



Dietrich Schlottmann  
Henrik Schnegas

# Auslegung von Konstruktions- elementen

Sicherheit, Lebensdauer und Zuverlässigkeit  
im Maschinenbau

*3. Auflage*

VDI

 Springer Vieweg

---

# VDI-Buch

Weitere Informationen zu dieser Reihe finden Sie unter  
<http://www.springer.com/series/3482>



---

Dietrich Schlottmann • Henrik Schnegas

# Auslegung von Konstruktionselementen

Sicherheit, Lebensdauer  
und Zuverlässigkeit im Maschinenbau

3. Auflage

Dietrich Schlottmann  
Rostock, Deutschland

Henrik Schnegas  
FB Ingenieurwissenschaften  
Hochschule Wismar  
Wismar, Deutschland

VDI-Buch

ISBN 978-3-662-48806-5

ISBN 978-3-662-48807-2 (eBook)

DOI 10.1007/978-3-662-48807-2

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

Springer Vieweg

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2016

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag, noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer-Verlag GmbH Berlin Heidelberg ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media ([www.springer.com](http://www.springer.com))

---

## Vorwort zur 3. Auflage

Die Berechnung von Sicherheit, Lebensdauer und Zuverlässigkeit technischer Gebilde erweist sich immer wieder als wesentlicher aber auch anspruchsvoller Bestandteil der Arbeit des in der Konstruktion tätigen Ingenieurs.

Höhere Leistungsparameter, Energie- und Ressourceneffizienz bei verbesserter Verfügbarkeit und einer nach Möglichkeit instandhaltungs- und reparaturoptimalen Nutzungszeit kennzeichnen zunehmend auch die Erzeugnisse des Maschinen- und Anlagenbaus. Neue Produktsicherheitsgesetze und -richtlinien verlangen nach Auslegungsmethoden, die z.B. die Forderung nach einer notwendigen Lebensdauer mit einer möglichst kalkulierbaren Ausfallwahrscheinlichkeit unter Berücksichtigung von Kosten bereits im Produktentstehungsprozess berücksichtigen.

Das vorliegende Buch ist hervorgegangen aus Vorlesungen für Maschinenelemente, Konstruktionslehre und Zuverlässigkeit technischer Systeme, aus praktischen Erfahrungen der Autoren in der Auslegungspraxis auf dem Gebiet des Schiffs-, Maschinen- und Anlagenbaus, sowie aus Forschungs- und Entwicklungsaufgaben am Institut für Konstruktionstechnik der Universität Rostock und der Fachgruppe Konstruktionstechnik der Hochschule Wismar. Es erhebt keinen Anspruch, neue Forschungsergebnisse z.B. auf Gebieten wie der Betriebsfestigkeitslehre oder der Tribologie zu verbreiten. Es verfolgt das Anliegen, multivalent und unkompliziert nutzbare Methoden für die Auslegung und zuverlässigkeitstheoretische Bewertung von Maschinen- und Apparateelemente für die Konstruktionspraxis sowie für Studierende konstruktiv geprägter Fachrichtungen zu vermitteln. Neben Bruch und Ermüdung stehen hierbei auch Verschleiß, Korrosion und andere flächenabtragende Schädigungsprozesse im Fokus dieses Buches. Für die statistische und wahrscheinlichkeitstheoretische Auswertung und Beschreibung von technischen Schädigungsarten werden einfache Algorithmen und Werkzeuge zur Verfügung gestellt. Da auch die Produktkosten bereits im Konstruktionsprozess eine immer größere Rolle spielen, runden Kostenbetrachtungen mit Bezug auf Lebensdauer, Sicherheit und Zuverlässigkeit das vorliegende Buch ab.

Ich gebe der Hoffnung Ausdruck, dass die 3. Auflage viele Leser und Interessenten erreichen wird. Ein ganz großes Dankeschön gilt meiner Familie, die mit viel Verständnis das abendliche Schreiben an diesem Buch ertragen hat und der Geduld und der Unterstützung der Mitarbeiter des Lektorates des Springer-Verlages. Gleichzeitig soll diese 3. Auflage ein ehrendes Gedenken an *Prof. Dr. sc. techn. Dietrich Schlottmann* (\*27.02.1936 – †17.09.2012) sein, der bereits in den 60er Jahren die Zuverlässigkeit als „optimales“ Auslegungskriterium erkannte, mich während des Studiums und später als Wissenschaftlicher Mitarbeiter für dieses Thema begeisterte und vielen Studenten und mir das notwendige Rüstzeug für die heutige Tätigkeit mitgab.

Henrik Schnegas

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Auslegung von Maschinen- und Konstruktionselementen – eine wesentliche Aufgabe des Ingenieurs</b> .....	1
1.1 Berechnung von Sicherheit, Lebensdauer und Zuverlässigkeit als historisch gewachsene Auslegungsmethoden .....	1
1.2 Einordnung der Auslegung von Konstruktionselementen und Maschinen in den Konstruktionsprozess.....	3
Quellen und weiterführende Literatur .....	6
<b>2 Auslegung von Konstruktionselementen durch Berechnung der „Sicherheit“</b> .....	7
2.1 Auslegung, dargestellt am klassischen Sicherheitsbegriff .....	7
2.2 Berechnung der „vorhandenen“ Spannungen .....	9
2.3 Versagen durch bleibende Verformung, Gewalt- und Schwingbruch .....	12
2.4 Bestimmung der Sicherheit bei Schwingbeanspruchung.....	17
2.4.1 Überlastfall 1 .....	17
2.4.2 Überlastfall 2 .....	18
2.4.3 Überlastfall 3 .....	18
2.4.4 allgemeiner Fall .....	18
2.5 Örtliche Spannungserhöhungen; Konzept der Sicherheitsberechnung nach örtlichen Spannungen.....	19
2.6 Einflüsse auf die Schwingfestigkeit; das Nennspannungskonzept .....	24
2.7 Zusammengesetzte oder kombinierte Beanspruchung stabförmiger Bauteile; Vergleichsspannung und Gesamtsicherheit.....	30
2.8 Vergleichsspannung und Sicherheitsnachweis für nichtstabförmige Bauteile; Grenzen des Konzeptes der örtlichen Spannungen .....	35
2.9 Erforderliche Sicherheit; Sicherheit unter wahrscheinlichkeitstheoretischem Aspekt .....	37
2.10 Ermittlung der übergeordneten Sicherheit; Produktsicherheit.....	41
2.11 Anhang .....	46
Quellen und weiterführende Literatur .....	66



<b>3</b>	<b>Schädigung und Versagen technischer Gebilde .....</b>	<b>67</b>
3.1	Ausfallverhalten, statistische Grundlagen.....	67
3.2	Grundlagen der Zuverlässigkeitstheorie.....	70
3.2.1	Mathematische Zusammenhänge .....	70
3.2.2	Spezielle Verteilungsfunktionen und Anwendung.....	73
3.2.3	Verteilungsfunktionen, Ermittlung charakteristischer Größen.....	76
3.2.4	Berechnung der Ausfallwahrscheinlichkeit und Zuverlässigkeit .....	80
3.2.5	Systemzuverlässigkeit .....	82
3.3	Mathematische Beschreibung von Schädigung und Versagen technischer Gebilde .....	86
3.3.1	Systematisierung von Schädigung und Versagen .....	86
3.3.2	Schädigung durch Ermüdung .....	90
3.3.3	Schädigung durch Verschleiß .....	96
3.3.4	Schädigung durch Erosion, Korrosion und andere flächenabtragende Prozesse .....	104
3.3.5	Mehrfache Schädigung.....	106
3.3.6	Komplexe Schädigungen .....	107
3.4	Anhang .....	111
	Quellen und weiterführende Literatur .....	122
<b>4</b>	<b>Berechnung der Lebensdauer bei nomineller und variabler Zuverlässigkeit .....</b>	<b>123</b>
4.1	Allgemeine Grundlagen der Lebensdauerberechnung.....	123
4.1.1	Klassische Lebensdauerberechnung.....	123
4.1.2	Lebensdauerberechnung bei Kollektivbeanspruchung.....	126
4.1.3	Lebensdauerberechnung bei Äquivalenzbelastung.....	131
4.1.4	Lebensdauerberechnung mit Äquivalenzfaktor.....	133
4.2	Lebensdauerberechnung bei variabler Zuverlässigkeit .....	135
4.2.1	Zuverlässigkeitsbasierte Lebensdauerberechnung bei konstanter Beanspruchung und Gaußverteilung .....	136
4.2.2	Zuverlässigkeitsbasierte Lebensdauerberechnung bei konstanter Beanspruchung und Weibullverteilung.....	137
4.2.3	Zuverlässigkeitsbasierte Lebensdauerberechnung bei variabler Beanspruchung und Normpunkt.....	138
4.2.4	Zuverlässigkeitsbasierte Lebensdauerberechnung bei Kollektivbeanspruchung und Normpunkt.....	140
4.3	Anhang .....	141
	Quellen und weiterführende Literatur .....	146
<b>5</b>	<b>Zusammenhänge zwischen Sicherheit, Lebensdauer und Zuverlässigkeit – eine neue Auslegungsphilosophie.....</b>	<b>147</b>
5.1	Systematisierung und Zielstellung .....	147
5.2	Zusammenhang zwischen Lebensdauer und Sicherheit im Zeitfestigkeitsbereich bei variabler Zuverlässigkeit .....	147

5.3	Zusammenhang zwischen Lebensdauer und Sicherheit im Zeitfestigkeitsbereich bei gleichbleibender Zuverlässigkeit.....	149
5.4	Zusammenhang zwischen Zuverlässigkeit bzw. Schadenswahrscheinlichkeit und Sicherheit bei gleichbleibender Lebensdauer.....	151
5.5	Aktuelle Zuverlässigkeit von Wälzlagern .....	154
5.6	Zuverlässigkeit bzw. Schadenswahrscheinlichkeit bei Kollektivbeanspruchung.....	156
5.7	Zuverlässigkeitstheoretische Interferenzmodelle .....	159
5.7.1	„Statisches“ Interferenzmodell .....	159
5.7.2	„Dynamisches“ Interferenzmodell .....	161
5.7.3	Interferenzmodell für Verschleiß .....	162
5.8	Anforderungen an Zuverlässigkeit und Ausfallwahrscheinlichkeit .....	164
5.9	Sicherheit, Lebensdauer, Zuverlässigkeit und Ausfall- wahrscheinlichkeit – eine neue Auslegungsphilosophie .....	165
	Quellen und weiterführende Literatur .....	169
<b>6</b>	<b>Kosten im Lebenszyklus technischer Gebilde – wie teuer dürfen Qualität und Zuverlässigkeit sein?.....</b>	<b>171</b>
6.1	Kostenverantwortung bei der Entwicklung eines technischen Gebildes.....	171
6.2	Lebenslaufkosten eines technischen Gebildes und Modelle für ihre Berechnung.....	174
6.2.1	Lebenslaufkosten eines technischen Gebildes.....	174
6.2.2	Lebenslaufkostenmodell und Bestimmung der optimalen Nutzungsdauer eines technischen Gebildes.....	174
6.3	Herstellerseitige Lebenslaufkosten und Zuverlässigkeit.....	179
6.3.1	Allgemeine Kostenstruktur bei der Entwicklung und Herstellung technischer Gebilde.....	179
6.3.2	Kostenentwicklungsgesetze und Zuverlässigkeit .....	181
6.3.3	Zusammenhang von Kosten, Zuverlässigkeit und Bauteilgröße am Beispiel der Wälzlagerauslegung.....	184
6.4	Anwenderseitige Lebenslaufkosten und Zuverlässigkeit.....	187
6.4.1	Allgemeine Kostenstruktur bei der Nutzung technischer Gebilde .....	187
6.4.2	Kosten und Zuverlässigkeit bei der Instandhaltung.....	189
6.5	Target Costing – ein Werkzeug für die retrograde Bestimmung erlaubter Kosten – wie teuer dürfen Sicherheit, Lebensdauer und Zuverlässigkeit sein?.....	193
6.5.1	Grundbegriffe des Target Costing.....	193
6.5.2	Aufteilung der Kosten auf die auszuliegenden Systemkomponenten .....	195
	Quellen und weiterführende Literatur .....	197

<b>7 Sicherheit – Lebensdauer – Zuverlässigkeit Anwendungsfälle und Beispiele</b> .....	199
Beispiel 1: Sicherheit gegen Streck- und Fließgrenzenüberschreitung, Einfluss der Vergleichsspannungshypothesen.....	200
Beispiel 2: Sicherheitsnachweis bei Schwingbeanspruchung für Dauer- Schwingfestigkeit (Nennspannungskonzept); Abschätzung der Ausfallwahrscheinlichkeit .....	201
Beispiel 3: Lebensdauernachweis und Sicherheit im Kurzlebensbereich (Zeitfestigkeit) bei einem Beanspruchungshorizont.....	203
Beispiel 4: Lebensdauerberechnung mittels linearer Schadensakkumulationshypothesen bei Ermüdung (Kollektivbelastung) .....	206
Beispiel 5: Auswertung von Ermüdungsversuchen (Gauß / Weibull) Generieren eines Wöhlerdiagramms Lebensdauer und Zuverlässigkeitsberechnung .....	209
Beispiel 6: Bestimmung von Verteilungsparametern (Weibull) aus einem Wöhlerlinienfeld. Generieren einer Wöhlerliniengleichung. Lebensdauer und Zuverlässigkeitsberechnung unter Kollektivbelastung.....	218
Beispiel 7: Auswertung von Verschleißgrößen.....	223
Beispiel 8: Systemzuverlässigkeit einer Zweikreisbremse.....	227
Beispiel 9: Wälzlager mit erhöhter Einzelzuverlässigkeit. Systemzuverlässigkeit für 4 Lager.....	228
Beispiel 10: Aktuelle Zuverlässigkeit am Beispiel eines Zahnrades mit Evolvente.....	231
Beispiel 11: Zuverlässigkeit und ökonomische Nutzungsdauer .....	235
<b>Stichwortverzeichnis</b> .....	237

---

# Auslegung von Maschinen- und Konstruktionselementen – eine wesentliche Aufgabe des Ingenieurs

1

---

## 1.1 Berechnung von Sicherheit, Lebensdauer und Zuverlässigkeit als historisch gewachsene Auslegungsmethoden

Bevor für den konstruktionstechnisch interessierten Leser die „Auslegung von Konstruktionselementen“ eine entsprechende Einordnung in den konstruktiven Gesamtprozess erfahren wird, soll in einer historisch angelegten Darstellung verdeutlicht werden, welchem wissenschaftlichen Anliegen und welchem Ziel das vorliegende Buch zuzuordnen ist.

Bei der Auslegung von Maschinen, Baugruppen und Elementen wird nach der Festlegung der Prinziplösung über Hauptabmessungen, Topologie, Form und Gestalt und damit über Masse, Lebensdauer und Zuverlässigkeit entschieden. Informationsverarbeitung und Rechentechnik haben das Tätigkeitsbild des Konstrukteurs in den letzten Jahrzehnten verändert.

