zur Ermittlung von Geräuschquellen und deren Ursachen nötig.

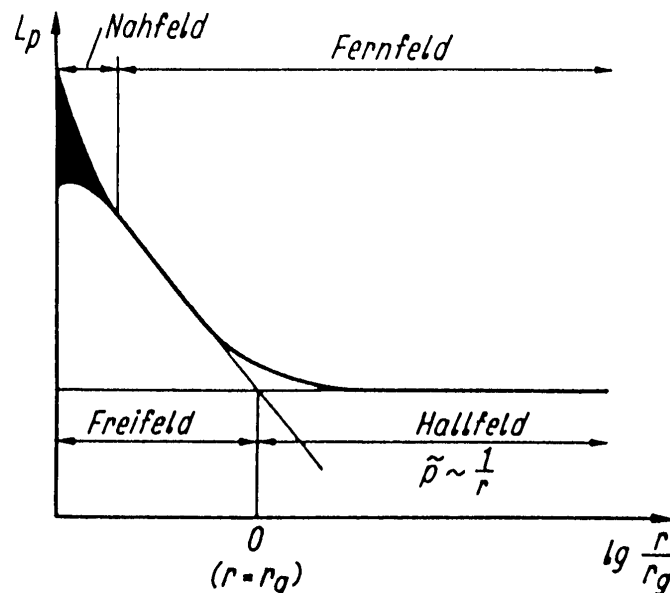


Abb. 7.6: Umgebungsbedingungen um eine Schallquelle, aus [38/

Vor Beginn von Messungen sollte man sich auch über die Umgebungsbedingungen Klarheit verschaffen, Abb. 7.6.

- Die Umgebungsbedingungen der Quelle beeinflussen das Messergebnis zunächst durch störende Reflexionen:
 - In einem sogenannten **Freifeld** oder Direktschallfeld erfolgt eine gleichmäßige Ausbreitung in alle Richtungen ohne Hindernisse. Der Schalldruckpegel nimmt linear zum Logarithmus der Entfernung ab, das entspricht - 6 dB je Entfernungsverdopplung. Für Feldgrößen gilt allgemein eine Abnahme $\sim 1/r$ (Schalldruck-, Schallschnelle), für Energiegrößen $\sim 1/r^2$ (Schalleistung), für Pegelgrößen - 6dB bei Verdopplung des Abstandes. Dies ist im Freien oder in speziellen Messräumen (reflexionsarm bzw. „schalltot“) der Fall.

- a2) Sind allseitig reflektierende Begrenzungen vorhanden, erfolgt insbesondere bei sehr glatten, schallharten Oberflächen ein ständiges Reflektieren und ein vollständiges Durchmischen zu einem sogenannten **Hallfeld** (diffuses Schallfeld), bei dem an jedem Punkt idealer Weise gleiche Pegel auftreten. Hallräume mit allseitigen, glatten Betonwänden kommen dem sehr nahe.
- b) Die Entfernung von der Quelle hat zusätzlich Einfluss auf die gemessenen Werte:
- b1) In unmittelbarer Nähe der Quelle (wenige Zentimeter entfernt) herrschen sogenannte **Nahfeldbedingungen**; p und v sind nicht in Phase. Damit lässt sich die Schallleistung P wegen vorhandener Bildleistung nicht eindeutig bestimmen. Dieser Bereich ist also für Messungen zu meiden.
Erfahrungswert: für $f \leq 200$ Hz reicht der Nahfeldeinfluss bis ca. 25 cm.
- b2) Deshalb sollten Messungen stets im sogenannten **Fernfeld** erfolgen, wo p und v in Phase sind und die Schallschnelle proportional zu $1/r$ abnimmt, sofern noch kein Hallfeld vorliegt.

7.2.4.2 Messverfahren

Hier soll nur ganz knapp auf die erforderlichen Messverfahren eingegangen werden.

Messung der Schalldruckpegel L_{pAem} und L_{pA} :

Schalldruckpegel in Form arbeitsplatzbezogener Emissionswerte L_{pAem} oder der Immissionswerte L_{pA} werden über Mikrofone in Ohrhöhe erfasst. Diese Messungen stellen Relativmessungen dar und sind nur unter gleichen Bedingungen im Umfeld vergleichbar.

Die Messung der **abgestrahlten Schallleistung** bzw. des **Schallleistungspegels** als objektiver Vergleichswert ist dagegen genormt /69//70/. Sie erfolgt im europäischen Raum meist im **Hüllflächenverfahren** im Freifeld, in amerikanischen Gebieten vorwiegend als **Hallfeldmessung**.

Hüllflächenverfahren im Freifeld zur Schallleistungsmessung:

Ausgangspunkt ist die Messung von Schalldruckpegeln an verschiedenen, auf einer Hüllfläche um das Messobjekt auf Messpfaden verteilten Messpunkten (auch kontinuierliche Messungen auf Messpfaden sind zulässig). Als Hüllflächen dienen Quader oder Kugeln, meist jedoch Halbkugeln und Quader auf einer reflektierenden Stellfläche, Abb. 7.7 und 7.8. Dabei ist für Freifeldbedingungen zu sorgen /70/. Je 5 bis 10 Messwerte je Messpunkt werden gemittelt und dann über die gesamte Messfläche ein Mittelwert gebildet:

$$\bar{L}_{pA} = 10 \lg \left(\frac{1}{n} \sum 10^{0,1L_{pAi}} \right) \text{ dB} . \quad (7.15)$$

Sind erhebliche Fremdgeräusche vorhanden, wird die Messung meist doppelt ausgeführt, zum einen bei Betriebsbedingungen/Funktion des Gerätes, zum anderen bei ausgeschaltetem Gerät zur alleinigen Erfassung der Fremdgeräusche.

Über Pegelsubtraktion lässt sich dann zunächst eine Korrektur der Fremdgeräusche vornehmen

$$\bar{L}_{pA} = \bar{L}'_{pA} - \Delta L, \quad (7.16)$$

wenn $\bar{L}'_{pA}$ den mit Fremdgeräuschen belasteten Pegel darstellt.

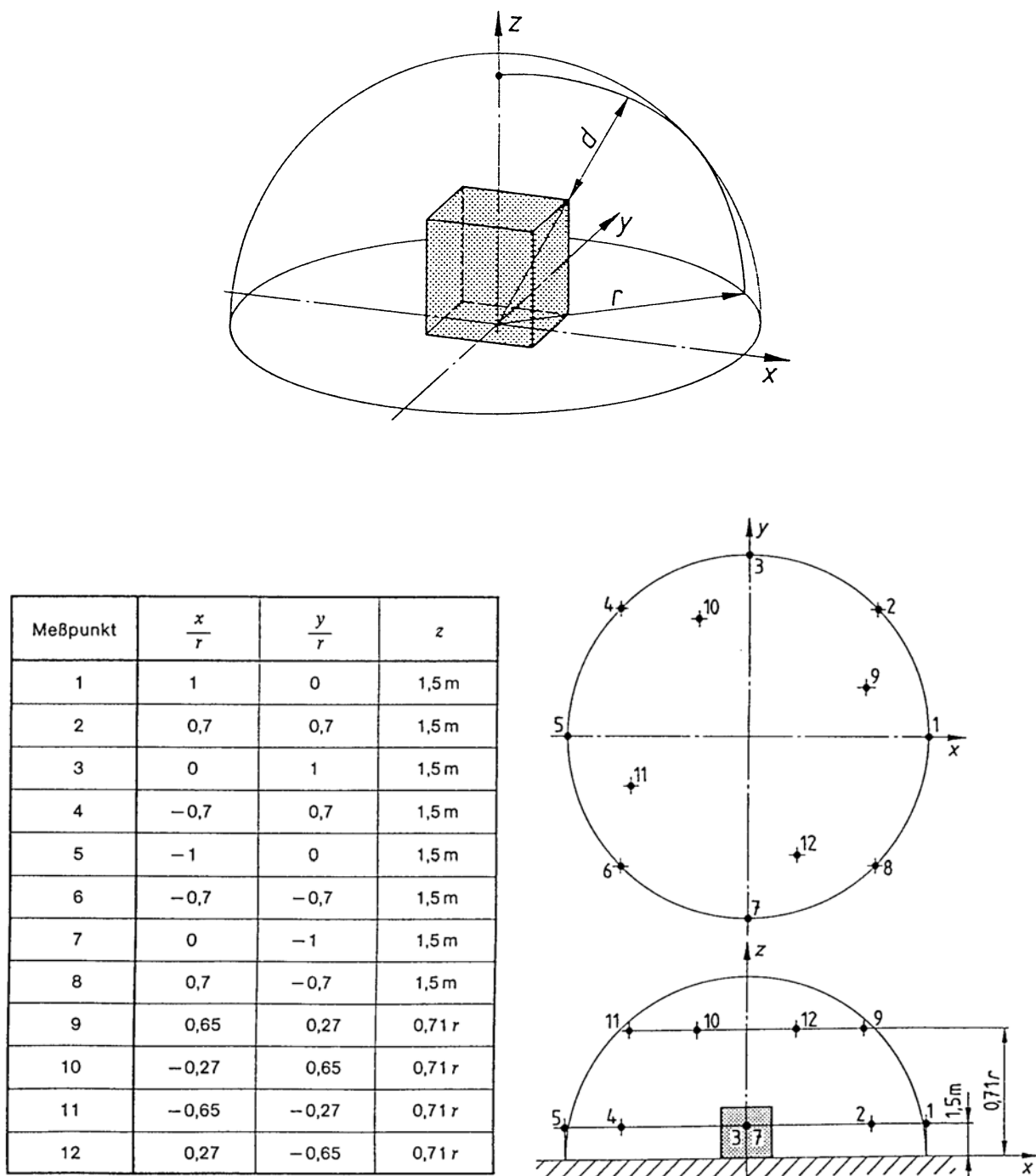


Abb. 7.7: Halbkugel-Messfläche, Messpunktanordnung und Koordinaten, aus /69/

Der Schallleistungspegel wird nun unter Berücksichtigung des von der Hüllfläche abhängigen Messflächenmaßes über

$$L_{WA} = \bar{L}_{pA} + L_A = \bar{L}_{pA} + 10 \lg \frac{A}{A_0} \text{ dB} \quad (7.17)$$

berechnet, mit L_A als Messflächenmaß, in das die Hüllfläche A und eine Referenzfläche $A_0 = 1 \text{ m}^2$ eingeht.

Die Lage der Quelle innerhalb der Hüllfläche (mittig) und die Größenrelationen zueinander (kleines Messobjekt im Vergleich zur Hüllfläche) sind hauptsächliche Fehlerquellen für die Messung.

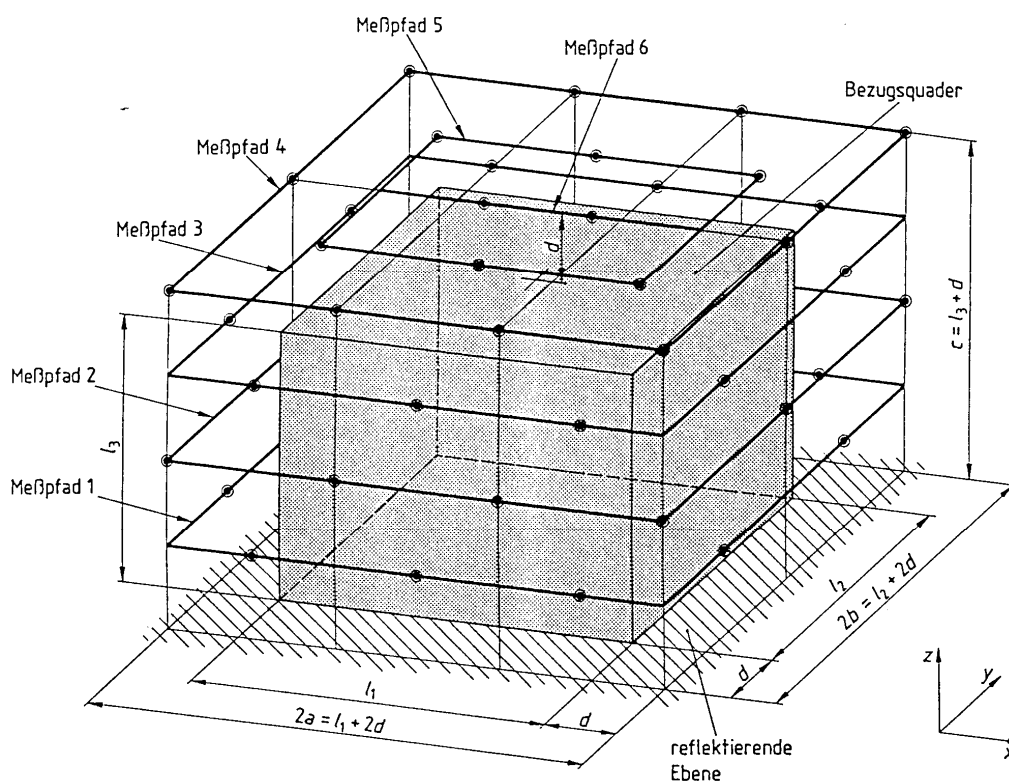


Abb. 7.8: Quader-Messfläche, Messpunkte und Messpfade bei großen Maschinen, aus /69/

Schallleistungsmessung im Hallfeld:

Die Schallleistungsmessung im Hallfeld erfordert einen Hallraum, der ein möglichst ideales, gleichmäßiges Schallfeld durch Reflexionen erzeugt. Es ist dann ein über dem Raum gemittelter Schalldruckpegel zur Leistungsberechnung heranzuziehen

$$L_{WA} = \bar{L}_{pA} + 10 \lg \frac{A}{A_0} \text{ mit } A = 0,163 \frac{V}{T}, \quad (7.18)$$

wobei Hallraumparameter in Form des Raumvolumens V und der Nachhallzeit T eingehen.

Intensitätsmessungen:

Sie sind auch im Nahfeld und bei zusätzlichen Fremdgeräuschen möglich, da vektorielle Größen erfasst werden. Die Messtechnik ist jedoch deutlich aufwendiger. Hier soll nicht näher darauf eingegangen werden.

Frequenzgang:

Zu beachten ist bei allen Messungen zusätzlich der anzutreffende Frequenzgang. Für viele Geräuschmessungen reicht die Betrachtung der Amplituden (Amplitudenspektren) aus, Phaseninformationen sind meist ohne Interesse, Abb. 7.9, 7.10. Die meisten Geräusche überdecken dabei ein sehr breites Spektrum, durch Frequenzanalysen lassen sich jedoch einzelne Frequenzen ermitteln und gegebenenfalls Rückschlüsse auf Geräuschursachen ziehen.

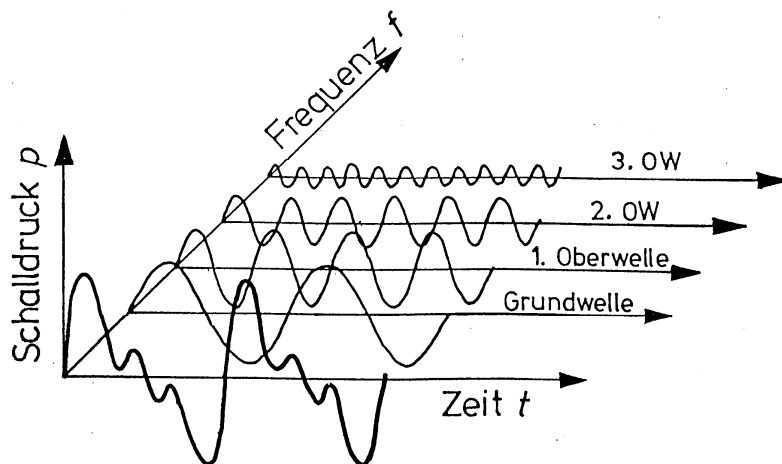


Abb. 7.9: Zusammenhang zwischen Zeit- und Frequenzebene, aus /48/

Schalldruckpegel werden zunächst als Gesamtpegel vorzugsweise A-bewertet angegeben. Üblich sind jedoch Frequenzanalysen (durch Filter) mit Bandbreiten zwischen oberer und unterer Grenze des Frequenzbandes von

$$f_0 = 2 f_u \text{ Oktavanalyse} \quad (7.19)$$

$$f_0 = \sqrt[3]{2} f_u \approx \frac{5}{4} f_u \text{ Terzanalyse} \quad (7.20)$$

mit

$$f_m = \sqrt{f_0 f_u} \text{ als Mittenfrequenz des Bandes} \quad (7.21)$$

bzw. auch mit direkt anzugebenden Bandbreiten von

$$\Delta f = 1 \text{ Hz bzw. } 4 \text{ Hz} \quad \text{bei Schmalbandanalysen mit fester absoluter Bandbreite} \quad (7.22)$$

oder

$$\Delta f = \frac{f_0 - f_u}{f_m} = 10\% \quad \text{mit fester relativer Bandbreite.} \quad (7.23)$$

Charakteristische
Zeitfunktionen eines
Geräusches



Zeitfunktionen und
ihre Spektren

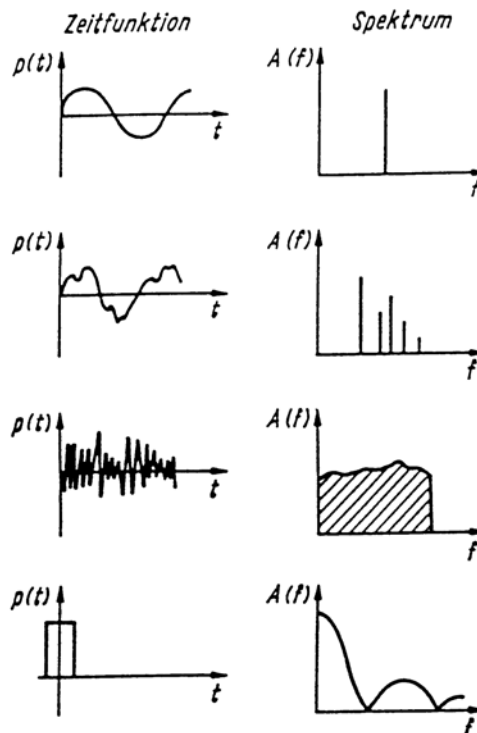


Abb. 7.10: Charakteristische Zeitfunktionen und Spektren von Geräuschen, aus /38/

Tafel 7.4 vergleicht Terz- und Oktavfilter, eine Umrechnung von feinerer zu gröberer Teilung ist möglich, die Aussagefähigkeiten jedoch verschieden, Abb. 7.11.

Aus Terzpegeln rechnet man nach folgender Beziehung in Oktavpegel um:

$$L_{Okt} = 10 \lg \left(10^{\frac{L_{terz1}}{10}} + 10^{\frac{L_{terz2}}{10}} + 10^{\frac{L_{terz3}}{10}} \right) \quad (7.24)$$

L_{terz1} , L_{terz2} und L_{terz3} sind die Terzpegel dreier benachbarter Terzen. Aus Bandpegeln wird der Gesamtpegel allgemein berechnet nach:

$$L_{\Sigma} = 10 \lg \left(\sum_{i=1}^n 10^{0,1 L_i} \right) \quad (7.25)$$

L_i sind die Bandpegel aufeinanderfolgender Bänder. Will man einen bewerteten Gesamtpegel, z. B. L_A errechnen, so sind die einzelnen Bandpegel entsprechend der Bewertungskurve A zu korrigieren.

Tafel 7.4 Vergleich Terz- und Oktavfilterung

Oktave				Terz			
f_{li} Hz	f_{ls} Hz	f_m Hz	A-Bewertung dB	f_{li} Hz	f_{ls} Hz	f_m Hz	A-Bewertung dB
11	22	16	-56,7	14,1	17,8	16	-56,7
				17,8	22,4	20	-50,5
				22,4	28,2	25	-44,7
22	44	31,5	-39,4	28,2	35,5	31,5	-39,4
				35,5	44,7	40	-34,6
				44,7	56,2	50	-30,2
44	88	63	-26,2	56,2	70,7	63	-26,2
				70,7	89,1	80	-22,5
				89,1	112	100	-19,1
88	177	125	-16,1	112	141	125	-16,1
				141	178	160	-13,4
				178	224	200	-10,9
177	355	250	-8,6	224	282	250	-8,6
				282	355	315	-6,6
				355	447	400	-4,8
355	710	500	-3,2	447	562	500	-3,2
				562	708	630	-1,9
				708	891	800	-0,6
710	1420	1000	0	891	1122	1000	0
				1122	1413	1250	+0,6
				1413	1778	1600	+1,0
1420	2840	2000	+1,2	1778	2239	2000	+1,2
				2239	2818	2500	+1,3
				2818	3548	3150	+1,2
2840	5680	4000	+1,0	3548	4467	4000	+1,0
				4467	5623	5000	+0,5
				5623	7079	6300	-0,1
5680	11360	8000	-1,1	7079	8913	8000	-1,1
				8913	11220	10000	-2,5
				11220	14130	12500	-4,3
11360	22720	16000	-6,6	14130	17780	16000	-6,6
				17780	22390	20000	-9,3

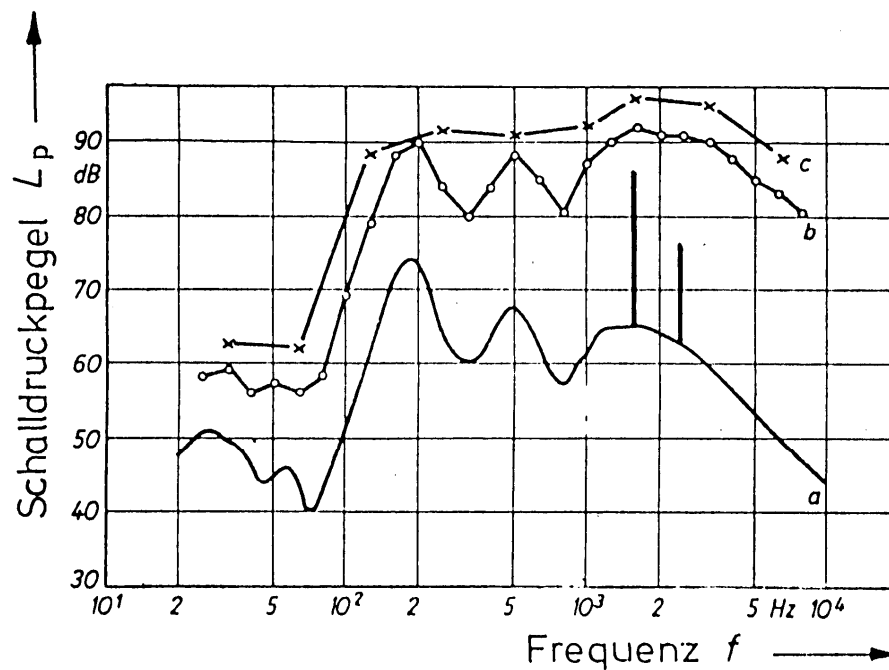


Abb. 7.11: Einfluss des Filtertypes auf das Schalldruckpegelspektrum, aus [48/

a) Schmalbandanalyse

b) Terzfilteranalyse

c) Oktavfilteranalyse

Zusätzlich zum Frequenzspektrum können Schalldrücke auch **zeitlich verschieden** sein, dann ist gegebenenfalls ein energieäquivalenter Dauerschallpegel zu berechnen

$$L_{pm} = 10 \lg \left(\frac{1}{T} \int_0^T 10^{0,1 L_p} dt \right) \approx 10 \lg \left[\frac{1}{T} \sum_{i=1}^n t_i \cdot 10^{0,1 L_{pi}} \right] \quad (7.26)$$

Bisher wurden vorwiegend Luftschallmessungen erwähnt. Um **Körperschall** zu messen, kann man im Allgemeinen nicht auf Drücke zurückgreifen, sondern muss die Schwingung selbst, deren Schnelle oder die Beschleunigung ($a = \omega v = \omega^2 x$) ermitteln

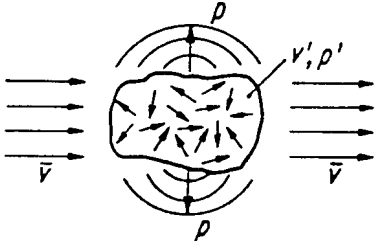
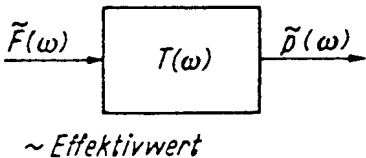
Dies erfolgt beispielsweise über piezoelektrische Beschleunigungsaufnehmer oder Kraftsensoren, die auch Kraft-Zeit-Verläufe und damit Stoßkenngrößen bzw. Impulskenngrößen zu erfassen gestatten. Eine andere Möglichkeit sind Schwingungs- bzw. Schnellmessung mit Laservibrometern oder Wegsensoren.

