

Grundsätzliches zum Sicherheitsbegriff sowie Elemente einer Sicherheitsnorm für Tragwerke

Autor(en): **Schneider, Jörg**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **IABSE reports of the working commissions = Rapports des commissions de travail AIPC = IVBH Berichte der Arbeitskommissionen**

Band (Jahr): **18 (1974)**

PDF erstellt am: **19.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-16944>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Grundsätzliches zum Sicherheitsbegriff sowie Elemente einer Sicherheitsnorm für Tragwerke

Basics on Safety Concept and Elements of a Safety Code for Structures

Remarques fondamentales sur le concept de sécurité et éléments d'une norme de sécurité pour les structures

Jörg SCHNEIDER
Dipl. Bau-Ing. ETH
Professor an der
Eidg. Techn. Hochschule
Zürich, Schweiz

1. Einschränkende Vorbemerkung

Man muss sein Gedächtnis nicht besonders anstrengen, um einige Beispiele für das Versagen von Bauwerken aufzuzählen. Stichworte wie Ronan Point, Melbourne, Koblenz, Wien usw. gingen durch die internationale Presse und geben dem aufmerksamen Betrachter der letzten Jahre ausreichende Hinweise. Diese Schadenfälle und viele andere, die international weniger Beachtung fanden, sind eingetreten, *obwohl* wir über das Verhalten von Bauwerken und Bauteilen unter den verschiedensten Einwirkungen ausserordentlich gut Bescheid wissen. Hier hat nicht etwa der angewendete Sicherheitsbegriff versagt (auch eine "moderne Sicherheitstheorie" wird ähnliches nicht verhindern können), sondern versagt hat in der Mehrzahl aller Schadenfälle der Mensch, der an Projektierung, Auftragserteilung, Ausführung, Ueberwachung und Betrieb der Bauwerke beteiligte und für diese Teilgebiete verantwortliche Fachmann.

Wenn man von Sicherheit spricht, muss man im Auge behalten, dass zum Versagen von Bauwerken normalerweise nicht etwa unvorausehbare Ueberlastung oder unerwartbar geringe Materialfestigkeit führt, sondern das Uebersehen irgend eines massgebenden Aspektes in der Fülle der zu berücksichtigenden Gesichtspunkte. Ein *fehlender Aspekt* bei der Beurteilung eines Sachverhaltes führt zu einem *Fehler*

im eigentlichen Sinn des Wortes [1]. Eine Sicherheitstheorie fängt erst dort an, wo eigentliche Fehler bereits ausgemerzt sind. Es wäre eine reizvolle Aufgabe, der Frage nachzugehen, auf welche Art und Weise und mit welcher Strategie und Taktik die jedem einzelnen von uns in der täglichen Arbeit unterlaufenden Fehler aufgedeckt werden könnten. Und es wäre eine überaus lohnende Aufgabe dazu.

Wenn also in der Folge von Sicherheit gesprochen wird und vielleicht Elemente einer möglichen Sicherheitsnorm für Tragwerke angedeutet werden, so ist Voraussetzung, dass die zu beurteilende Situation frei von eigentlichen Fehlern ist.

2. Was ist überhaupt Sicherheit?

Sicherheit ist ein Bedürfnis der Gesellschaft. Die Gesellschaft stellt Sicherheitsforderungen, um sich vor allzu vielen Schadenfällen zu schützen und um die Gefahr für Leib und Leben auf ein annehmbares Mass herunterzudrücken.

Doch dieses Bedürfnis ist von der Einstellung der Gesellschaft gegenüber einer Gefährdung ihres Lebensbereiches abhängig. Und diese Einstellung ist abhängig vom betrachteten Kulturkreis und variiert von Situation zu Situation. Es lassen sich drei Pole extremer menschlicher Einstellung einer Gefährdung gegenüber bezeichnen (Bild 1):

- *Akzeptieren* der Gefährdung als eine Aeusserung höherer Gewalt
- *Bereitschaft* zu einem der Gefährdung adäquaten menschlichen Verhalten
- *Forderung* nach einer jede Gefährdung ausschliessenden Zuverlässigkeit von Bauten und Einrichtungen.

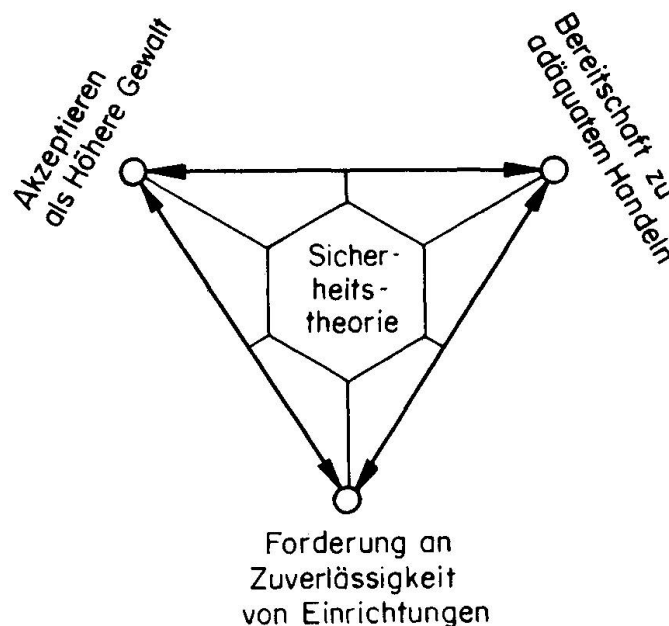


Bild 1: *Pole extremer menschlicher Einstellung einer Gefährdung gegenüber*

Das Akzeptieren der Gefährdung als eine Aeusserung höherer Gewalt ist eine typisch orientalische Einstellung (Kismet = unabwendbares Schicksal). Eine Bereitschaft zu adäquatem Handeln findet sich in ausgesprochenen Pionier-Gesellschaften. Die Forderung nach vollkommener Zuverlässigkeit ist die typische Einstellung des "hochindustrialisierten westlichen Menschen". Doch auch die Einstellung dieses letzteren bestreicht den Raum zwischen den drei Polen: Wir haben uns daran gewöhnt, den täglichen Blutzoll auf den Strassen zu bezahlen; wir sind bereit, in einer Bergkameradschaft beispielsweise adäquat zu handeln, und wir fordern schliesslich die doppelte und dreifache Absicherung einer Sicherheitseinrichtung (Bahnen, Sprinkleranlage usw).

Inwieweit diese "sicherheitsfordernde westliche Haltung" nach Kritik ruft, kann hier nicht untersucht werden. Es ist das eine Frage, die in einem anderen Rahmen zu diskutieren wäre. Im vorliegenden Zusammenhang müssen wir uns lediglich mit der Frage auseinandersetzen, welches Mass der Sicherheit *unsere* Gesellschaft von den von uns erstellten Bauwerken fordert, oder - anders ausgedrückt - welchen Grad von Risiko unsere Gesellschaft bereit ist, auf sich zu nehmen.

3. Zum Sicherheitsbedürfnis unserer Gesellschaft

Es ist wohl unbestritten, dass der "hochindustrialisierte westliche Mensch" nur eine vergleichsweise kleine Gefährdung als höhere Gewalt zu akzeptieren bereit ist. Dass im übrigen die Voraussetzung eines der Gefährdung adäquaten menschlichen Verhaltens zumindest normalerweise nicht gerechtfertigt ist, lehrt jeder Gang durch eine grössere Stadt, in der jeder einzelne bestrebt ist, in keiner Weise in irgend etwas hineingezogen zu werden. Bezeichnend für die Haltung des "westlichen Menschen" dem Begriff Sicherheit gegenüber ist die Definition, die sich im Larousse findet: "...la tranquillité d'esprit resultant de la pensée, qu'il n'y a pas de péril a redouter", frei übersetzt als "...die Seelenruhe, die aus dem Gedanken kommt, dass keine Gefahr zu fürchten sei".

"...Keine Gefahr..."? Das wäre zu untersuchen, denn ohne Zweifel leben wir nicht ohne ganz beträchtliche Risiken. Man kommt wohl nicht darum herum, diese Risiken zahlenmässig auszudrücken. Wir wollen hier unter Risiko - obwohl wesentlich eingehendere und den Begriff schärfer fassende Vorschläge [2] vorliegen - der Einfachheit halber die Wahrscheinlichkeit verstehen, dass ein unerwünschtes Ereignis eintritt. Dabei müssen wir allerdings immer die Art dieses Ereignisses benennen (Verletzungsrisiko, Risiko Geld zu verlieren etc) und die Zeitspanne angeben, auf welche sich die Aussage bezieht. Einige Zahlen finden sich in Tabelle 1. Als Quelle dienen [3], [4], [5]. Die erste Gruppe von Zahlen bezieht sich auf Risiken, denen sich ein normaler "westlicher Mensch" nicht oder *kaum entziehen* kann. Die zweite Gruppe enthält *Berufsrisiken*, die der Betroffene im echten Sinn des Wortes *in Kauf* nimmt, denn er wird dafür bezahlt (wird er das wirklich?).

Tabelle 1: Einige Zahlen zur Risikosituation

Wahrscheinlichkeit, dass ... (alle Zahlen pro 10 ⁶) wird:	
	verletzt	getötet
... ein Einwohner bei Verkehrsunfall innerhalb eines Jahres: ...	6'000	300
... der nächste Flug eines Verkehrsflugzeuges mit einem - meist für alle tödlichen - Unfall endet:	~0	5
... ein Passagier einer Bergseilbahn bei der nächsten Fahrt ...	0,3	0,02
... ein Einwohner innerhalb eines Jahres anlässlich eines Gebäudebrandes ...	45	8
... ein Bauarbeiter innerhalb eines Jahres anlässlich eines Betriebsunfalles..	225'000	500
... ein Bauarbeiter innerhalb eines Jahres einen zu Invalidität führenden Betriebsunfall erleidet	6'000	
... US-Soldat in VIETNAM innerhalb eines Jahres	100'000	15'000

Was ist eigentlich angesichts dieses belegbaren Risikos sicher? Wenn auch das, was landläufig als sicher angesehen wird, merkbare Risiken in sich trägt? Man ist doch im Grunde genommen bereit, das Wohnen in einem fachgerecht erstellten Gebäude z.B. als sicher zu bezeichnen, obwohl auch dort ein zahlenmässig fassbares Risiko besteht. Offensichtlich bezeichnet die Gesellschaft Situationen als sicher, die (gegenüber anderen "unausweichlichen" Risiken) ein vernachlässigbar kleineres Risiko in sich bergen. Etwas *ist* demnach nicht sicher (denn das gibt es gar nicht), sondern es wird als sicher *bezeichnet*, es *gilt* als sicher. Von Gebäuden erwartet

der "westliche Mensch" ein sehr hohes Mass an Sicherheit, er möchte sich geborgen wissen in seinem Haus. Es ist anzunehmen, dass er das heute für diese Situation geltende jährliche Risiko (von z.B. $8 \cdot 10^{-6} \approx 10^{-5}$ für tödliche Verletzungen) weiterhin als sicher zu bezeichnen bereit ist.

Für einen im Bauwesen tätigen Berufsmann ist das Risiko jedoch ganz wesentlich höher. Doch die Höhe dieses in Tabelle 1 aufgezzeichneten *Berufsriskos* fordert Aufmerksamkeit: Jeder fünfte erleidet einen Unfall, sechs von 1000 werden invalid und einer von 2000 Bauarbeitern erleidet jährlich den Tod. Es ist dringend nötig, Zeit für die Beantwortung der Frage zu verwenden, wie dieses Risiko vermindert werden kann. Auch das ist eine Aufgabe des Ingenieurs.

4. Aufgabe und Dilemma des Ingenieurs

Die Aufgabe des Ingenieurs ist es, Schäden zu verhüten. Bei der Erfüllung dieser Aufgabe stösst er immer wieder auf Forderungen der folgenden, rational erfassbaren Form:

$$C > A \quad (1)$$

Hierin steht A allgemein für Anforderung, C für Aufnahmekapazität dieser Anforderung gegenüber. Für beide Grössen sehen wir jedoch den Ingenieur in einem elementaren *Dilemma*: Die Grössen A und C entsprechen einer Situation, die noch gar nicht existiert. Der Ingenieur muss vorausplanen, Entwürfe prüfen, Massnahmen treffen, entscheiden; alles, ohne die bestimmenden Grössen zum voraus genau zu kennen.

Er muss sich deshalb von *Vorstellungen* leiten lassen, z.B. über die äusseren Einwirkungen auf die betrachtete Konstruktion, bezüglich des Verhaltens derselben sowie auch bezüglich Baustoffeigenschaften, Zusammenwirken derselben und bezüglich der Herstellung des Bauwerks. Dabei ist sich der Ingenieur der *Abweichungen* bewusst, die zwischen den *Vorstellungen*, die er seinen *Voraussagen* zugrunde legt, und der *Wirklichkeit* möglich sind. Er weiss, dass gewisse Elemente seiner Vorstellung *unsicher* sind, andere von *Zufälligkeiten* oder der *Tätigkeit anderer Menschen*, von *ungünstigen äusseren Einflüssen* etc abhängig sind.

Der Ingenieur erwartet deshalb nicht einen festen Wert X_m für eine bestimmte Grösse, sondern ist sich bewusst, dass die in Wirklichkeit auftretenden Werte von diesem *Erwartungswert* abweichen werden. Dabei ist einzusehen, dass bei sorgfältiger Abschätzung der Situation die *Wahrscheinlichkeit* grösserer Abweichungen vom Erwartungswert kleiner ist als die Wahrscheinlichkeit kleinerer Abweichungen.

Man kann diese Situation darstellen in der Art, wie man gewohnt ist, stochastische Grössen darzustellen, also z.B. in Form der sog. Verteilungsdichte (Bild 2) einer stochastischen Grösse \tilde{X} .

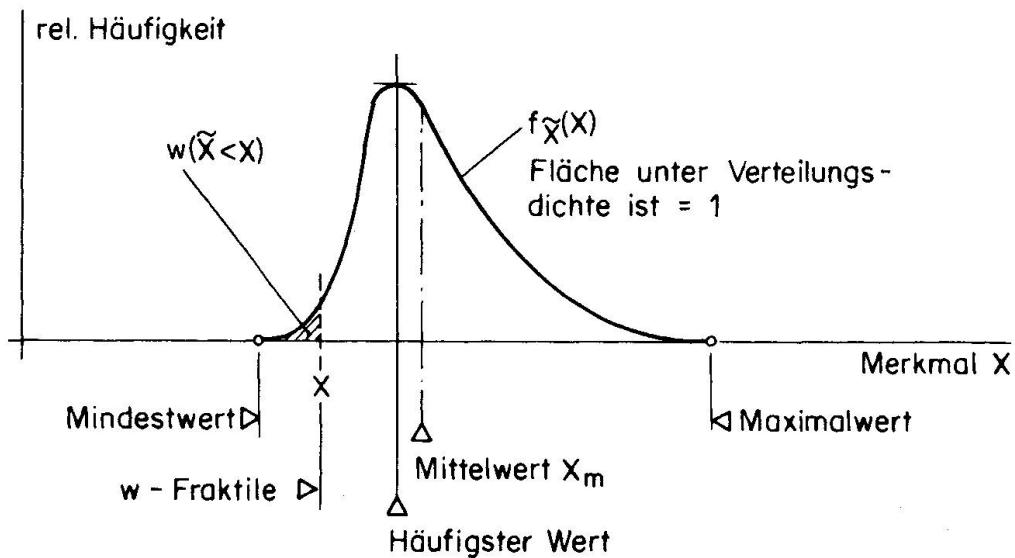


Bild 2: Verteilungsdichte einer stochastischen Grösse mit Wahrscheinlichkeit w für das Auftreten von Werten $\tilde{X} < x$

Dabei wird neben dem mittleren Erwartungswert X_m in vielen Fällen ein Mindestwert angegeben werden können, der "mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit" nicht unterschritten wird. Das gleiche wird in manchen Fällen auch für einen Maximalwert gelten. Die Wahrscheinlichkeit w , dass ein Wert unterhalb bzw. oberhalb einer bestimmten w -Fraktile liegt, lässt sich durch die Grösse der in Bild 2 schraffierten Teilfläche charakterisieren.

Mit dieser Darstellung erhält die Sicherheitsforderung (1) jedoch eine unerwünschte Unschärfe. Wir müssen schreiben:

$$\tilde{C} \geq \tilde{A} \quad (2)$$

und es ist zunächst unklar, welche Werte miteinander zu vergleichen sind. Das Dilemma des Ingenieurs wird vollends deutlich, wenn man beachtet, dass tatsächlich nicht nur diese Frage besteht, sondern die Verteilungsdichten der Grössen \tilde{C} und \tilde{A} selber nur Erwartungscharakter haben.

Trotz dieser ganz elementaren Unsicherheit muss der Ingenieur seine Massnahmen treffen und wird für seine Anweisungen *verantwortlich* gemacht. Man wird es ihm jedoch nicht verargen dürfen, wenn er seine Verantwortung wenigstens in dem Sinn einschränkt, dass er einerseits von einer mit dem Besteller *vereinbarten Nutzung* des Bauwerkes ausgeht und andererseits eine gewisse *zumutbare Ausführungsorgfalt* bei der Herstellung voraussetzt.

5. Klassierung der Schäden

Von einem *Versagen* sprechen wir, wenn ein Tragwerk oder ein Bauteil (siehe [10])

- das statische Gleichgewicht verliert (Einsturz, Bruch),
- zu grosse bleibende Verformungen aufweist (Unbrauchbarkeit),
- zu grosse elastische Verformungen oder Schwingungen zeigt,
- durch Risse und dergleichen in seiner Beständigkeit beeinträchtigt ist,
- durch Risse und dergleichen an Schönheit verliert.

In allen angeführten Fällen kann das Tragwerk oder Bauteil die ihm zuge dachte Aufgabe nicht voll erfüllen. Es versagt. Die *Folgen* des Versagens sind jedoch unterschiedlich schwer. Der Verlust des statischen Gleichgewichts ist katastrophaler Natur, auch sind wegen des meist plötzlichen Versagens Menschenleben in Gefahr. Bleibende Deformationen lassen sich kaum reparieren, der Ersatz einzelner Tragwerksteile ist nötig. Zu nachgiebige Bauteile lassen sich mit einigem Aufwand verstärken. Eine mangelnde Beständigkeit lässt sich (bei ausreichender Ueberwachung) rechtzeitig erkennen.

Im vorliegenden Zusammenhang sollen die auf das Versagen zurückzuführenden *Schäden* in zwei grundsätzlich verschiedene Gruppen aufgeteilt werden:

- Sachschäden
- Personenschäden (Verletzte und Tote).

Die Einstellung unserer Gesellschaft und demnach auch des Ingenieurs diesen beiden Schadenarten gegenüber ist von prinzipieller Verschiedenheit.

Der Wahrscheinlichkeit des Auftretens von *Sachschäden* gegenüber lässt sich mit gutem Grund das *Optimierungsprinzip* anwenden. Eine kleinere Versagenswahrscheinlichkeit muss in der Regel mit einem höheren Aufwand beim Bau oder bei der Ueberwachung bezahlt werden. Ein - finanzielles - Optimum wird erreicht, wenn, stark vereinfacht ausgedrückt, die folgende Beziehung ausgewertet wird:

$$K + w \cdot V + U \rightarrow \text{Minimum,} \quad (3)$$

worin K die Herstellungskosten, w die Wahrscheinlichkeit eines Versagens, V die im Falle eines Versagens auftretenden Kosten (Abbruch und Wiederherstellung) und U die kapitalisierten Ueberwachungs- und Unterhaltskosten sind. Das Produkt $w \cdot V$ kann auch als kapitalisierte Versicherungsprämie gedeutet werden (siehe auch [6]). Es sei nicht verschwiegen, dass die Auswertung dieser Beziehung in konkreten Fällen schwierig ist, da dem Ingenieur meist zu wenig Information über die Versagenswahrscheinlichkeit w zur Verfügung steht.

Ganz anders ist die Wahrscheinlichkeit eines Auftretens von *Personenschäden* zu werten. Obwohl im Versicherungswesen und bei Haftpflichtfällen auch der Wert eines Menschenlebens in Geldeinheiten beziffert wird, darf ein solcher Betrag nicht gleichwertig mit Sachschäden in die Beziehung (3) eingesetzt werden. Der Ingenieur muss vielmehr seine Massnahmen so treffen, dass die von ihm kontrollierte (und verantwortete) Situation von der betroffenen Personengruppe (Bewohner von Gebäuden, Benützer von Brücken, mit der Herstellung beauftragte Bauarbeiter, etc) *als sicher bezeichnet werden kann*.

Damit wird es nötig, die Sicherheitsforderung in eine der Aufgabenstellung angepasste Form zu bringen.

6. Ein wahrscheinlichkeitstheoretisches Modell

Für das folgende wird im Sinne einer *Modell-Ueberlegung* angenommen, dass die Verteilungsdichten von \tilde{A} und \tilde{C} der *Gauss'schen Normalverteilung* (Bild 3) entsprechen. Diese eignet sich besonders gut, weil

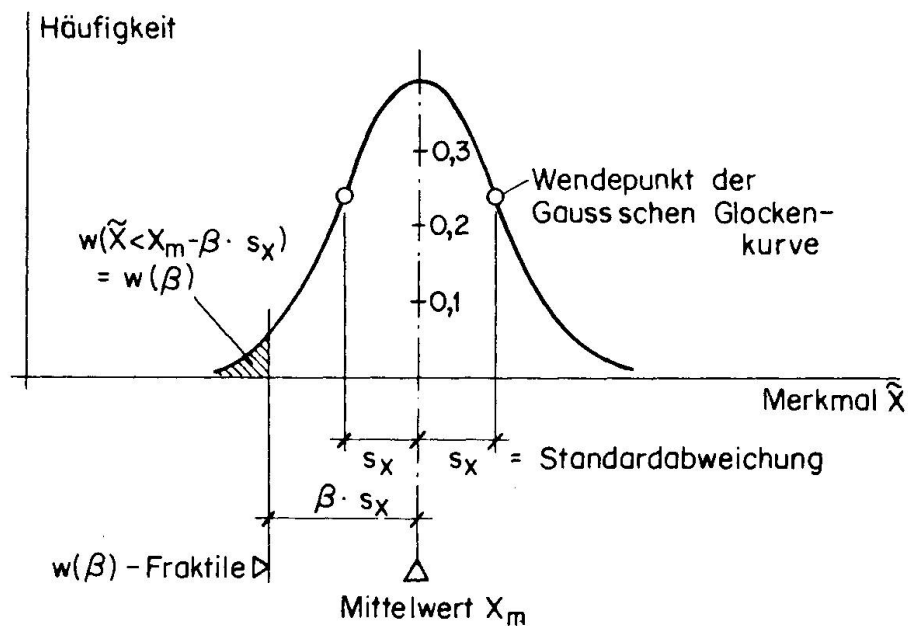


Bild 3: Normalverteilung

sie besonders einfach zu handhaben ist. So sind insbesondere Summen und Produkte von normalverteilten Grössen wieder normalverteilt und die Rechenregeln einfach. Die Normalverteilung ist symmetrisch zum Mittelwert und definiert für Merkmalsgrössen zwischen $-\infty$ bis $+\infty$. Gerade hier wird deutlich, dass diese - mathematisch einfach erfassbare - Verteilung sich der Verteilung der fraglichen Grössen insbesondere bei grösseren Abweichungen vom Mittelwert gar nicht besonders gut anpasst. Man wird bei der Interpretation der Ergebnisse einer

solchen Modellüberlegung dieser Tatsache Rechnung tragen müssen. Die Normalverteilung lässt sich durch zwei Grössen definieren: den Mittelwert X_m und die Standardabweichung s_x . Ein beliebiges vielfaches β von s_x legt die $w(\beta)$ -Fraktile fest und damit die Wahrscheinlichkeit, mit welcher eine solche Fraktile unter- bzw. überschritten wird (siehe Tabelle 2).

Tabelle 2: Fraktile bei Normalverteilung

β	$w(\beta)$	$w(\beta)$	β
0	0,50	10^{-2}	2,32
1	0,159 $\approx 16\%$	10^{-3}	3,09
2	0,023 $\approx 2,3\%$	10^{-4}	3,72
3	0,0014 $\approx 1,4\%$	10^{-5}	4,27
4	0,0003	10^{-6}	4,75

Für das folgende schreiben wir die Sicherheitsforderung (2) in der wohl zuerst von E. Basler [7] angegebenen und später vor allem von Cornell [8] weiterentwickelten Form als

$$\tilde{Z} = \tilde{C} - \tilde{A} \geq 0, \quad (4)$$

worin \tilde{Z} die sogenannte Sicherheitszone ist, wie die Grössen \tilde{C} und \tilde{A} natürlich eine durch ihre Verteilungsdichte beispielsweise charakterisierte Grösse. