

DEUTSCHER AUSSCHUSS FÜR STAHLBETON

DAfStb-Richtlinie

Verfahren zur Herleitung von Sicherheitsbeiwerten im Massivbau unter Verwendung probabilistischer Methoden

Entwurf August 2025 (Stellungnahmen bis zum 17. November 2025)

Teil 1: Grundlagen für zeitinvariante Betrachtungen

Teil 2: Herleitung von Teilsicherheitsbeiwerten auf der Widerstandsseite bei Entkopplung von Einwirkungs- und Widerstandsseite

Anwendungswarnvermerk

Dieser Richtlinien-Entwurf wird der Öffentlichkeit zur Prüfung und Stellungnahme vorgelegt. Weil die beabsichtigte Richtlinie von der vorliegenden Fassung abweichen kann, ist die Anwendung dieses Entwurfes besonders zu vereinbaren. Stellungnahmen werden erbeten

- vorzugsweise als Datei per E-Mail an info@dafstb.de in Form einer Tabelle. Die Vorlage der Tabelle kann im Internet unter <http://www.dafstb.de/richtlinien.html> abgerufen werden;
- oder in Papierform an den Deutschen Ausschuss für Stahlbeton e. V., Budapester Straße 31, 10787 Berlin.

Die Empfänger dieses Richtlinien-Entwurfes werden gebeten, mit ihren Kommentaren jegliche relevanten Patentrechte, die sie kennen, mitzuteilen und unterstützende Dokumentationen zur Verfügung zu stellen.

Notifiziert gemäß der Richtlinie (EU) 2015/1535 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 9. September 2015 über ein Informationsverfahren auf dem Gebiet der technischen Vorschriften und der Vorschriften für die Dienste der Informationsgesellschaft (ABl. L 241 vom 17.9.2015, S. 1).

Bezüglich der in dieser Richtlinie genannten Normen, anderen Unterlagen und technischen Anforderungen, die sich auf Produkte oder Prüfverfahren beziehen, gilt, dass auch Produkte bzw. Prüfverfahren angewandt werden dürfen, die Normen oder sonstigen Bestimmungen und/oder technischen Vorschriften anderer Mitgliedstaaten der Europäischen Union oder der Türkei oder einem EFTA-Staat, der Vertragspartei des EWR-Abkommens ist, entsprechen, sofern das geforderte Schutzniveau in Bezug auf Sicherheit, Gesundheit und Gebrauchstauglichkeit gleichermaßen dauerhaft erreicht wird.

Herausgeber:
Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e. V. – DAfStb
Budapester Straße 31
D-10787 Berlin
Telefon: 030 2693-1320
info@dafstb.de

Der Deutsche Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb) beansprucht alle Rechte, auch das der Übersetzung in fremde Sprachen. Ohne ausdrückliche Genehmigung des DAfStb ist es nicht gestattet, diese Veröffentlichung oder Teile daraus auf fotomechanischem Wege oder auf andere Art zu vervielfältigen.

Vorwort

Diese Richtlinie regelt Verfahren zur Herleitung von Sicherheitsbeiwerten im Massivbau unter Verwendung von Verfahren der Zuverlässigkeitstheorie.

Teil 1 regelt die Grundlagen für zeitinvariante Betrachtungen. Die weiteren Teile der Richtlinie sind in Verbindung mit Teil 1 anzuwenden.

Teil 2 behandelt die Verfahren zur Herleitung von Teilsicherheitsbeiwerten auf der Widerstandsseite bei Entkopplung von Einwirkungs- und Widerstandsseite.

In der Richtlinie wird auf ausführliche Angaben zu technischen Einzelheiten verzichtet. Hierfür wird auf die Erläuterungen zur Richtlinie hingewiesen (siehe DAfStb-Heft 668).

DEUTSCHER AUSSCHUSS FÜR STAHLBETON

DAfStb-Richtlinie

**Verfahren zur Herleitung von Sicherheitsbeiwerten im
Massivbau unter Verwendung probabilistischer Methoden**

Teil 1: Grundlagen für zeitinvariante Betrachtungen

Teil 1: Grundlagen für zeitinvariante Betrachtungen

Inhalt

1	Anwendungsbereich und Anwendungsgrenzen	5
2	Verweisungen auf Normen und sonstige technische Regelwerke.....	6
3	Begriffe, Definitionen, Symbole	6
3.1	Begriffe und Definitionen	6
3.2	Symbole, Abkürzungen und Formelzeichen.....	9
4	Bestimmung der statistischen Parameter der Basisvariablen	10
4.1	Allgemeines	10
4.2	Ermittlung einer geeigneten Verteilungsfunktion	11
4.3	Ermittlung von Ausreißern	14
4.4	Parameterschätzung.....	16
5	Berechnung der Versagenswahrscheinlichkeit	17
5.1	Allgemeines	17
5.2	Level-II-Verfahren	19
5.3	Level-III-Verfahren	19
5.4	Bestimmung der Systemversagenswahrscheinlichkeit	20
6	Vorgehensweise zur Ermittlung von Sicherheitsbeiwerten	21
6.1	Allgemeines	21
6.2	Vorgehen zur Bewertung des Sicherheitsniveaus und Berechnung von Sicherheitsbeiwerten.....	21
	Anhang A: Stochastische Modelle für Basisvariablen (informativ)	26
A.1	Basisvariablen der Widerstandsseite für Stahlbeton	27
A.1.1	Festigkeiten und geometrische Größen	27
A.1.2	Modellunsicherheiten	30
A.2	Basisvariablen auf der Einwirkungsseite (für üblichen Hochbau).....	33
A.2.1	Ständige Einwirkung	33
A.2.2	Veränderliche Einwirkung	33
A.2.3	Modellunsicherheiten der Einwirkungen	35
	Literaturhinweise	36

1 Anwendungsbereich und Anwendungsgrenzen

(1) Diese Richtlinie legt mögliche Vorgehensweisen zur Bewertung des Zuverlässigkeitsniveaus und Berechnung von Sicherheitsbeiwerten mit dem Ziel fest:

- das Zuverlässigkeitsniveau von Bemessungsregeln zu prüfen oder
- die Sicherheitselemente von Bemessungsregeln zur Erzielung des vorgegebenen Zuverlässigkeitsniveaus anzupassen oder
- die Teilsicherheitsbeiwerte für Baustoffe, Bauprodukte oder Bauteile abzuleiten.

(2) Teil 1 der Richtlinie gilt für zeitinvariante Zuverlässigkeitsberechnungen im Massivbau. Die Bewertung der Zuverlässigkeit erfolgt anhand der operativen Versagenswahrscheinlichkeit.

(3) Zur Herleitung von Sicherheitselementen regelt Teil 1 der Richtlinie insbesondere statistische Verfahren und Methoden der Datenauswertung sowie zuverlässigkeitstheoretische Verfahren zur Berechnung der Versagenswahrscheinlichkeit.

(4) Die Anwendung dieser Richtlinie setzt voraus, dass:

- die ausgewerteten Versuche eine nachvollziehbare Versagensart aufweisen;
- unter vergleichbaren definierten Versuchsanordnungen/Randbedingungen getestet wurde;
- die Versuchs- und Messeinrichtungen (ausreichend genau) kalibriert und die Messungenauigkeiten im Vergleich zu den Messgrößen klein sind;
- der Anwender sowohl über vertiefte Kenntnisse für die untersuchten Versagensarten als auch für die Themengebiete der beschreibenden (deskriptive) und mathematischen (induktive) Statistik verfügt.

2 Verweisungen auf Normen und sonstige technische Regelwerke

Die folgenden Dokumente werden in der Richtlinie in solcher Weise in Bezug genommen, dass einige Teile davon oder ihr gesamter Inhalt Anforderungen des vorliegenden Dokuments darstellen. Bei datierten Verweisungen gilt nur die in Bezug genommene Ausgabe. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments (einschließlich aller Änderungen).

DIN EN 1990	Eurocode — Grundlagen der Planung von Tragwerken und geotechnischen Bauwerken
DIN EN 1990/NA	Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter zu DIN EN 1990
DIN EN 1992-1-1	Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Betontragwerken — Teil 1-1: Allgemeine Regeln und Regeln für Hochbauten, Brücken und Ingenieurbauwerke
DIN EN 1992-1-1/NA1	Eurocode 2: Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter zu DIN EN 1992-1-1
Probabilistic Model Code ¹⁾	JCSS Probabilistic Model Code, Teile 1 bis 4

3 Begriffe, Definitionen, Symbole

3.1 Begriffe und Definitionen

3.1.1 Basisvariable

Variable, die eine physikalische Größe beschreibt, mit der Einwirkungen und Umgebungseinflüsse, geometrische Größen und Baustoffeigenschaften einschließlich der Eigenschaft des Baugrunds charakterisiert werden.

ANMERKUNG: Basisvariablen sind streuende Größen und werden bei zeitinvarianten Zuverlässigkeitsberechnungen mathematisch als Zufallsvariablen (auch Zufallsgröße oder stochastische Variable) beschrieben.

3.1.2 Deterministische Größen

Parameter, deren Werte durch eindeutige Bedingungen vollständig bestimmt sind.

ANMERKUNG: Basisvariablen dürfen beispielsweise als deterministische Größen angesetzt werden, wenn ihre quadrierten Wichtungsfaktoren gegenüber den weiteren Größen vernachlässigbar sind (d. h. mindestens eine Zehnerpotenz kleiner als die quadrierten Wichtungsfaktoren der anderen Basisvariablen).

3.1.3 Grenzzustand

Zustand einer Tragstruktur und der auf sie einwirkenden Belastungen, bei deren Überschreitung die Struktur nicht mehr den Bemessungsanforderungen entspricht.

3.1.4 Grenzzustandsgleichung (Grenzzustandsfunktion)

Mathematische Beziehung zur Trennung des akzeptierten Bereichs (Überlebensbereich) von demjenigen, der als Versagen eingestuft wird (Versagensbereich).

ANMERKUNG: Im allgemeinen Fall ist die Grenzzustandsgleichung $r - e = 0$. Hierbei beschreiben r den Tragwiderstand und e die Einwirkungen.

3.1.5 Kalibrierungspunkt

Maßgebendes Parameterfeld, das zur größten Versagenswahrscheinlichkeit führt.

ANMERKUNG: Das Auffinden der maßgebenden Kalibrierungspunkte wird durch systematische Parameterstudien und Erfahrungswerte unterstützt. Ein Beispiel, wie Kalibrierungspunkte im Anwendungsbereich der Grenzzustandsgleichung mithilfe einer Parameterstudie gefunden werden können, wird in Bild 3-1 gegeben.

¹⁾ Bereitgestellt durch JCSS <https://www.jcss-lc.org/jcss-probabilistic-model-code/>.

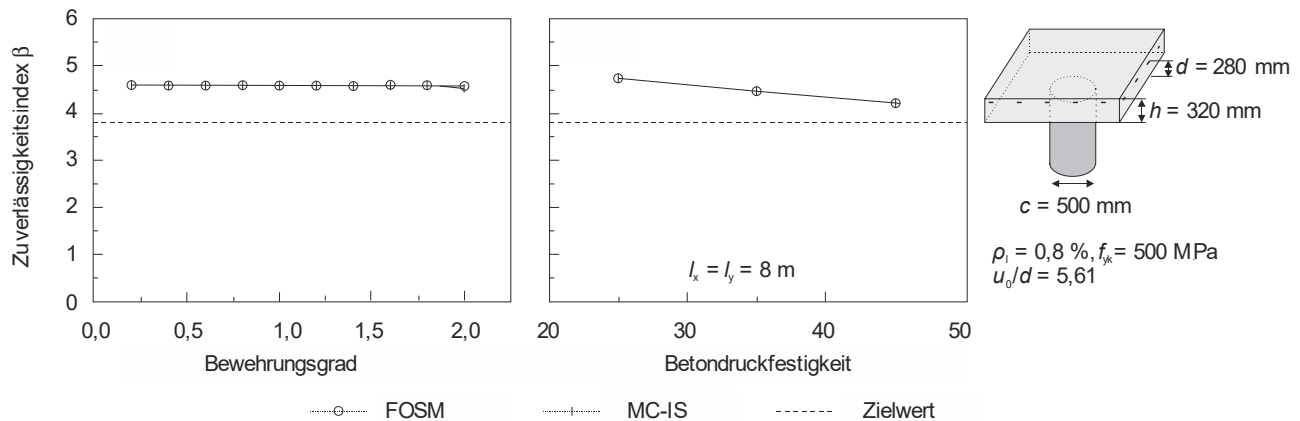


Bild 3-1: Beispiel zur Wahl von Kalibrierungspunkten am Beispiel einer Parameterstudie [1]

3.1.6 Lageparameter (Lagemaße)

Typische Kenngrößen der Stochastik zur Beschreibung der Verteilung einer Zufallsvariablen.

ANMERKUNG: Lageparameter dienen der Beschreibung des „typischen“ Wertes einer Zufallsvariablen. Beispiele sind u. a. der Erwartungswert, der Median und der Modus.

3.1.7 Level-I-Verfahren (Stufe-I-Methode)

Ein Verfahren, das die erforderliche Zuverlässigkeit durch die Verwendung von Teilsicherheitsbeiwerten erreicht.

ANMERKUNG: Diese Teilsicherheitsbeiwerte werden meist in Verbindung mit charakteristischen Werten für die Eingangsgrößen verwendet. Diese Verfahren kommen in der aktuellen Normung zur Anwendung. Das in DIN EN 1990 verwendete Teilsicherheitskonzept (Methode mit Teilsicherheitsbeiwerten) wird als semiprobabilistische Methode bezeichnet und wird den Level-I-Verfahren zugeordnet.

3.1.8 Level-II-Verfahren (Stufe-II-Methode)

Ein Verfahren, das die Versagenswahrscheinlichkeit nur punktuell an der Grenze zwischen Versagens- und Überlebensbereich – die durch die Grenzzustandsgleichung beschrieben wird – überprüft.

ANMERKUNG: Level-II-Verfahren verwenden Näherungen für die nichtlineare Grenzzustandsgleichung und nähern in der einfachsten Form die Verteilungen der Basisvariablen durch eine Normalverteilung an. Als Beispiele sind die First Order Reliability Method (FORM) und die Second Order Reliability Method (SORM) zu nennen. In DIN EN 1990 werden die Level-II-Verfahren als probabilistische Methoden bezeichnet.

3.1.9 Level-III-Verfahren (Stufe-III-Methode)

Ein Verfahren, das die Versagenswahrscheinlichkeit für das Tragwerk oder Bauteil „exakt“ berechnet.

ANMERKUNG: Das Faltungsintegral der Verbundverteilungsdichte im Versagensbereich wird entweder analytisch oder numerisch gelöst. Die vorhandenen statistischen Verteilungen und eventuell vorhandene statistische Abhängigkeiten der Basisvariablen werden berücksichtigt. Simulationsverfahren nach der Monte-Carlo-Methode werden auch zu den Level-III-Verfahren gezählt. In DIN EN 1990 werden die Level-III-Verfahren als vollprobabilistische Methoden bezeichnet.

3.1.10 Sicherheitsbeiwert

Verhältniswert zwischen charakteristischem Wert und Bemessungswert.

3.1.11 Sicherheitselement

Teilsicherheitsbeiwerte, globale Sicherheitsbeiwerte, Vorhaltemaße sowie auf der Einwirkungsseite ggf. zusätzliche Kombinationsbeiwerte.