Schließlich sind auch Messungen zur Wahrnehmung der Geräusche z. B. als Kunstkopfmessung üblich.

7.2.5 Geräuscentstehung und -weiterleitung

Betrachtet man nun die gesamte Wirkungskette von der Geräuschquelle innerhalb eines Gerätes bis zur Abstrahlung und Wirkung als Luftschall, so muss man zunächst zwischen direkter und indirekter Geräuscherzeugung unterscheiden, Tafel 7.5.

Tafel 7.5 Direkte und indirekte Geräuscentstehung, aus /38/

	direkt erzeugte Geräusche	indirekt erzeugte Geräusche
Entstehungsmechanismus	Zeitliche Schwankungen von Geschwindigkeit und Druck innerhalb eines Fluids infolge strömungsmechanischer Vorgänge erzeugen Wechsellruck im Hörbereich (Luftschall)	Wechselkräfte infolge von Bewegungs- oder anderen physikalischen Vorgängen regen mechanische Schwingungen im Hörbereich (Körperschall) an, die als Luftschall abgestrahlt werden.
Modell	 – zeitlicher Mittelwert	 ~ Effektivwert
Erläuterungen	$\bar{v}$ mittlere Strömungsgeschwindigkeit v' zeitlich schwankende Strömungsgeschwindigkeit p' zeitlich schwankender Druck im Strömungsbereich p Schalldruck	$\tilde{F}(\omega)$ Spektrum der anregenden Wechselkraft $T(\omega)$ Übertragungsfunktion der mechanischen Struktur (Schwings- und Abstrahlverhalten) $\tilde{p}(\omega)$ Frequenzspektrum des Schalldrucks

7.2.5.1 Wirkungskette der direkten Geräuscentstehung

Abläufe/Vorgänge in Geräten, die direkt Luftdruckschwankungen und damit Luftschall erzeugen, sind beispielsweise Auswirkungen

aeropulsiver Quellen (Ansaugöffnungen, Auspuff)
aerodynamischer Quellen (Luftströmungen) oder
thermodynamischer Quellen (Explosion).

Es handelt sich dabei um eine direkte Wandlung von Druckänderungen oder von mechanischen Bewegungen in Schall

$$p(\omega) = Z(\omega) \cdot v(\omega) \quad (7.27)$$

mit

$Z(\omega)$ als Luftimpedanz (evtl. Impedanz eines Fluides).

In der Feinwerktechnik findet man direkte Geräuscherzeugung vorwiegend in Lüftern, insgesamt aber vergleichsweise selten.

7.2.5.2 Wirkungskette der indirekten Geräuscentstehung

Wechselnde Betriebskräfte (**Kraftanregung**) oder bewegte bzw. schwingende Teile (**Geschwindigkeits- oder Fußpunktanregung**) innerhalb von Geräten erzeugen zunächst Körperschall im Hörbereich, der im Gerät über mechanische Strukturen auch an Bauteile oder Flächen gelangt, die eine solche Schwingungsrichtung erfahren, dass letztlich Luftschall erregt wird. Man spricht dann von indirekter Geräuscentstehung. In allen Geräten, in denen bewegte Vorgänge ablaufen, ist dies meist die dominierende Geräuscherzeugung. Neben der Art der Anregung spielt hier also auch das Schwingungs- und Abstrahlverhalten der mechanischen Struktur, also dessen Übertragungsfunktion eine wichtige Rolle, Abb. 7.12.

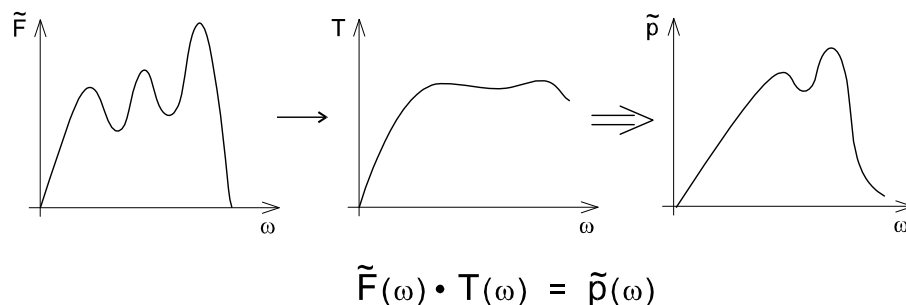


Abb. 7.12: Beispiel für eine indirekte Geräuscentstehung

Betrachtet man die gesamte Wirkungskette

$$p(\omega) = Z_{Str}(\omega) \cdot \ddot{u}(\omega) \cdot v(\omega) = Z_{Str}(\omega) \cdot \ddot{u}(\omega) \cdot h_{Eing}(\omega) \cdot F(\omega) \quad (7.28)$$

$$\text{mit } v(\omega) = h_{Eing}(\omega) \cdot F(\omega), \quad (7.29)$$

so sind neben der Körperschallanregung über $F(\omega)$ oder $v(\omega)$ auch die Körperschallübertragung $\ddot{u}(\omega)$ zur Abstrahlfläche und die Impedanz der Schallabstrahlung $Z_{Str}(\omega)$ bei der Geräuscentstehung zu berücksichtigen.

Bezüglich der Körperschallanregung liegt hier eine Kraftanregung $F(\omega)$ über eine gewisse Eingangsadmittanz $h_{\text{Eing}}(\omega)$ an der Anregungsstelle vor, die auch durch eine Geschwindigkeitsanregung $v(\omega)$ erfolgen kann.

1. Körperschallerregung (Abb. 7.13)

a) Kraftanregung

Periodische oder impulsartige Betriebskräfte werden insbesondere dann, wenn die Impedanz des Systems sehr groß gegenüber der des Erregers ist, nicht zu einer Aufprägung einer Bewegung auf das Gesamtsystem führen, sondern die Kraftwirkung erregt im schwingungsfähigen Gesamtsystem Körperschall. Dabei erfolgt diese Anregung nicht nur an der Einleitungsstelle selbst, sondern an allen Stellen, die in den Kraftfluss einbezogen sind.

Typische Erregungsursachen können sein

- Unwuchten
- Stöße
- hin- und hergehende Bewegungen
- diskontinuierliche Kraftübertragungen bzw. Kraftübertragungen mit diskontinuierlichen Anteilen (Zahnrad, Zahnriemengetriebe)
- Spiel in der Bewegungsübertragung
- magnetische Kraftwirkungen.

b) Geschwindigkeitsanregung (Schnelleanregung)

Wird dagegen an einem Erreger hoher Impedanz beispielsweise eine sehr leichte Struktur (z. B. ein Abdeckblech) mit vergleichsweise sehr kleiner Impedanz angekoppelt, so ist eine Aufprägung der Erregerbewegung direkt auf dieses Gebilde/System möglich. Diese Teile müssen dabei nicht im Kraftfluss liegen, können jedoch trotzdem mitbewegt werden.

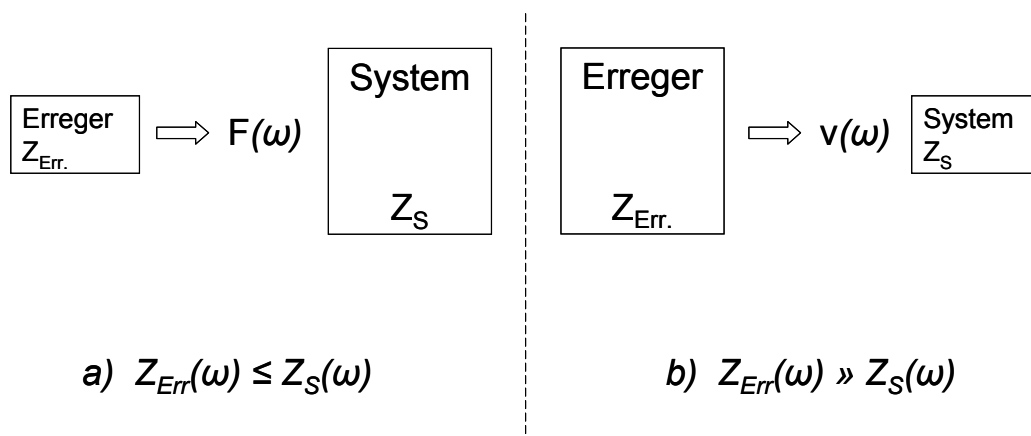


Abb. 7.13: Veranschaulichung von a) Kraft- und b) Geschwindigkeitsanregung

2. Körperschallübertragung

Der Körperschall wird meist nicht in der jeweils erregten Struktur auch als Luftschall abgestrahlt, sondern es erfolgt in der Mehrzahl der Fälle zunächst eine Körperschallübertragung innerhalb des Gerätes. Luftschallabstrahlung setzt wegen der longitudinalen Luftschwingung ja eine im Allgemeinen senkrecht zur abstrahlenden Fläche stehende Schwingungsamplitude, also Biegewellen voraus. Nur Geräteteile mit senkrecht zur Oberfläche verlaufenden Schwingenden strahlen in großem Maße ab.

Körperschallschwingungen sind jedoch beliebig gerichtet, sie werden an Bauteilgrenzen häufig reflektiert, jedoch nicht nennenswert bedämpft. Es entsteht ein Körperschallfeld im Gerät mit annähernd konstanter Schwingungsenergiedichte. In die gesamte Übertragung können natürlich, wie beispielsweise bei der Kraftanregung, auch wieder andere Koppel- und damit Einleitungspunkte zu anderen Baugruppen/Bauteilen im Sinne einer Anregung überwunden werden. Hier soll $\ddot{u}(\omega)$ als gesamte Übertragungsfunktion zwischen Erregerstelle und Abstrahlfläche verstanden werden.

Innere Verluste treten zwar auf (Tafel 7.6), sind jedoch meist sehr gering. Für viele feinwerktechnische Geräte gilt $\eta \approx 10^{-2}$ als gute Näherung, durch optimale Beschichtungen mit viskoelastischen Materialien (Entdröhnmittel) erreicht man ca. $\eta \approx 0,1$.

Tafel 7.6 Verlustfaktoren einiger Materialien und Konstruktionen, nach /38/

Material / Konstruktion	Verlustfaktor ¹⁾	Dämpfungsmechanismus
Stahl, Aluminium	10^{-4}	reine Werkstoffdämpfung
feinwerktechnische Strukturen	$(1 \text{ bis } 5) \times 10^{-2}$	Dämpfung der Verbindungsstellen, Werkstoffdämpfung
Automobilkonstruktionen	10^{-2}	
Verbundbleche, Bleche mit Entdröhnsschicht	$(2 \text{ bis } 8) \times 10^{-1}$	Werkstoffdämpfung optimal durch Aufbau des Verbundsystems zur Geltung gebracht
reale Zahndämpfung bei Zahnradgetrieben	$(0,3 \text{ bis } 1) \times 10^{-1}$	Reibung, Werkstoffdämpfung
Hartgummi	1	Werkstoffdämpfung

¹⁾ Verlustfaktor η als Verhältnis der in Wärme umgewandelten zur gesamten mechanischen Energie. Beachte auch den wesentlich höheren Verlustfaktor realer Konstruktionen ($\eta \approx 10^{-1}$) gegenüber reinen Werkstoffen wie Stahl oder Aluminium.

3. Luftschallabstrahlung

Die Luftschallabstrahlung erfolgt meist an mit Biegeschwingungen beaufschlagten, plattenförmigen Bauteilen. Die analytische Betrachtung ist relativ unanschaulich und nur für sehr eingegrenzte Fälle möglich, sie soll deshalb hier nicht vertieft werden.

7.3 Zulässige Lärmbelastungen

7.3.1 Geräuschemission

Zulässige Werte für die Schallimmission oder Geräuschemission beziehen sich vorwiegend auf die Geräuschemission am Arbeitsplatz oder im Wohnbereich. Sie seien kurz erläutert.

Messbedingungen (stark vereinfacht nach DIN 45645, /70/):

- für Geräuschemission auf Menschen am Arbeitsplatz
⇒ Mikrofon dort anordnen, wo Mensch tätig ist (in Ohrhöhe),
- für Geräuschemission in der Nachbarschaft (also z. B. im Wohnbereich)
⇒ im Allgemeinen 0,5 m außen vor Mitte des geöffneten Fensters des am stärksten betroffenen Raumes.

Messgröße: L_{pA} als mittlerer Wert.

Bewertungsgröße:

Einführung eines Beurteilungspegels L_r unter Berücksichtigung von Zuschlägen, da nicht nur der Geräuschpegel, sondern auch das Spektrum subjektiv zu bewerten ist:

$$\text{Heimbereich: } L_r = L_{pA} + \underset{\substack{\downarrow \\ \text{Impulzzuschlag}}}{K_I} + \underset{\substack{\downarrow \\ \text{Tonzuschlag}}}{K_T} + \underset{\substack{\downarrow \\ \text{Zuschlag für Ruhezeiten}}}{K_R} \quad (7.30)$$

$$\text{Arbeitsplatz: } L_r = L_{pA} + K_I + K_T + 10 \lg \frac{T}{T_r} \text{ dB.} \quad (7.31)$$

T_r - Bewertungszeitraum tagsüber; T - Zeit der Geräuscheinwirkung innerhalb T_r .

$$\text{Impulzzuschlag } K_I: \Rightarrow K_I = L_{\text{imp.}} - L_{pA} \quad (7.32)$$

Tonzuschlag K_T : + 3dB für auffällige Töne; + 6 dB für besonders auffällige Töne

Ruhezuschlag K_R : z. B. + 6 dB für Sonn- und Feiertage.

Falls kein stationäres Geräusch über die gesamte Zeit vorliegt, sondern Messungen in Teilzeiten nötig waren:

$$L_r = 10 \lg \left[\frac{1}{T_r} \sum_{i=1}^m T_i \cdot 10^{(L_{pAi} + K_{Ii} + K_{Ti} + K_{Ri})/10 \text{ dB}} \right] \text{ dB} \quad (7.33)$$

$$\text{mit } T_r = \sum_{i=1}^m T_i \text{ (Je } i \text{ sollten 3 unabhängige Messwerte gemittelt werden).} \quad (7.34)$$

Vergleichsgrößen/zulässige Werte:**a) hinsichtlich einer Gehörgefährdung (VDI 2058 Bl. 2, /73/):**

$L_r \geq 85 \text{ dB}$	allgemeine Gefahr des Entstehens von Gehörschäden
$85 \leq L_r \leq 89 \text{ dB}$	Gefahr des Entstehens von Gehörschäden nur bei länger andauernder Belastung
$L_r \geq 90 \text{ dB}$	Gefahr des Entstehens von Gehörschäden auch bei kürzerer Einwirkung möglich, bei ohrgesunden Personen ab nachfolgendem Zeitraum Schädigung: $\Rightarrow$ 90 dB ab 6 Jahre 87 dB ab 10 Jahre 85 dB ab 15 Jahre
$L_r \geq 120 \text{ dB}$	akute Gehörschäden schon nach wenigen Minuten
$L_r \geq 135 \text{ dB}$	Schäden bereits durch Einzelschallereignisse (Knalle, Explosionen)

b) hinsichtlich einer Beeinträchtigung/Störung (VDI 2058 Bl. 3, /73/):

am Arbeitsplatz: (VDI 2058 Bl. 3)	$\leq 55 \text{ dB (A)}$	für überwiegend geistige Tätigkeiten
	$\leq 70 \text{ dB (A)}$	einfache, überwiegend mechanisierte Bürotätigkeiten
	$\leq 85 \text{ dB}$	sonstige Tätigkeiten
	(bis + 5 dB zulässig)	

im Wohnbereich: (VDI 2058 Bl. 1)	Außen	tagsüber $\leq \text{dB (A)}$	nachts $\leq \text{dB (A)}$
	Kurgebiete (Krankenhäuser)	45	35
	reine Wohngebiete	50	35
	allgemeine Wohngebiete	55	40
	Mischgebiete	60	45
	Gewerbegebiete	65	50
	Industriegebiete	70	70

Innen

unabhängig von Lage in obigen Gebieten:

tagsüber $\leq 35 \text{ dB (A)}$ nachts $\leq 25 \text{ dB (A)}$

(kurzzeitige Geräuschspitzen bis + 10 dB zulässig).

7.3.2 Geräuschemission von Geräten und Maschinen

Für den Entwickler ist jedoch die Frage der Geräuschemission maßgebend. Hier sind die Festlegungen jedoch relativ unkonkret. Hersteller sind verpflichtet:

- Geräte und Maschinen entsprechend den fortschrittlichen, in der Praxis bewährten Regeln der Lärminderung auszulegen.
- Die Lärmemission der Geräte/Maschinen anzugeben in Form des
 - Schalleistungspegels L_{WA}
 - arbeitsplatzbezogenen Emissionswertes L_{pAem}
(am Arbeitsplatz von Maschinen/Geräten auftretender Schalldruckpegel ohne Reflexionen).

Grenzwerte für die Geräuschemission sind wegen der verschiedenen Einsatzbedingungen und Einsatzumfelder und wegen des ständigen technischen Fortschrittes nicht festgelegt. In den VDI-Vorschriften (/71//72/) werden jedoch Vergleichswerte für den aktuellen Stand der Technik in Form von an ausgewählten Erzeugnissen ermittelten Messwerten gesammelt und Messbedingungen festgelegt, Tafel 7.7.

Tafel 7.7 Beispiele typischer gemessener Emissionskennwerte, nach /71//72/:

Gerät	L_{WA} in dB	L_{pAem} in dB
Schreibmaschinen	70 ... 75	65 ... 70
Bürokopierer	67	71
Computer: im typischen Betrieb im Leerlauf Komponenten: Tastatur Diskettenlaufwerk Festplattenlaufwerk	57 50 59 56 53	-- 42 56 50 45
Küchenmaschine	79...83	
Geschirrspüler	68 ... 72	
Staubsauger	76 ... 80	
Waschmaschine: Waschen Schleudern	62 ... 66 72	
Trockner	59 ... 68	
Kühlschränke	41 ... 43	

7.4 Maßnahmen zur Lärminderung im Gerätebau

Abb. 7.14 verdeutlicht am Beispiel der indirekten Geräuscentstehung nochmals die komplette Wirkungskette, die gleichzeitig auch Richtschnur für Maßnahmen zur Lärminderung bietet. Zunächst sollten primäre Maßnahmen in der angegebenen Wertigkeit die Entstehung anregender Kräfte und Bewegungen beeinflussen, deren Einkopplung in Systeme sowie ihre innere Weiterleitung als Körperschall und letztlich die Abstrahlung als Luftschall mindern, ehe sekundäre Maßnahmen nur noch Einfluss auf die Schallausbreitung nehmen können, Tafel 7.8.

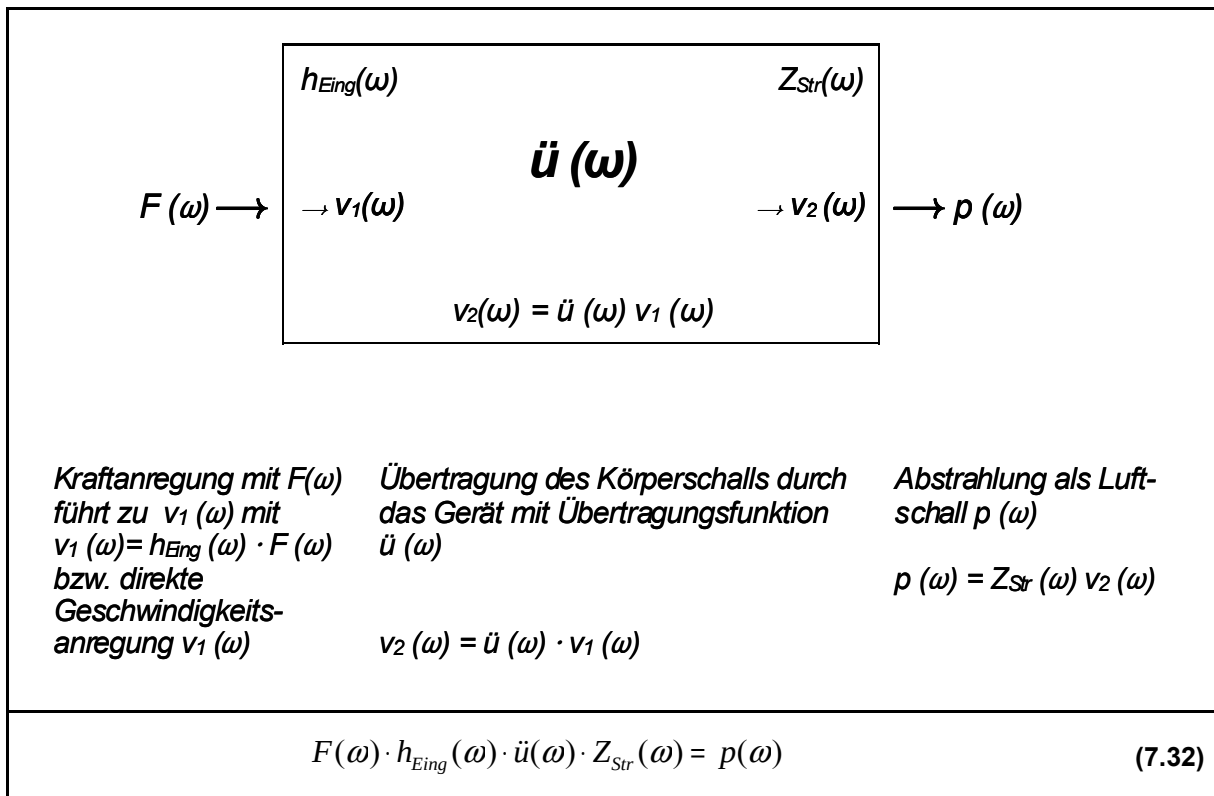


Abb. 7.14: Wirkungskette der indirekten Geräuscentstehung

Zu beginnen ist an Hauptgeräuschquellen. Die Überlagerung zweier Quellen mit 6 dB Unterschied erhöht den Gesamtpegel kaum merklich um nur noch 1 dB gegenüber dem höheren Pegel. Die Lärminderung muss dabei bereits mit der Aufgabenpräzisierung beginnen, im gesamten Entwicklungsprozess erfolgen und nicht am Ende oben aufgesetzt werden. Durch lärmarme Wirkprinzipie lässt sich dabei eine wesentlich größere Pegelabsenkung erzielen als durch andere Maßnahmen.

Die konkreten Maßnahmen können nicht allgemeingültig formuliert und dargestellt werden, vielmehr zeigen nur konkrete Lösungen Wege zur Lärminderung auf. Solche konkreten Lösungsansätze mit möglichst allgemeingültigem Charakter enthält beispielsweise /38/, als Tabelle 5.1ff, die nachfolgend ebenfalls abgedruckt sind. Hier seien aber zunächst einige Aspekte nur verbal aufgeführt.

Tafel 7.8 Maßnahmen der Lärminderung mit Prioritäten

Primäre Maßnahmen:	
1.	Minderung anregender Kräfte $F(\omega)$ bzw. Geschwindigkeiten $v(\omega)$
2.	Minderung der Einkopplung der angeregten Schwingungen in das Gerät ($h_{\text{Eing}}(\omega)$)
3.	Dämmung bzw. Dämpfung der Weiterleitung des Körperschalls im Gerät ($\ddot{u}(\omega)$)
4.	Minderung der Abstrahlung ($Z_{\text{Str}}(\omega)$)
Sekundäre Maßnahmen:	
5.	Minderung der Ausbreitung $p(\omega)$
6.	Körperschutzmaßnahmen

Primäre Maßnahmen zur Verminderung der Anregung von Geräuschen:

- Verringerung der direkten Luftschallanregung durch:
 - Vermeidung von Luftströmungen bzw. Realisierung möglichst niedriger Strömungsgeschwindigkeiten.
 - Vermeidung von Störungen in Luftströmen, die zu Verwirbelungen führen.
 - Vermeidung sprunghafter Querschnittsänderungen in Strömungskanälen und an Ausgangsöffnungen zur Realisierung konstanter Geschwindigkeitsprofile und wirbelfreier Einläufe.
- Verringerung der Anregung von Körperschall durch:
 - Vermeidung bzw. Verringerung anregender Kräfte, Geschwindigkeiten und Drehzahlen (z. B. durch anderes Wirkprinzip, Auswuchten schnell rotierender Teile, Masseausgleich).
 - Vermeidung diskontinuierlicher Kraftwirkungen (z. B. bei Zahnrädern).
 - Vermeidung von Gleichzeitigkeiten in der Anregung (Prinzip der Schrägung).
 - Vermeidung der Anregung von Resonanzen durch Verschiebung der Anregungsfrequenz. Mechanische Schwingungen direkt besitzen meist unkritische Frequenzen bis ca. 100 Hz, regen aber Resonanzfrequenzen und Oberwellen im hörbaren Bereich an.
 - Minimierung der ersten und zweiten, eventuell auch höherer Ableitungen der Zeitfunktion der Anregung, um einen steilen Abfall des Spektrums bei höheren Frequenzen zu sichern.
 - Vermeidung von Stößen (und deshalb auch von Spiel) in der Bewegung, da Stöße ein sehr breites Spektrum anregen.
 - Verringerung des Stoßimpulses $J = mv$, Halbierung von m oder v bringt -6 dB!
 - Verlängerung der Stoßdauer, zeitliche Verdoppelung führt zu -6 dB!
 - Einengung oder Beseitigung von Spiel.
 - Vermeidung von Verbindungsstellen, die sekundäre Stoßstellen bilden können (Klappern).

Primäre Maßnahmen zur Verminderung der Körperschalleinkopplung und -übertragung:

- Eingangsimpedanzen an Krafteinleitungsstellen möglichst hoch ausbilden (Massekonzentration / Erhöhung der Steifigkeit der Abkoppelstelle).
- An Stellen von Geschwindigkeitsanregung möglichst durch Gummi- und Federelemente entkoppeln (Körperschallisolation).
- Kraftfluss kurz halten.
- Gehäuseteile an kraftführender Struktur körperschallisoliert anbringen (Befestigungspunkte möglichst an steifen, massehaltigen Punkten, an Knotenpunkten der Eigenschwingungen).
- Große Laufstrecken und viele Reflexionen dämpfen den Körperschall, für feinerwerktechnische Abmessungen bleiben die Einflussmöglichkeiten jedoch stark eingeschränkt.
- Nutze Materialien mit hohem Absorptionsgrad zur inneren Dämpfung (z. B. hochpolymere Kunststoffe oder Verbundwerkstoffe, z. B. -3 dB auf 20 cm Länge in Kunststoffen).
- Dämpfung durch Entdröhnbeläge erfordert sehr dicke Schichten, um messbare Lärminderungen zu erzielen.

Primäre Maßnahmen zur Verminderung der Schallabstrahlung:

- Kraftfluss auf möglichst engen, inneren, massiven und steifen Kreis beschränken und nicht über Außenflächen (Abstrahlflächen) führen.
- Abstrahlende Oberfläche so klein wie möglich halten (Ausbrüche, Lochung).
- Verringerung der Biegesteifigkeit der abstrahlenden Fläche.
- Aufbringung von mehrschichtigen, allerdings sehr dicken schallabsorbierenden Schichten.

Sekundäre Maßnahmen:

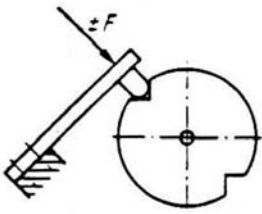
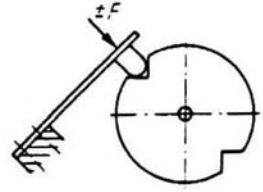
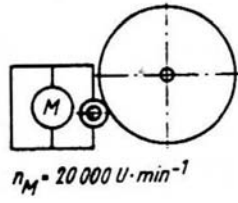
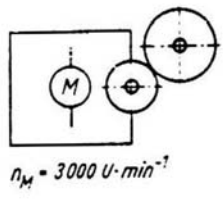
- Verminderung der Geräuschemissionen des Gerätes durch Verminderung der Schallausbreitung, z. B. durch
 - Kapselung, Schallschutzkabinen.
- Verminderung der Geräuschimmission auf den Menschen, z. B. durch
 - raumakustische Maßnahmen am Arbeitsplatz,
 - individuellen Gehörschutz.

Zur Verdeutlichung entsprechender Details sei auf die Vorlesung und auf /38/ verwiesen. Alle oben beschriebenen Maßnahmen sind in dieser abstrakten Form zunächst einleuchtend. Die konkrete Umsetzung ist jedoch sehr gerätespezifisch. Hier wäre es erforderlich auf eine Vielzahl von Beispielen einzugehen, um dies anschaulich zu verdeutlichen. Da dies den Rahmen dieser Lehrveranstaltung sprengen würde, seien nachfolgend einige Tabellen zur anschaulichen Verdeutlichung der vorgeschlagenen Maßnahmen aus 38 übernommen und an dieser Stelle aufgeführt. Darin wird mit vereinfachten, aber dadurch prägnanten Skizzen, die Wirkungsweise der einzelnen Maßnahmen verdeutlicht. Natürlich sind derartige Beispiele nicht abschließend.

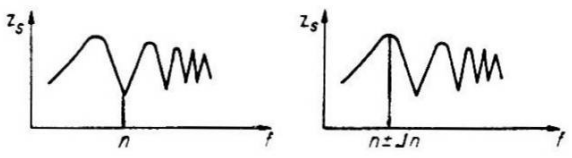
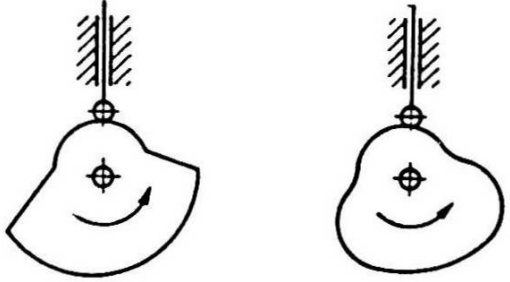
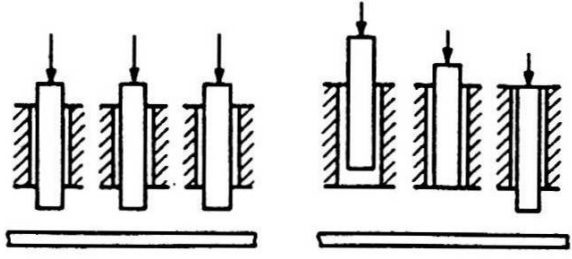
Tafel 7.9 Allgemeine Regeln zur Lärminderung, aus /38/

Regel	Erläuterungen
① Die Hersteller sind verpflichtet, für ihr Produkt das Einhalten von Best- oder Zielwerten der Geräuschemission zugrunde zu legen!	Best- oder Zielwerte der Geräuschemission sind Werte, die sich am internationalen Höchststand von Wissenschaft und Technik orientieren und dem jeweiligen Erkenntnisstand sowie den technisch-ökonomischen Möglichkeiten der Lärminderung entsprechen.
Regel	Erläuterungen
② Bei der Entwicklung und Konstruktion von Produkten darf die Lärminderung nicht als separate Aufgabenstellung betrachtet werden, sondern muß in jede Phase des konstruktiven Entwicklungsprozesses integriert sein!	Die gesonderte Betrachtung der Lärminderung würde zu einem absoluten Vorrang der Gerätefunktion führen und dazu, daß der Aufwand für dann im Nachhinein notwendige Maßnahmen steigt.
③ Die Lärminderung muß bereits bei der Wahl des Verfahrensprinzips (Wirkprinzips) für die Gerätefunktion [13, 15] beginnen!	Beispiele dafür sind der Ersatz mechanischer durch elektronische Bauelemente für informationsverarbeitende Baugruppen, die Anwendung von Schrittmotoren zum Realisieren von beliebigen Bewegungsabläufen an Stelle von Schrittmechanismen, das Ablösen des Typendruckes durch Thermo- oder Tintenstrahldruck, die Verwendung von Magnetbändern oder Disketten statt Lochstreifen usw. Dabei sind jedoch stets die technisch-ökonomischen Randbedingungen zu beachten.
④ Parallel zum Erarbeiten der aus dem Verfahrensprinzip abzuleitenden Funktionsstruktur und des technischen Prinzips eines Gerätes [13, 15] sind die wichtigsten Anregungsstellen, Übertragungswege und Abstrahlflächen in Form eines Schallflußbildes (s. Abschnitt 7 und Bild 8-5) aufzuzeichnen und zu optimieren!	Beim Aufstellen des Schallflußbildes lassen sich Erfahrungen und Vergleiche mit ähnlichen Geräten, evtl. vorliegende Meßergebnisse und Erkenntnisse aus dem Studium von Beispiellösungen mit heranziehen.
⑤ Beim Festlegen von Lärminderungsmaßnahmen ist die Orientierung auf das Bekämpfen der Geräuschenstehung (aktive Lärminderung) vorrangig!	Geräusche lassen sich am wirksamsten und sehr ökonomisch an ihrer Quelle bekämpfen. Die Minderung einmal entstandener Geräusche (passive Lärminderung) sollte hauptsächlich auf funktionsbedingte Geräusche beschränkt bleiben.
⑥ Maßnahmen der Lärminderung sind in erster Linie an solchen Baugruppen anzusetzen, die den Gesamtpegel des Gerätes bestimmen!	Geräuschmäßig dominierende Baugruppen liegen mit ihrem anteiligen Schallpegel um 5 dB oder mehr über dem der anderen Baugruppen. Sind derartige Baugruppen nicht vorhanden, so müssen sich die Maßnahmen der Lärminderung auf alle Baugruppen erstrecken. Dabei ist immer zu beachten, daß die Senkung des Geräuschpegels einer oder mehrerer Baugruppen entsprechend der Pegelrechnung wenig Erfolg bringt, solange es noch andere Baugruppen mit größerem Pegel gibt.

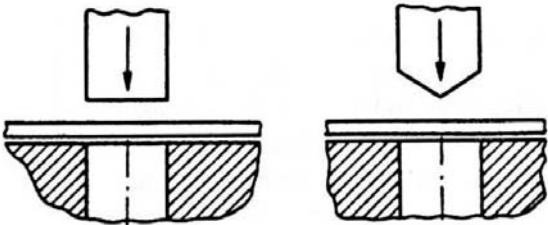
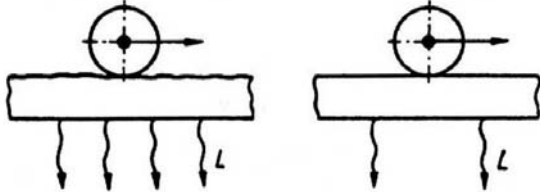
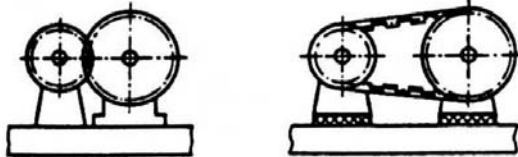
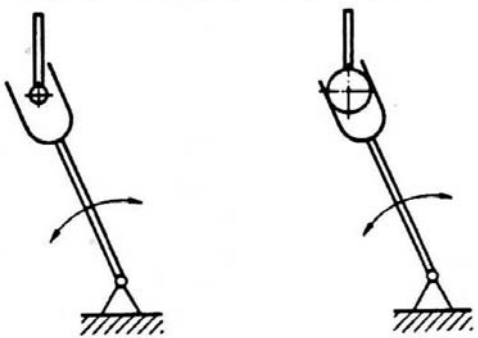
Tafel 7.10 Regeln zur Verminderung der Körperschallanregung, aus /38/

Regel Erläuterungen	Lösung	
	ungünstig	günstig
① <i>Funktionsnotwendige Kräfte sind nicht größer als unbedingt erforderlich zu wählen!</i> Das Minimieren der Betriebskräfte hat zur Folge, daß nur ein technisch begründetes Mindestmaß an Körperschall entstehen und in Luftschall umgewandelt werden kann. Gleichzeitig werden Energieökonomie und Lebensdauer des Gerätes verbessert.		
② <i>Die Drehzahl rotierender Bauteile soll so niedrig wie möglich liegen!</i> Die Körperschallanregung durch Unwuchten wächst progressiv mit der Drehzahl. Das Senken der Drehzahl auf die Hälfte bewirkt ein Vermindern der Unwuchtanregung auf ein Viertel (um 12 dB). Die Anregung rechts im Bild beträgt bei gleicher Unwucht nur noch $(3\,000/20\,000)^2$, d.h. 2 % gegenüber der links dargestellten Variante.	 $n_M = 20\,000 \text{ U} \cdot \text{min}^{-1}$	 $n_M = 3\,000 \text{ U} \cdot \text{min}^{-1}$

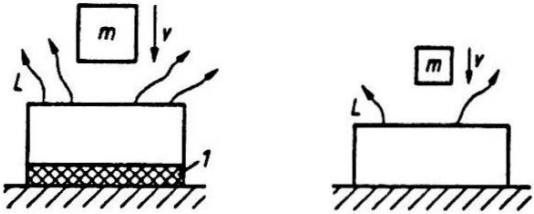
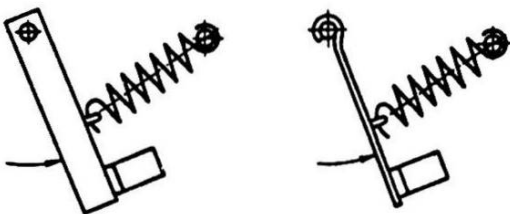
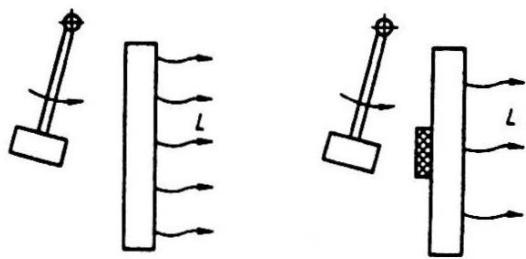
Tafel 7.10 Fortsetzung 1

Regel Erläuterungen	Lösung	
	ungünstig	günstig
③ <i>Druch geringe Änderung tonaler Anregungsfrequenzen (Drehzahl, Zahneingriffsfrequenz) oder der Bauteilgeometrie kann die Übereinstimmung mit Biegeeigenfrequenzen vermieden werden!</i> Die aufgrund von Resonanzüberhöhungen entstehenden hohen Geräuschpegel treten infolge ihrer Schmalbandigkeit besonders störend in Erscheinung. Die ungünstige Lösung zeigt das Anregen einer Platte durch die Drehzahl n in einem Gebiet geringer Impedanz (starkes Mitschwingen). Durch Drehzahländerung $\pm \Delta n$ wird ein besseres akustisches Verhalten erreicht.		
④ <i>Die Zeitfunktion periodischer Betriebskräfte ist so zu gestalten, daß Anstieg und Krümmung möglichst klein sind!</i> Das Minimieren der ersten und zweiten (ggf. auch höheren) Ableitungen der Zeitfunktion bewirkt eine Lärminderung bei höheren Frequenzen ab einigen hundert Hertz. Aus dem gleichen Grund sollen z.B. die Bewegungsgesetze von Kurvengetrieben bis zur 3. Ableitung stetig sein [16].		
⑤ <i>Mehrere unabhängig voneinander wirkende Anregungsvorgänge sind zeitlich zu versetzen!</i> Zwei gleiche Anregungsvorgänge, die zeitlich gestaffelt sind, z.B. versetzte Lochstempel, weisen einen um 3 dB niedrigeren Spitzenpegel auf als bei gleichzeitigem Ablauf.		

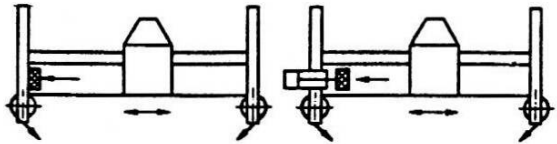
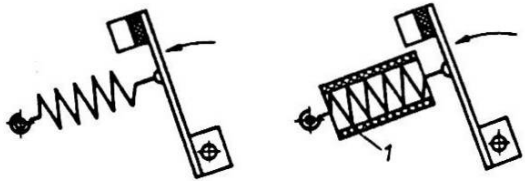
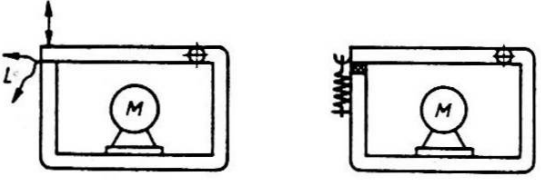
Tafel 7.10 Fortsetzung 2

Regel Erläuterungen	Lösung	
	ungünstig	günstig
⑥ Eine zeitliche Dehnung des Anregungsvorganges bewirkt eine stetigere Kraftübernahme und damit einen geringeren Körperschallpegel! Eine zeitliche Dehnung läßt sich durch das Schrägungsprinzip erreichen. Schrägverzahnte Getriebe laufen im allgemeinen ruhiger als geradverzahnte; Stanznadeln mit Dachschriff (Bild) arbeiten leiser als solche mit senkrechter Schnittfläche [18].		
⑦ Hohe Präzision bei Herstellung und Montage sowie Spielfreiheit durch elastische Bauweise tragen zur Lärminderung bei! Oberflächenrauheiten sowie Form- und Lageabweichungen an Laufflächen (Bild), Spiel, Unwuchten u.ä. führen zum Auftreten nicht funktionsnotwendiger Kräfte und damit zu Körperschallanregung.		
⑧ Zum Realisieren von Übertragungs- und Stützfunktionen sind vorzugsweise elastische und/oder dämpfende Bauteile einzusetzen! Zahnriemengetriebe (Bild) sind günstiger als Zahnrad- oder Kettengetriebe; Gleitlager laufen in der Regel leiser als Wälzlager [16, 17].		
⑨ Nicht funktionsnotwendige Stoßstellen (Anschläge, Spiel in Gelenken) sind zu vermeiden oder zu minimieren! Häufig sind Anschläge oder spielbehaftete Bauteile dominierende Geräuschquellen in einem Gerät.		

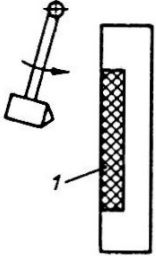
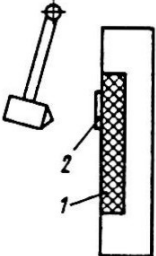
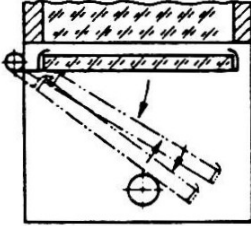
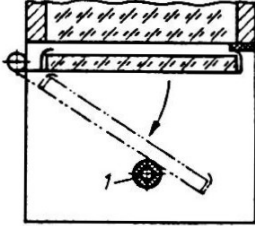
Tafel 7.10 Fortsetzung 3

Regel Erläuterungen	Lösung	
	ungünstig	günstig
⑩ <i>Stoßerzeugte Geräusche lassen sich wirksam nur an der Stoßstelle bekämpfen!</i> Stoßgeräusche werden im Gegensatz zu kontinuierlichen Geräuschen von der unmittelbaren Umgebung der Anregungsstelle stärker abgestrahlt. Außerdem sind körperschallisierende Maßnahmen (z.B. elastische Unterlage 1) nur auf einen Teil (höhere Frequenzen) des angeregten breiten Spektrums begrenzt. Deshalb sollten bevorzugt die anregenden Größen (z.B. m und v) beeinflusst werden.		
⑪ <i>Stoßgeräusche können durch Verringern der wirksamen Stoßmasse und der Auftreffgeschwindigkeit minimiert werden!</i> Das Produkt aus Stoßmasse und Auftreffgeschwindigkeit (Stoßimpuls) bestimmt die Höhe des konstanten Teils vom angeregten Spektrum, deshalb z.B. schwere Hebel durch leichte ersetzen, die durch geringere Kräfte beschleunigt werden.		
⑫ <i>Die Dauer der Kraftwirkung während eines Stoßes (Stoßdauer) sollte bei gleichzeitigem Verringern der Spitzenkraft verlängert werden!</i> Beim Stoß bewegter Massen ist das zeitliche Dehnen der Kraftwirkung im allgemeinen mit einer Senkung der Spitzenkraft verknüpft, und der angeregte Frequenzbereich wird dadurch eingeschränkt. Das Verlängern der Stoßdauer kann durch die Wahl des Werkstoffes, die Nachgiebigkeit der Berührungsflächen (z.B. elastische Zwischenlagen) und die Beeinflussung der effektiv wirksamen Masse erfolgen.		

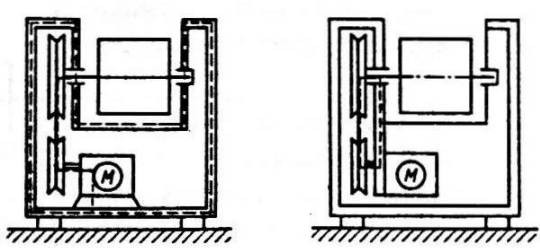
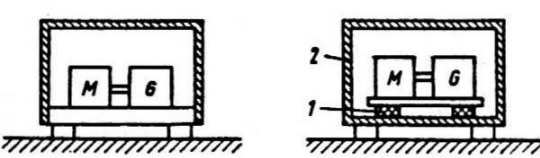
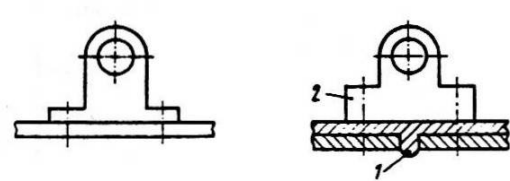
Tafel 7.10 Fortsetzung 4

Regel Erläuterungen	Lösung	
	ungünstig	günstig
⑬ Eine sehr große zeitliche Dehnung der Kraftwirkung ist nur durch zusätzliche Elemente realisierbar! In einigen Fällen (hohe Stoßenergie) läßt sich allein durch Verändern konstruktiver Parameter (Regel ⑪) die erforderliche große Dehnung nicht erzielen. Hier sind zusätzliche Mechanismen (pneumatische oder hydraulische Stoßfänger, Wirbelstrombremsen, spezielle Federkombinationen) einzusetzen, die die Stoßenergie langsam abbauen und gleichzeitig die Spitzenkraft herabsetzen; z.B. Endanschlag eines Mosaikdruckkopfes (Bild).		
⑭ Stoßstelle mit ausgeprägten Eigenresonanzen (langes Nachklingen) sind zu dämpfen! Dämpfungsmaßnahmen beeinflussen hauptsächlich die durch den Stoßimpuls angeregten Eigenresonanzen, weniger das Stoßgeräusch (Nachklingen gespannter Federn, z.B. vermeidbar durch dämpfende Umhüllung 1).		
⑮ Bei der Gestaltung des Geräteaufbaus ist das Auftreten "sekundärer" Stoßstellen (sog. Klapperstellen) zu vermeiden! Schwingungsfähige Bauteile (Abdeckbleche, Hebel), die selbst keine Wechselkräfte übertragen, können durch andere Stoß- oder Schwingungsquellen im Gerät zum Anschlagen (Klappern) angeregt werden. Diese Bauteile sind ebenso wie "primäre" Quellen (Regeln ⑨ und ⑫) zu gestalten.		

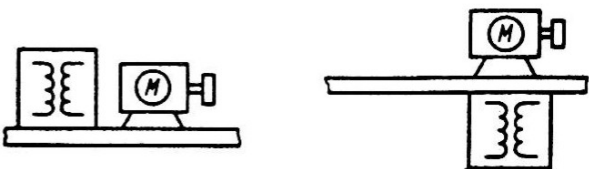
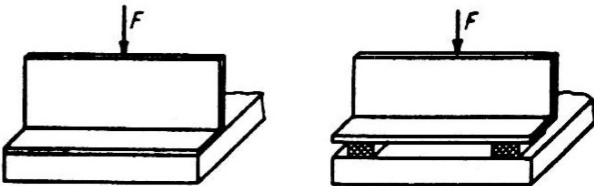
Tafel 7.10 Fortsetzung 5

Regel Erläuterungen	Lösung	
	ungünstig	günstig
⑩ <i>An den Berührungsstellen von Stoßteilen sollte bevorzugt der Schichtaufbau Anwendung finden!</i> Bei akustisch günstig gestalteten Stoßstellen (kleine Berührungsflächen, weiche Materialien) wird oft die zulässige Flächenpressung überschritten. Einen akustisch-konstruktiven Kompromiß bildet der Schichtaufbau, bei dem man ein weiches Material 1 mit einer (dünnen) harten Oberfläche 2 versieht.		
⑪ <i>Das Auftreten von Mehrfachstößen (Prellen) ist zu verhindern!</i> Die Spektren dicht aufeinanderfolgender Stöße (Prellen) überlagern sich zur Erhöhung des abgestrahlten Geräusches. Zum Vermeiden des Prellens gibt es verschiedene konstruktive Möglichkeiten (s. Abschnitt 6), z.B. elastisches Material 1 am 45°-Anschlag des Spiegels einer Spiegelreflexkamera.		

Tafel 7.11 Regeln zur Verminderung der Körperschallübertragung und -ausbreitung, aus /38/

Regel Erläuterungen	Lösung	
	ungünstig	günstig
① <i>Der Kraftschluß zwischen Bauteilen bzw. Baugruppen soll als direkte Verbindung und kurz gestaltet sein!</i> Der Kraftschluß (---) ist über kompakte und steife Teile mit minimaler Oberfläche zu führen, ohne dabei Außenflächen des Gerätes mit einzubeziehen. Dadurch werden die Voraussetzungen für eine Körperschallausbreitung bereits wesentlich eingeschränkt; im Bild z.B. beim Antrieb einer Trommelwaschmaschine.		
② <i>Zwischen den Teilen im Kraftschluß und dem Gehäuse bzw. den Gerätefüßen ist zur Körperschallisolierung eine möglichst weiche elastische Verbindung vorzusehen!</i> Die Körperschallisolierung 1 bei einer Motor-Getriebe-Baugruppe MG unterbricht den Körperschallfluß zu den Abstrahlflächen in Form des Gehäuses 2 bzw. verhindert die Körperschallanregung der Anstellfläche.		
③ <i>Als Befestigungspunkte für körperschall-erzeugende Baugruppen sind solche mit großer Impedanz bzw. geringer Admittanz zu wählen (Massenkonzentration, hohe Steifigkeit)!</i> Die Auswahl von Befestigungspunkten mit großer Impedanz bzw. geringer Admittanz bewirkt eine Fehlanpassung für den Körperschallfluß und führt dadurch zu einer Verringerung der Schnelle auf der Übertragungsstruktur (z.B. Versteifung 1 und Zusatzmasse 2).		

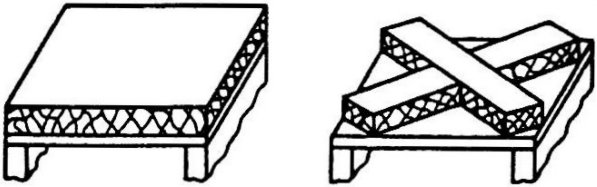
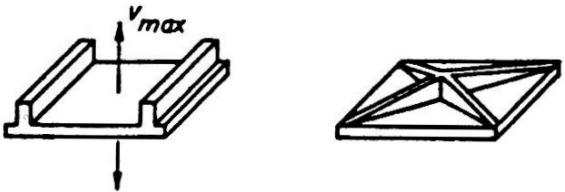
Tafel 7.11 Fortsetzung 1

Regel Erläuterungen	Lösung	
	ungünstig	günstig
④ <i>Starre und schwere Baugruppen, die selbst keine dominierende Körperschallquelle darstellen (z.B. Transformatoren, Akkus), sind nach Möglichkeit unmittelbar bei den wichtigsten Körperschallanregern anzuordnen!</i> Die Nutzung vorhandener Baugruppen als Zusatzmassen ist eine wirksame Methode zum Vermindern des Schnellepegels. Dagegen sind zusätzlich angebrachte Massen mit rein akustischer Funktion unökonomisch und gebrauchswertmindernd; im Bild zwei unterschiedliche Anordnungen eines Transformators.		
⑤ <i>Eine punktförmige Schwingungseinleitung sollte der linienförmigen Anregung vorgezogen werden!</i> Die Wirkung dieser Maßnahme beruht auf der Körperschalldämmung. Einschränkungen ergeben sich jedoch bei schwach gedämpften Materialien durch Verringern der Strukturdämpfung.		
⑥ <i>Zur Schwingungs- bzw. Körperschallisolierung rein harmonischer Geräusche sind in erster Linie Stahlfedern einzusetzen!</i> Die Resonanzfrequenz des dabei entstehenden Feder-Masse-Systems darf höchstens 1/3 der tiefsten zu dämmenden Frequenz betragen. Praktische Körperschallpegelminderungen sind ab 6 dB akzeptabel. Bei entsprechender Dimensionierung können auch Werte von mehr als 20 dB erreicht werden. Eine Quelle harmonischer Geräusche ist z.B. durch einen Motor M gegeben.		

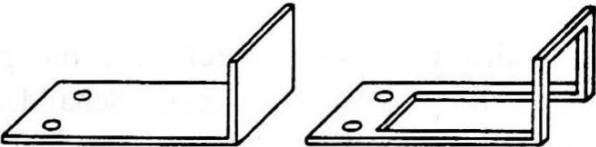
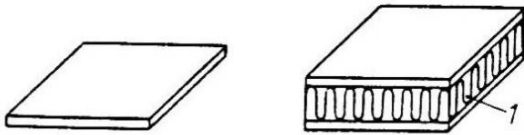
Tafel 7.11 Fortsetzung 2

Regel Erläuterungen	Lösung	
	ungünstig	günstig
⑦ Bei Impulsanregung sind für die Körperschallisolierung viskoelastische Elemente (Gummi o.ä.) zu verwenden! Zum Bedämpfen der bei Impulsvorgängen zwangsläufig angeregten Systemresonanz liegt der Verlustfaktor viskoelastischer Elemente in einem günstigen Bereich (im Bild: Montage eines Schützes auf der Schalttafel).		
⑧ Im Fall der Körperschallanregung ist eine zusätzliche Dämpfungserhöhung höchstens bei großen Blechteilen ($l \gg \lambda_B$) sinnvoll! Eine zusätzliche Bedämpfung erbringt keinen praktischen Nutzen, wenn der vorliegende Verlustfaktor bereits im Bereich des optimalen liegt oder wenn die Teile verhältnismäßig klein sind ($l < \lambda_B$). Die beiden letztgenannten Bedingungen liegen in der Feinwerktechnik meistens vor (im Bild: Lärminderungsmaßnahmen an einer abstrahlenden Gehäusefläche).		
⑨ Kraftschlüssige Verbindungen sind gegenüber stoffschlüssigen zu bevorzugen! Vernietete oder verschraubte Baugruppen weisen überwiegend ein optimales Dämpfungsvermögen auf. Sie sind daher günstiger als verschweißte oder gegossene Strukturen, bei denen eine zusätzlich notwendige Erhöhung des Verlustfaktors den Fertigungsaufwand vergrößern würde [16].		
⑩ Die Verbindung zweier Teile sollte großflächig und mit kleiner mittlerer Flächenpressung gestaltet werden! Preßpassungen mit unnötig großem Übermaß sind demzufolge zu vermeiden, weil dadurch auch der Verlustfaktor dieser Verbindungsstelle geringer wird.		

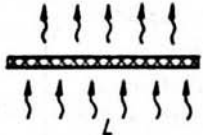
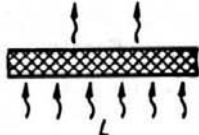
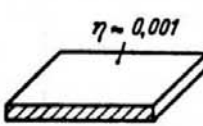
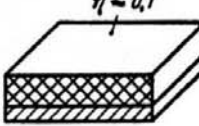
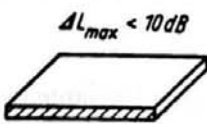
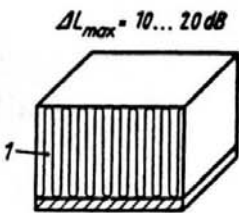
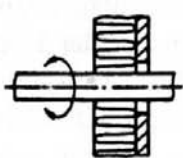
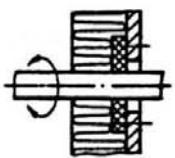
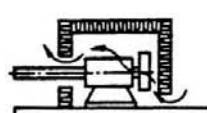
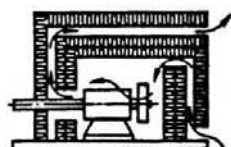
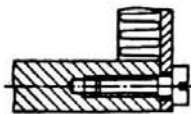
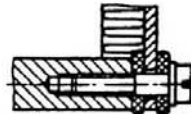
Tafel 7.11 Fortsetzung 3

Regel Erläuterungen	Lösung	
	ungünstig	günstig
⑪ <i>Dämpfungsmaßnahmen sind an Orten der größten Schwingamplituden am wirkungsvollsten!</i> Ein körperschallerregtes flächiges Bauteil sollte nur an einigen Stellen mit großer Schwingbewegung bedämpft werden. Ein ganzflächiges Entdröhnen bringt keine merkliche Verbesserung mehr und ist daher unökonomisch (im Bild: zwei Möglichkeiten zum Entdröhnen eines Abdeckbleches mit gleicher Wirkung).		
⑫ <i>Die körperschalldämpfende Wirkung von Doppelblechen kommt der von Kunststoffen nahe!</i> Der Verlustfaktor von Doppelblechen liegt infolge der Luftverdrängung zwischen den Blechen etwa in der Größenordnung des Verlustfaktors von Kunststoffen und damit im optimalen Bereich. Doppelbleche können dort eingesetzt werden, wo Kunststoffe versagen (z.B. hitzebeständige Bauteile).		
⑬ <i>Die Anwendung von Versteifungen, wie unsymmetrische Verrippung, Sicken oder gekrümmte Oberflächen, tragen zum Verringern der mittleren Schnelle bei!</i> Die Maßnahme kann trotz Vergrößern des Abstrahlgrades (siehe Regel ③ in Tabelle 5-4) bei krafterregten Strukturen akustische Vorteile bringen. Bei mehreren, parallel angeordneten Rippen sollte deren Abstand zueinander unterschiedlich groß gewählt werden. Zum Vermeiden von hohen Spitzen des Schnellepegels sind Versteifungen auch örtlich begrenzt einsetzbar [18].		

Tafel 7.12 Regeln zur Verminderung der Schallabstrahlung, aus /38/

Regel Erläuterungen	Lösung	
	ungünstig	günstig
① Die Oberfläche von Bauteilen sollte so klein wie möglich gehalten werden. Dadurch verringert sich der Abstrahlgrad σ besonders bei tiefen Frequenzen! Die lärm mindernde Wirkung beruht auf der Ausnutzung des akustischen Kurzschlusses (Druckausgleich an Vorder- und Rückseite).		
② Große körperschallerregte Flächen sind zur wirkungsvollen Verringerung der Schallabstrahlung mit Durchbrüchen zu versehen! Die Verringerung der Schallabstrahlung ist analog Regel ① auf den Einfluß des akustischen Kurzschlusses zurückzuführen. Anzustreben ist ein Öffnungsflächenanteil von etwa 20 % (z.B. bei Grundplatte 1). Einschränkungen erfährt diese Maßnahme bei Ausnutzen solcher flächenhaften Bauteile zur Luftschalldämmung (s. Tabelle 5-5).		
③ Zum Verringern des Abstrahlgrades σ durch Erhöhen der BiegeWellengrenzfrequenz sollen die Bauteile biegeweich und schwer sein! Dies gilt besonders für schnelleerregte Strukturen (z.B. Gehäuseteile) und kann durch Anbringen von biegeweichen und schweren Belägen oder durch Nuten in Platten erreicht werden.		
④ Durch Aufbringen von schallabsorbierendem Material 1 in Verbindung mit einer Schalldämmschicht (z.B. schwere Folie) läßt sich der abgestrahlte Luftschall direkt an der Entstehungsstelle verringern! Es handelt sich hierbei um eine Vorstufe zum Kapseln, so daß prinzipiell die Gesetzmäßigkeiten der Luftschalldämmung und -absorption gelten.		

Tafel 7.13 Regeln zur Verminderung der Luftschallausbreitung, aus [38/

Regel Erläuterungen	Lösung	
	ungünstig	günstig
① Die Schalldämmung wächst mit zunehmender Dichte und Dicke des Dämmmaterials sowie mit der Frequenz! Bei Verdoppeln der Wanddicke oder der Frequenz erhöht sich die Schalldämmung um rd. 6 dB.		
② Die Schalldämmung von Materialien mit geringem Verlustfaktor kann durch Entdröhnen (z.B. Beschichtung mit Phon-Ex) verbessert werden! Diese Maßnahme ist anwendbar, solange der optimale Verlustfaktor nicht erreicht ist.		
③ Zum Ausnutzen der möglichen Schalldämmung muß die Luftschallenergie im Inneren der Kapsel in andere Energieformen umgewandelt werden! Die Wirkung poröser Absorberschichten 1 beruht vorrangig auf der Reibung zwischen Luftteilchen und Gewebefasern. Je tiefer die zu absorbierende Frequenz ist, um so größer muß die Dicke der Auskleidung sein (z.B. bei 200 Hz und $\alpha \approx 0,5$ etwa 100 mm!)		
④ Öffnungen verringern die Dämmwirkung einer Kapsel erheblich und müssen vermieden werden! Nicht notwendige Öffnungen wie Fugen, Gehäusedurchführungen u.ä. sollten abgedichtet sein. Ab 10 % Öffnungsflächenanteil ist die Anwendung von Kapseln nicht mehr sinnvoll [9].		
⑤ Bei größeren Geräten können Öffnungen zum Be- und Entlüften mit schallabsorbierenden Kanälen versehen werden! Der dafür notwendige Platzbedarf richtet sich nach dem zu dämpfenden Frequenzbereich sowie nach der erforderlichen Kühlluftmenge [9, 13].		
⑥ Zum Vermeiden einer Körperschallanregung der Kapselwände sind diese von schwingenden Teilen elastisch zu isolieren! Diese Forderung gilt nicht nur für das Ankoppeln an das Chassis, sondern auch für Bauteile, die durch die Kapselwände nach außen geführt werden müssen.		

7.5 Schwingungen in Geräten

Die Betrachtung der Geräuschenstehung und Lärminderung stellt bereits eine, wenn auch auf einen bestimmten Frequenzbereich eingeeengte Betrachtung des Problemkreises Schwingungen in Geräten dar. Ähnliches wäre deshalb an dieser Stelle für andere Frequenzbereiche abzuhandeln. Beginnend mit speziellen Kenngrößen über Mess- und Auswerteverfahren bis zur Schwingungserzeugung und Weiterleitung stehen ähnliche Probleme bei der Schwingungsminderung. Die Bewertung des Einflusses auf den Menschen ist natürlich eine andere.

Dies soll hier im Skript jedoch nicht vertieft werden, sondern - falls genügend Zeit vorhanden - der Vorlesung vorbehalten bleiben.

8 Thermische Situation in Geräten

Bezüglich der thermischen Situation in Geräten wird auch auf die Vorlesung Aktorik in der Gerätetechnik, Konstruktion, Berechnung und Anwendung mechatronischer Komponenten verwiesen. An dieser Stelle wird eine grundlegende und vereinfachte Behandlung der thermischen Situation in Geräten im Skript zwar abgedruckt, in der Vorlesung wird dieser Abschnitt jedoch in der Regel nicht behandelt, weil in der genannten Parallelvorlesung Aktorik in der Gerätetechnik dies ausführlich am Beispiel der Antriebstechnik erfolgt. Der nachfolgende Abschnitt dient also nur der Vollständigkeit der Betrachtung der Situation in Geräten, zu der auch die thermischen Aspekte zählen. Gegebenenfalls ist eine Vertiefung anhand der weiterführenden Literatur erforderlich.

8.1 Einführung

Mechanische und insbesondere auch elektronische Geräte erzeugen teilweise erhebliche Verlustleistungen im Geräteinneren. Oft werden dabei elektrische oder elektronische Komponenten bezüglich ihrer Verlustleistung unterschätzt. Aber die Integrationsdichten in Bauelementen oder die Packungsdichten auf Leiterplatten steigen erheblich und damit auch die abzuführenden Verlustleistungen in Form von Wärme. Prozessoren könnten beispielsweise ohne aufgesetzten Lüfter kaum noch betrieben werden. Motoren erzeugen auch im Stillstand u. U. erhebliche Verlustleistung. Hinzu kommen äußere Wärmequellen, die Wärme in das Gerät einbringen, Abb. 8.1.

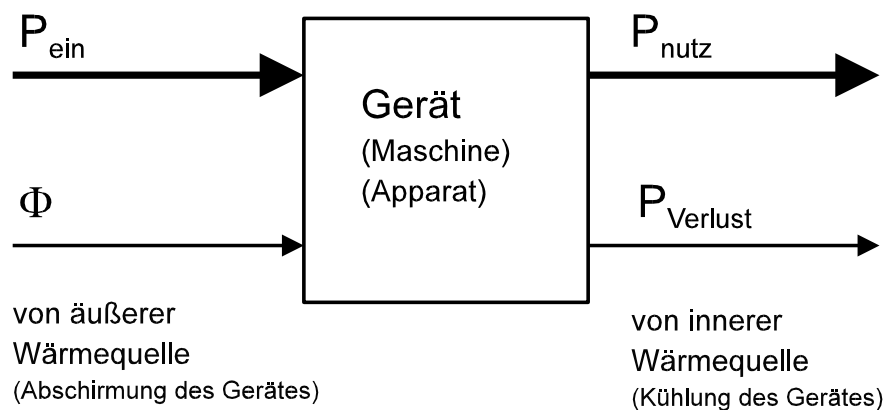


Abb. 8.1: Leistungsbilanz eines Gerätes schematisch

Die thermische Dimensionierung eines Gerätes bestimmt deshalb häufig die Leistungsgrenzen eines Gerätes oder von Baugruppen in einem Gerät: So sind beispielsweise häufig Drehmomente und Schubkräfte von Antrieben thermisch begrenzt.

8.2 Leistungsbilanz eines Gerätes

Die inneren Wärmequellen (mechanische, elektrische, thermodynamische Effekte, chemische Reaktionen) und die zusätzlichen Wirkungen der äußeren Wärmequellen (Sonnenstrahlung, umgebende Luft, benachbarte Geräte) führen zu beachtlichen Temperaturerhöhungen im Geräteinneren und an Geräteoberflächen. Letztere sind jedoch meist noch erträglich, während die Erwärmung im Inneren erhebliche Folgen hat, z. B.:

- | | |
|----------------------------------|---|
| • mechanische Effekte | Längenänderungen, Spannungen |
| • elektrische Effekte | $R = R(T)$, $\varepsilon = \varepsilon(T)$, $\mu = \mu(T)$
Halbleiter, Halbleiter-Kennlinie
(Parameter „laufen weg“) |
| • chemisch-physikalische Effekte | Zähigkeit (Schmierstoffe)
Depolarisation (Curie-Punkt)
chemische Zersetzung von Kunststoffen |
| • sonstige Effekte | Aussehen (Farb-, Formänderungen)
beschleunigte Alterung
Brand- und Explosionsgefahr
Verbrennungen
Zuverlässigkeit, Lebensdauer sinkt. |

Es müssen also Maßnahmen zur Vermeidung unzulässig hoher Temperaturen getroffen werden, z. B.:

- Reduzierung der Verlustleistung (Leistungsabsenkung, geeignete Dimensionierung, verbesserter Wirkungsgrad)
- Kühlung (Wärmetransport zur Ableitung der Wärmeverlustleistung durch Wärmeleitung, Konvektion, Wärmestrahlung, Abb. 8.2)
- Abschirmung und Schutz vor äußeren Wärmequellen.

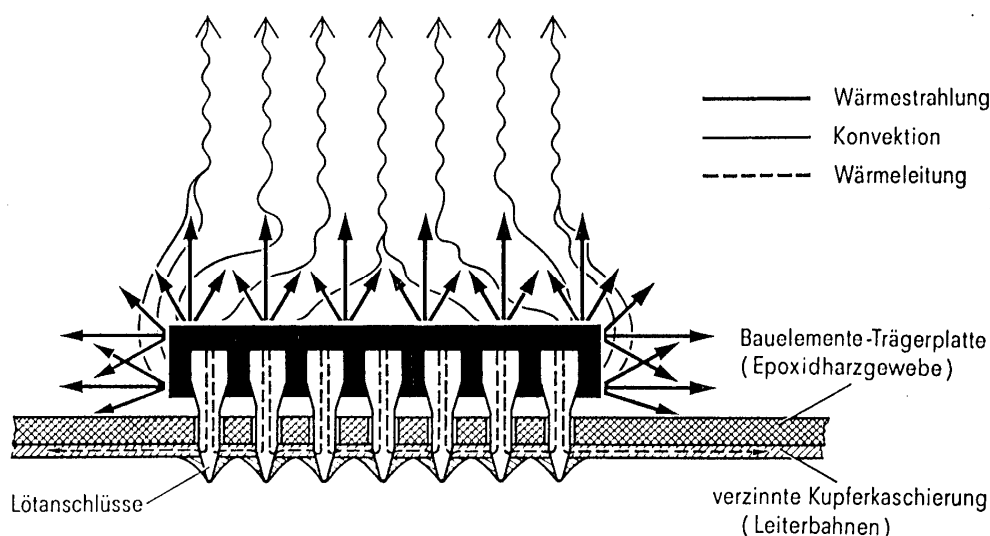
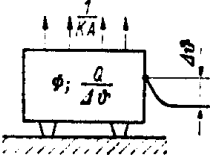
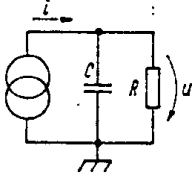


Abb. 8.2: Wärmeabführung am Beispiel eines IC, aus /76/

Die insgesamt von außen zugeführte Leistung wird oft nur zu einem kleinen Teil in Nutzleistung überführt und abgegeben. Ein oft erheblich größerer Teil ist als Wärmeverlustleistung abzuführen, erhöht jedoch auch die Temperatur im Geräteinneren (man denke an die Nutzleistung eines PC).

Die komplizierten thermischen Prozesse in einem Gerät mit teilweise verteilten Wärmequellen sind nur schwer mathematisch erfassbar. Aus diesem Grund benutzt man zur Modellbildung häufig eine Abstraktion des Geräteaufbaus und verwendet hierfür eine Analogie zur Elektrotechnik. In Tafel 8.1 sind die entsprechenden Analogien zwischen den thermischen und elektrischen Berechnungen gegenübergestellt. Bei Anwendung dieser Analogien lassen sich die entstandenen Netzwerke mit den Methoden der Elektrotechnik, wie der Knotenspannungsanalyse, dem Superpositionsprinzip oder der Zweigstromanalyse (Maschenstromanalyse), berechnen.

Tafel 8.1 Elektrische und thermische Analogie, aus /9/

Wärmegrößen	Elektrische Größen
	
$\Phi(t) = \frac{Q}{\Delta\theta} \frac{d(\Delta\theta)}{dt} + KA \Delta\theta$	$i(t) = C \frac{du}{dt} + \frac{1}{R} u$
Stationärer Fall	
$\Phi = KA \Delta\theta$	$I = U/R$
Wärmestrom $\Phi = Q/t$ W	Strom I A
Wärmestromdichte q $W \cdot m^{-2}$	Stromdichte S $A \cdot m^{-2}$
Temperaturdifferenz $\Delta\theta$ K	Spannungsabfall U V
Wärmewiderstand $\Delta\theta/\Phi = 1/(KA)$ K/W	Widerstand R $\Omega, V/A$
Wärmekapazität $Q/\Delta\theta$ Ws/K	Kapazität C $F, A \cdot s/W$
Wärmeleistung $\Phi \Delta\theta = (Q/t) \Delta\theta$ $W \cdot K$	Leistung P $W, V \cdot A$
Wärmeleitfähigkeit λ $W/(K \cdot m)$	Leitfähigkeit $\gamma = I/(R \cdot A)$ S/m
Wärmeübergangszahl α, K $W/(K \cdot m^2)$	

Statt verteilter Wärmequellen setzt man vereinfacht isotrope, homogene Körper voraus. So ergibt sich beispielsweise ein Ersatzschaltbild nach Bild 8.3 und damit eine Differentialgleichung für die Wärmeübertragung. Von der Wärmequelle wird der Wärmestrom Φ über R_i an die Oberfläche des Gerätes geleitet. R_i beinhaltet dabei alle Übertragungswege bis zur Oberfläche des Systems, R_a beinhaltet die Oberflächencharakteristik (Konvektionsfläche) und die Abstrahlungsfähigkeit z. B. von Metallteilen in ihrer Eigenschaft als Kühlflächen. Die Wärmekapazität C_i kann im stationären, d. h. eingeschwungenen Zustand des Systems vernachlässigt werden. Sie ist lediglich bei der Untersuchung von dynamischen Vorgängen zu berücksichtigen.

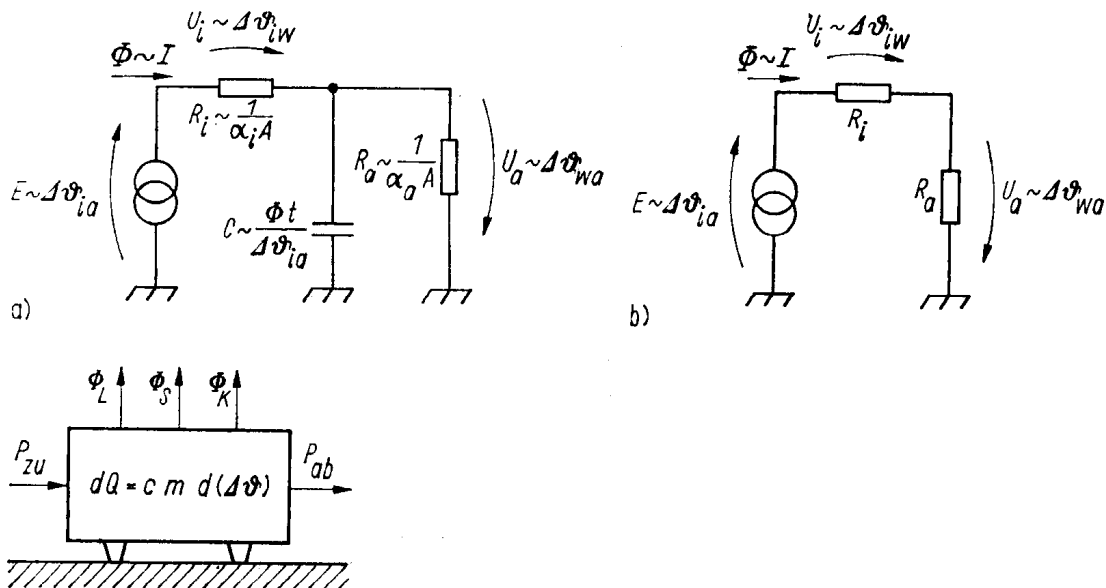


Abb. 8.3: Thermisches Ersatzschaltbild eines Systems, aus /9/

a) allgemein; b) stationär; c) Wärmebilanz

dQ Wärmemenge in Ws, C spezifische Wärme; $\Delta \vartheta$ Temperaturdifferenz in K;

m Masse in kg; Φ Wärmestrom in W (im stationären Zustand ist $dQ = 0$)

Φ_L - Wärmestromübertragung durch Wärmeleitung

Φ_S - Wärmestromübertragung durch Wärmestrahlung

Φ_K - Wärmestromübertragung durch Konvektion

$P_v = P_{zu} - P_{ab} = \Phi_L + \Phi_S + \Phi_K$

8.3 Theoretische Grundlagen

Abb. 8.4 zeigt eine Erwärmung und anschließende Abkühlung eines Gerätes. Zunächst wird in einem instationären Vorgang neben der Wärmeleitung nach außen auch Energie im Gerät gespeichert und somit die Temperatur im Inneren erhöht. Nach einer gewissen Zeit stellt sich ein stationärer Zustand, also ein Gleichgewicht zwischen Energieeintrag und Wärmeableitung ein. Eine konstante Temperaturdifferenz zur Umgebung ist die Folge.

Zur Wärmeübertragung werden drei physikalische Vorgänge genutzt, Wärmeleitung, Wärmestrahlung und Konvektion.

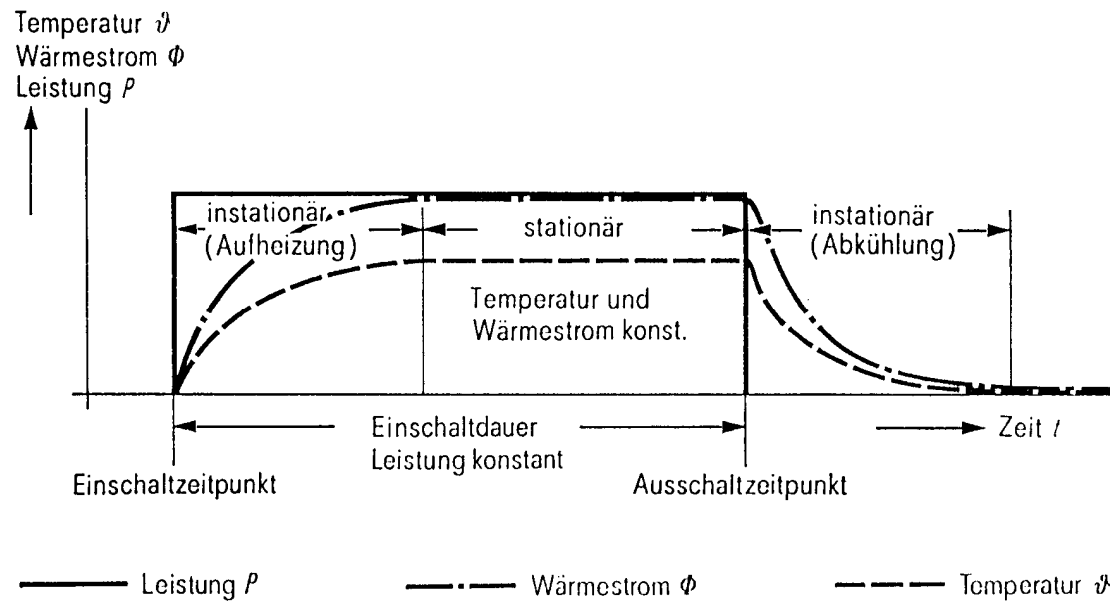


Abb. 8.4: Aufheizung und Abkühlung eines Bauelementes, aus /76/

Es gilt

$$P_{\text{Verlust}} = \underbrace{\Phi_L}_{\text{Leitung}} + \underbrace{\Phi_S}_{\text{Strahlung}} + \underbrace{\Phi_K}_{\text{Konvektion}} + \underbrace{\frac{dQ}{dt}}_{\text{Aufheizen}} \quad (8.1)$$

mit:

$$P_{\text{Verlust}} = a_L A_L \Delta \vartheta_L + a_S A_S \Delta \vartheta_S + a_K A_K \Delta \vartheta_K + cm \frac{d(\Delta \vartheta)}{dt} \quad (8.2a)$$

bzw.

$$P_{\text{Verlust}} = \frac{\Delta \vartheta_L}{R_L} + \frac{\Delta \vartheta_S}{R_S} + \frac{\Delta \vartheta_K}{R_K} + cm \frac{d(\Delta \vartheta)}{dt} \quad (8.2b)$$

Stationär wird $dQ/dt = 0$.

8.3.1 Wärmeleitung

Zunächst muss die Wärme durch Wärmeleitung nach außen oder zumindest an Stellen weitertransportiert werden, die eine Wärmeabfuhr zulassen. Der Wärmestrom Φ_L beinhaltet die Wärmemenge, die über **Wärmeleitung** durch einen Körper fließt:

$$\Phi_L = qA = \frac{\lambda}{s} \Delta \vartheta_{12} A, \quad (8.3)$$

mit der Wärmestromdichte q , der Wärmeleitfähigkeit λ , der wirksamen Fläche A und der Materialdicke s , Abb.8.5. Die Wärmestromdichte errechnet sich dabei wie folgt

$$q = -\lambda \left(d \frac{\vartheta}{dx} \right) = -\frac{\lambda}{s} \Delta \vartheta. \quad (8.4)$$

Für einen ebenen Körper gilt also

$$q = \frac{\lambda}{s}(\vartheta_1 - \vartheta_2) = \frac{\lambda}{s} \Delta \vartheta_{12}, \quad (8.5)$$

wobei $\Delta \vartheta_{12}$ dem elektrischen Spannungsabfall U entspricht und dann ein Wärmeleitwiderstand R_L eingeführt werden kann mit

$$R_L = \frac{s}{\lambda A} = \frac{1}{\alpha_L A} \quad (8.6)$$

Einige Daten für die Wärmeleitfähigkeit λ enthält Tafel 8.2.

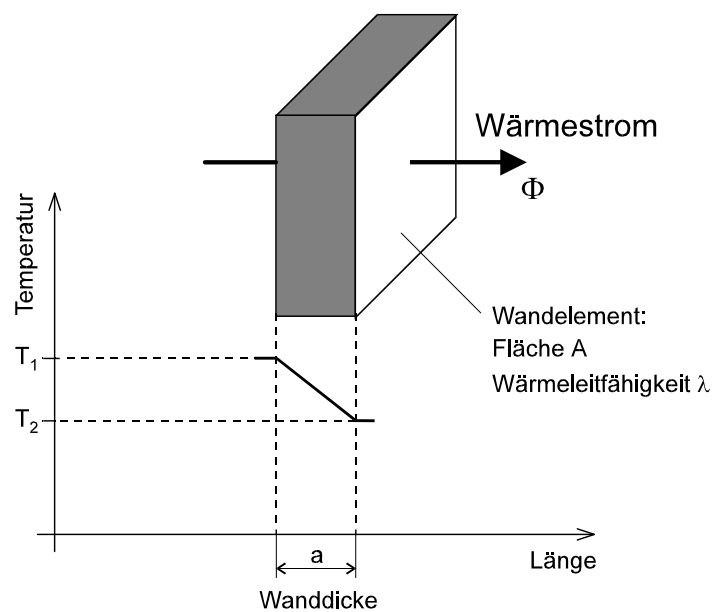


Abb. 8.5: Wärmeleitung durch einen Körper

Tafel 8.2 Wärmeleitfähigkeit verschiedener Werkstoffe, aus [9/]

Metalle	$\frac{\lambda}{\text{m} \cdot \text{K}}$	Nichtmetalle	$\frac{\lambda}{\text{m} \cdot \text{K}}$
Aluminium (99,9)	225	Asbest	0,18
Aluminium (99)	205	Filz	0,05
Silumin (85 Al, 13 Si)	160	Glas	0,80
Blei	34	Glaswolle	0,05
Bronze (25 Sn, 75 Cu)	27	Quarzglas	1,45
Al-Bronze (95 Cu, 5 Al)	82	Glimmer	0,36
Eisen (99,9)	60	Gummi	0,17
Gußeisen	58	Hartgewebe	0,34
Kohlenstoffstahl	45	Epoxidglashartgewebe	0,31
Wolframstahl (20 W)	39	Hartpapier	0,26
Nickelstahl (40 Ni)	10	Phenolhartpapier	0,29
Dynamoblech, längs	65	Holz	0,1 ... 0,3
Dynamoblech, quer	1	Keramik ($\text{AlO}_3 + \text{Ton}$)	0,46
Trafolech, längs	25	Papier	0,13
Trafolech, quer	0,5	Pappe	0,18
Gold, rein	310	Polyäthylen (PE)	0,51
Konstantan	23	Polystyrol (PS)	0,17
Kupfer, Elyt (99,9)	390	Polyvinylchlorid (PVC)	0,16
Kupfer (99)	360	Porzellan	1,21
Messing	110	Quarz	10
Quecksilber	10		
Silber, rein	456	Wasser 10°C	0,575
Silber, technisch	410	30°C	0,618
Zink	110	50°C	0,647
Zinn	64	Trafoöl	0,16
		Luft 10°C	0,025
		30°C	0,027
		50°C	0,028
		70°C	0,03

Mehrschichtige Wände stellen eine Reihenschaltung verschieden dicker Wärmeleitwiderstände dar. Bei metallischen Wänden ist der Temperaturabfall über der Wanddicke häufig vernachlässigbar und $\vartheta_{wi} \approx \vartheta_{wa}$. Dies gilt nicht für Kunststoffe.

8.3.2 Wärmestrahlung

Als zweite wichtige Wärmestromübertragung soll die **Wärmestrahlung** Φ_s untersucht werden. Als Grundprinzip wird die Wärmeübertragung durch elektromagnetische Schwingungen mit einer Wellenlänge von $\lambda = 0,4 - 40 \mu\text{m}$ zugrunde gelegt (Lichtwellenlänge $\lambda = 0,4 - 0,75 \mu\text{m}$).

Trifft Wärmestrahlung auf einen Körper, wird sie absorbiert, reflektiert oder durchgelassen. Grenzfälle sind

- der ideal schwarze Körper, der nur absorbiert,
- der ideal weiße Körper, der nur reflektiert,
- ein diathermer Stoff, der ideal durchlässig ist.

Das Emissionsvermögen verschiedener Werkstoffe bzw. Oberflächen wird mit ε bezeichnet. Tafel 8.3 gibt einige Emissionscharakteristika wieder. Der Emissionsgrad ist gleich dem Absorptionsgrad.

Die Wärmestromdichte für Strahlungsenergie zwischen zwei ebenen, parallelen Flächen berechnet sich nach dem Stefan-Boltzmannschen Gesetz zu

$$q_{s12} = \varepsilon_x C_s f_{12} \Delta \vartheta_{12}, \quad (8.7)$$

mit $C_s = 5,67 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$, der Strahlungszahl des schwarzen Körpers, und f_{12} der Temperaturfunktion der Strahler

$$f_{12} = \frac{\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4}{\Delta \vartheta_{12}}. \quad (8.8)$$

Aus dem Temperaturfunktionsdiagramm lassen sich die entsprechenden Funktionen ablesen, Abb. 8.6.

Der Wärmewiderstand für Strahlung berechnet sich dann zu

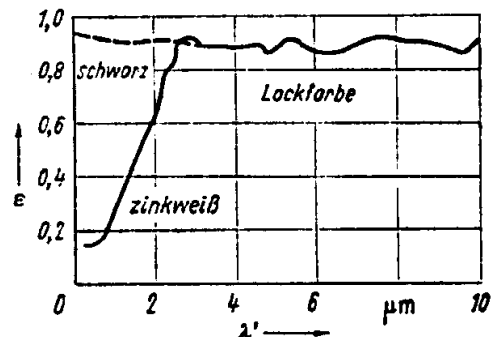
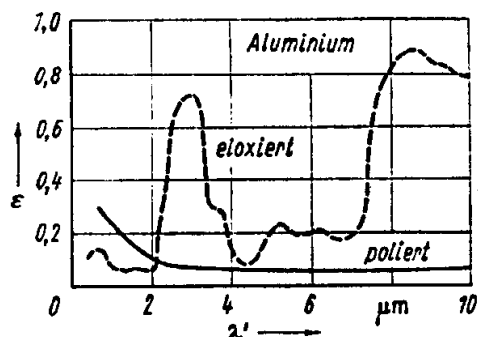
$$R_s = \frac{1}{\varepsilon_x C_s f_{s12} A} = \frac{1}{\alpha_s A}, \quad (8.9)$$

und der Wärmestrom bei Strahlung ergibt sich damit zu

$$\Phi_s = \varepsilon_x C_s f_{12} \Delta \vartheta_{12} A. \quad (8.10)$$

Tafel 8.3 Emissionscharakteristika verschiedener Werkstoffe, aus /9/

Metalle	ϵ	Nichtmetalle	ϵ
Aluminium, walzblank	0,04	Eis, Wasser	0,95
Aluminium, roh	0,08	Asbest	0,95
Aluminium, eloxiert 30 μm	0,65	Eiche, glatt	0,9
Chrom, poliert	0,08	Emaile, weiß	0,9
Gußeisen, roh	0,9	Glas	0,94
Gußeisen, bearbeitet	0,7	Gummi, weich	0,9
Kupfer, poliert	0,03	Hartpapier	0,92
Kupfer, oxydiert	0,76	Mauerwerk	0,91
Messing, poliert	0,05	Papier	0,92
Messing, matt	0,22	Porzellan, glasiert	0,93
Nickel, poliert	0,07		
Nickel, oxydiert	0,4	Anstriche	ϵ
Silber, poliert	0,02		
Stahl, gewalzt	0,6	Lack, schwarz, matt	0,96
Stahl, leicht angerostet	0,7	Lack, schwarz, hochglänzend	0,89
Stahl, stark verrostet	0,85	Lack, weiß, matt	0,92
Stahl, blank geschmiegelt	0,24	Mennige	0,92
Stahl, blank geätzt	0,13	Ölfarbe	0,9
Stahlblech, roh	0,6	Emaillack	0,9
Stahlblech, verzinkt	0,27	Aluminiumfarbe	0,3
Stahlblech, vernickelt (nicht poliert)	0,11	Spezialalufarbe	0,2
Zinn, blank	0,06	Hammerschlaglack	0,35
Zink, poliert	0,05		
Zink, oxydiert	0,11		
Zink, rau	0,25		



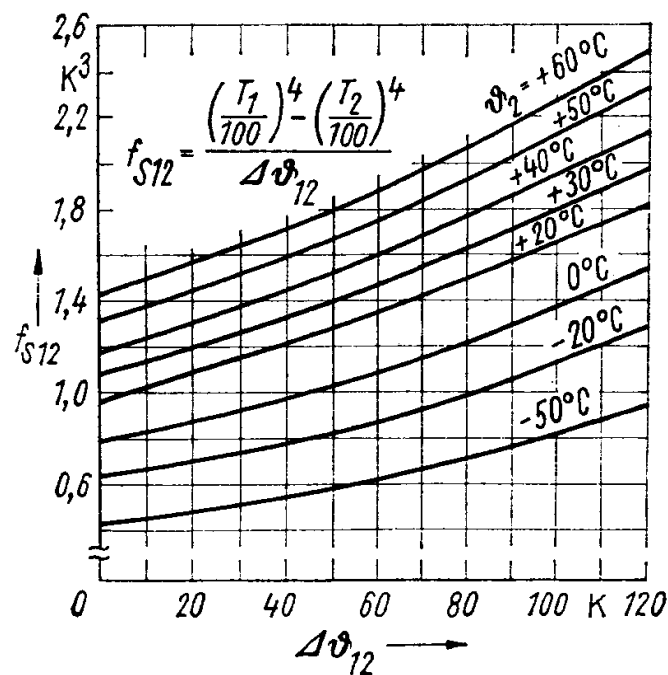


Abb. 8.6: Temperaturfunktionsdiagramm, aus /9/

8.3.3 Konvektion

Der Wärmeübergang von der Wand zur Luft erfolgt durch **Konvektion** Φ_K . Die Luft wird erwärmt bzw. abgekühlt. Infolge des Dichteunterschiedes zwischen kalter und warmer Luft strömt sie ab- bzw. aufwärts. Man spricht von Eigenkonvektion oder Wärmemitführung (laminare Strömung), Abb. 8.7. Wird die Luft z. B. durch einen Lüfter zwangsweise in Bewegung versetzt, spricht man von Zwangskonvektion.

Im Fall von Eigenkonvektion berechnet sich der Wärmestrom zu

$$\Phi_{K1} = \alpha_{K1} A \Delta \vartheta_{12} \quad , \quad (8.11)$$

und für den Wärmewiderstand folgt

$$R_K = \frac{1}{\alpha_{K1} A} \quad . \quad (8.12)$$

Die Berechnung von α_K ist kompliziert, da sich der Wert nur aus Ähnlichkeitsbeziehungen der verschiedenen physikalischen Grundgrößen der Nußelt-, Graßhoff-, Prandelt- und Reynolds-Zahl berechnen lässt. Er ist abhängig von zahlreichen Einflussgrößen, wie Zähigkeit, Temperatur und Geschwindigkeit des Mediums.

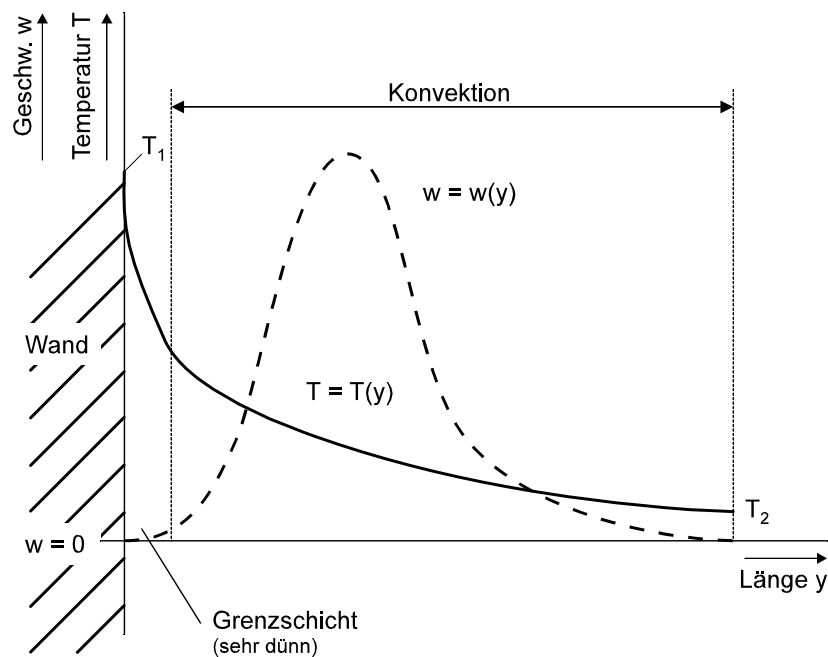


Abb. 8.7: Temperatur- und Geschwindigkeitsverlauf an einer senkrechten beheizten Fläche bei freier Konvektion (qualitativ)

Für die vereinfachte Bestimmung des Faktors α_K lassen sich folgende Tabellen benutzen, wobei für eine laminare Luftströmung $n = 0,25$ und für eine turbulente Luftströmung $n = 0,33$ angenommen werden muss. Überschlägig lässt sich bestimmen, ob eine Strömung laminar verläuft. Wenn $\Delta \vartheta \leq (0,84 / l)^3$ ist, wird $n = 0,25$ und die Strömung laminar.

Aus den folgenden beiden Tabellen lässt sich der Wärmeübergangskoeffizient für verschiedene Anordnungen im unendlichen Raum bestimmen, Tafel 8.4.

Eine Abschätzung erlaubt auch Abb. 8.8. Für eine überschlägige Berechnung gilt

$$\alpha_K \approx 10 \frac{W}{m^2 K} \quad (8.13)$$

bei freier Konvektion.

Die Eigenkonvektion im Inneren von Geräten ist meist deutlich eingeschränkt gegenüber der Eigenkonvektion außen am Gerät (meist 1/3). In engen Spalten unter 5 mm bilden sich gar keine Eigenkonvektion aus.

Lüftungsöffnungen im Gehäuse (belüftete Geräte) führen zu einer wesentlichen Verbesserung der Eigenkonvektion, wobei sehr große Lüftungsöffnungen über 25 % dann keine weitere Verbesserung mehr bringen. Bis zu dieser Grenze sind jedoch durchaus fünf- bis sechsfache Werte der Verlustleistung abführbar.

Tafel 8.4 Bestimmungstabelle für die Konvektionskoeffizienten (vereinfacht), aus /9/

Betrachtete Anordnung	$n = 0,25$	$n = 0,33$
Kugel bzw. horizontaler Zylinder mit dem Durchmesser d	$\alpha_K = c_1 \left(\frac{\Delta\theta}{d} \right)^{0,25}$	$\alpha_K = c_2 (\Delta\theta)^{0,33}$
Vertikale Platte bzw. vertikaler Zylinder mit der Höhe h	$\alpha_K = c_1 \left(\frac{\Delta\theta}{h} \right)^{0,25}$	$\alpha_K = c_2 (\Delta\theta)^{0,33}$
Horizontale Platte, Wärmeabgabe nach oben ($l_{\min}$, kleinere Abmessung)	$\alpha_K = 1,3 c_1 \left(\frac{\Delta\theta}{l_{\min}} \right)^{0,25}$	$\alpha_K = 1,3 c_2 (\Delta\theta)^{0,33}$
Horizontale Platte, Wärmeabgabe nach unten	$\alpha_K = 0,7 c_1 \left(\frac{\Delta\theta}{l_{\min}} \right)^{0,25}$	$\alpha_K = 0,7 c_2 (\Delta\theta)^{0,33}$

$$c_1 = 0,54 (\beta g \text{Pr})_m^{1/4} \frac{\lambda_m}{\nu_m^{1/2}} \quad \text{in} \quad \frac{\text{W}}{\text{m}^{7/4} \cdot \text{K}^{5/4}}$$

$$c_2 = 0,135 (\beta g \text{Pr})_m^{1/3} \frac{\lambda_m}{\nu_m^{2/3}} \quad \text{in} \quad \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}^{4/3}}$$

	ϑ_m					
	0 °C	20 °C	40 °C	60 °C	80 °C	100 °C
c_1 (Luft)	–	1,38	1,34	1,31	1,29	1,27
c_1 (Wasser)	–	105	149	178	205	227
c_2 (Luft)	1,69	1,61	1,53	1,45	1,39	1,33
c_2 (Wasser)	102	198	290	363	425	480

Die üblichen Werte für freie Konvektion von $\alpha_K \approx 10 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}}$ können jedoch durch erzwungene Konvektion (Lüfter) durchaus bis

$$\alpha_K = 20 \dots 120 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}} \quad (8.14)$$

erhöht werden. Darüber hinaus bieten sich dann Sonderkühlungen (Flüssigkeitskühlung, Peltier-Element, Wärmerohr) an.

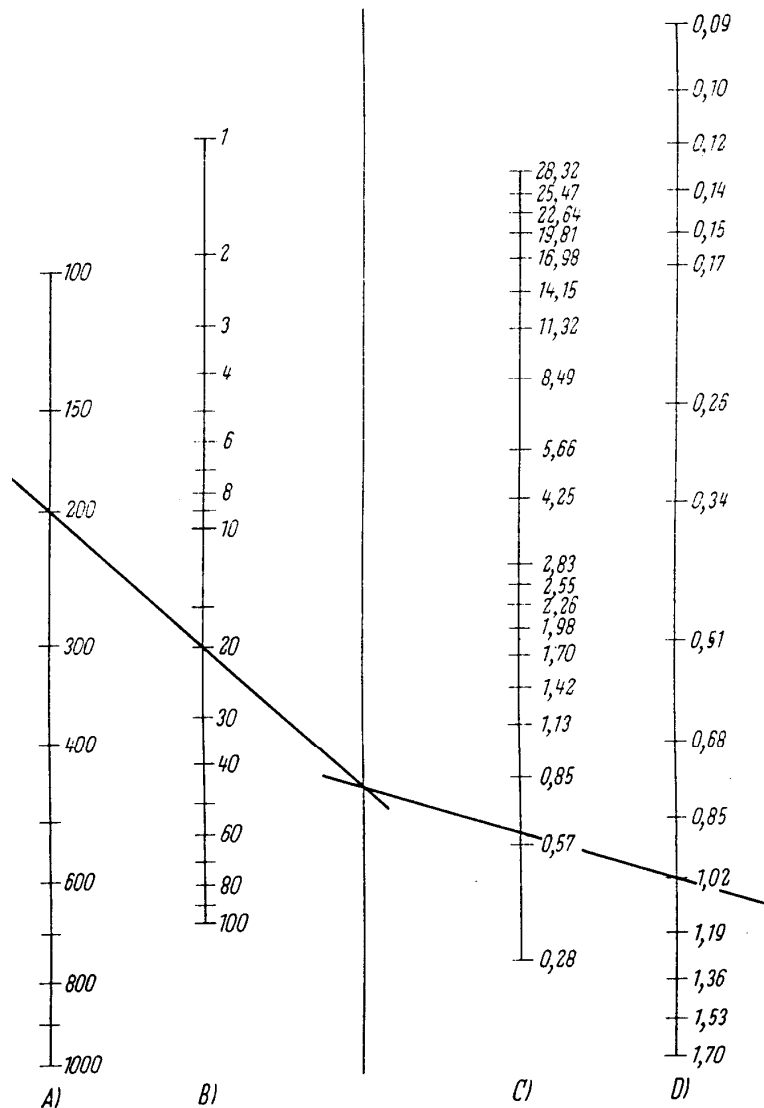


Abb. 8.7: Nomogramm zum Abschätzen der Kühlluftmenge bei erzwungener Konvektion, aus [77]

A) Verlustleistung in Watt; B) Übertemperatur in K; C) Kühlluftmenge in m³/min;

D) Luftdichte in kg/m³, bei 760 bar und 0 °C = 1,29

8.3.4 Kombination verschiedener Effekte

Betrachtet man beispielsweise ein Gerät mit Eigenkonvektion innen und außen, so zeigt Bild 8.9 zusammenfassend den Wärmeübertritt

$$\frac{\Phi}{A} = \dot{q} = k (T_1 - T_2) , \quad (8.15)$$

wobei über

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{Iges}} + \sum_{i=1}^n \frac{s_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_{IIges}}} \quad (8.16)$$

mit

$$\alpha_{I\text{ ges}} = \alpha_{I\text{ Konvektion}} + \alpha_{I\text{ Strahlung}}$$

$$\alpha_{II\text{ ges}} = \alpha_{II\text{ Konvektion}} + \alpha_{II\text{ Strahlung}}$$

oft eine Wärmedurchgangszahl k in $\frac{W}{m^2 K}$ definiert wird.

Hieraus kann beispielsweise bei gegebener Leistung $P = \frac{dQ}{dt} = \Phi$ die Temperaturdifferenz zwischen Gerät innen und außen ermittelt werden.

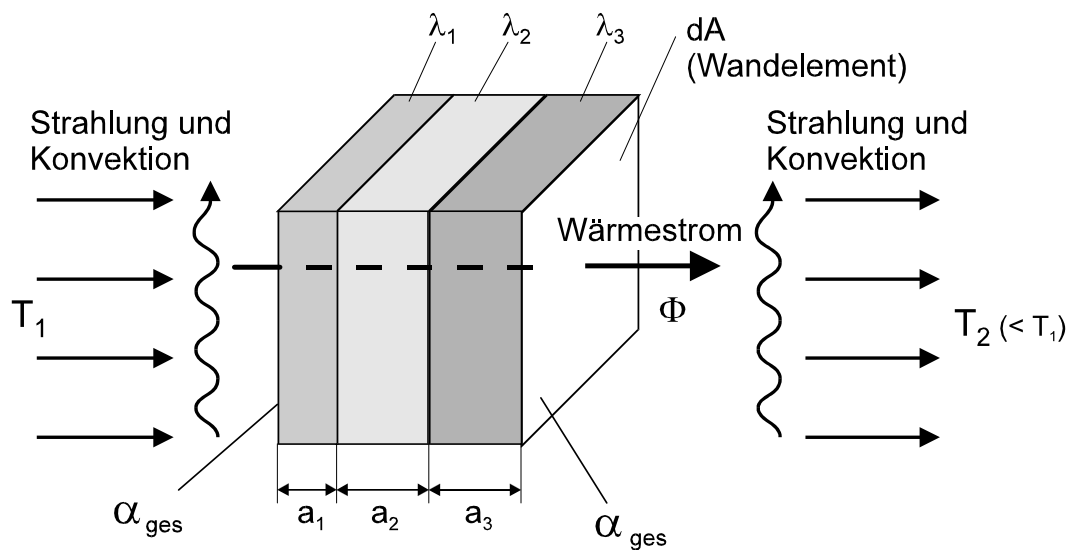


Abb. 8.9: Wärmeübertragung und -abführung, zusammengefasst

8.4 Konstruktive Maßnahmen der Wärmeabführung

Bei der Kühlung von Geräten sind im Allgemeinen alle drei Arten des Wärmetransports beteiligt. Ihr Anteil zur Kühlung kann jedoch sehr unterschiedlich sein. Deshalb sollte man zunächst ermitteln, welche Art des Wärmetransports überwiegt, um diese dann gezielt zu erhöhen bzw. auch andere Mechanismen zum Wärmetransport mit einzubeziehen.

Hier sollen nur wenige Ansätze für konstruktive Maßnahmen vorgestellt werden, ausführliche Darstellungen siehe beispielsweise /76//77/.

8.4.1 Maßnahmen zur Verbesserung der Wärmeleitung

Durch Wärmeleitung ist im Allgemeinen zunächst die Wärmemenge von der Wärmequelle an andere Orte innerhalb eines Gerätes zu leiten, von denen dann eine Wärmeabfuhr nach außen möglich wird. Häufig ist die dann folgende Wärmeabfuhr recht gut und der dabei zu überwindende Widerstand vergleichsweise klein, so dass die Wärmeableitung von der Quelle zu wärmeabführenden äußeren Oberflächen eine Engstelle bildet, Abb. 8.10, 8.11, 8.12.

In diesem Falle sollten:

- die wärmeleitenden Flächen vergrößert werden, Abb. 8.10, 8.11,
- parallele Wärmeleitung realisiert werden, Abb. 8.12,
- Werkstoffe mit großem Wärmeleitvermögen zum Einsatz kommen,
- isolierende Luftschichten verringert oder mit Wärmeleitpaste überbrückt werden,
- die Quelle in gut leitendem Material eingegossen werden, Abb. 8.11 und 8.12.

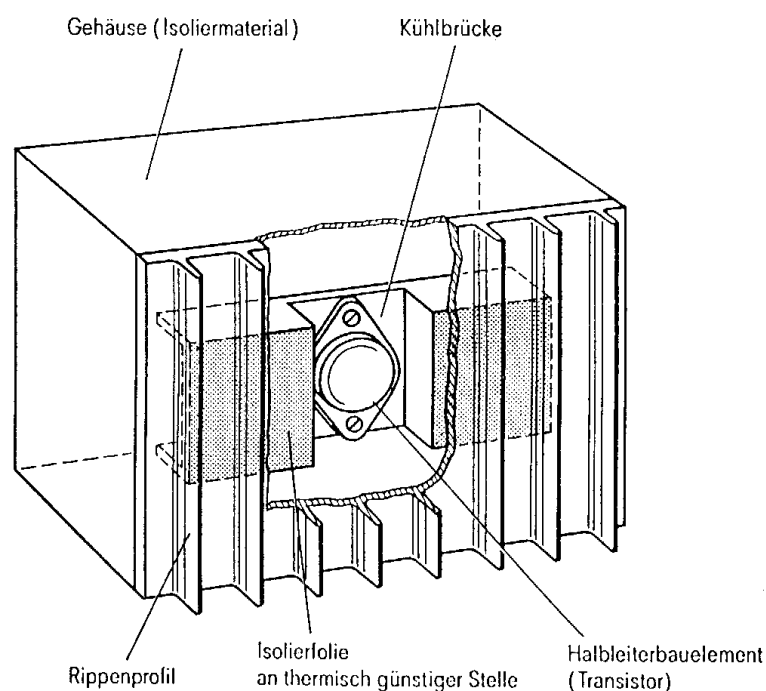
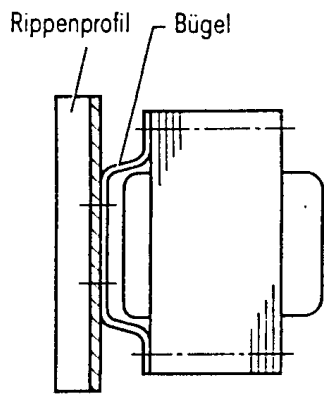
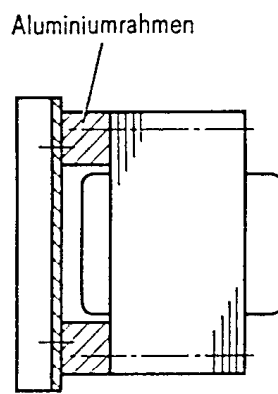


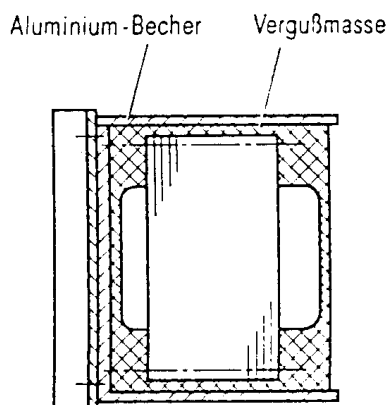
Abb. 8.10: Transistor mit Kühlblech in einem wärmeisolierenden Gehäuse, nach /76/



a)
Transformatorbefestigung
mit Bügel



b)
Transformatorbefestigung mit
Aluminiumrahmen



c)
Transformator
in Aluminiumbecher vergossen

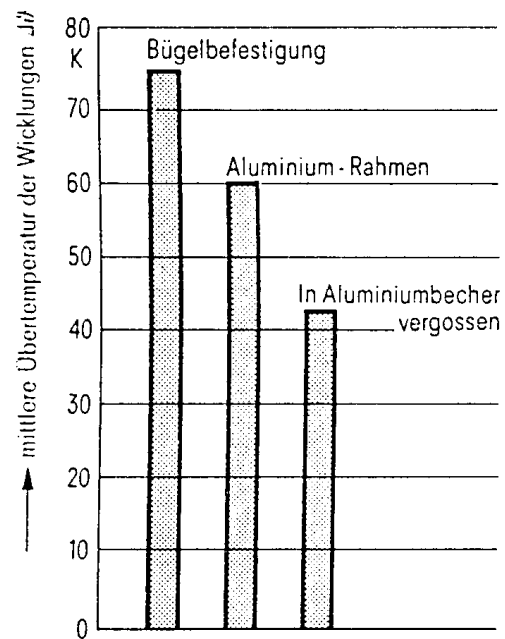


Abb. 8.11: Senkung der Übertemperatur von Transformatorwicklungen bei verschiedenen Befestigungsarten des Eisenblechpaketes (Verlustleistung $P_v=10$ W), aus /76/

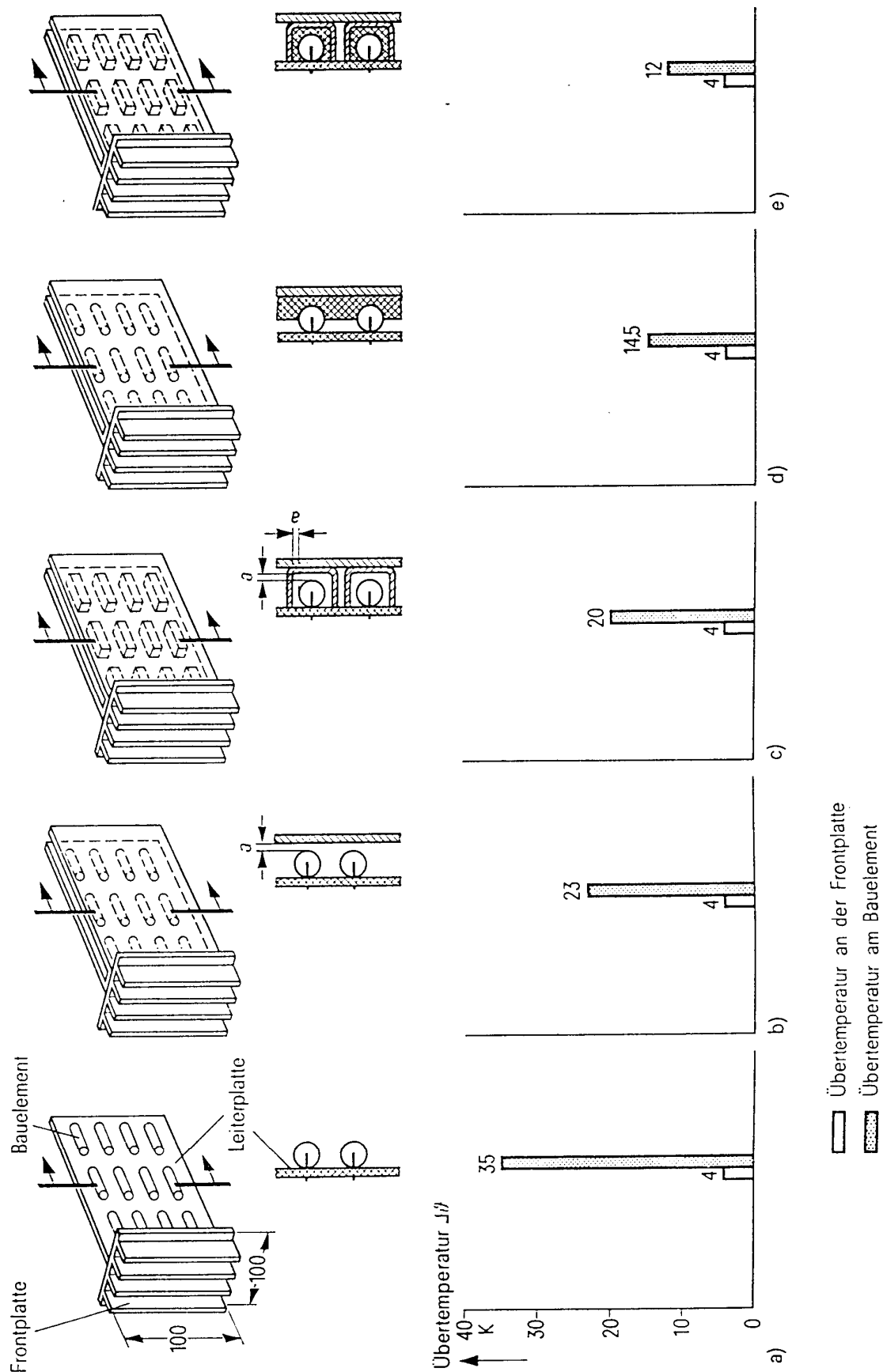


Abb. 8.12: Verbesserung der Wärmeleitung zwischen Bauelementen und berippter Frontplatte durch ein parallel zur Leiterplatte/Bauelemente-Trägerplatte angeordnetes Aluminiumblech, Gesamtverlustleistung $P_{\text{ges}} = 2 \text{ W}$, aus /75/

8.4.2 Maßnahmen zur Verbesserung der Wärmeabstrahlung

Betrachtet man den Wärmeabtransport aus dem Gerät heraus mittels Wärmestrahlung, so sollte das Emissionsvermögen erhöht werden. Nach Tafel 8.3 lässt sich dies durch die Materialauswahl und insbesondere durch die Materialoberfläche wesentlich beeinflussen. Gezielt eingesetzte Lacke eignen sich zur Einstellung des Emissionsvermögens. Auch die Temperaturdifferenz hat nach den Gleichungen (8.7) und (8.8) einen nichtlinearen Einfluss auf die Wärmestromdichte bei Wärmestrahlung.

Unter Umständen ist jedoch auch der Wärmeeintrag von außen in das Gerät ein Problem. Hier können z. B. Absorptionsbleche oder Filtergläser im Sinne einer Abschirmung vor der Wärmestrahlung wirken.

8.4.3 Maßnahmen zur Verbesserung der Konvektion

Zunächst sollten geeignete Maßnahmen zur Verbesserung der freien Konvektion ausgeschöpft werden, da erzwungene Konvektion mit Lüftereinsatz und damit zusätzlichen Leistungsverlusten und insbesondere auch Geräuscentwicklungen verbunden ist. In sensiblen Umgebungen, z. B. am Arbeitsplatz, kann ein Lüftergeräusch durchaus zum entscheidenden Verkaufsargument werden.

Eine gezielte Führung der Luftströmung an der Wärmequelle vorbei hin zu einer möglichst großen Umgebung hat für die freie Konvektion hier den größten Einfluss, z. B. durch Perforation und Belüftungsschlitze (Kiemen), Abb. 8.13, 8.14. Strömungskanäle zur freien Konvektion sollten weitgehend senkrecht verlaufen, durch Rippen kann dies erreicht werden. Kaminwirkungen sollten gezielt ausgenutzt werden.

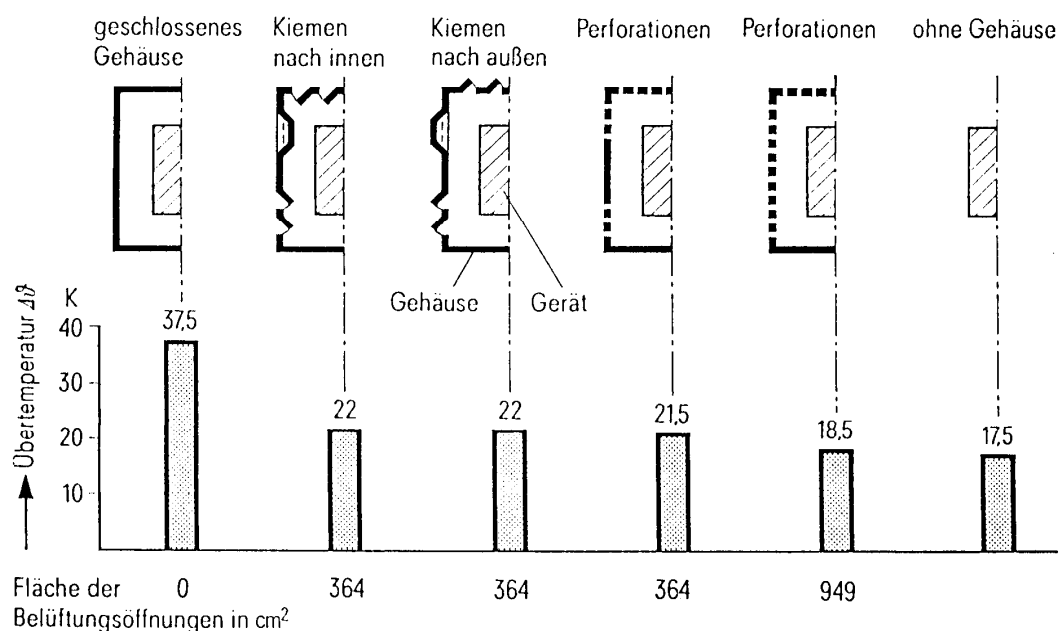
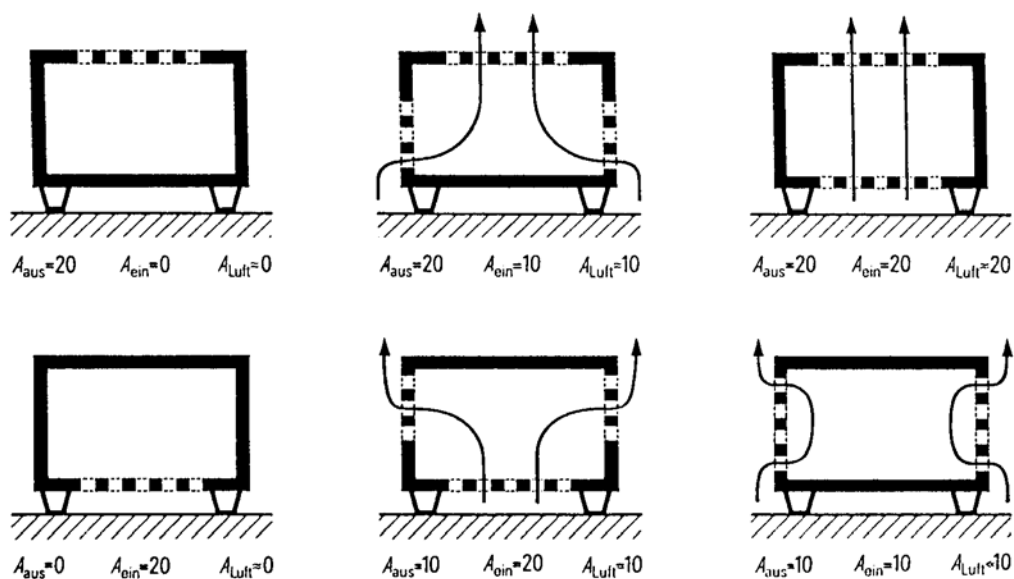


Abb. 8.13: Wirkung von Belüftungsschlitzen und Perforationen auf die mittlere Übertemperatur im Inneren von Geräten, Verlustleistung 125 W, aus /76/



A_{aus} für den Luftaustritt wirksame Fläche

A_{ein} für den Luft Eintritt wirksame Fläche

A_{Luft} kleinste für die Luftströmung wirksame Fläche

A_{ges} Gesamtoberfläche des Gehäuses

Die angegebenen Zahlen sind nur Verhältniszahlen

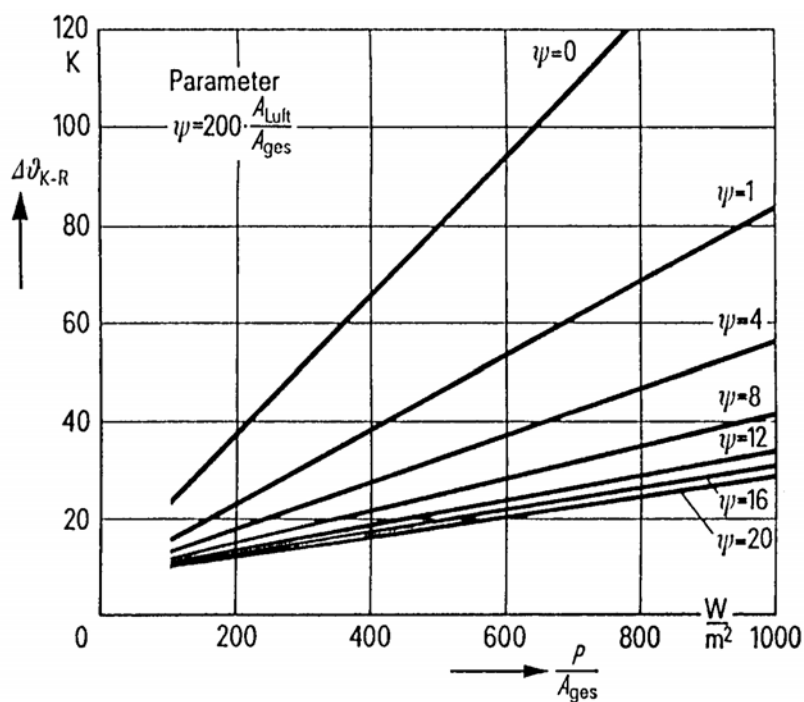


Abb. 8.14: Belüftung von Geräten, aus /76/

Belüftungsschlitze bergen natürlich sofort Risiken aus Gesichtspunkten der Gerätesicherheit und des Geräteschutzes, vergleiche Abb. 8.15.

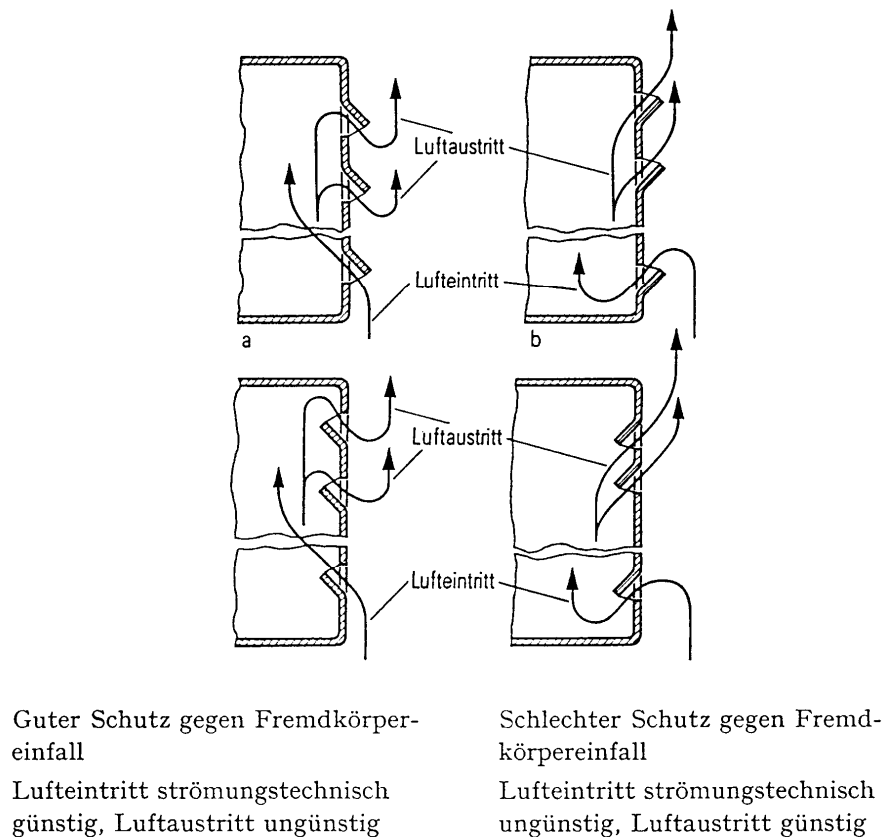


Abb. 8.15: Fremdkörpereinfluss und Luftströmungsverlauf bei unterschiedlichen Anordnungsmöglichkeiten von Lüftungsöffnungen in senkrechten Gerätewänden, aus /76/

Zu beachten ist außerdem, dass die vorbei geleitete Luft nicht bereits durch andere Wärmequellen, beispielsweise darunter liegender Baugruppen, zu stark erwärmt ist, Abb. 8.16 bis 8.18. Versetzte Anordnungen oder Luftleitbleche können dies verhindern.

Sollte die freie Konvektion nicht ausreichen, lassen sich durch erzwungene Konvektion, z. B. durch Lüftereinsatz nach Abb. 8.19, mit den bereits genannten Nachteilen die abführbaren Wärmemengen vervielfachen. Man beachte dabei jedoch auch Zuverlässigkeitsaspekte, der Lüfter als preiswertes Bauelement sollte eine wesentlich größere Lebensdauer aufweisen als beispielsweise der Prozessor, den er kühlt.

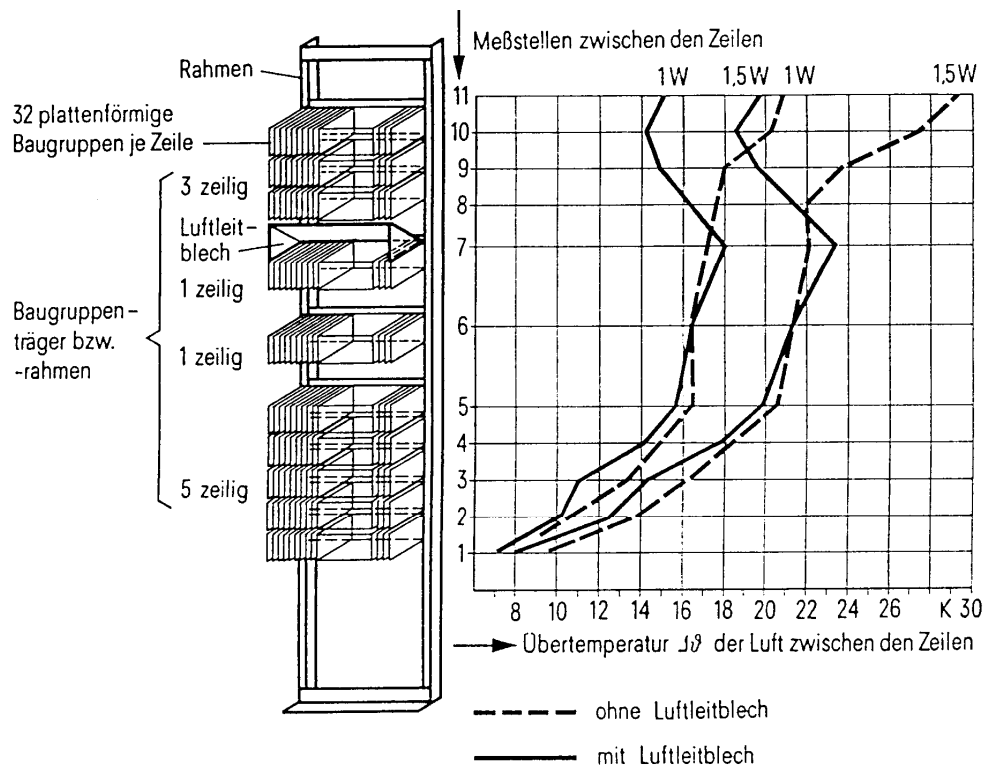
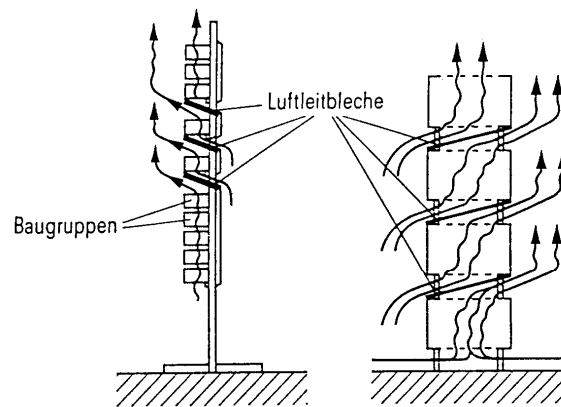


Abb. 8.16: Aufheizung übereinander liegender Baugruppen, aus /76/



Luftleitbleche zur Erzielung gleichmäßigerer Temperaturverteilungen
an einem Gestell mit vier Baugruppenträgern

bei vier aufeinander gestapelten
Gerätekoffern

Abb. 8.17: Einsatz von Luftleitblechen zur Erzielung gleichmäßigerer Temperaturen, aus /76/

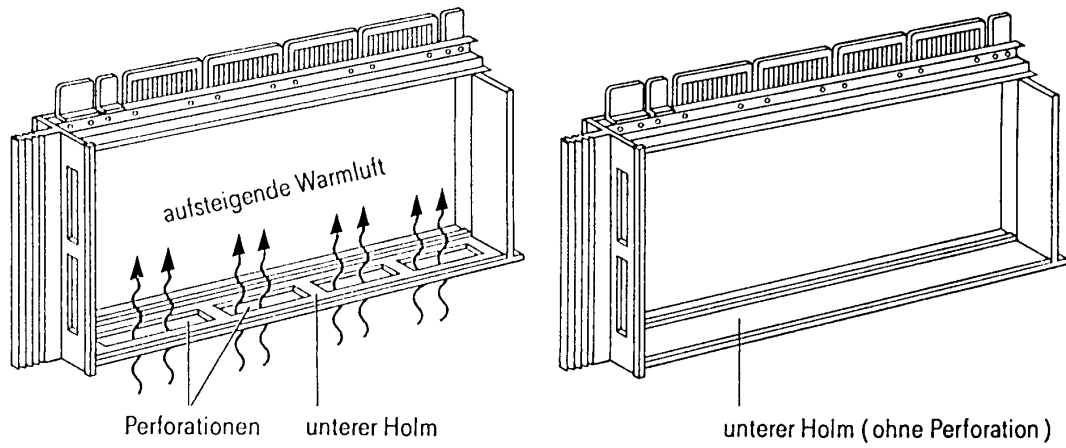


Abb. 8.18: Schutz von Leiterplatten durch Holme ohne Perforation, aus /76/

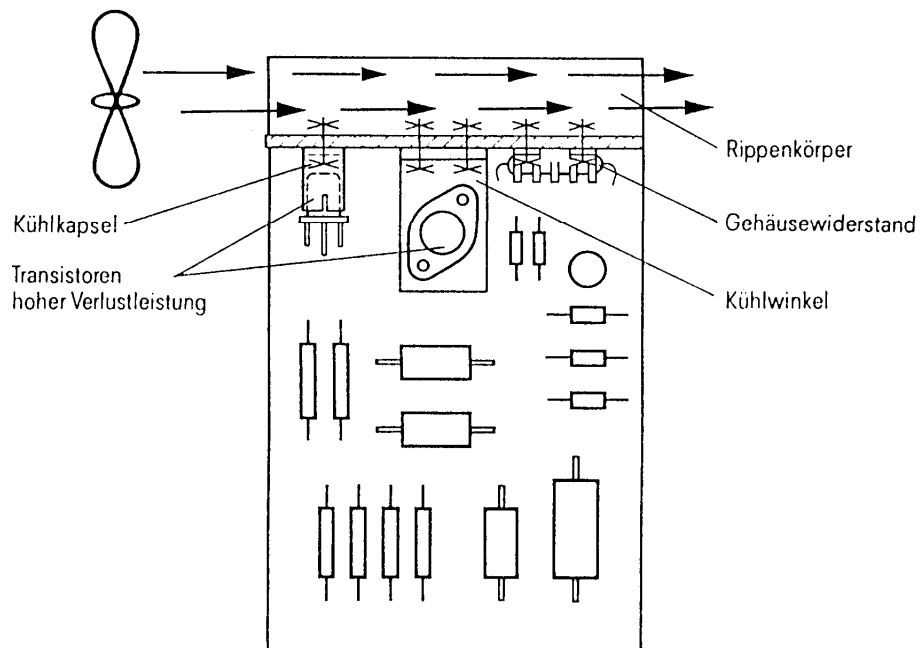


Abb. 8.19: Baugruppe mit luftgekühlter berippter Frontfläche, aus /76/

9 Umwelt und Gerät - verbleibende Aspekte der Klassifizierung

Vorangehende Abschnitte betrachten schwerpunktmäßig die Wirkung des Gerätes auf die Umwelt, auf den Menschen oder die Rückwirkung des Gerätes auf sich selbst. Dies betraf Fragen der Funktion (Genauigkeit und Fehlverhalten, Toleranzen), Fragen der Sicherheit und Zuverlässigkeit sowie von Geräuschen und Schwingungen genauso wie thermische Aspekte. Nur punktuell wurden bisher Fragen der Einwirkung der Umwelt und des Menschen auf das Gerät behandelt (z. B. bei Schutzgraden). Dies soll hier nachgeholt werden. Da die inhaltlichen Aspekte bereits bei der Wirkungsrichtung Gerät $\Rightarrow$ Umwelt behandelt wurden, reicht hier eine Klassifizierung der umgekehrten Wirkungsrichtung Umwelt $\Rightarrow$ Gerät aus. Erinnerung sei in diesem Zusammenhang an Bild 1.2 im Abschnitt 1.

Da die vielfältigen Aspekte der Einwirkungen der Umwelt auf das Gerät nicht losgelöst voneinander und einzeln betrachtet werden sollen, wurde eine Klassifizierung aller Umweltbedingungen für den Einsatz, für die Lagerung und für den Transport in Form von Einsatz-, Lager- und Transportklassen erarbeitet. Lagerung und Transport müssen ja bei der Konstruktion eines Gerätes ebenfalls vorhergesehen und vorausschauend in der konstruktiven Lösung bedacht werden.

Zielsetzung ist es, Klassen von Umweltgrößen und deren Grenzwerte festzulegen, denen ein Erzeugnis während des Transportes, der Lagerung und dem Einsatz ausgesetzt sein kann. Der Aufbau der europäisch genormten Klassifizierung der Umweltbedingungen /89/ sei an einem Beispiel verdeutlicht. Eine Klassifizierung erfolgt dabei mit dreistelligem Aufbau, z.B. 2K3:

- | | |
|---------------|---|
| 1. Ziffer: | Anwendungsbereichskodierung |
| | 1 Lagerung |
| | 2 Transport |
| | 3 ortsfester Einsatz |
| | , |
| | , |
| | , |
| 2. Buchstabe: | Einflussgrößenkodierung |
| | K, Z klimatische Bedingungen |
| | B biologische Bedingungen |
| | C chemisch-aktive Bedingungen |
| | S mechanisch-aktive Bedingungen |
| | M mechanische Bedingungen |
| 3. Ziffer: | Grenzwertkodierung |
| | höhere Zahl entspricht schärferer Bedingung |

Einige Beispiele für zugehörige Werte können den Tafeln 9.1 bis 9.6 entnommen werden. Eine vollständige Klassifizierung trägt dann beispielsweise folgende Bezeichnung:

Lagerung	1K2 / 1Z1 / 1B1 / 1C2 / 1S1 / 1M3
Transport	2K2 / 2B1 / 2C2 / 2S2 / 2M3
Einsatz	3K2 / 3Z1 / 3Z4 / 3B1 / 3C2 / 3S1 / 3M4.

Tafel 9.1 Klassifizierung von klimatischen Umweltbedingungen 1 K ... , nach /89/

UMWELTEINFLUSS-GRÖßE		EIN-HEIT	KLASSE								
			1K1	1K2	1K3	1K4	1K5	1K6	1K7	1K8	1K9
a)	Niedrige Lufttemperatur	°C	+20	+5	-5	-25	-40	-55	-20	-33	-65
b)	Hohe Lufttemperatur	°C	+25	+40	+45	+55	+70	+70	+35	+40	+55
c)	Niedrige relative Luftfeuchtigkeit	%	20	5	5	10	10	10	20	15	4
d)	Hohe relative Luftfeuchtigkeit	%	75	85	95	100	100	100	100	100	100
e)	Niedrige absolute Luftfeuchtigkeit	g/m³	4	1	1	0,5	0,1	0	0,9	0,26	0
f)	Hohe absolute Luftfeuchtigkeit	g/m³	15	25	29	29	35	35	22	25	36
g)	Temperaturänderungsgeschwindigkeit	°C/min	0,1	0,5	0,5	0,5	1	1	0,5	0,5	0,5
h)	Niedriger Luftdruck	kPa	70	70	70	70	70	70	70	70	70
i)	Hoher Luftdruck	kPa	106	106	106	106	106	106	106	106	106
j)	Sonnenstrahlung	W/m²	500	700	700	1120	1120	1120	1120	1120	1120
k)	Wärmestrahlung	--	-	-	1)	1)	1)	1)	1)	1)	1)
l)	Luftbewegung	m/s	0,5	1	1	1	5	5	2)	2)	2)
m)	Betauung	--	-	-	möglich	möglich	möglich	möglich	möglich	möglich	möglich
n)	Niederschlag (Regen, Schnee, usw.)	--	-	-	-	möglich	möglich	möglich	möglich	möglich	möglich
o)	Regenmenge	mm/min	-	-	-	-	-	-	6	6	15
p)	Niedrige Regentemperatur	°C	-	-	-	-	-	-	+5	+5	+5
q)	Wasser (außer Regen)	--	-	-	-	-	-	-	-	-	-
r)	Eisbildung und Vereisung	--	-	-	möglich	möglich	möglich	möglich	möglich	möglich	möglich

1) Wärmestrahlung z. B. in der Nachbarschaft von Raumheizeinrichtungen

2) Verweis auf Z-Klassifikation

Tafel 9.2 Klassifizierung von klimatischen Umweltbedingungen 2 K ... , nach /89/

UMWELTEINFLUSS-GRÖßE		EIN-HEIT	KLASSE						
			2K1	2K2	2K3	2K4	2K5	2K5H	2K5L
a)	Niedrige Lufttemperatur	°C	+5	-25	-25	-40	-65	-25	-65
b)	Hohe Lufttemperatur in unbelüfteten Behältern	°C	-	+60	+70	+70	+85	+85	+70
c)	Hohe Lufttemperatur in belüfteten Behältern oder in Freiluft	°C	+40	+40	+40	+40	+55	+55	+40
d)	Temperaturänderung Luft/Luft	°C	-	-25/+25	-25/+30	-40/+30	-65/+30	-25/+30	-65/+30
e)	Temperaturänderung Luft/Wasser	°C	-	-	+40/+5	+40/+5	+55/+5	+55/+5	+40/+5
f)	Relative Luftfeuchte, nicht kombiniert mit rascher Temperaturänderung	%			95	95	95	95	95
		°C	75 +30	75 +30	95 +40	95 +45	95 +50	95 +50	95 +45
g)	Relative Luftfeuchte, kombiniert mit rascher Temperaturänderung: Luft/Luft bei hoher relativer Luftfeuchte	%	-	-	95	95	95	95	95
		°C			-25/+30	-40/+30	-65/+30	-25/+30	-65/+30
h)	Absolute Luftfeuchte kombiniert mit rascher Temperaturänderung: Luft/Luft bei hohem Wassergehalt	g/m³							
		°C	-	-	60 +70/+15	60 +70/+15	80 +85/+15	80 +85/+15	60 +70/+15
i)	Niedriger Luftdruck	kPa	70	70	70	70	30	30	30
j)	Druckänderung	kPa/min	-	-	-	-	6	6	6
k)	Luftbewegung	m/s	-	-	20	20	30	30	30
l)	Niederschlag, Regen	mm/min	-	-	6	6	15	15	6
m)	Sonnenstrahlung	W/m²	700	700	1120	1120	1120	1120	1120
n)	Wärmestrahlung	W/m²	-	-	600	600	600	600	600
o)	Wasser (außer Regen)	m/s	-	-	1	1	3	3	3
p)	Nässe	-	-	-	-	Nasse Ladeflächen			

Tafel 9.3 Klassifizierung von klimatischen Umweltbedingungen 3 K ... , nach /89/

UMWELTEIN- FLUSSGRÖßE	EIN- HEIT	KLASSE										
		3K1	3K2	3K3	3K4	3K5	3K6	3K7	3K7L	3K8	3K8H	3K8L
a) Niedrige Lufttemperatur	°C	+20	+15	+5	+5	-5	-25	-40	-40	-55	-25	-55
b) Hohe Lufttemperatur	°C	+25	+30	+40	+40	+45	+55	+70	+40	+70	+70	+55
c) Niedrige relative Luftfeuchte	%	20	10	5	5	5	10	10	10	10	10	10
d) Hohe relative Luftfeuchte	%	75	75	85	95	95	100	100	100	100	100	100
e) Niedrige absolute Luftfeuchte	g/m ³	4	2	1	1	1	0,5	0,1	0,1	0	0,5	0
f) Hohe absolute Luftfeuchte	g/m ³	15	22	25	29	29	29	35	35	35	35	29
g) Temperaturänderungsgeschwindigkeit	°C/min	0,1	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1	1	1	1	1
h) Niedriger Luftdruck	kPa	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70
i) Hoher Luftdruck	kPa	106	106	106	106	106	106	106	106	106	106	106
j) Sonnenstrahlung	W/m ²	500	700	700	700	700	1120	1120	-	1120	1120	1120
k) Wärmestrahlung	--	-	1)	1)	1)	1)	1)	1)	1)	1)	1)	1)
l) Luftbewegung	m/s	0,5	1	1	1	1	1	5	5	5	5	5
m) Betauung	--	-	-	-	mög- lich	mög- lich	mög- lich	mög- lich	mög- lich	mög- lich	mög- lich	mög- lich
n) Windgetriebener Niederschlag (Regen, Schnee, Hagel usw.)	--	-	-	-	-	-	mög- lich	mög- lich	mög- lich	mög- lich	mög- lich	mög- lich
o) Wasser (außer Regen)	--	-	-	-	1)	1)	1)	1)	1)	1)	1)	1)
p) Eisbildung	--	-	-	-	-	mög- lich	mög- lich	mög- lich	mög- lich	mög- lich	mög- lich	mög- lich

1) Verweis auf Z-Klassifikation

Tafel 9.4 Klassifizierung von chemisch-aktiven Stoffen, nach /89/

UMWELTEIN- FLUSSGRÖßE	EINHEIT	KLASSE					
		1C1L Grenz- wert	1C1 Grenz- wert	1C2		1C3	
				Mittel- wert	Grenz- wert	Mittel- wert	Grenz- wert
a) Meersalz und Streusalz	--	--	--	Auftreten von Salznebel			
b) Schwefeldioxid	mg/m ³ cm ³ /m ³	0,1 0,037	0,1 0,037	0,3 0,11	1,0 0,37	5,0 1,85	10 3,7
c) Schwefelwasserstoff	mg/m ³ cm ³ /m ³	0,01 0,0071	0,01 0,0071	0,1 0,071	0,5 0,36	3,0 2,1	10 7,1
d) Chlor	mg/m ³ cm ³ /m ³	0,01 0,0034	0,1 0,034	0,1 0,034	0,3 0,1	0,3 0,1	1,0 0,34
e) Chlorwasserstoff	mg/m ³ cm ³ /m ³	0,01 0,0066	0,1 0,066	0,1 0,066	0,5 0,33	1,0 0,66	5,0 3,3
f) Fluorwasserstoff	mg/m ³ cm ³ /m ³	0,003 0,0036	0,003 0,0036	0,01 0,012	0,03 0,036	0,1 0,12	2,0 2,4
g) Ammoniak	mg/m ³ cm ³ /m ³	0,3 0,42	0,3 0,42	1,0 1,4	3,0 4,2	10 14	35 49
h) Ozon	mg/m ³ cm ³ /m ³	0,01 0,005	0,01 0,005	0,05 0,025	0,1 0,05	0,1 0,05	0,3 0,15
i) Stickoxide (angegeben in Äquivalent- werten von Stickstoffdi- oxid)	mg/m ³ cm ³ /m ³	0,1 0,052	0,1 0,052	0,5 0,26	1,0 0,52	3,0 1,56	9,0 4,68

Tafel 9.5 Klassifizierung von biologischen Umweltbedingungen, nach /89/

UMWELTEIN- FLUSSGRÖßE	EINHEIT	KLASSE		
		1B1	1B2	1B3
a) Flora	--	vernachlässigbar	Auftreten von Schimmelwachstum, Schwamm usw.	
b) Fauna	--	vernachlässigbar	Auftreten von Nagetieren und anderen tierischen Schädlingen mit Ausnahme von Termiten	einschließlich Termiten

Tafel 9.6 Klassifizierung von weiteren klimatischen Umweltbedingungen, nach /89/

UMWELTEINFLUSS-GRÖßE	EINHEIT	KLASSE	WEITERE KLIMATISCHE UMWELTBEDINGUNGEN (Klassifikation Z)
k) Wärmestrahlung	--	1Z1	vernachlässigbar
	--	1Z2	Wärmestrahlung z. B. in der Nachbarschaft von Einrichtungen zur Raumheizung
l) Luftbewegung	m/s	1Z3	30
	m/s	1Z4	50
p) Wasser (außer Regen)	--	1Z5	Tropfwasser
	--	1Z6	Strahlwasser
	--	1Z7	Schwere See (Wellen)

Transport und Lagerung gelten für versandfertige Packstücke. Grenzwerte für Transport und Lagerung sind meist erheblich höher als für den Einsatz, trotz gleichen Kennziffern in der dritten Position.

Diese Einsatzklassen beschreiben zunächst Grenzwerte, keine Maßnahmen zu deren Realisierung und auch keine Prüfvorschriften dazu. Sie sind auch nicht im Sinne einer unbedingt einzuhaltenden Funktionsgrenzbedingung zu sehen. Vielmehr obliegt es dem Konstrukteur, geeignete Maßnahmen zur Sicherung der Funktion des Gerätes zu ergreifen. Auch enthalten diese Angaben keine Aussagen über Fehlerverhalten und Zuverlässigkeit unter den genannten Grenzbedingungen.

Vielen der genannten Einflussgrößen ist nur mit erheblichen Aufwänden zu begegnen, dies erhöht die Kosten u. U. erheblich. Tragbare Kompromisse sind nötig. Andererseits sind die angegebenen Umweltgrenzwerte durchaus nicht gleichzusetzen mit den maximal vorkommenden Beanspruchungen. Klimaeinflüsse können sich überlagern. Auf dem Dach eines PKW beispielsweise können an einem Sommertag am Mittelmeer durchaus bis 130 °C gemessen werden, ein Wert, der die 70 °C der schärfsten Einsatzklasse 3K8H bei weitem überschreitet.

10 Zusammenfassung

Das vorliegende Skript versucht, aufbauend auf der Konstruktionslehre Feinwerktechnik den Übergang zur Betrachtung eines kompletten Erzeugnisses, eines feinwerktechnischen Gerätes zu vollziehen. Während die Konstruktionslehre noch stark an einzelnen Bauelementen und Baugruppen und folglich an einzelnen Funktionen orientiert ist, steht hier das aus solchen Komponenten zusammengesetzte System im Blickpunkt. Ein Aspekt dabei ist die Frage der Methodik der Entwicklung eines solchen Gerätes, die jedoch hier nur der Einordnung dient. Andere vertiefte Aspekte resultieren aus dem Systemcharakter, nämlich die Betrachtung der Genauigkeit, der Sicherheit, der Zuverlässigkeit des Gesamtsystems oder aber aus den Beziehungen Mensch - Gerät - Umwelt, wie die Behandlung thermischer Probleme oder von Schwingungen und Geräuschen in Geräten. Dies alles bis ins Detail zu behandeln würde Bücher füllen. Hier ist der Versuch eines Überblickes gemacht worden.

11 Literaturhinweise (stark eingeeengte Auswahl)

Literatur zu Abschnitt 2:

- /1/ VDI 2221: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte.
- /2/ VDI/VDE 2422: Entwicklungsmethodik für Geräte mit Steuerung durch Mikroelektronik.
- /3/ Pahl, G.; Beitz, W.: Konstruktionslehre, Methoden und Anwendungen. Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag 1983.
- /4/ VDI 2222: Konstruktionsmethodik, Konzipieren technischer Produkte.
- /5/ VDI 2225: Technisch wirtschaftliches Konstruieren.
- /6/ VDI 2235: Wirtschaftliche Entscheidungen beim Konstruieren.
- /7/ Roth, K.-H.: Konstruieren mit Konstruktionskatalogen. Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag 1982.
- /8/ VDI 2206: Entwicklungsmethodik für mechatronische Produkte.

Literatur zu Abschnitt 3 und 4:

- /9/ Krause, W.: Gerätekonstruktion in Feinwerktechnik und Elektronik. 3. stark bearbeitete Auflage. München, Wien: Carl Hanser Verlag 2000.
- /10/ Kirschling, G.: Qualitätssicherungen und Toleranzen. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag 1988.
- /11/ Klein, B.; Mannewitz, F.: Statistische Tolerierung. Braunschweig/Wiesbaden: Vieweg-Verlag 1993.
- /12/ Szyminski, S.: Toleranzen und Passungen. Braunschweig/Wiesbaden: Vieweg-Verlag 1993.
- /13/ DIN 7186: Statistische Tolerierung (zurückgezogen).
- /14/ DIN 1319: Grundbegriffe der Messtechnik.
- /15/ Klein, B.: Toleranzmanagement im Maschinen- und Fahrzeugbau. München: Oldenburgverlag 2012.

Literatur zu Abschnitt 5:

- /16/ Strnad, H.; Vorath, B.-J.: Sicherheitsgerechtes Konstruieren - Einführung in das Konstruieren gefahrenfreier technischer Arbeitsmittel. Verlag TÜV Rheinland 1984.
- /17/ Peters, O. H.; Meyna, A.: Handbuch der Sicherheitstechnik. München: Carl Hanser Verlag 1985.
- /18/ Berghaus, H.; Langer, D.: Das CE-Zeichen. München, Wien: Carl Hanser Verlag 1994.
- /19/ Bauer, C.-O.; Hinsch, C.: Produkthaftung - Herausforderung an Manager und Ingenieure. Berlin: Springer Verlag 1994.
- /20/ Herhahn, A.; Winkler, A.: Elektroinstallation nach DIN VDE 0100. Würzburg: Vogel-Fachbuchverlag 1992.
- /21/ DIN 31 000 (zugleich VDE 1000): Sicherheitsgerechtes Gestalten technischer Erzeugnisse. Allgemeine Leitsätze. Berlin: Beuth. Teilweise ersetzt durch DIN EN 292 Teil 1 und 2: Sicherheit von Maschinen, Grundbegriffe, allgemeine Gestaltungsleitsätze, 1993.
- /22/ Normenreihe DIN VDE 0100: Errichten von Starkstromanlagen mit Nennspannungen bei 1000 V. Berlin: Beuth-Verlag
 - Teil 200 Allgemeingültige Begriffe
 - Teil 300 Planung elektrischer Anlagen
 - Teil 410 (gleichzeitig DIN 57 100, Teil 410)
Schutzmaßnahmen; Schutz gegen gefährliche Körperströme
 - Teil 540 (gleichzeitig DIN 57 100, Teil 540)
Erdung, Schutzleiter, Potentialausgleich.
- /23/ DIN EN 61140 / VDE 0140-1: Schutz gegen elektrischen Schlag.
- /24/ DIN EN 60529 VDE 0470-1: Schutzarten durch Gehäuse (IP-Code).
- /25/ DIN 40050-9: Straßenfahrzeuge; IP-Schutzarten; Schutz gegen Fremdkörper, Wasser und Berühren; Elektrische Ausrüstung.
- /26/ VDI 2244: Konstruieren sicherheitsgerechter Erzeugnisse.
- /27/ VDE 0110-5: Luft- und Kriechstrecken.
- /28/ VDE 0750: Medizinische Geräte.
- /29/ Richtlinie 2006/95/EG Niederspannungsrichtlinie.
- /30/ Richtlinie 2006/42/EG Maschinenrichtlinie.

Literatur zu Abschnitt 6:

- /31/ Bertsche, B.; Lechner, G.: Zuverlässigkeit im Fahrzeug- und Maschinenbau. 3. Auflage. Berlin, Heidelberg, New York, Tokio: Springer-Verlag 2004.
- /32/ Birolini, A.: Qualität und Zuverlässigkeit technischer Systeme. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag 1988.
- /33/ Bertsche, B.; Göhner, P.; Jensen, U.; Schinköthe, W.; Wunderlich, H.-J.: Zuverlässigkeit mechatronischer Systeme - Grundlagen und Bewertung in frühen Entwicklungsphasen. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag 2009.
- /34/ Rosemann, H.: Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit technischer Anlagen und Geräte. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag 1981.
- /35/ DIN EN 60812: Ausfalleffektanalyse/FMEA.
- /36/ DIN 25424-2: Fehlerbaumanalyse.
- /37/ DIN 40041: Zuverlässigkeit, Begriffe.

Literatur zu Abschnitt 7:

- /38/ Krause, W.: Lärminderung in der Feinwerktechnik. Düsseldorf: VDI-Verlag 1995.
- /39/ Klotter, K.: Technische Schwingungslehre. Berlin: Springer-Verlag 1978.
- /40/ Beitz, W.; Küttner, K.-H.: Dubbel-Taschenbuch für den Maschinenbau. Springer-Verlag (Abschnitt O).
- /41/ Schiehlen, W.: Technische Dynamik. Stuttgart: Teubner-Verlag 1986.
- /42/ Holzweißig, F.; Dresig, H.: Lehrbuch der Maschinendynamik. Wien: Springer-Verlag 1994.
- /43/ Göbel, E. F.: Gummifeder-Berechnung und Gestaltung. Berlin: Springer-Verlag 1969.
- /44/ Schmidt, H.: Schalltechnisches Taschenbuch. Düsseldorf: VDI-Verlag 1976.
- /45/ Cremer, L.; Heckl, M.: Körperschall - Physikalische Grundlagen und Technische Anwendungen. Berlin: Springer-Verlag 1967.
- /46/ VDI-Handbuch Schwingungstechnik, Düsseldorf: VDI-Verlag.
- /47/ VDI-Handbuch Lärminderung, Düsseldorf: VDI-Verlag.
- /48/ Tuffentsammer, K.: Lärmarm Konstruieren. Vorlesungsskript. Universität Stuttgart 1979.

/49/ Bertolini, T.; Fuchs, T. Schwingungen und Geräusche elektrischer Kleinantriebe. München: Süddeutscher Verlag onpact GmbH 2011.

Ausgewählte Normen und Richtlinien zu Schwingungen:

/50/ VDI 2057: Einwirkung mechanischer Schwingungen auf den Menschen.

/51/ VDI 2062: Schwingungsisolierung.

/52/ VDI 3831: Schutzmaßnahmen gegen die Einwirkung mechanischer Schwingungen auf den Menschen.

/53/ DIN 45661: Schwingungsmesseinrichtungen, Begriffe.

/54/ DIN 45662: Schwingungsmesseinrichtungen, allgemeine Anforderungen und Prüfung.

/55/ DIN 45664: Ankopplung von Schwingungsmessgeräten und Überprüfung auf Störeinflüsse (zurückgezogen).

/56/ DIN 45666: Schwingstärkemessgerät; Anforderungen (zurückgezogen).

/57/ DIN 45669: Messung von Schwingungsimmissionen.

/58/ DIN EN ISO 8041: Schwingungseinwirkung auf den Menschen.

/59/ DIN EN 28662 ff: Einwirkung mechanischer Schwingungen auf das Hand-Arm-System.

/60/ DIN 45676: Mechanische Eingangsimpedanz und Übertragungsfunktion des menschlichen Körpers (zurückgezogen).

Ausgewählte Normen und Richtlinien zu Geräuschen:

/61/ VDI 2058: Beurteilung von Arbeitslärm.

/62/ DIN ISO 5128: Akustik - Innengeräusche in Kraftfahrzeugen.

/63/ DIN ISO 14163: Akustik - Leitlinien für den Schallschutz durch Schalldämpfer.

/64/ DIN ISO 15667: Akustik - Leitlinien für den Schallschutz durch Kapseln und Kabinen.

/65/ VDI 3720: Lärmarm Konstruieren.

/66/ VDI 3727: Schallschutz durch Körperschalldämpfung.

/67/ VDI 3738 ff: Emissionswerte technischer Schallquellen.

- /68/ DIN EN ISO 1683: Akustik - Bevorzugte Bezugswerte für Pegel ...
- /69/ DIN EN ISO 3740 ff: Akustik - Bestimmung des Schallleistungspegels von Geräuschquellen ...
- /70/ DIN 45641: Mittelung von Schallpegeln.

Emissionswerte für technische Schallquellen:

- /71/ VDI 3738 ff: Emissionswerte technischer Schallquellen.
- /72/ DIN EN 60704-3: Elektrische Geräte für den Hausgebrauch - Prüfvorschriften für die Bestimmung der Luftschallemission.

Beurteilung von Lärm:

- /73/ VDI 2058: Bl. 1 Beurteilung von Arbeitslärm in der Nachbarschaft
 Bl. 2 Beurteilung von Arbeitslärm hinsichtlich Gehörschäden
 Bl. 3 Beurteilung von Lärm am Arbeitsplatz unter Berücksichtigung unterschiedlicher Tätigkeiten.
- /74/ DIN EN 61672-1: Schallpegelmesser (Definition verschiedener Bewertungskurven).
- /75/ DIN 45645: Einheitliche Ermittlung des Beurteilungspegels für Geräuschemissionen.

Literatur zu Abschnitt 8:

(siehe auch /9/)

- /76/ von Leyen, D.: Wärmeübertragung - Grundlagen und Berechnungsbeispiele aus der Nachrichtentechnik. Berlin, München: Siemens AG 1971.
- /77/ Bremberger, M.: Elektro-Mechanik-Arbeitsbuch für Entwicklung, Technologie und Fertigung in Nachrichtentechnik und Elektronik. München: Carl Hanser Verlag 1970.
- /78/ Merker, G. P.: Konvektive Wärmeübertragung. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag 1987.
- /79/ Baehr, H. D.; Stephan, K.: Wärme- und Stoffübertragung. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag 1994.
- /80/ Löbl, H.: Geräteentwicklung - Thermische Dimensionierung - Vorlesungsunterlagen TU Dresden. Großerkmannsdorf: Initial Werbestudio & Verlag 2004.
- /81/ Baehr, H. D.: Thermodynamik – Grundlagen und technische Anwendungen. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag 2005.

- /82/ Langenheinecke, K.; Jany, P.; Thieleke, G.: Thermodynamik für Ingenieure – eine Lehr- und Arbeitsbuch für das Studium. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag 2007.
- /83/ Marek, R.; Nitsche, K.: Praxis der Wärmeübertragung – Grundlagen - Anwendungen – Übungsaufgaben. München, Wien: Carl Hanser Verlag 2007.
- /84/ Polifke, W.; Kopitz, J.: Wärmeübertragung – Grundlagen, analytische und numerische Methoden. München :Pearson Studium Verlag 2005.
- /85/ VDI: VDI-Wämeatlas. 10. Aufl. Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag 2005.
- /86/ Von Böckh, P.; Wetzel, T.: Wärmeübertragung – Grundlagen und Praxis. 3. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag 2009.
- /87/ Wagner, W.: Wärmeübertragung. 6. Aufl. Würzburg: Vogelverlag 2004.

Literatur zu Abschnitt 9

- /88/ DIN EN 60 068: Umweltprüfung
- /89/ DIN EN 60 721-1 / IEC 60 721 Teil 3 - 1 bis 3 - 7: Klassifizierung von Umweltbedingungen für Lagerung, Transport, ortsfesten Einsatz und Einsatz in Landfahrzeugen, Schiffen . . . sowie ortsveränderlichen Einsatz.