Neben den Möglichkeiten des Computer Aided Designs (CAD) lassen sich im Rahmen des Computer Aided Engineerings (CAE) Berechnungen durchführen, die noch vor Jahren wegen des hohen Arbeits- und Zeitaufwandes nicht denkbar waren. Natürlich hat diese Entwicklung auch die „Auslegung“ von Konstruktionselementen beeinflusst. Denken wir nur an die Methoden der Finiten Elemente (FEM), die es gestattet, die vorhandenen Spannungen in kompliziertesten Bauteilen zu berechnen oder deren Anwendung bei der Strukturoptimierung, bei der Suche nach kleinstmöglichen Konstruktionselementen.

Trotzdem bleibt die Rechentechnik für die Ermittlung von Sicherheit, Lebensdauer und Zuverlässigkeit ein Hilfsmittel, da das Ausfallverhalten von Konstruktionselementen und Maschinen damit nur auf der Basis mathematischer Modelle simuliert werden kann.

Das Problem des Ausfalles bzw. des Versagens von Geräten und schließlich auch Bauwerken dürfte so alt sein wie die Menschheit selbst. Die Erfahrung des Menschen

lieferte jedoch offensichtlich ein relativ sicheres Gefühl für die Belastbarkeit der beeindruckenden Bauwerke des Altertums.

Erste wissenschaftliche Ansätze einer „Auslegungsrechnung“ gehen auf Galilei (1564–1642) zurück, der den Methoden und Modellen der heutigen Festigkeitslehre bereits sehr nahe kam (vgl. z. B. [1.07, 1.08]). So verwendete er den Begriff der Spannung und berechnete diese für den Einspannungsquerschnitt eines Kragarmes. Auch wenn die angenommene Spannungsverteilung und damit das Ergebnis falsch war, erkannte er die Bedeutung der Spannung als Vergleichsgröße für das Eintreten des Bruches. Mit Recht wird deshalb der Name Galilei mit der einfachsten Bruchtheorie, nämlich der Hauptnormalspannungshypothese in Verbindung gebracht (vgl. Kap. 3).

Natürlich war es bis zur Gestaltänderungsenergiehypothese (1913) nach v. Mises [1.03] noch ein weiter Weg. Die v. Mises'sche Hypothese dürfte für das Fließen und den Bruch infolge statischer Beanspruchung insbesondere für metallische Werkstoffe der Realität am nächsten kommen.

Neue Rätsel gaben die sich immer schneller drehenden Maschinen ihren Schöpfern insbesondere bzgl. ihrer Haltbarkeit auf. Berechnungen mit Kräften analog den statischen Lasten erwiesen sich als völlig unzutreffend. Es ist das bleibende Verdienst von Wöhler, das Ermüdungsverhalten von Werkstoffen und Bauteilen mit dem nach ihm bezeichneten „Wöhlerdiagramm“ anschaulich und zweckmäßig beschrieben zu haben [1.10].

Ein Grundanliegen des vorliegenden Buches besteht darin, der von Wöhler für die Ermüdung entwickelten Methodik auch für andere Versagensarten wie Verschleiß und Korrosion zu folgen.

Die erstmals von Wöhler entdeckte „Dauerfestigkeit“ metallischer Werkstoffe, d. h. ihre Unempfindlichkeit gegenüber schwingender Beanspruchung unterhalb eines bestimmten Beanspruchungsniveaus, führte zu relativ einfachen Berechnungsmethoden auch für den Ermüdungsbereich. Wie bei statischer Belastung werden „Sicherheitszahlen“ als Quotient aus zum Versagen führender und vorhandener Beanspruchung berechnet. Obwohl diese einfache ingenieurmäßige Methode in Kap. 3 teilweise einer kritischen Betrachtung unterzogen wird, dürfte sie auch in Zukunft ihre Bedeutung behalten.

Andererseits ist es gerade die Schädigung durch „Ermüdung“, die sich in den letzten Jahrzehnten durch eine hohe Forschungsdichte auszeichnet und als „Betriebsfestigkeitslehre“ zu einer selbstständigen Teildisziplin der Festigkeitslehre geworden ist.

Leider hat sich die Betriebsfestigkeitslehre bisher nicht von der Empirie lösen können, und es muss vielleicht gerade deshalb beklagt werden, dass sie nicht in gebührendem Maße bei der Auslegung von Bauteilen des Maschinenbaus zur Anwendung gekommen ist. Die Berechnungsstandards gehen bisher weitgehend davon aus, dass eine Maschine auf „Dauerfestigkeit“ ausgelegt wird – und das ist gleichbedeutend mit einer zumindest theoretisch unendlichen Lebensdauer.

Die Erfahrung lehrt aber, dass Maschinen nach endlichen Zeiten ausfallen – und dass nicht nur durch Gewalt- oder Ermüdungsbruch, sondern auch durch Verschleiß, Korrosion und andere Versagensarten. So gesehen stellt die von Palmgren [1.05] bereits 1924

vorgeschlagene Methode der Lebensdauerberechnung von Wälzlager eine der Zeit vorausgehende Pionierleistung dar, deren Entwicklung sich aufdrängte, da Wälzlager keinen Dauerfestigkeitsbereich aufweisen.

Neben der Wöhlerlinie wird die von Palmgren eingeführte und von Miner [1.02] verallgemeinerte Methode der Lebensdauerberechnung in der vorliegenden Publikation als eine ingenieurmäßig zweckmäßige Vorgehensweise angesehen, die auch bei Schädigungsmechanismen wie Ermüdung, Verschleiß und Korrosion anzuwenden ist.

Auch wenn diese Schädigungen ursächlich kaum Gemeinsamkeiten aufweisen, soll der Versuch unternommen werden, eine phänomenologisch begründete gleichartige Berechnungsmethode zu entwickeln, um eine ingenieurmäßig einheitliche Berechnung von Schädigungen im Sinne der Auslegungsrechnung zu erreichen.

Es sei hervorgehoben, dass die vorgeschlagene Vorgehensweise nur aus der Sicht des Konstrukteurs ihre Begründung findet. Sie erhebt keinen Anspruch, auf den Teilgebieten wie der Ermüdung, des Verschleißes oder der Korrosion einen auf die Grundlagen gerichteten Beitrag leisten zu wollen. Trotzdem dürfte die integrative Betrachtungsweise auch für den Spezialisten der Teildisziplin Anregung bieten.

Ein weiterer Aspekt des Buches besteht darin, die aktuelle Zuverlässigkeit bzw. Ausfallwahrscheinlichkeit zu ermitteln, um für eine vorgegebene Lebensdauer die Systemzuverlässigkeit bzw. Informationen zur Instandhaltung zu gewinnen. Damit wird der Nachteil der Betriebsfestigkeitslehre, eine Lebensdauer nur für eine nominelle Zuverlässigkeit angeben zu können, überwunden. Es wird damit eine „gestufte“ Auslegung mit den Teilschritten

- Sicherheit gegen Ermüdung (klassische Sicherheit in Beanspruchungen)
- Lebensdauer für Schädigung durch Ermüdung und andere Versagensarten (auch Sicherheit auf der Basis des Lebensdauerquotienten) und
- aktuelle Zuverlässigkeit bzw. Schadenswahrscheinlichkeit

möglich, wobei die drei Stufen baukastenartig mit relativ elementaren Zusatzinformationen zu berechnen sind. Die Ermittlung einer vorhandenen Systemzuverlässigkeit ist gleichzeitig eine Möglichkeit, im Rahmen aktuell geforderter Risikoanalysen eine Risikobewertung durchführen zu können.

---

## **1.2 Einordnung der Auslegung von Konstruktionselementen und Maschinen in den Konstruktionsprozess**

Das Bedürfnis nach neuen Erzeugnissen wird durch die Entwicklung der Wirtschaft und das Entstehen von Marktlücken ausgelöst. Für den Entwicklungsingenieur und Konstrukteur beginnt der Konstruktionsprozess i. d. R. mit einer entsprechend formulierten Aufgabe und endet mit der Produktdokumentation des angestrebten Erzeugnisses.

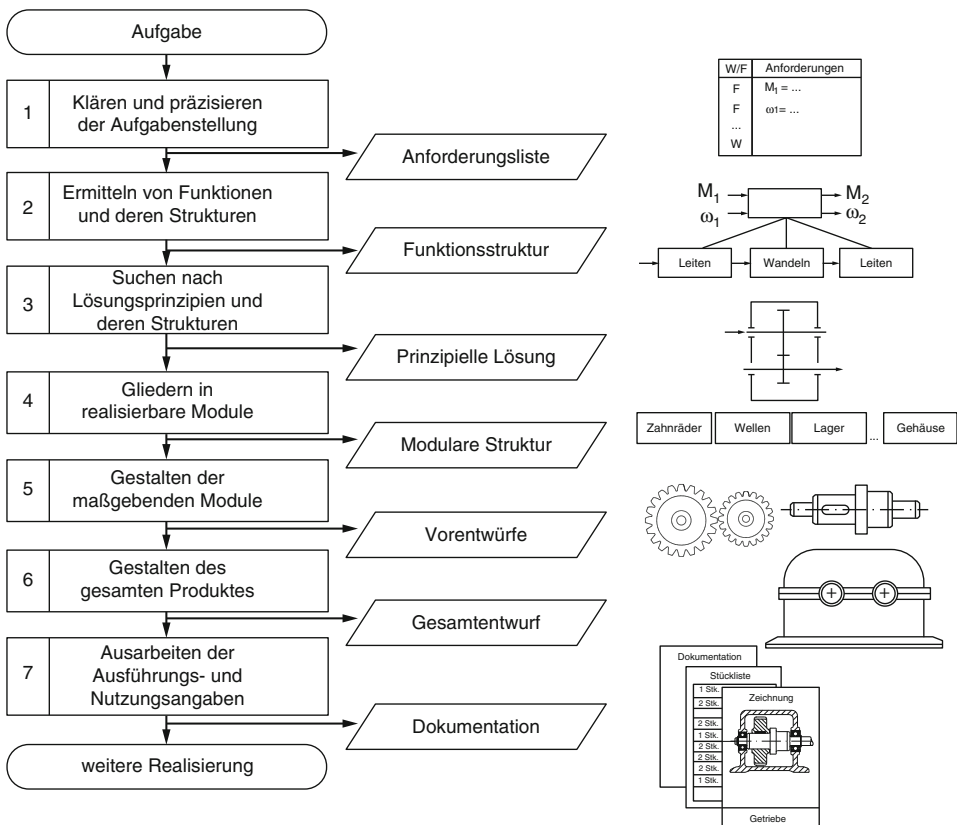
Eine wissenschaftliche Analyse dieses Prozesses geht auf Hansen [1.01] sowie Müller [1.04] zurück. Ähnliche Darstellungen sind in [1.09] und [1.06] zu finden.

Ohne die Struktur des Konstruktionsprozesses beschreiben zu wollen, werden sieben Arbeitsphasen durchlaufen (vgl. Abb. 1.1), wie am Beispiel einer Getriebekonstruktion erläutert wird.

In Abb. 1.1 wird deutlich, dass im Arbeitsschritt 5 über die wesentlichen Abmessungen des technischen Gebildes entschieden wird, d. h., das Bauteil erfährt seine vorläufige „Auslegung“. Bei genauer Betrachtung unterteilt sich dieser Prozess wiederum in 3 Teilschritte, nämlich in

- Entwurfsrechnung
- Gestaltung und
- Nachweisrechnung,

wie am Beispiel Welle in Abb. 1.1 zu erkennen ist [1.06].



**Abb. 1.1** Generelle Arbeitsschritte und Arbeitsergebnisse des Konstruktionsprozesses nach VDI 2221 [1.09] am Beispiel einer Getriebekonstruktion