3.1.12 Sicherheitsformat

Mathematische Beschreibung, wie bei einer Bemessungsaufgabe das geforderte Zuverlässigkeitsniveau eingehalten wird.

ANMERKUNG: In Deutschland wird in der Regel als Sicherheitsformat (bzw. Sicherheitskonzept) für eine Querschnittsbemessung das semiprobabilistische Konzept der Eurocodes mit Teilsicherheitsbeiwerten angewendet.

3.1.13 Statistische Verfahren

Testverfahren oder Methoden, um statistische Aussagen bzw. Hypothesen über Stichproben zu untersuchen.

ANMERKUNG: Im Bauwesen sind grafische und analytische statistische Verfahren wie beispielsweise Anpassungs- oder Ausreißertests zur Untersuchung von Datenmengen üblich.

3.1.14 Stichprobe

Gruppe von Elementen, die zufällig oder nach einem festgelegten Verfahren aus einer größeren Gesamtheit ausgewählt werden und für Prüfzwecke als repräsentativ für die größere Gesamtheit anzusehen sind.

3.1.15 Streuparameter (Streuungsmaße)

Typische Kenngrößen der Stochastik zur Beschreibung der Verteilung einer Zufallsvariablen, welche die im Lagemaß enthaltenen Information ergänzen und Aufschluss über das Abweichungsverhalten geben.

ANMERKUNG: Beispiele sind u. a. die Varianz, die Standardabweichung oder der Variationskoeffizient.

3.1.16 Versagenswahrscheinlichkeit

Operativer Wert zur Quantifizierung der Zuverlässigkeit anhand einer Wahrscheinlichkeit oder als Komplement der Überlebenswahrscheinlichkeit.

3.1.17 Verteilungsdichte (Dichtefunktion)

Wird bezeichnet mit $f_X(x)$ und ist die Ableitung der Verteilungsfunktion. Die Fläche unter der Verteilungsdichte ist gleich 1.

3.1.18 Verteilungsfunktion

Funktion, welche für jedes x die Wahrscheinlichkeit P ermittelt, dass eine Zufallsvariable X nicht größer als x ist: $F_X(x) = P(X \leq x)$.

3.1.19 Wichtungsfaktor (Sensitivitätsfaktor)

Richtungskosinus des geometrischen Zuverlässigkeitsindex β (d. h. des Lotes vom Koordinatenursprung auf die Grenzzustandsgleichung).

ANMERKUNG: Im standardnormalverteilten Raum kann der geometrische Zuverlässigkeitsindex β als Lotabstand vom Koordinatenursprung zur Grenzzustandsgleichung interpretiert werden. Für ein Beispiel mit zwei Zufallsgrößen im standardnormalverteilten Raum ist die geometrische Bedeutung des Zuverlässigkeitsindex und der Wichtungsfaktoren in Bild 3-2 dargestellt. Die Wichtungsfaktoren beschreiben anschaulich den Einfluss der Streuung der zugehörigen Basisvariable auf die Versagenswahrscheinlichkeit.

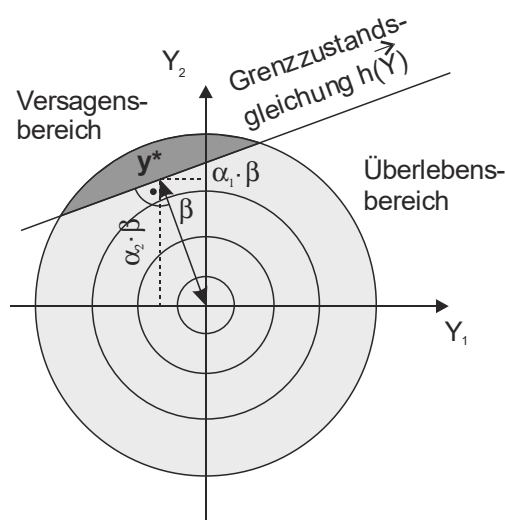


Bild 3-2: Verbundverteilungsdichte der Basisvariablen Y_1 und Y_2 sowie Grenzzustandsgleichung $h(\vec{Y})$ im standardnormalverteilten Raum mit geometrischem Zuverlässigkeitsindex β und Wichtungsfaktoren (adaptiert nach [2])

3.1.20 Zuverlässigkeit

Fähigkeit eines Tragwerks oder eines tragenden Bauteils, die festgelegten Anforderungen während der Nutzungsdauer, für die es bemessen wurde, mit ausreichend hoher Wahrscheinlichkeit zu erfüllen.

ANMERKUNG: Wahrscheinlichkeiten bezeichnen den Grad der Möglichkeit des Eintretens eines Ereignisses.

3.1.21 Zuverlässigkeitsindex

Maß für die Versagenswahrscheinlichkeit, ausgedrückt als Quantilwert der Standardnormalverteilung.

3.2 Symbole, Abkürzungen und Formelzeichen

Die folgenden Symbole, Formelzeichen und Abkürzungen sind für die Anwendung von Teil 1 der Richtlinie erforderlich.

Große lateinische Buchstaben

$F_X(x)$	(kumulative) Verteilungsfunktion
P	Wahrscheinlichkeit
P_f	(operative) Versagenswahrscheinlichkeit
X	Zufallsvariable
$\vec{X}$	Vektor der Basisvariablen

Kleine lateinische Buchstaben

a	Konstante
Δa	Vorhaltemaß
e	Eulersche Zahl
e	Einwirkungs- bzw. Lastseite
$f_X(x)$	Verteilungsdichte (Dichtefunktion)
k	Mindestanzahl von Intervallen
n	Stichprobenumfang
r	Widerstandsseite
x	Realisation der Zufallsvariable X
$\vec{x}^*$	Bemessungsvektor (Koordinaten des Bemessungspunktes)
x_i	i-tes Element der Stichprobe

Griechische Buchstaben

α_i	Wichtungs-/Sensitivitätsfaktoren
α_E	Sensitivität der Einwirkungsseite
α_R	Sensitivität der Widerstandsseite
α	Signifikanzniveau
β	Zuverlässigkeitsindex
ρ_{ij}	Korrelation
Φ^{-1}	inverse kumulative Verteilungsfunktion der Standardnormalverteilung
γ	Teilsicherheitsbeiwert

Abkürzungsverzeichnis

MC	(einfache) Monte-Carlo-Methode
$MCIS$	Monte-Carlo-Methode mit Importance Sampling
$MCSuS$	Monte-Carlo-Methode mit Subset Sampling
MLE	Maximum-Likelihood-Schätzer (engl. Maximum-Likelihood-Estimator)
$\ln()$	Logarithmus zur Basis e (Eulersche Zahl)

4 Bestimmung der statistischen Parameter der Basisvariablen

4.1 Allgemeines

(1) Dieser Abschnitt 4 stellt Regeln, Standardabläufe und allgemeine Empfehlungen für die Berechnung von statistischen Parametern bzw. von stochastischen Modellen für Basisvariablen bereit, die für die Herleitung von Sicherheitsbeiwerten im Massivbau unter Verwendung von Verfahren der Zuverlässigkeitstheorie verwendet werden.

ANMERKUNG: Die Ergebnisse von Software-Tools sind stets kritisch zu hinterfragen.

(2) Die Anwendung von Abschnitt 4 setzt vertiefte Kenntnisse für das Themengebiet der beschreibenden und mathematischen Statistik voraus. Die statistische Analyse von Datensätzen ist mit großer Sorgfalt durchzuführen und umfasst eine kritische Bewertung und die Prüfung auf Plausibilität der Ergebnisse. Bei kleinen Stichprobenumfängen sind für die zu berechnende Versagenswahrscheinlichkeit auf der sicheren Seite liegenden Annahmen zu treffen.

ANMERKUNG: Die für die Basisvariablen gewählten Verteilungen und deren Parameter haben einen Einfluss auf die berechnete Versagenswahrscheinlichkeit und können bei ungeeigneter Wahl zu großen Unterschieden bei der Beurteilung der Zuverlässigkeit von Tragwerken führen.

(3) Neben den in dieser Richtlinie genannten Voruntersuchungen, grafischen Methoden und statistischen Testverfahren sind weitere in der Literatur verfügbar, die ebenfalls dem Stand der Technik entsprechen. Falls diese verwendet werden, ist ihre Eignung zu überprüfen.

(4) Bei der Wahl der statistischen Verteilung sind physikalische Grundsätze zu beachten und ggf. vorliegende Erfahrungen zu berücksichtigen.

(5) Zur Bestimmung der statistischen Verteilungen und deren Parameter für die Basisvariablen sind folgende Schritte erforderlich (siehe Bild 4-1):

1. Voruntersuchungen
2. Ermittlung der Verteilungsfunktion
3. Ermittlung von Ausreißern
4. Parameterschätzung

Die einzelnen Schritte werden nachfolgend erläutert.

(6) Im Allgemeinen sind neben einer Auswertung mit grafischen Verfahren immer analytische Methoden (statistische Tests) zur Datenauswertung durchzuführen. Bei Anwendung der statistischen Testverfahren sind deren Anwendungsgrenzen zu beachten. Für die Anwendung der beschriebenen statistischen Testverfahren sollte die Stichprobe einen Stichprobenumfang $n \geq 8$ haben. In Ausnahmefällen dürfen mit Begründung kleinere Stichprobenumfänge verwendet werden.

ANMERKUNG: Größere Stichprobenumfänge ermöglichen eine Zuordnung der Daten einer Stichprobe zu einer Verteilungsfunktion mit einer höheren Signifikanz, eine eindeutigere Detektion von Ausreißern und reduzieren die "Breite" der Intervallschätzer.

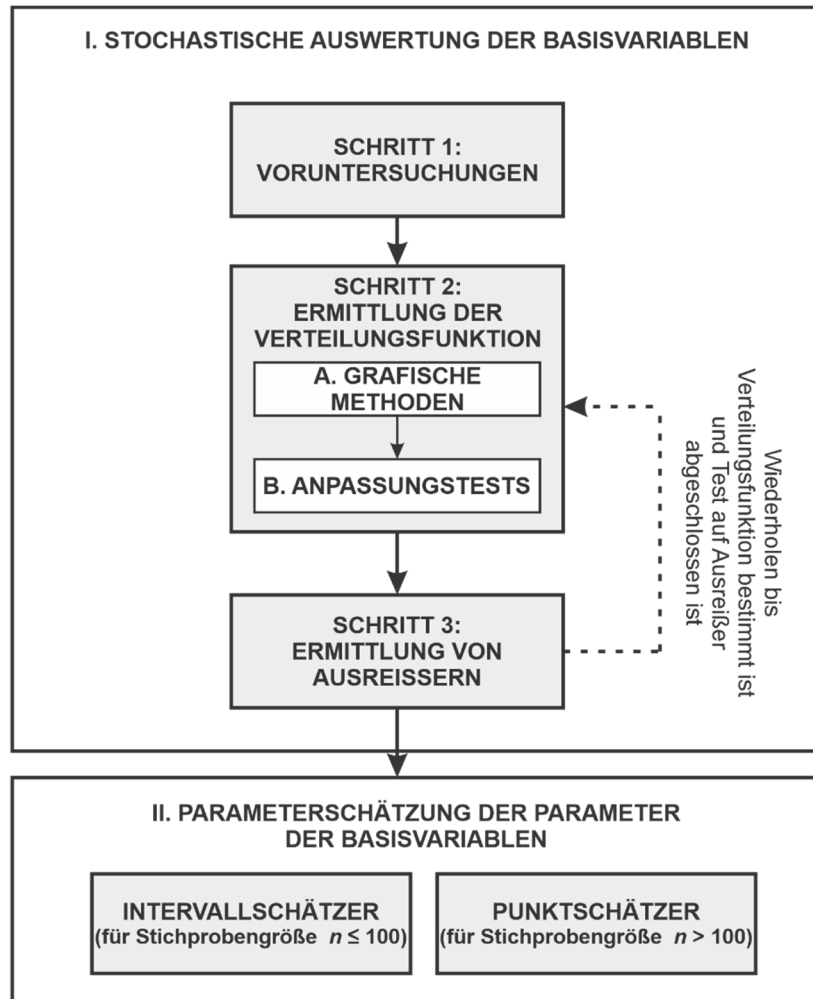


Bild 4-1: Allgemeiner Ablauf der Auswertung von Basisvariablen

4.2 Ermittlung einer geeigneten Verteilungsfunktion

4.2.1 Allgemeines

(1) Die Anpassungsgüte ist mit grafischen Methoden und analytischen Methoden (statistische Testverfahren) nach Bild 4-2 zu bewerten. Bei den grafischen und analytischen Methoden wird zwischen Verfahren für normal- und nichtnormalverteilte Stichproben unterschieden.

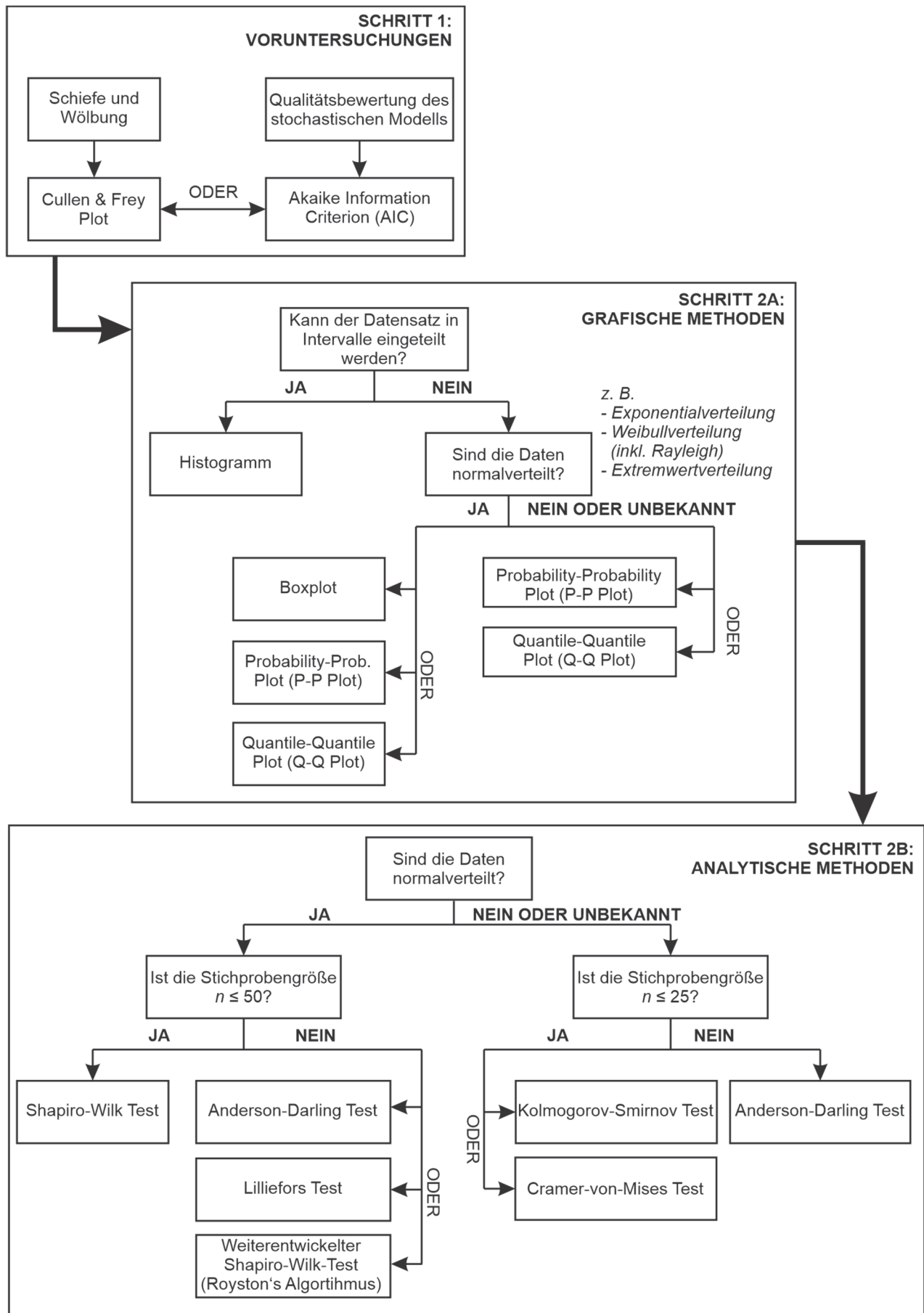


Bild 4-2: Allgemeiner Ablauf für die Auswahl geeigneter Anpassungstests

(2) Wenn die grafischen und analytischen Methoden keine Normalverteilung bestätigen, sollte überprüft werden, ob eine Transformation der Daten zu einer Normalverteilung führt.

ANMERKUNG: Beispiele für häufig verwendete Transformationen von Daten x_i sind:

- $\ln(x_i)$: logarithmieren
- $(x_i)^{1/2}$: Quadratwurzel berechnen
- $1/x_i$: Kehrwert bilden
- $x_i + a$: konstanten Wert a addieren

(3) Zur Auswahl der in Bild 4-2 genannten grafischen und analytischen Methoden wird in Schritt 1 überprüft, ob die Stichprobe durch eine Normalverteilung oder eine andere Verteilung beschrieben werden kann. Dazu dürfen zum Beispiel folgende zwei Verfahren verwendet werden:

- Das *Cullen & Frey*-Diagramm vergleicht die empirische Schiefe und Wölbung der Stichprobe mit der Schiefe und Wölbung von üblichen theoretischen stetigen Verteilungen.
- Das *Akaike*-Informationskriterium bewertet die relative Anpassungsgüte der gewählten Verteilungsfunktionen an die Stichprobe und deren Komplexität, gemessen an der Anzahl an benötigten Verteilungsparametern.

4.2.2 Grafische Methoden

(1) Grafische Methoden liefern grundlegende Informationen (z. B. zur Schiefe) über die empirische Verteilung. Histogramme werden in der Regel verwendet, wenn die Daten in Intervalle unterteilt werden können. Stichproben, die sich nicht in Intervalle einteilen lassen, können mit Quantile-Quantile-Plots (Q-Q-Plots), Probability-Probability-Plots (P-P-Plots) und/oder Boxplots auf Normalverteilung überprüft werden. Bei nicht-normalverteilten Daten können zu der entsprechenden Verteilung passende Q-Q-Plots oder P-P-Plots verwendet werden.

ANMERKUNG: Bei der Erstellung der Histogramme kann die Intervallanzahl näherungsweise zu $\sqrt{n}$ abgeschätzt werden, wobei n die Stichprobengröße ist.

(2) Da grafische Methoden nur eine qualitative visuelle Bewertung der Stichprobenverteilung ermöglichen, sind zusätzlich analytische Methoden (statistische Anpassungstests) für eine statistisch signifikante Bewertung anzuwenden.

4.2.3 Anpassungstests

(1) Um anhand einer vorliegenden Stichprobe auf einen geeigneten statistischen Verteilungstypen zur Beschreibung der Grundgesamtheit zu schließen, sind Anpassungstests durchzuführen.

ANMERKUNG: Statistische Anpassungstests folgen üblicherweise folgender Vorgehensweise:

1. Formulierung einer Null- und Alternativhypothese auf Basis von sinnvollen Annahmen (z. B. Erfahrung, physikalische Plausibilität, Voruntersuchungen)
2. Auswahl der Testmethode
3. Wahl des Signifikanzniveaus α
4. Berechnung der Prüf- bzw. Testgröße
5. Entscheidung, ob die Nullhypothese für das gewählte Signifikanzniveau α anzunehmen oder zu verwerfen ist

(2) Wenn die Anpassungstests die Verwendung von mehr als einem Verteilungstyp mathematisch zulassen und eine eindeutige Auswahl aufgrund der Art der Basisvariablen (z. B. Festigkeiten, geometrische Abmessungen) oder Erfahrungen nicht möglich ist, sollten die verschiedenen Verteilungstypen in der Zuverlässigkeitstheoretischen Berechnung berücksichtigt werden und das Ergebnis, das zur größten Versagenswahrscheinlichkeit führt, verwendet werden.

(3) Der ausgewählte statistische Verteilungstyp ist durch einen oder mehrere Anpassungstests zu überprüfen. Die Anpassungstests sind in Abhängigkeit vom gewählten Verteilungstyp und vom Stichprobenumfang zu wählen. Geeignete Anpassungstests sind in Bild 4-2 aufgeführt. In den Anpassungstests ist in der Regel mit einem Konfidenzniveau von $(1 - \alpha) = 95\%$ zu bestätigen, dass die Nullhypothese „Die Stichprobe gehört zu einer Grundgesamtheit eines bestimmten theoretischen Verteilungstyps.“ nicht verworfen werden kann.

(4) Wenn mehr als ein statistischer Test nach Bild 4-2 anwendbar ist, sind mindestens zwei der Tests zu verwenden, um einen geeigneten Verteilungstypen auszuwählen.

(5) Bei normalverteilten Daten sollte für Stichprobengrößen $n > 50$ der *Anderson-Darling-Test*, der *Lilliefors-Test* oder der erweiterte *Shapiro-Wilk-Test* verwendet werden, für kleinere normalverteilte Stichprobengrößen $n \leq 50$ der *Shapiro-Wilk-Test* oder der erweiterte *Shapiro-Wilk-Test*.

(6) Für nicht normalverteilte Daten mit Stichprobengrößen $n > 25$ sollte der *Anderson-Darling-Test* verwendet werden, für Stichprobengrößen $n \leq 25$ der *Kolmogorov-Smirnov-Test* oder der *Cramér-von-Mises-Test*.

(7) Für große Stichprobenumfänge, die sich in gleichbreite Intervalle einteilen lassen, kann der Anwender alternativ zu den Empfehlungen aus Bild 4-2 einen Test aus der Chi-Quadrat-Testfamilie auswählen, um einen geeigneten theoretischen Verteilungstypen zur Beschreibung der zu einer Stichprobe gehörenden Grundgesamtheit zu finden.

ANMERKUNG 1: Die Intervallanzahl kann näherungsweise zu $\sqrt{n}$ für $30 \leq n \leq 400$ und zu 20 für $n > 400$ abgeschätzt werden, wobei n die Stichprobengröße ist.

ANMERKUNG 2: Für weitergehende Informationen zum Thema Anpassungstests wird auf die folgende Literatur verwiesen ([4], [5], [6], [7]).

4.3 Ermittlung von Ausreißern

(1) Messwerte sind darauf zu untersuchen, ob Sie für die untersuchte Versagensart plausibel sind und ob sie mit ausreichender Wahrscheinlichkeit zu einer Grundgesamtheit zusammengefasst werden können.

ANMERKUNG: Einzelne Ausreißer können die Ergebnisse von Parameterschätzungen oder statistischen Tests signifikant beeinflussen.

(2) Zur ersten qualitativen Beurteilung, ob Ausreißer in der Stichprobe vorhanden sind, können die grafischen Verfahren aus Schritt 2A (vgl. Abschnitt 4.2 bzw. Bild 4-2) verwendet werden. Ein P-P-Diagramm, ein Boxplot-Diagramm, ein Streudiagramm oder ein Histogramm kann alle offensichtlich abweichenden Punkte aufzeigen. Da grafische Methoden nur eine qualitative visuelle Detektion der Ausreißer vornehmen, sind zusätzlich analytische Ausreißertests zur quantitativen Bewertung durchzuführen.

ANMERKUNG: Neben den rein grafischen Methoden können zur qualitativen Detektion von Ausreißern ergänzend die Residuen einer Regressionsanalyse verwendet werden.

(3) Um Ausreißer in einer Stichprobe zu identifizieren, sind Ausreißertests durchzuführen.

ANMERKUNG: Für die Detektion von möglichen Ausreißern ist grundsätzlich folgende Vorgehensweise zu wählen:

1. Formulierung einer Null- und Alternativhypothese
2. Auswahl einer geeigneten Testmethode in Abhängigkeit der angenommenen Verteilungsfunktion und der Stichprobengröße
3. Wahl des Signifikanzniveaus α
4. Berechnung der Prüf- bzw. Testgröße
5. Entscheidung, ob die Nullhypothese für das gewählte Signifikanzniveau α anzunehmen oder zu verwerfen ist

(4) Für die detektierten Ausreißer ist zu prüfen, ob ein Fehler in den Daten vorliegt. Lässt sich der Ausreißer auf einen Fehler zurückführen, sollte das Stichprobenelement gelöscht werden, es sei denn der fehlerhafte Wert lässt sich korrigieren. Lässt sich der Ausreißer nicht auf einen Fehler zurückführen, darf das Stichprobenelement nur nach vorheriger sorgfältiger Prüfung gelöscht werden. Das Löschen von Ausreißern ist zu begründen und zu dokumentieren.

(5) Geeignete analytische Ausreißertests in Abhängigkeit bestimmter Kriterien (z. B. Verteilungstyp, Stichprobenumfang) sind Bild 4-3 zu entnehmen.

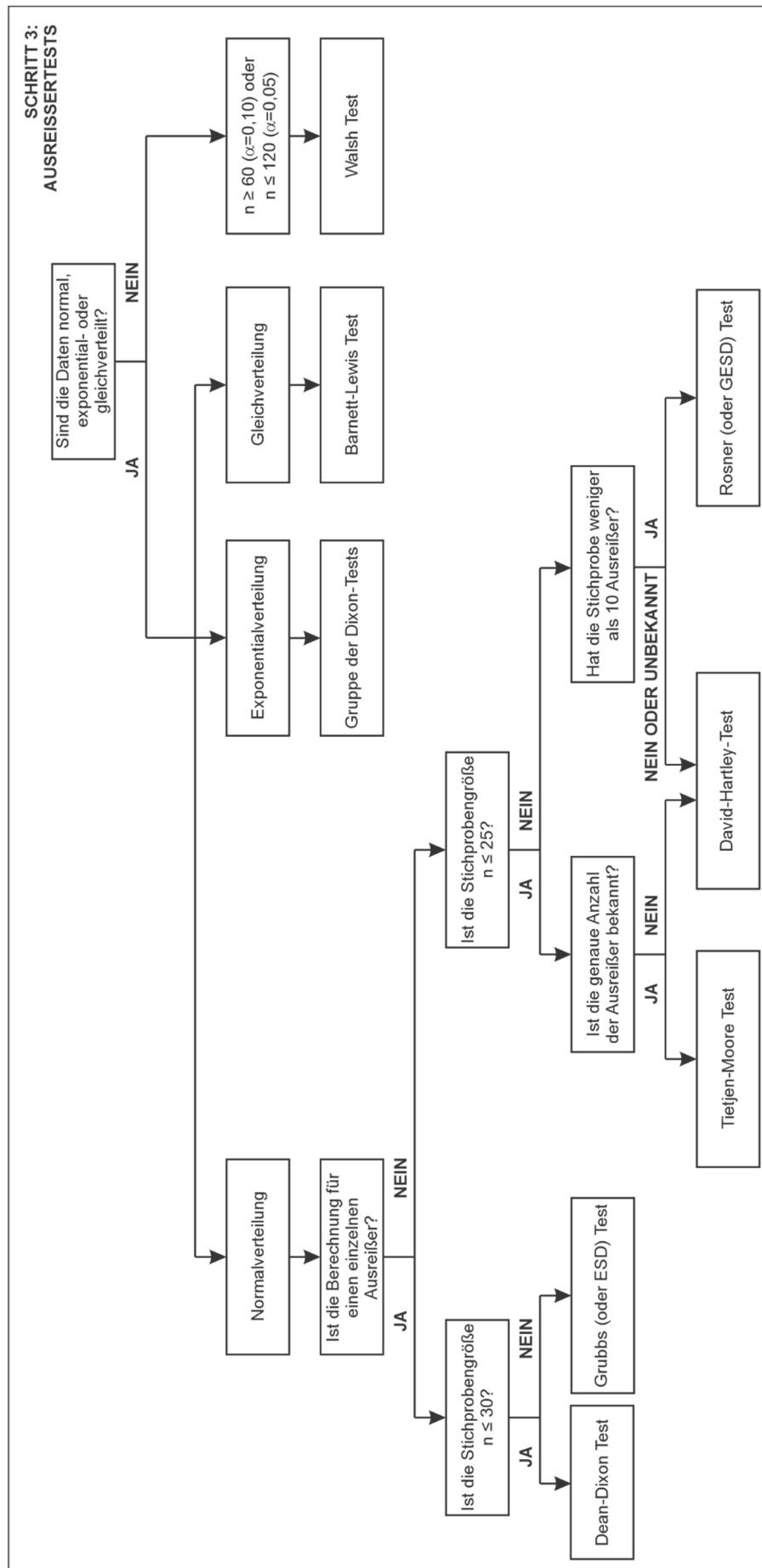


Bild 4-3: Zusammenstellung geeigneter Ausreißertests mit zugehörigen Kriterien

(6) Wenn die grafischen und analytischen Methoden keine Normalverteilung bestätigen, sollte überprüft werden, ob eine Transformation der Daten zu einer Normalverteilung führt.

ANMERKUNG: Beispiele für häufig verwendete Transformationen von Daten x_i sind:

- $\ln(x_i)$: logarithmieren
- $(x_i)^{1/2}$: Quadratwurzel berechnen
- $1/x_i$: Kehrwert bilden
- $x_i + a$: konstanten Wert a addieren

(7) Bei normalverteilten Stichproben sind die statistischen Tests zur Erkennung von Ausreißern in Abhängigkeit der Stichprobengröße auszuwählen.

(8) Für exponentialverteilte Stichproben sollte ein Test aus der Gruppe der *Dixon*-Tests, und für gleichverteilte Stichproben sollte der *Barnett-Lewis*-Test verwendet werden.

(9) Für Stichproben mit einer unbekannten Verteilung bzw. für Datenreihen, die einer Verteilung folgen, für die kein spezifischer Ausreißertest verfügbar ist, sollte der *Walsh*-Test verwendet werden.

ANMERKUNG: Für die Anwendung des *Walsh*-Tests ist eine große Stichprobengröße erforderlich. Für die Erreichung eines Konfidenzniveaus von $1 - \alpha = 95\%$ ist ein Stichprobenumfang von mindestens $n_{\min} = 220$ erforderlich.

4.4 Parameterschätzung

(1) Bei der Parameterschätzung werden anhand einer Stichprobe die Verteilungsparameter der Grundgesamtheit geschätzt (d. h. näherungsweise ermittelt). Es wird zwischen Punkt- und Intervallschätzern unterschieden.

(2) In der Regel sind Maximum-Likelihoodschätzer (MLE) zu verwenden, da sie bei gleichem Stichprobenumfang Schätzwerte ermitteln, die näher an den Parametern der Grundgesamtheit liegen als die der anderen Methoden (z. B. Momentenmethode, Methode der kleinsten Quadrate).

ANMERKUNG: Für normalverteilte Daten sind die MLE und die Schätzer der Momentenmethode identisch.

(3) Im Rahmen der Zuverlässigkeitsanalyse sind für Stichproben mit $n \leq 100$ einseitige Intervallschätzer (einseitige Konfidenzintervalle) für ein Konfidenzniveau von $1 - \alpha = 95\%$ für die Schätzung der Verteilungsparameter zu verwenden, da die Verwendung einer einfachen Punktschätzung bei kleinen Stichprobengrößen dazu führen kann, dass in der anschließenden Zuverlässigkeitsanalyse die Versagenswahrscheinlichkeit unterschätzt wird.

ANMERKUNG 1: Hiervon zu unterscheiden ist das bei der Berechnung von charakteristischen Werten verwendete Konfidenzniveau, das zum Beispiel bei der nachträglichen Bewertung von Bauwerken oder bei Konformitätskontrollen abweichend $1 - \alpha = 75\%$ betragen kann.

ANMERKUNG 2: Die üblichen Gleichungen zur Berechnung von Konfidenzintervallen gelten strenggenommen nur für normalverteilte Stichproben. Die Konfidenzintervalle sind jedoch relativ robust gegenüber dieser Annahme, das heißt, bei Vorliegen von Stichproben mit nur einer geringen Abweichung von der Normalverteilung ist der Fehler gering (es sind in diesem Fall Konfidenzniveaus von 93 % bis 94% anstelle der geforderten 95 % zu erwarten).

(4) Bei der Schätzung der Lage- und Streuparameter sind für Stichproben mit $n \leq 100$ einseitige Intervallschätzer zu verwenden. Es sind in der Regel die Intervallgrenzen zu wählen, die zu einer größeren Versagenswahrscheinlichkeit führen.

ANMERKUNG: Die Intervallschätzer sind auch für Stichproben mit $n > 100$ geeignet.

5 Berechnung der Versagenswahrscheinlichkeit

5.1 Allgemeines

(1) Die Beschreibung des Zuverlässigkeitsniveaus erfolgt durch die Versagenswahrscheinlichkeit P_f . In der Regel wird der Zuverlässigkeitsindex β zur Beschreibung der Versagenswahrscheinlichkeit P_f verwendet. Der Zuverlässigkeitsindex β berechnet sich wie folgt:

$$\beta = -\Phi^{-1}(P_f) \quad (5-1)$$

wobei Φ^{-1} die inverse kumulative Verteilungsfunktion der Standardnormalverteilung ist.

ANMERKUNG: Da der Zusammenhang zwischen dem Zuverlässigkeitsindex und der Versagenswahrscheinlichkeit stark nichtlinear ist, führen bereits geringe Unterschiede des Zuverlässigkeitsindex zu einer großen Änderung der Versagenswahrscheinlichkeit.

(2) Bei nichtlinearen Grenzzustandsgleichungen können Verfahren nach Level II und Level III zu unterschiedlichen Zuverlässigkeitsindizes (bzw. Versagenswahrscheinlichkeiten) führen. In diesem Fall sind die Ergebnisse der Level-III-Verfahren zu verwenden.

(3) Diese Richtlinie legt Kriterien zur Ableitung von Sicherheitselementen fest. Die Zielwerte des Zuverlässigkeitsindex β sind in Abhängigkeit vom Anwendungsfall festzulegen oder aus einschlägigen Regelwerken (z. B. DIN EN 1990) zu übernehmen. Dabei sind spezifische Bedingungen für den jeweiligen Anwendungsfall zu berücksichtigen (z. B. Optimierung hinsichtlich Ressourceneffizienz und Wirtschaftlichkeit, erforderliche Aufwendungen zur Risikominimierung).

(4) Zur Unterscheidung der verschiedenen Verfahren zur Berechnung der Versagenswahrscheinlichkeit bzw. des Zuverlässigkeitsindex werden drei Level definiert:

- Level-III-Verfahren: Bei diesen Verfahren wird die Versagenswahrscheinlichkeit für das Tragwerk oder Bauteil „exakt“ berechnet, d. h. das Faltungsintegral wird entweder analytisch oder numerisch gelöst. Die genauen Verteilungen und eventuell vorhandene stochastische Abhängigkeiten der Zufallsgrößen werden berücksichtigt. Simulationsverfahren (z. B. nach der Monte-Carlo-Methode) werden auch zu den Level III-Verfahren gezählt.
- Level-II-Verfahren: Die Grenzzustandsgleichung wird im Bemessungspunkt linearisiert (FORM) oder durch eine quadratische Funktion (SORM) angenähert, um die Integration über den Versagensbereich zu vereinfachen. Level-II-Verfahren nähern die Verteilungen der Zufallsgrößen durch eine Normalverteilung an.
- Level-I-Verfahren: Der Zielwert der Versagenswahrscheinlichkeit bzw. des Zuverlässigkeitsindex wird durch die Verwendung von Sicherheitselementen erreicht. Die Sicherheitselemente sollten mit Level-II- oder Level-III-Verfahren kalibriert werden. Das semi-probabilistische Sicherheitskonzept der Eurocodes ist den Level-I-Verfahren zuzuordnen.

(5) Bild 5-1 gibt einen beispielhaften Überblick über verschiedene Verfahren nach Level II und Level III, die zur Berechnung der Versagenswahrscheinlichkeit verwendet werden dürfen.

(6) In dieser Richtlinie werden Verfahren nach Level II und Level III zur Kalibrierung von Sicherheitselementen für Bemessungsnormen und -richtlinien (z. B. Eurocodes) verwendet.

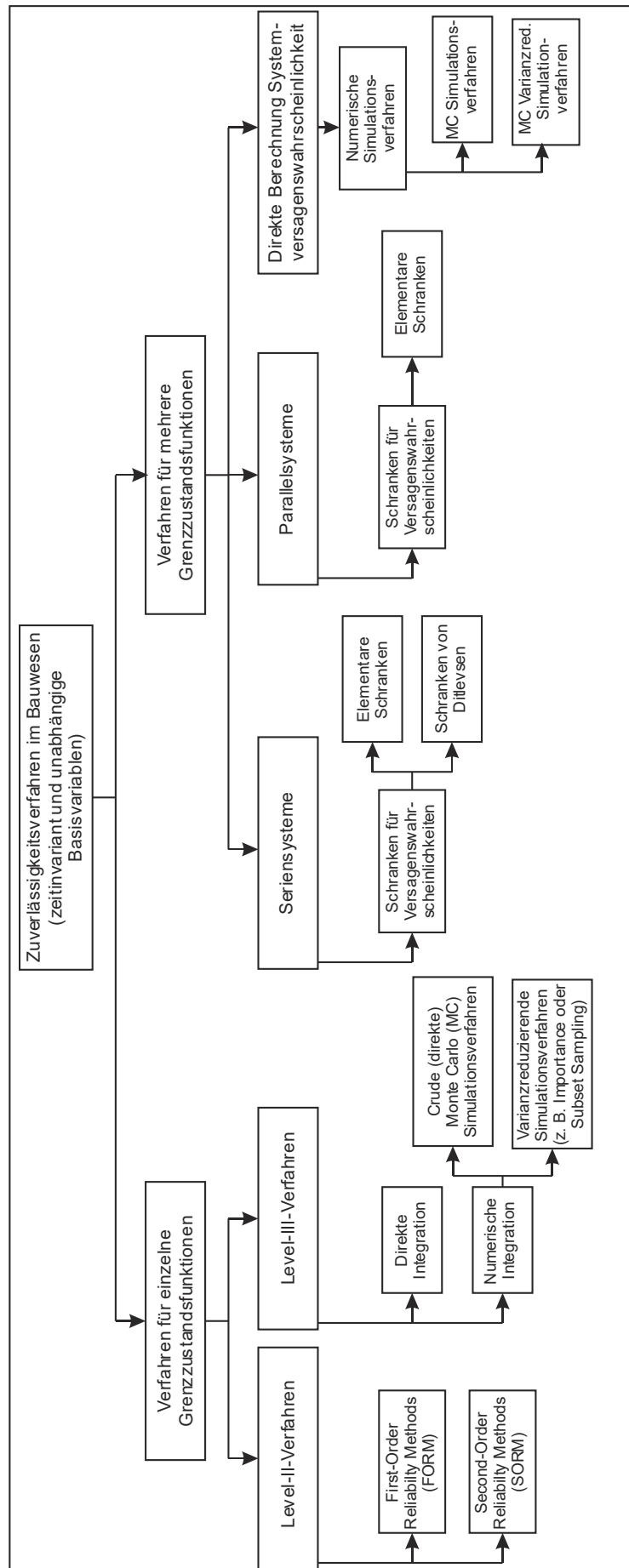


Bild 5-1: Übersicht der Verfahren zur Berechnung der Versagenswahrscheinlichkeit

5.2 Level-II-Verfahren

(1) Berechnungen, die mit Näherungsverfahren nach Level II durchgeführt wurden, sind stichprobenartig mit Level-III-Verfahren zu verifizieren. Das Level-II-Verfahren gilt als geeignet, wenn der ermittelte Zuverlässigkeitsindex nicht mehr als 2,5 % größer ist als der mit einem Level-III-Verfahren ermittelte Wert.

(2) Insbesondere im Fall einer nichtlinearen Grenzzustandsgleichung kann es zielführend sein, eine SORM-Methode anstatt einer FORM-Methode zu verwenden, da die SORM-Methode die Krümmung der Grenzzustandsgleichung berücksichtigt. Dadurch ist es ggf. möglich eine deutlich rechenintensivere Berechnung mit einem Level-III-Verfahren zu vermeiden.

ANMERKUNG: Die bekannteste SORM-Methode ist der Ansatz nach *Breitung* [3], jedoch führen andere Methoden (Ansatz nach *Hohenbichler* [8], *Tvedt* [9]) ebenfalls zu validen Ergebnissen.

(3) Für die Berechnung des Zuverlässigkeitsindex (bzw. der Versagenswahrscheinlichkeit) wird die MVFOSM-Methode nicht empfohlen, da diese beispielsweise für nichtlineare Grenzzustandsgleichungen nicht invariant gegenüber der mathematischen Formulierung ist. Deshalb sind erweiterte FORM-Methoden nach z. B. *Hasofer/Lind* [10] zu verwenden.

ANMERKUNG 1: Nur für den Sonderfall einer linearen Grenzzustandsgleichung und normalverteilten Basisvariablen berechnen die MVFOSM-Methoden den Zuverlässigkeitsindex (bzw. die Versagenswahrscheinlichkeit) exakt. Hingegen ergibt sich z. B. bei Anwendung der MVFOSM-Methoden für die Grenzzustandsgleichung $x_1^2 + x_2^2 = 0$ und für die mathematisch identische Grenzzustandsgleichung $x_1^2/x_2^2 + 1 = 0$ jeweils ein anderer Zuverlässigkeitsindex.

ANMERKUNG 2: Erweiterte FORM-Methoden wurden von *Hasofer/Lind* in [10] beschrieben.

(4) Nichtnormalverteilte Basisvariablen können durch eine Normalverteilung angenähert werden. Dazu sind im Bemessungspunkt $\vec{x}^*$ die Verteilungsdichte sowie die Verteilungsfunktion der nichtnormalverteilten und der in eine Normalverteilung transformierten Basisvariablen gleichzusetzen. Für kleine Versagenswahrscheinlichkeiten liegt der Bemessungspunkt $\vec{x}^*$ im Bereich der Verteilungsschwänze. Dort ergibt sich meist eine ausreichend gute Annäherung durch die Normalverteilung (siehe Bild 5-2).

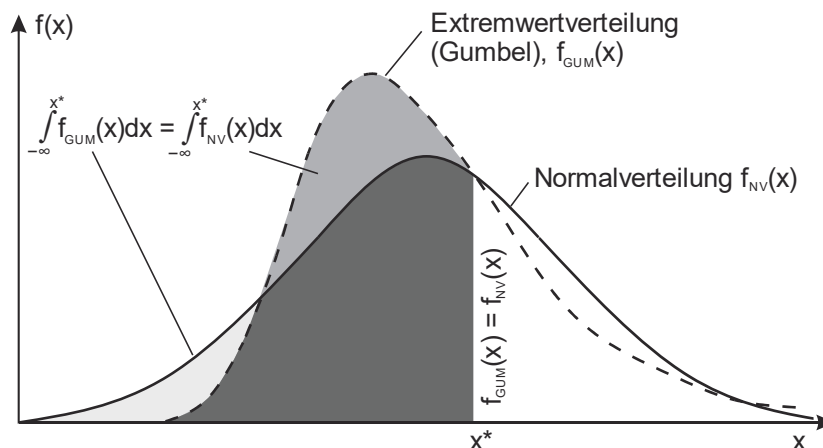


Bild 5-2: Annäherung einer beliebigen Verteilung durch eine Normalverteilung, sodass im Bemessungspunkt die Verteilungsdichten und -funktionen übereinstimmen

ANMERKUNG: Für weitere Informationen zu Abschnitt 4 wird auf die Literatur [1], [2], [8], [9], [13] verwiesen.

5.3 Level-III-Verfahren

(1) Bei nichtlinearen Grenzzustandsgleichungen, deren Versagenswahrscheinlichkeit mit einem Level-II-Verfahren nicht ausreichend genau berechnet werden kann, sind Level-III-Verfahren anzuwenden, da diese das Faltungsintegral exakt lösen oder sich der exakten Lösung annähern. Die Faltungsintegrale können analytisch oder numerisch gelöst werden.

(2) Bei ausreichend großer Simulationsanzahl ist die einfache bzw. direkte Monte-Carlo-Methode (auch Monte-Carlo-Simulation bzw. Monte-Carlo-Integration) zur Berechnung der Versagenswahrscheinlichkeit geeignet. Die Simulationsanzahl ist dann ausreichend groß, wenn sich für die berechnete Versagenswahrscheinlichkeit als Maß für die Genauigkeit der Schätzung ein Variationskoeffizient $\leq 2,5 \%$ ergibt, da dann mit keiner signifikanten Änderung des zugehörigen Zuverlässigkeitsindex mehr zu rechnen ist.

(3) Die Effizienz der einfachen bzw. direkten Monte-Carlo-Methode kann durch sogenannte Varianzreduktionsverfahren signifikant verbessert werden (beispielhaft sind zwei übliche Verfahren in Bild 5-1 dargestellt).

(4) Um die Monte-Carlo-Methode mit Importance Sampling (MCIS) zu verwenden, sind die Koordinaten des Bemessungspunktes $\vec{x}^*$ vorab mit Level-II-Verfahren zu bestimmen.

ANMERKUNG: Die Grundidee des Verfahrens MCIS ist, die Simulation nicht wie bei der einfachen MC-Methode im relativ uninteressanten Bereich in der Umgebung der Erwartungswerte der Basisvariablen, sondern im relevanten Bereich in der Nähe des Bemessungspunktes $\vec{x}^*$ durchzuführen.

(5) Das Verfahren Monte-Carlo-Methode mit Subset Sampling (MCSuS) ist ein stochastisches Simulationsverfahren, das insbesondere zur effizienten Berechnung von den im Bauwesen üblichen kleinen Versagenswahrscheinlichkeiten geeignet ist und im Gegensatz zum MCIS keine Vorinformationen aus Level-II-Verfahren benötigt.

ANMERKUNG 1: Die Grundidee besteht darin, eine Reihe von kleineren Zuverlässigkeitsproblemen zu lösen. Im Zuge des Subset-Samplings werden bedingte Ereignisse mit höherer Versagenswahrscheinlichkeit getrennt bewertet. Anschließend werden sie als Produkt der bedingten Wahrscheinlichkeiten kombiniert, wobei sich der Ansatz auch für hochdimensionale Probleme eignet.

ANMERKUNG 2: Für weitere Informationen zum Abschnitt 5.3 wird auf die Literatur [3], [8], [9], [13] verwiesen.

(6) Die Anwendung der Monte-Carlo-Methode ist mehrmals zu wiederholen, dabei sind mindestens 5 Berechnungsläufe (engl. runs) zur Ermittlung des Zuverlässigkeitsindex β durchzuführen. Anschließend ist für den Mittelwert der Simulationsergebnisse (Zuverlässigkeitsindex β) ein nach unten begrenztes einseitiges Konfidenzintervall mit einem Konfidenzniveau von $1 - \alpha = 95 \%$ zu berücksichtigen. Die Anzahl der Wiederholungen ist (in der Regel) dann ausreichend, wenn die Differenz zwischen der unteren Grenze des Konfidenzintervalls und dem Mittelwert der berechneten Zuverlässigkeitsindizes $\leq 5 \%$ ist.

ANMERKUNG: In der Regel sind weniger als 20 Berechnungsläufe (engl. runs) erforderlich, um das Kriterium von 5 % einzuhalten.

(7) Für die Monte-Carlo-Methode ist ein Zufallszahlengenerator zu verwenden, der über eine ausreichend große Periodenlänge (mindestens 10^{10}) verfügt und stochastisch unabhängige (Pseudo-)Zufallszahlen errechnet. Für jeden Berechnungslauf sind unterschiedliche Startwerte (engl. seeds) zu verwenden. Der verwendete Zufallszahlengenerator ist zusammen mit den Eingangswerten des Zufallszahlengenerators (z. B. Periodenlänge, Startwerte) zu dokumentieren.

5.4 Bestimmung der Systemversagenswahrscheinlichkeit

(1) Falls mehr als ein Versagensmodus existiert (d. h. mehr als eine Grenzzustandsgleichung zu berücksichtigen ist), kann vereinfacht eine Versagenswahrscheinlichkeit für die Grundtypen Serien- und Parallelsystem sowie Kombinationen daraus berechnet werden (vgl. Bild 5-1).

ANMERKUNG: Ein Beispiel für ein Seriensystem ist das Durchstanzversagen einer Platte mit Durchstanzbewehrung. Es sind drei Grenzzustandsgleichungen für das Versagen innerhalb ($\tau_{Rd,cs}$) und außerhalb ($\tau_{Rd,c,out}$) der durchstanzbewehrten Zonen sowie auf Maximaltragfähigkeitsniveau ($\tau_{Rd,max}$) am Stützenanschnitt zu definieren. Der kleinste Tragwiderstand ist maßgebend für die Bemessung und das schwächste Glied des Seriensystems bestimmt die Versagenswahrscheinlichkeit. Weitere Beispiele für ein Parallelsystem und ein gemischtes System (Kombination) finden sich im DAfStb-Heft 668 zur Richtlinie.

(2) Das Verfahren der Elementaren Schranken und die Schranken nach *Ditlevsen* können für eine auf der sicheren Seite liegende Schätzung der Systemversagenswahrscheinlichkeiten genutzt werden.

ANMERKUNG 1: Elementare Schranken sind rechnerisch einfach zu ermitteln und berücksichtigen die beiden Extremfälle einer vollständigen Korrelation ($\rho_{ij}=1$) und keiner Korrelation ($\rho_{ij}=0$) zwischen den Versagensarten. Die *Ditlevsen*-Schranken zweiter Ordnung berücksichtigen mit dem Korrelationskoeffizienten ρ_{ij} die Abhängigkeiten zwischen den Versagensarten.

ANMERKUNG 2: In der Literatur sind weitere Schranken zur Abschätzung der Systemversagenswahrscheinlichkeiten beschrieben.

(3) Simulationsverfahren können angewendet werden, um die Systemversagenswahrscheinlichkeiten für das gewählte Modell exakt zu bestimmen.

ANMERKUNG 1: Beispiele für geeignete Simulationsverfahren sind eine direkte Monte-Carlo-Methode oder eine angepasste Monte-Carlo-Methode mit Varianzreduktion (insbesondere die MCSuS).

ANMERKUNG 2: Für weitere Informationen wird beispielsweise auf die Literatur von Spaethe, Ditlevsen, Melchers, Sørensen, ([2], [11], [12], [14]) verwiesen.

6 Vorgehensweise zur Ermittlung von Sicherheitsbeiwerten

6.1 Allgemeines

(1) Eine ausreichende Zuverlässigkeit von Tragwerken und Bauteilen wird im Allgemeinen durch den Ansatz von Sicherheitselementen nachgewiesen. Unter Sicherheitselementen versteht diese Richtlinie Teilsicherheitsbeiwerte, globale Sicherheitsbeiwerte, Vorhaltemaße sowie auf der Einwirkungsseite ggf. zusätzliche Kombinationsbeiwerte.

(2) Dieser Abschnitt regelt das allgemeine Vorgehen zur Ermittlung von Teilsicherheitsbeiwerten, globalen Sicherheitsbeiwerten und Vorhaltemaßen (Δa in DIN EN 1990) unter Vorgabe eines Zielwerts für das Zuverlässigkeitsniveau.

ANMERKUNG: In den Eurocodes wird üblicherweise das Nachweiskonzept mit Teilsicherheitsbeiwerten in Kombination mit charakteristischen und repräsentativen Werten verwendet. Geometrische Abweichungen werden teilweise durch additive Sicherheitselemente (z. B. Vorhaltemaß der Betondeckung) berücksichtigt. Für spezielle Anwendungen (z. B. nichtlineare Verfahren, Berechnung von Bauteilen nach Theorie II. Ordnung) sind auch Teilsicherheitsbeiwerte für den Systemwiderstand (γ_R nach E DIN EN 1992-1-1/NA1:2025-08, Anhang F) zulässig.

6.2 Vorgehen zur Bewertung des Zuverlässigkeitsniveaus und Berechnung von Sicherheitsbeiwerten

(1) Bild 6-1 gibt das Vorgehen zur Bewertung des Zuverlässigkeitsniveaus von bestehenden Bemessungsregeln oder zur Berechnung von Sicherheitsbeiwerten wieder.

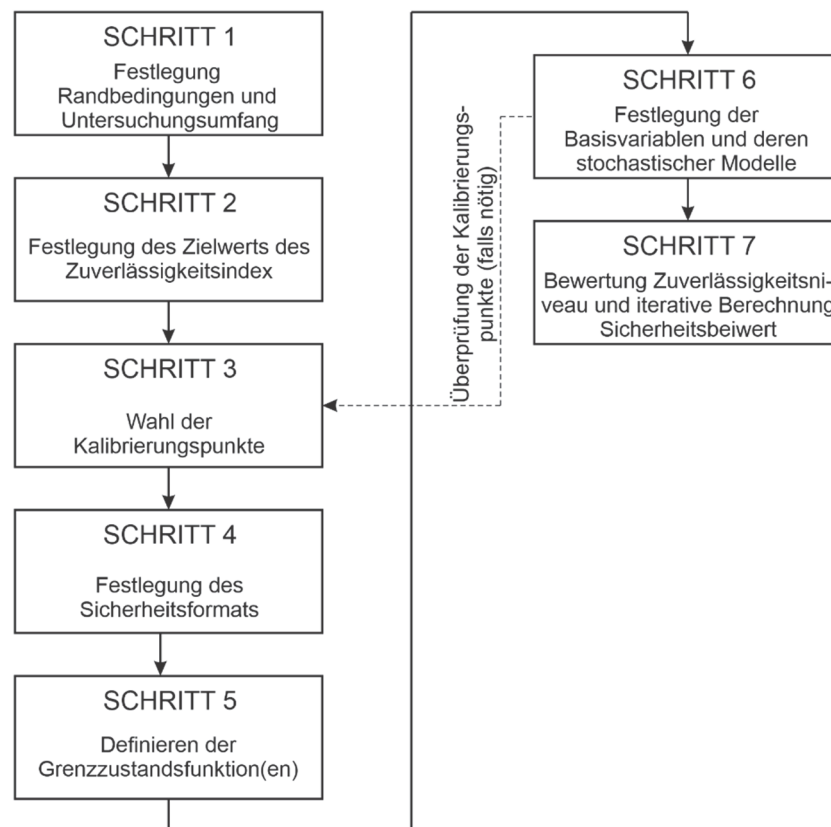


Bild 6-1: Siebenschrittiges Vorgehen zur Berechnung von Sicherheitsbeiwerten

(2) In Schritt 1 sind die Randbedingungen sowie der Untersuchungsumfang festzulegen. Hierzu gehören insbesondere:

- Arten des Nachweises und der Grenzzustände (z. B. Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT), Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (GZG))
- Bezugszeitraum (z. B. 1 Jahr oder 50 Jahre)
- ständige Einwirkungen (z. B. Eigengewicht, Ausbaulast)
- veränderliche Einwirkungen (z. B. infolge von Schnee, Wind, Nutzung, Temperatur)
- mögliche Einwirkungskombinationen (z. B. ständige und vorübergehende im GZT, seltene im GZG)
- Baustoffe (z. B. Festigkeiten, Eigenschaften, Spannungs-Dehnungslinien)
- Geometrie (z. B. Abmessungen, statische Nutzhöhe)
- Festlegung der Versagensmodi für Bauteile und ggf. Tragwerke (z. B. Biegeversagen, Querkraftversagen, kombiniertes Versagen (Berücksichtigung über eine Systemversagenswahrscheinlichkeit))
- Bemessungsansatz (z. B. Querkrafttragfähigkeit ohne Querkraftbewehrung)

(3) In Schritt 2 ist der Zielwert des Zuverlässigkeitsindex nach Abschnitt 5.1 festzulegen.

(4) In Schritt 3 sind für den Anwendungsbereich die Kombinationen der Basisvariablen und ggf. weiterer als deterministisch angenommene Größen der Einwirkungs- und Widerstandsseite als Kalibrierungspunkte zu bestimmen, für die sich der minimale Zuverlässigkeitsindex bzw. die größte Versagenswahrscheinlichkeit ergeben.

ANMERKUNG: Durch Eingrenzung auf die maßgebenden Kalibrierungspunkte wird der Rechenaufwand reduziert.

(5) Das Auffinden der maßgebenden Kalibrierungspunkte wird durch systematische Parameterstudien und Erfahrungswerte unterstützt. Falls die maßgebenden Kalibrierungspunkte nicht eindeutig bestimmt werden können, sind im Grenzfall die Zuverlässigkeitsindizes aller theoretisch möglichen Parameterkombinationen im Anwendungsbereich der Bemessungsgleichungen zu untersuchen.

(6) In Schritt 4 ist das zugrundeliegende Sicherheitsformat festzulegen.

(7) In Schritt 5 sind die Grenzzustände und deren Grenzzustandsgleichung(en) festzulegen.

ANMERKUNG: Die Grenzzustandsgleichung kann durch eine oder mehrere Gleichungen oder durch eine aufwendigere analytische bzw. numerische Berechnung (z. B. Finite-Elemente-Methode) beschrieben werden.

(8) In Schritt 6 sind die stochastischen Modelle der Basisvariablen festzulegen. Hierfür sind die unbekannten Unsicherheiten bei der Schätzung der statistischen Parameter für die Verteilungsfunktion zu berücksichtigen (siehe Abschnitt 4.4 (3)). Die Verteilungsparameter können entweder aus verfügbaren Daten abgeleitet (siehe Abschnitt 4) oder aus dem Anhang A bzw. weiterer Literatur entnommen werden.

ANMERKUNG: Weitere Angaben zu im Bauwesen typischen Basisvariablen sind z. B. im *JCSS Probabilistic Model Code* enthalten.

(9) In Schritt 7 ist die Bewertung des Zuverlässigkeitsniveaus durch einen Vergleich des berechneten Zuverlässigkeitsindex (oder der Versagenswahrscheinlichkeit) mit einem vorgegebenen Zielwert (z. B. $\beta_{t=50a} = 3,8$) vorzunehmen. Alternativ können Sicherheitsbeiwerte für einen Zielwert des Zuverlässigkeitsindex oder der Versagenswahrscheinlichkeit berechnet werden.

(10) Durch die Betrachtung weiterer über den gesamten Anwendungsbereich gleichmäßig verteilten Parameterkombinationen ist zu überprüfen, dass die in Schritt 3 gewählten Kalibrierungspunkte zum minimalen Zuverlässigkeitsindex bzw. zur größten Versagenswahrscheinlichkeit führen und damit geeignet sind.

(11) Prinzipiell kann das Vorgehen zur Berechnung von baustoffbezogenen Teilsicherheitsbeiwerten (Bild 6-1) auch für die Berechnung von Teilsicherheitsbeiwerten für den Systemwiderstand (γ_R nach E DIN EN 1992-1-1/NA1:2025-08, Anhang F) und globalen Sicherheitsbeiwerten herangezogen werden. Es ergeben sich jedoch folgende Abweichungen:

- Die Widerstandsseite wird als eine Größe betrachtet.
- Bei Entkopplung der Einwirkungs- und Widerstandsseite sind die in den Eurocodes angenommenen Wichtungsfaktoren der Widerstands- und Einwirkungsseite ($\alpha_R = 0,8$, $\alpha_E = -0,7$) im Einzelfall zu überprüfen.

ANMERKUNG: Die Überprüfung bzw. Festlegung von Teilsicherheitsbeiwerten für den Systemwiderstand auf der Widerstandsseite erfordert ein hohes Maß an Sachkenntnis.

(12) Zur Berücksichtigung von zufälligen Abweichungen und Ungenauigkeiten von Basisvariablen, deren Streuungen unabhängig vom Mittelwert sind (z. B. bei geometrischen Größen), dürfen im Unterschied zu üblichen multiplikativen Sicherheitselementen (charakteristische Werte und Sicherheitsbeiwerte) additive Sicherheitselemente verwendet werden.

(13) Bei einer stichprobenartigen Prüfung müssen im Fall einer Parameterrechnung die Versagenswahrscheinlichkeiten (Zuverlässigkeitsindizes) mindestens für den minimalen, den maximalen und einen weiteren mittleren Wert der Basisvariablen (z. B. Betondruckfestigkeit, statische Nutzhöhe) verifiziert werden.

Anhang A: Stochastische Modelle für Basisvariablen (informativ)

In diesem Anhang werden für Bauteile und Tragwerke aus Beton, Stahl- oder Spannbeton für auf der Einwirkungs- und Widerstandsseite häufig verwendete Basisvariablen typische stochastische Modelle aus der Literatur angegeben. Eine Zusammenstellung von geeigneten stochastischen Modellen für Basisvariablen findet sich beispielsweise in dem *Probabilistic Model Code* [15]. Zudem sollten Modelle aus aktuelleren Untersuchungen berücksichtigt werden.

A.1 Basisvariablen der Widerstandsseite für Stahlbeton

A.1.1 Festigkeiten und geometrische Größen

Tabelle A-1: Stochastische Modelle der Basisvariablen für Festigkeiten und geometrische Größen

S	1		2	3	4	5	6	7
Z	Basisvariable		Verteilung	Einheit	Erwartungswert μ_x	CoV	Char. Wert	Standard-abw. σ_x
1	Betondruckfestigkeit f_c^a [15]	C15	LNV ^b	N/mm ²	30,52	19 %	15	5,90
2		C25			39,00	17 %	25	6,45
3		C35			47,35	12 %	35	5,86
4		C45			53,76	10 %	45	5,17
5	Streckgrenze Betonstahl [15] ^c	f_y	NV	N/mm ²	$500 + 2 \sigma_{fy}$	5 %	500	30
6	Alternativ: Streckgrenze Betonstahl [16]	f_y	NV	N/mm ²	550	5 %	500	26,5
7	Statische Nutzhöhe [15]	D	NV	mm	$d_{nom} + 10$	Var.	d_{nom}	10
8	Bemessungswert der statischen Nutzhöhe [17]	d_d	NV	mm	$d_{nom} - 15$	--	$d_{nom} - 15$	0
9	Stützenabmessung [15]	$c, c_\emptyset$	NV	mm	$c_{nom} + 0,003 c_{nom}$	Var.	c	$4 + 0,006 c_{nom}$
10	Bauteilhöhe [15] ($h \leq 1,0$ m)	h	NV	mm	$\min \left\{ \begin{array}{l} h_{nom} + \\ 0,003 h_{nom}; \\ 0,003 \end{array} \right\}$	Var.	b_{nom}	10
11	Plattenbreite [15] ($b \leq 1,0$ m)	b	NV	mm	$\min \left\{ \begin{array}{l} b_{nom} + \\ 0,003 b_{nom}; \\ 0,003 \end{array} \right\}$	Var.	b_{nom}	10
12	Stahlquerschnitt ^c [15]	A_s	NV	mm ²	$A_{s,nom}$	2 %	$A_{s,nom}$	$0,02 A_{s,nom}$
13	Größtkorndurchmesser [18]	D_{max}	NV	mm	$D_{nom,max}$	10 %	$D_{nom,max}$	$0,1 D_{nom,max}$
14	Spannweite [15]	L	NV	m	L_{nom}	Var.	L_{nom}	0,012
15	Abstand Bewehrung [18]	s_r	NV	mm	$s_{r,nom}$	Var.	$s_{r,nom}$	$s_{r,nom} \pm 20$
16	Effektive Schubspannweite [18]	a_{cs}	NV	mm	$\min \left\{ \begin{array}{l} a_{cs,nom} + \\ 0,003 a_{cs,nom}; \\ 0,003 \end{array} \right\}$	Var.	$a_{cs,nom}$	10

^a Falls vorhanden, sind bevorzugt gemessene Werte zu verwenden (z. B. Bauen im Bestand).

^b Gilt für $\nu \cdot n \geq 10$.

^c Es besteht eine Abhängigkeit bzw. Korrelation zwischen der Streckgrenze und der Querschnittsfläche von Betonstahl. Diese kann vereinfacht durch eine Modifikation des Erwartungswertes mit folgender Gleichung berücksichtigt werden: $\mu(d) = 1/\mu(0,87 + 0,13 \cdot \exp(-0,08 \cdot \emptyset_s))$. Alternativ kann mit korrelierten Basisvariablen gerechnet werden. Die Korrelationsmatrix kann Probabilistic Model Code [15] entnommen werden.

Abkürzungen: NV = Normalverteilung; LNV = Lognormalverteilung, Var. = Variabler Wert des Variationskoeffizienten, abhängig von Erwartungswert, CoV: Variationskoeffizient (engl. Coefficient of Variation).

Der *Probabilistic Model Code* [15] verwendet als stochastisches Modell für die Betondruckfestigkeit die log-Student-t-Verteilung, welche jedoch ab $\nu \cdot n \geq 10$ gut durch eine logarithmische Normalverteilung angenähert werden kann. Die Gleichung der log-Student-t-Verteilung lautet:

$$f_X(x|m',s',n',\nu') = \frac{1}{x-s'} \cdot t_{\nu'} \left(\frac{\ln(x)-m'}{x-s'} \cdot \sqrt{\frac{n'}{n'+1}} \right)$$

wobei $t_{\nu'}$ der Dichtefunktion der Student-t-Verteilung mit ν' Freiheitsgraden entspricht. Die vier Parameter (m', s', n', ν') können Tabelle A-2 und Tabelle A-3 entnommen werden.

Tabelle A-2: Ergänzung stochastisches Modell der Betonzylinderdruckfestigkeit (Lieferbeton) [15]

S	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Z	Druckfestigkeits- klasse ^c	Log-Student-t-Verteilung				Log-Normalverteilung			
		Prior Kennwerte [15] ^{a, b}				Parameter		$\mu_{f,cm}$ [N/mm ²]	$\sigma_{f,cm}$ [N/mm ²]
		m'	n'	s'	ν'	μ_{ln}	σ_{ln}		
1	C15	3,40	3,0	0,14	10	3,40	0,192	30,52	5,90
2	C25	3,65	3,0	0,12	10	3,65	0,164	39,00	6,45
3	C35	3,85	3,0	0,09	10	3,85	0,123	47,35	5,86
4	C45	3,98	3,0	0,07	10	3,98	0,096	53,76	5,17

Wenn vereinfacht die log. Normalverteilung verwendet wird, lässt sich die Standardabweichung σ_{ln} durch folgende Gleichung bestimmen: $\sigma_{ln} = s' \cdot \sqrt{\frac{n'}{n'-1} \cdot \frac{\nu'}{\nu'-2}}$

^a Wenn aktuelle Betondruckfestigkeiten vorliegen, können die Priordaten mit den z. B. in [15] oder [19] gezeigten Verfahren aktualisiert werden.

^b Für den süddeutschen Raum finden sich aktualisierte Parameter in [19].

^c Zwischenwerte für andere Festigkeitsklassen dürfen linear interpoliert werden. Eine Extrapolation ist nicht zulässig.

Tabelle A-3: Ergänzung des stochastischen Modells der Betonzylinderdruckfestigkeit (Beton von Fertigteilen) [15]

S	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Z	Druckfestigkeits- klasse ^b	Log-Student-t-Verteilung				Log-Normalverteilung			
		Prior Kennwerte [15] ^a				Parameter		$\mu_{f,cm}$ [N/mm ²]	$\sigma_{f,cm}$ [N/mm ²]
		m'	n'	s'	ν'	μ_{ln}	σ_{ln}		
1	C15	3,80	3,0	0,09	10	3,80	0,123	45,04	5,57
2	C25	3,95	3,0	0,08	10	3,95	0,110	52,25	5,74
3	C35	4,08	4,0	0,07	10	4,08	0,090	59,39	5,38
4	C45	4,15	4,0	0,05	10	4,15	0,065	63,57	4,11

Wenn vereinfacht die log. Normalverteilung verwendet wird, lässt sich die Standardabweichung σ_{ln} durch folgende Gleichung bestimmen: $\sigma_{ln} = s' \cdot \sqrt{\frac{n'}{n'-1} \cdot \frac{\nu'}{\nu'-2}}$

^a Wenn aktuelle Betondruckfestigkeiten vorliegen, können die Priordaten mit den z. B. in [15] oder [19] gezeigten Verfahren aktualisiert werden.

^b Zwischenwerte für andere Festigkeitsklassen dürfen linear interpoliert werden. Eine Extrapolation ist nicht zulässig.

Die Parameter $\mu_{f,cm}$ und $\sigma_{f,cm}$ ergeben sich durch folgende Transformationen:

$$\mu_{f,cm} = \exp(\mu_{ln} + 0,5 \cdot \sigma_{ln}^2) \text{ sowie } \sigma_{f,cm} = \mu_{f,cm} \cdot \sqrt{\exp(\sigma_{ln}^2) - 1}$$

Weiterhin empfiehlt [15] die Berücksichtigung weiterer Streuungen der Betondruckfestigkeit durch zwei zusätzliche Zufallsvariablen Y_1 und λ : $f_c = (f_{c0})^\lambda \cdot Y_1$

mit f_c als Betondruckfestigkeit im Bauteil;
 f_{c0} als eine Zufallsvariable (entspricht der Basisvariablen der Betondruckfestigkeit f_{cm} gemäß Tabelle A-2 und Tabelle A-3);
 λ als logarithmisch normalverteilte Zufallsvariable mit dem Erwartungswert 0,96 und einem Variationskoeffizienten von 0,5 % (es ist üblicherweise ausreichend, λ als deterministisch anzunehmen);
 Y_1 als eine log. normalverteilte Zufallsvariable (s. Tabelle A-4), die zusätzliche Streuungen aufgrund z. B. unterschiedlicher Einbau- und Erhärtingsbedingungen berücksichtigt.

Der *Probabilistic Model Code* [15] empfiehlt die Berücksichtigungen weiterer Streuungen der Betondruckfestigkeit durch zusätzliche Zufallsvariablen Y_i für die Betonzugfestigkeit, für den E-Modul vom Beton sowie für die Betonbruchstauchung (s. Tabelle A-4).

Tabelle A-4: Zufallsvariable zur Erfassung von zusätzlichen Streuungen (Y_i) [15]

S	1	2	3	4	5
Z	Name	Modell	Verteilung	Erwartungswert μ_x	Variationskoeffizient
1	Y_1^a	Betondruckfestigkeit	LNV	1,0	6 %
2	Y_2^b	Betonzugfestigkeit	LNV	1,0	30 %
3	Y_3^c	E-Modul Beton	LNV	1,0	15 %
4	Y_4^d	Bruchstauchung Beton	LNV	1,0	15 %
^a Die Betondruckfestigkeit ergibt sich zu: $f_c = (f_{c0})^\lambda \cdot Y_1$ ^b Die Betonzugfestigkeit ergibt sich zu: $f_{ct} = 0,3 \cdot f_{c0}^{2/3} \cdot Y_2$ ^c Der Beton E-Modul ergibt sich zu: $E_c = 10,5 \cdot f_{c0}^{1/3} \cdot Y_3$ ^d Die Betonbruchstauchung ergibt sich zu: $\varepsilon_c = 6 \cdot 10^{-3} \cdot f_{c0}^{-1/6} \cdot Y_4$					

Tabelle A-5: Betondeckung nach [15]

S	1	2	3	4
Z	Name	Verteilung	Erwartungswert μ_x	Standardabweichung
1	Obere Bewehrung (allgemein)	Beta ^a , Gamma ^a , logNormal ^a	$5 \text{ mm} \leq \mu \leq 15 \text{ mm}$	$5 \text{ mm} \leq \sigma \leq 15 \text{ mm}$
2	Untere Bewehrung (allgemein)		$-20 \text{ mm} \leq \mu \leq 20 \text{ mm}$	$\sigma = 5 \text{ mm}$
3	Stütze/Wände		$0 \text{ mm} \leq \mu \leq 5 \text{ mm}$	$5 \text{ mm} \leq \sigma \leq 10 \text{ mm}$
4	Platten/Balken (obere Bewehrung)		$0 \text{ mm} \leq \mu \leq 10 \text{ mm}$	$10 \text{ mm} \leq \sigma \leq 15 \text{ mm}$
5	Platten (untere Bewehrung)		$0 \text{ mm} \leq \mu \leq 10 \text{ mm}$	$5 \text{ mm} \leq \sigma \leq 10 \text{ mm}$
6	Balken (untere Bewehrung)		$-10 \text{ mm} \leq \mu \leq 0 \text{ mm}$	$5 \text{ mm} \leq \sigma \leq 10 \text{ mm}$
^a Vereinfacht kann die angegebene Verteilung mit der Normalverteilung genähert werden, wobei jedoch zu beachten ist, dass negative Werte aus physikalischen Gründen ausgeschlossen werden sollten.				

Tabelle A-6: Alternativ: Betondeckung nach DAfStb Heft 510 [20]

S	1	2	3	4
Z	Name	Verteilung	Erwartungswert μ_x	Standardabweichung
1	Bauteile ohne besondere Ausführungsanforderungen	Betaverteilung ^a	c_{nom}	10 mm
2	Bauteile mit normalen Ausführungsanforderungen nach DBV – MERKBLATT [21]	Betaverteilung ^a	c_{nom}	10 mm
3	Bauteile mit besonderen Ausführungsanforderungen nach DBV – MERKBLATT [21]	Betaverteilung ^a	c_{nom}	10 mm
^a Vereinfacht kann die Betaverteilung mit der Normalverteilung genähert werden, wobei jedoch zu beachten ist, dass negative Werte aus physikalischen Gründen ausgeschlossen werden sollten.				

A.1.2 Modellunsicherheiten

In diesem Abschnitt werden typische stochastische Modelle für die Modellunsicherheit für typische Basisvariablen aus der Widerstandsseite angegeben. Nach Möglichkeit sollte die Modellunsicherheit auf Grundlage von Versuchsauswertungen für die zu untersuchende Bemessungsgleichung bestimmt werden.

Tabelle A-7: Stochastische Modelle nach DIN EN 1992-1-1+NA [22]

S	1	2	3	4
Z	Modell	Verteilung	Erwartungswert μ_x	Variations- koeffizient
1	Biegung mit Längskraft [23]	LNv	1,03	7,0 %
2	Drucklängskraft [23]	LNv	0,97	14,0 %
3	Querkraft ohne Querkraftbewehrung [24] ^a	LNv	1,177	14,1 %
Querkraft mit Querkraftbewehrung (unter Gleichstreckenlast)				
4	Zugstrebenversagen [25]	LNv	1,10	10,0 %
5	Druckstrebenversagen [25]	LNv	1,10	15,0 %
6	Querkraft mit Querkraftbewehrung (unter Einzellast, allgemein) [25]	LNv	1,10	20 - 25 %
7	Durchstanzen ohne Durchstanz- bewehrung [24] ^b	LNv	1,093	15,4 %
Durchstanzen mit Durchstanzbewehrung (Bügel)				
8	Versagen innerhalb [26] ^c	LNv	1,348	16,3 %
9	Versagen außerhalb [26] ^d	LNv	1,071	18,2 %
10	Versagen auf Maximaltragfähigkeit [26] ^e	LNv	1,060	11,6 %
^a Siehe Tabelle A-8. ^b Siehe Tabelle A-9. ^c Siehe Tabelle A-10. ^d Siehe Tabelle A-11. ^e Siehe Tabelle A-12.				

Tabelle A-8: Ergänzung stochastisches Modell der Modellunsicherheit Querkraft ohne Querkraftbewehrung [24]

S	1		2	3
Z	n = 473		Normalverteilung (NV)	Logarithmische NV (LNv) $Y = \ln(X)$
1	Mittelwerte	μ_x	1,177	1,177 ^a
2	Standardabweichung	σ_x	0,167	0,166 ^b
3	Variationskoeffizient	CoV_x	0,142	0,141 ^c
4	5%-Quantil	$X_{5\%}$	0,902	0,925
^a $\mu_X = e^{\mu_{LN} + 0,5\sigma_{LN}^2}$. ^b $\sigma_X = \mu_{LN,conv} \sqrt{e^{\sigma_{LN}^2} - 1}$. ^c $CoV_X = \sqrt{e^{\sigma_{LN}^2} - 1}$.				

Tabelle A-9: Ergänzung stochastisches Modell Modellunsicherheit Durchstanzen ohne Durchstanzbewehrung [24]

S	1	2	3	4	5	6	7	8
	$n = 316$	Normalverteilung		Log-Normalverteilung				
				Punktschätzer		Intervallschätzer (95 %)		
Z	Parameter	Punkt-schätzer	Intervallschät-zer (95 %)	LN-Wert	LN-Wert transformiert	IS-Wert	IS-Wert trans-formiert	Korrigierter Wert
1	μ_x	1,1058	[1,0907; +∞]	0,0895	1,1061 ^a	[0,0755; +∞]	[1,0925; +∞] ^d	1,0925
2	σ_x	0,1619	[−∞; 0,1733]	0,1507	0,1676 ^b	[−∞; 0,1613]	[−∞; 0,1774] ^e	0,1687 ^g
3	CoV	0,1464	[−∞; 0,1589]	0,1464	0,1515 ^c	[−∞; 0,1623] ^f	[−∞; 0,1623]	0,1544 ^h
^a $\mu_{LN,conv} = e^{\mu_{LN} + 0,5\sigma_{LN}^2}$; ^b $\sigma_{LN,conv} = \mu_{LN,conv} \sqrt{e^{\sigma_{LN}^2} - 1}$; ^c $CoV_{LN,conv} = \sqrt{e^{\sigma_{LN}^2} - 1}$; ^d $\mu_{IS,LN,conv} = e^{\mu_{IS,LN} + 0,5\sigma_{IS,LN}^2}$; ^e $\sigma_{IS,LN,conv} = \mu_{IS,LN,conv} \sqrt{e^{\sigma_{IS,LN}^2} - 1}$; ^f $CoV_{IS,LN,conv} = \sqrt{e^{\sigma_{IS,LN}^2} - 1}$; ^g korrigierter Wert: $\sigma_{\theta,LN,cor} = \mu_{LN,conv} \sqrt{CoV_{\theta,LN,conv}^2 - CoV_{\epsilon}^2} = \mu_{LN,conv} \sqrt{CoV_{\theta,LN,conv}^2 - 0,05^2}$ ^h korrigierter Wert: $CoV_{\theta,LN,cor} = \sqrt{CoV_{\theta,LN,conv}^2 - CoV_{\epsilon}^2} = \sqrt{CoV_{\theta,LN,conv}^2 - 0,05^2}$								

Tabelle A-10: Ergänzung stochastisches Modell der Modellunsicherheit Durchstanzen mit Durchstanzbe-
wehrung bei Versagen innerhalb des durchstanzbewehrten Bereichs [26]

S	1	2	3	4	5	6	7	8
	$n = 37$	Normalverteilung		Log-Normalverteilung				
				Punktschätzer		Intervallschätzer (95 %)		
Z	Parameter	Punkt-schätzer	Intervallschät-zer (95 %)	LN-Wert	LN-Wert transformiert	IS-Wert	IS-Wert trans-formiert	Korrigierter Wert
1	μ_x	1,3927	[1,3397; +∞]	0,3219	1,3927	[0,2841; +∞]	[1,3478; +∞]	1,3478
2	σ_x	0,1910	[−∞; 0,2375]	0,1362	0,1906	[−∞; 0,1694]	[−∞; 0,2300]	0,2199
3	CoV	0,1371	[−∞; 0,1773]	0,4231	0,1368	[−∞; 0,5962]	[−∞; 0,1706]	0,1631

Tabelle A-11: Ergänzung stochastisches Modell der Modellunsicherheit Durchstanzen mit Durchstanzbe-
wehrung bei Versagen außerhalb des durchstanzbewehrten Bereichs [26]

S	1	2	3	4	5	6	7	8
	$n = 44$	Normalverteilung		Log-Normalverteilung				
				Punktschätzer		Intervallschätzer (95 %)		
Z	Parameter	Punkt-schätzer	Intervallschät-zer (95 %)	LN-Wert	LN-Wert transformiert	IS-Wert	IS-Wert trans-formiert	Korrigierter Wert
1	μ_x	1,1072	[1,0654; +∞]	0,0903	1,1075	[0,0514; +∞]	[1,0713; +∞]	1,0713
2	σ_x	0,1648	[−∞; 0,2008]	0,1536	0,1712	[−∞; 0,1871]	[−∞; 0,2023]	0,1951
3	CoV	0,1489	[−∞; 0,1885]	1,7013	0,1545	[−∞; 3,6442]	[−∞; 0,1888]	0,1821

Tabelle A-12: Ergänzung stochastisches Modell der Modellunsicherheit Durchstanzen mit Durchstanzbe-
wehrung bei Versagen auf dem Niveau der Maximaltragfähigkeit [26]

S	1	2	3	4	5	6	7	8
	$n = 44$	Normalverteilung		Log-Normalverteilung				
				Punktschätzer		Intervallschätzer (95 %)		
Z	Parameter	Punkt-schätzer	Intervallschät-zer (95 %)	LN-Wert	LN-Wert transformiert	IS-Wert	IS-Wert trans-formiert	Korrigierter Wert
1	μ_x	1,0855	[1,0567; +∞]	0,0769	1,0855	[0,0500; +∞]	[1,0596; +∞]	1,0596
2	σ_x	0,1095	[−∞; 0,1345]	0,1021	0,1111	[−∞; 0,1254]	[−∞; 0,1334]	0,1224
3	CoV	0,1009	[−∞; 0,1273]	1,3277	0,1023	[−∞; 2,5058]	[−∞; 0,1259]	0,1155

Tabelle A-13: Allgemeine stochastische Modelle (ohne direkten Normenbezug)

S	1	2	3	4
Z	Modell	Verteilung	Erwartungswert μ_x	Variationskoeffizient
1	Biegung mit Längskraft [15]	LNV	1,20	15,0 %
2	Querkraftversagen [15]	LNV	1,40	25,0 %

A.2 Basisvariablen auf der Einwirkungsseite (für üblichen Hochbau)

In diesem Abschnitt werden typische stochastische Modelle für die Einwirkungsseite für typische Basisvariablen im üblichen Hochbau für Tragwerke und Bauteile im Massivbau angegeben.

A.2.1 Ständige Einwirkung

Tabelle A-14: Stochastische Modelle für ständige Einwirkung

S	1	2	3	4	5
Z	Modell	Verteilung	Erwartungswert μ_x	Variationskoeffizient	Charakteristischer Wert
1	Ständige Einwirkung (konservativer Ansatz für die meisten Anwendungen betrachtet) [27]	NV	1,0	10 %	1,0 (50 %-Quantil)

Tabelle A-15: Stochastische Modelle für Wichte von Beton und Betonstahl

S	1	2	3	4	5
Z	Modell	Verteilung	Erwartungswert μ_x [kN/m³]	Variationskoeffizient	Charakteristischer Wert
1	Betonstahl	NV	77	< 1 %	1,0 (50 %-Quantil)
2	Normalbeton		24 ^a	4 %	
3	Hochfester Beton		24 - 26 ^a	3 %	

^a Bei Stahlbeton sind die Mittelwerte um 1 kN/m³ zu erhöhen.

A.2.2 Veränderliche Einwirkungen

Das genauere Modell aus dem JCSS PMC für veränderlichen Einwirkungen wird näherungsweise in Extremwertverteilungen (Gumbel-Verteilungen) überführt. Die entsprechenden Werte sind in den nachfolgenden Tabellen angegeben. Veränderliche Einwirkungen auf Brücken sollten in der Regel durch Lastmessungen oder durch Messung der Bauwerksreaktionen und einer damit einhergehenden Rückrechnung auf die Einwirkungen ermittelt werden. Wenn solche Messungen nicht zur Verfügung stehen, sollte auf anerkannte Literatur zurückgegriffen werden (z. B. [28], [29], [30], [31], [32], [33], [34]).

Tabelle A-16: Stochastische Modelle für veränderliche Einwirkungen

S	1	2	3	4	5
Z	Modell (Art der Einwirkung)	Verteilung	Erwartungswert μ_x	Variationskoeffizient	Charakteristischer Wert/Quantil
1	Nutzlast [15], [26] ^a	Gumbel (Ext-1)	Siehe Tabelle A-17	Siehe Tabelle A-17	98 %
2	Nutzlast [23] ^b	Gumbel (Ext-1)	1,0	26 %	1,350 (99 %-Quantil)
3	Windlast [23] ^c	Gumbel (Ext-1)	1,0	14 %	1,084 (98 %-Quantil)
4	Schneelast [23] ^d	Gumbel (Ext-1)	1,0	20 %	0,821 (98 %-Quantil)

^a Siehe Tabelle A-17.
^b Anwenden mit Modellunsicherheit von $\mu = 1,0$ und $CoV = 10$ % als LNV (siehe Tabelle A-18).
^c Anwenden mit Modellunsicherheit von $\mu = 1,0$ und $CoV = 26$ % als LNV (siehe Tabelle A-18).
^d Anwenden mit Modellunsicherheit von $\mu = 0,81$ und $CoV = 26$ % als LNV (siehe Tabelle A-18).

Tabelle A-17: Ergänzung stochastische Modelle der Modellunsicherheiten von Nutzlasten (Erwartungswerte E und Standardabweichungen SD in Abhängigkeit der Einflussfläche) nach [26]

S	1	2	3	4	5	6
Z	Nutzungsart	Verteilung	A_0^a (m ²)	A^b (m ²)	$E(L_{t,max})$ (kN/m ²)	$SD(L_{t,max})^c$ (kN/m ²)
1	Büroflächen	Ext-I (Gumbel)	20	30 50 100 150 200	3,19 2,76 2,29 2,07 1,93	1,49 0,98 0,62 0,51 0,46
2	Wohnraum	Ext-I (Gumbel)	20	30 50 100 150 200	1,81 1,62 1,39 1,28 1,21	0,64 0,43 0,28 0,23 0,21
3	Bibliothek	Ext-I (Gumbel)	20	30 50 100 150 200 500	3,40 3,11 2,84 2,73 2,66 2,49	1,49 1,04 0,70 0,60 0,54 0,44

Abkürzungen: Ext-I (Gumbel) = Gumbelverteilung bzw. Extremwertverteilung Typ I der Größtwerte.

^a $A_0 = p(r_0)^2$ ist die Korrelationsfläche, innerhalb der die einzelnen Lastpunkte des Zufallsfeldes $U(x, y)$ als stark korreliert angesehen werden. Zur Erfassung der räumlichen Verteilung der Verkehrslasten können Zufallsfelder $W(x, y)$ mit dem folgenden additiven Ansatz verwendet werden: $W(x, y) = m + V + U(x, y)$. Hierbei ist m der für eine gegebene Art der Nutzung geltende globale Mittelwert und V ist eine Zufallsvariable mit dem Mittelwert Null, die die Variation zwischen Stockwerken und Bauwerken beschreibt. $U(x, y)$ beschreibt ein homogenes Zufallsfeld mit einem Mittelwert von Null, das die Variation der Verkehrslasten auf einer Decke beschreibt. Die Größen V und $U(x, y)$ sind stochastisch voneinander unabhängig. Der Korrelationsradius bzw. die Korrelationslänge r_0 des Zufallsfeldes $U(x, y)$ befindet sich in der Größenordnung typischer Möbelabmessungen [35]. Im Rahmen des TesiproV-Forschungsprojekts [26] wurden die im *Probabilistic Model Code* [15] für die verschiedenen Nutzungsarten angegebenen Korrelationsflächen A_0 verwendet.

^b A ist die Einflussfläche für das untersuchte Bauteil.

^c $L_{t,max}$ ist die Gesamtlast für das untersuchte Bauteil.

A.2.3 Modellunsicherheiten der Einwirkungen

Die Modellunsicherheiten der Einwirkungen können entweder den in dem entsprechenden Tragwerk auftretenden Schnittgrößen (Lasteffekt der Einwirkungen) oder nach Art der Einwirkung unterschieden werden.

Tabelle A-18: Empfohlene stochastische Modelle für Modelle der Einwirkungen

S	1	2	3	4	5
Z	Modell	Verteilung	Erwartungs- wert μ_x	Variations- koeffizient	Charakteristischer Wert
Lasteffekte der Einwirkung					
1	Biegemomente in Rahmen- tragwerken [15]	LNV	1,0	10 %	--
2	Biegemomente in Platten- tragwerken [15]	LNV	1,0	20 %	--
3	Längskräfte in Rahmen- tragwerken [15]	LNV	1,0	5 %	--
4	Normal- und Querkkräfte in Plattentragwerken [15]	LNV	1,0	10 %	--
5	Querkkräfte in Rahmen- tragwerken [15]	LNV	1,0	10 %	--
Art der Einwirkung					
6	Ständige Last [36]	LNV	1,0	5 %	--
7	Nutzlast [36]	LNV	1,0	5 %	--
8	Windlast [36]	LNV	1,0	20 %	--
9	Schneelast [36]	LNV	1,0	20 %	--
Alternativ					
10	Nutzlast [23]	LNV	1,0	10 %	--
11	Windlast [23]	LNV	1,0	26 %	--
12	Schneelast [23]	LNV	0,81	26 %	--

Literaturhinweise

Nachfolgend wird Literatur aufgeführt, die in dieser Richtlinie zitiert wird:

- [1] Ricker, M.; Feiri, T.; Nille-Hauf, K.; Adam, V.; Hegger, J. (2021): Enhanced reliability assessment of punching shear resistance models for flat slabs without shear reinforcement. In: *Engineering Structures* 226, S. 111319. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.111319.
- [2] Spaethe, G. (1992): *Die Sicherheit tragender Baukonstruktionen*. 2., neubearb. Aufl. Wien: Springer, ISBN 3-211-82348-41991.
- [3] Breitung, K. (1989): Asymptotic approximations for probability integrals. In: *Probabilistic Engineering Mechanics* 4 (4), S. 187–190. DOI: 10.1016/0266-8920(89)90024-6.
- [4] Fischer, L. (2001): *Das neue Sicherheitskonzept im Bauwesen. Ein Leitfaden für Bauingenieure, Architekten und Studenten*. Berlin: Ernst (Bautechnik).
- [5] Holický, M. (2013): *Introduction to probability and statistics for engineers*. Berlin, Heidelberg: Springer.
- [6] Lange, C.; Plate, E. J. (1993): *Statistik und angewandte Wahrscheinlichkeitslehre für Bauingenieure*: Ernst & Sohn.
- [7] Montgomery, D. C.; Runger, G. C. (2018): *Applied statistics and probability for engineers*. Seventh edition. Hoboken, NJ: Wiley (EMEA edition).
- [8] Hohenbichler, M.; Gollwitzer, S.; Kruse, W.; Rackwitz, R. (1987): New light on first- and second-order reliability methods. In: *Structural Safety* 4 (4), S. 267–284. DOI: 10.1016/0167-4730(87)90002-6.
- [9] Tvedt, L. (1990): Distribution of Quadratic Forms in Normal Space—Application to Structural Reliability. In: *J. Eng. Mech.* 116 (6), S. 1183–1197. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9399(1990)116:6(1183).
- [10] Hasofer, A. M.; Lind, N. C.: An Exact and Invariant First-Order Reliability Format. In: *Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE* 1974 (100).
- [11] Ditlevsen, O.; Madsen, H. O. (1996): *Structural reliability methods*. Chichester: Wiley, vol. 178. New York: Wiley.
- [12] Melchers, R. E.; Beck, A. T. (2018): *Structural reliability analysis and prediction*. Third edition. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons Ltd (Engineering professional collection). <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9781119266105>.
- [13] Rackwitz, R.; Fiessler, B. (1978): Structural reliability under combined random load sequences. In: *Computers & Structures* (9(5)), S. 489–494.
- [14] Sorensen, J. D. (2004): *Notes in structural reliability theory and risk analysis*: Aalborg University, [https://www.ukm.my/kamal3/rro/note Structural Reliability Theory and risk analysis.pdf](https://www.ukm.my/kamal3/rro/note%20Structural%20Reliability%20Theory%20and%20risk%20analysis.pdf).
- [15] Faber, M.; Vrouwenvelder, T. (2001): Probabilistic Model Code: 12th draft. Joint Committee on Structural Safety, Online verfügbar unter: <https://www.jcss-lc.org/jcss-probabilistic-model-code/>.
- [16] Beeby, Andrew; Jackson, Paul (2016): Partial safety factor for reinforcement. In: *Structures* 5, S. 101–111. DOI: 10.1016/j.istruc.2015.09.002.
- [17] prDIN EN 1992-1-1 (2023): *Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Betontragwerken — Teil 1-1: Allgemeine Regeln und Regeln für Hochbauten, Brücken und Ingenieurbauwerke*. Stabile Fassung.
- [18] Muttoni, A. (2021): prEN 1992-1-1:2020(D7) – Background document to 4.3.3 and Annex A Partial safety factors for materials.
- [19] Feiri, Tânia; Kuhn, Sebastian; Wiens, Udo; Ricker, Marcus (2023): Updating the prior parameters of concrete compressive strength through Bayesian statistics for structural reliability assessment. In: *Structures* 58, S. 105636. DOI: 10.1016/j.istruc.2023.105636.
- [20] Gehlen, Christoph (2000): *Probabilistische Lebensdauerbemessung von Stahlbetonbauwerken - Zuverlässigkeitsbetrachtungen zur wirksamen Vermeidung von Bewehrungskorrosion*. Heft 510 der Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton. Beuth, Berlin.
- [21] Deutscher Beton-Verein (1997): *Merkblatt Betondeckung der Bewehrung*. Fassung 1997. Berlin: DBV (Merkblätter / Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein e.V.).
- [22] Fingerloos, Frank; Hegger, Josef; Zilch, Konrad (Hg.) (2016): *Eurocode 2 für Deutschland. DIN EN 1992-1-1 Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken: Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau mit Nationalem Anhang: kommentierte und konsolidierte Fassung*. 2., überarbeitete Auflage. Berlin: Beuth (Kommentar. Bauwesen). Online verfügbar unter <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9783433605103>.

- [23] Köhler, J.; Hingorani, R.; Sørensen, J. (2023): Reliability Level of the Second Generation of the Eurocodes – Status and Potential. In: 14th International Conference on Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering, ICASP14 Dublin, Ireland, https://www.researchgate.net/publication/373659278_Reliability_Level_of_the_Second_Generation_of_the_Eurocodes_-_Status_and_Potential.
- [24] Hegger, J.; Ricker, M.; Adam, V.; Feiri, T.; K. Nille-Hauf, K. (2021): Überprüfung der Zuverlässigkeit der für die nächste Generation von EN 1992-1-1 vorgesehenen neuen Bemessungsansätze gegen Durchstanzen ohne Durchstanzbewehrung und Querkraft ohne Querkraftbewehrung. P 52-5-7.322. 1-2032/18, Projekt-Schlussbericht, Online verfügbar unter: <https://www.irbnet.de/daten/rswb/22029037458.pdf>.
- [25] Braml, Thomas (2010): Zur Beurteilung der Zuverlässigkeit von Massivbrücken auf der Grundlage der Ergebnisse von Überprüfungen am Bauwerk. Zugl.: München, Univ. der Bundeswehr, Diss., 2010. Univ. der Bundeswehr München, Neubiberg.
- [26] Ricker, M.; Feiri, T. (2022): Projekt-Schlussbericht: Allgemeingültiges Verfahren zur Herleitung von Teilsicherheitsbeiwerten im Massivbau auf Basis probabilistischer Verfahren anhand ausgewählter Versagensarten (Te-siproV) – Erstellung eines Richtlinienentwurfs. WIPANO – Normung und Standardisierung. Förderkennzeichen: 03TNK003E, Aachen, Biberach.
- [27] Joint Committee on Structural Safety (1996): Background Documentation Eurocode 1 (ENV 1991). Part 1: Basis of Design. Working Document, Brüssel: ECCS.
- [28] Böning, Sebastian (2013): Entwicklung einer geschlossenen Vorgehensweise zur Ermittlung von Beanspruchungen von Brückenbauwerken infolge Straßenverkehr. Zugl.: Bauhaus-Universität Weimar, Diss., 2013. Shaker, Aachen.
- [29] Freundt, U.; Vogt, R.; Böning, S. et al. (2014): Einsatz von Monitoringsystemen zur Bewertung des Schädigungszustandes von Brückenbauwerken. Berichte der Bundesanstalt für Straßen- und Verkehrswesen, Reihe B: Brücken- und Ingenieurbau (106).
- [30] Kraus, Josef Karl (2021): Zur analytischen Herleitung von Verkehrslastmodellen für die Tragfähigkeit und Ermüdung von Straßenbrücken. Dissertation. Shaker; Shaker Verlag, Düren.
- [31] O'Connor, A. J. (2001): Probabilistic Traffic Load Modelling for Highway Bridges. Dissertation, Trinity College, Dublin, Irland.
- [32] Özlü, Caner; Küttenbaum, Stefan; Kainz, Christian; Braml, Thomas; Taffe, Alexander (2024): Probabilistischer Nachweis einer Spannbetonbrücke – Teil 1. In: Beton und Stahlbetonbau 119 (7), S. 509–523. DOI: 10.1002/best.202400018.
- [33] Özlü, Caner; Küttenbaum, Stefan; Kainz, Christian; Braml, Thomas; Taffe, Alexander (2024): Probabilistischer Nachweis einer Spannbetonbrücke – Teil 2. In: Beton und Stahlbetonbau 119 (9), S. 622–635. DOI: 10.1002/best.202400020.
- [34] Steffens, Nico (2019): Sicherheitsäquivalente Bewertung von Brücken durch Bauwerksmonitoring. Dissertation. Shaker; Shaker Verlag, Düren.
- [35] Mehlhorn, G. (1997): Tragwerkszuverlässigkeit, Einwirkungen. Berlin: Ernst & Sohn (Der Ingenieurbau / Hrsg /8], Grundwissen).
- [36] Vrouwenvelder, A.; Siemes, A. (1987): Probabilistic Calibration procedure for the derivation of partial safety factors for the Netherlands building Codes. In: Heron Vol. 32.

DEUTSCHER AUSSCHUSS FÜR STAHLBETON

DAfStb-Richtlinie

Verfahren zur Herleitung von Sicherheitsbeiwerten im Massivbau unter Verwendung probabilistischer Methoden

Teil 2: Herleitung von Teilsicherheitsbeiwerten auf der Widerstandsseite bei Entkopplung von Einwirkungs- und Widerstandsseite

Teil 2: Herleitung von Teilsicherheitsbeiwerten auf der Widerstandsseite bei Entkopplung von Einwirkungs- und Widerstandsseite

Inhalt

1	Anwendungsbereich und Anwendungsgrenzen	40
2	Verweisungen auf Normen und sonstige technische Regelwerke	40
3	Begriffe, Definitionen, Symbole	40
4	Vorgehensweise zur Berechnung von Teilsicherheitsbeiwerten	41
4.1	Allgemeines	41
4.2	Verfahrensschritte zur Bewertung und Berechnung von Teilsicherheitsbeiwerten	41

1 Anwendungsbereich und Anwendungsgrenzen

(1) Teil 2 der Richtlinie regelt die Herleitung von Teilsicherheitsbeiwerten auf der Widerstandsseite. Dabei gelten die Festlegungen von Teil 1.

(2) In Teil 2 wird angenommen, dass das geforderte Zuverlässigkeitsniveau durch Teilsicherheitsbeiwerte nachgewiesen werden kann, die durch Level-II- und Level-III-Verfahren berechnet wurden. Dabei werden die Einwirkungs- und Widerstandsseite durch den Ansatz konstanter Wichtungsfaktoren voneinander entkoppelt.

ANMERKUNG: In DIN EN 1990 werden die Level-I-Verfahren als semiprobabilistische Methoden, die Level-II-Verfahren als probabilistische Methoden und die Level-III-Verfahren als vollprobabilistische Methoden bezeichnet. Die Level-II- und Level-III-Verfahren können zur Kalibrierung der Teilsicherheitsbeiwerte der Level-I-Verfahren verwendet werden.

(3) Die nach Teil 2 abgeleiteten Teilsicherheitsbeiwerte dürfen für eine Bemessung in den nach DIN EN 1990 definierten Grenzzuständen (z. B. Grenzzustand der Tragfähigkeit und Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit) verwendet werden.

2 Verweisungen auf Normen und sonstige technische Regelwerke

Es gelten die normativen Verweise von Teil 1.

3 Begriffe, Definitionen, Symbole

Es gelten die Begriffe, Definitionen und Symbole von Teil 1.

4 Vorgehensweisen zur Bewertung und Berechnung von Teilsicherheitsbeiwerten

4.1 Allgemeines

(1) In diesem Abschnitt wird ein Vorgehen zur Berechnung von Teilsicherheitsbeiwerten unter Verwendung von Level-II- und Level-III-Verfahren festgelegt.

(2) Im Allgemeinen darf nach DIN EN 1990 ein Wichtungsfaktor von $\alpha_R = \sqrt{\sum \alpha_{R,i}^2} = 0,8$ für die Widerstandsseite angenommen werden.

4.2 Verfahrensschritte zur Bewertung und Berechnung von Teilsicherheitsbeiwerten

(1) In Bild 4-1 sind die Verfahrensschritte zur Bewertung des Zuverlässigkeitsniveaus von Bemessungsregeln oder zur Berechnung von Teilsicherheitsbeiwerten dargestellt.

(5) Das Auffinden der maßgebenden Kalibrierungspunkte wird durch systematische Parameterstudien und Erfahrungswerte unterstützt. Wenn die maßgebenden Kalibrierungspunkte nicht eindeutig bestimmt werden können, sind im Grenzfall die Zuverlässigkeitsindizes der theoretisch möglichen Parameterkombinationen im Anwendungsbereich der Grenzzustandsgleichungen zu untersuchen.

(6) Die Zuverlässigkeitsindizes (Versagenswahrscheinlichkeiten) sind mindestens für den minimalen, den maximalen und einen weiteren mittleren Wert der Basisvariablen (z. B. Betondruckfestigkeit, statische Nutzhöhe) zu berechnen.

(7) In Schritt 4 ist das zugrundeliegende Sicherheitsformat festzulegen.

ANMERKUNG: In Deutschland wird in der Regel als Sicherheitsformat für eine Querschnittsbemessung das semi-probabilistische Konzept der Eurocodes mit Teilsicherheitsbeiwerten angewendet.

(8) In Schritt 5 sind die Grenzzustände und deren Grenzzustandsgleichung(en) festzulegen.

ANMERKUNG: Die Grenzzustandsgleichung kann durch eine oder mehrere Gleichung(en) oder durch eine aufwendigere analytische bzw. numerische Berechnung (z. B. Finite-Elemente-Methode) beschrieben werden.

(9) In Schritt 6 sind die stochastischen Modelle der Basisvariablen festzulegen. Hierfür sind die unbekannten Unsicherheiten bei der Schätzung der statistischen Parameter für die Verteilungsfunktion (siehe Teil 1, Abschnitt 4.4 (3)) zu berücksichtigen. Die Verteilungsparameter können entweder aus verfügbaren Daten (siehe Teil 1, Abschnitt 4) abgeleitet oder aus Teil 1, Anhang A, der Richtlinie entnommen werden.

ANMERKUNG: Weitere Angaben zu im Bauwesen typischen Basisvariablen sind z. B. im JCSS Probabilistic Model Code enthalten.

(10) In Schritt 7A (1.) sind entsprechend Teil 1 der Richtlinie die Zuverlässigkeitsindizes (bzw. Versagenswahrscheinlichkeiten) mit einem geeigneten Verfahren nach Level II und/oder Level III für die ausgewählten Kalibrierungspunkte zu berechnen.

ANMERKUNG: Geeignete Verfahren siehe Teil 1, Abschnitt 5.

(11) In Schritt 7A (2.) ist der in Schritt 7A (1.) berechnete maßgebende Zuverlässigkeitsindex mit dem Zielwert zu vergleichen.

ANMERKUNG: Falls der berechnete Zuverlässigkeitsindex kleiner als der Zielwert ist, erreicht die Bemessungsregel nicht das geforderte Zuverlässigkeitsniveau. In diesem Fall sind folgende Maßnahmen möglich:

- Anpassung des Teilsicherheitsbeiwertes oder der Teilsicherheitsbeiwerte
- Prüfung der Verteilungsannahmen für die Basisvariablen
- Optimierung des Ingenieurmodells zur Bestimmung des Bauteilwiderstands
- Einschränkung des Anwendungsbereichs (z. B. Bauteilabmessungen)
- Reduzierung des Zielwerts für den Zuverlässigkeitsindex unter Beachtung der einschlägigen Regelwerke (z. B. DIN EN 1990)

(12) In Schritt 7B ist eine Optimierungsaufgabe durchzuführen mit dem Ziel neue Teilsicherheitsbeiwerte zu berechnen. Dabei sind die Teilsicherheitsbeiwerte in einem iterativen Prozess so lange zu verändern, bis der Zielwert des Zuverlässigkeitsindex überschritten wird.

(13) In Schritt 7B (1.) sind Startwerte für die zu optimierenden Teilsicherheitsbeiwerte zu wählen.

(14) In Schritt 7B (2.) sind die Zuverlässigkeitsindizes (bzw. Versagenswahrscheinlichkeiten) mit einem geeigneten Verfahren nach Level II und/oder Level III für die ausgewählten Kalibrierungspunkte zu berechnen.

ANMERKUNG: Geeignete Verfahren siehe Teil 1, Abschnitt 5.

(15) Schritt 7B (3.) ist optional: Für die Optimierung der Teilsicherheitsbeiwerte darf die Fehlerabweichung der einzelnen Zuverlässigkeitsindizes für alle Kalibrierungspunkte getrennt berechnet werden. Bei der nachfolgenden Optimierung ist sicherzustellen, dass die Fehlerabweichungen der Zuverlässigkeitsindizes ($\beta_T - \beta_i(\gamma_j)$) für alle untersuchten Kombinationen positiv sind.

ANMERKUNG: Hierbei sind β_T der Zielwert des Zuverlässigkeitsindex und $\beta_i(\gamma_j)$ die Zuverlässigkeitsindizes des i-ten Kalibrierungspunktes vom Teilsicherheitsbeiwert γ_j des j-ten Teilsicherheitsbeiwertes.

(16) In Schritt 7B (4.) wird geprüft, ob der berechnete Zuverlässigkeitsindex kleiner als der in Schritt 2 (Abs. 4.2 (3)) gewählte Zielwert ist.

(17) In Schritt 7B (5.) wird entschieden, ob der Optimierungsprozess abgeschlossen ist. Wenn die berechneten Zuverlässigkeitsindizes kleiner als der Zielwert (Schritt 7B (4.)) und/oder die in Schritt 7B (3.) optional ermittelten Fehlerabweichungen zu groß sind, ist ein neuer Iterationsschritt durchzuführen und die Schritte 7B (2.) bis 7B (5.) erneut durchzuführen.

ANMERKUNG 1: Das Vorgehen ist wie folgt:

- A) Vergrößerung der Teilsicherheitsbeiwerte für den neuen Iterationsschritt, wenn der berechnete Zuverlässigkeitsindex den Zielwert unterschreitet.
- B) Optionale Verringerung der Teilsicherheitsbeiwerte für den neuen Iterationsschritt, wenn der berechnete Zuverlässigkeitsindex den Zielwert überschreitet.

ANMERKUNG 2: Wenn in die Grenzzustandsgleichung mehrere Teilsicherheitsbeiwerte eingehen, kann es zielführend sein, nur einen der TSB zu variieren und zunächst die übrigen konstant zu halten.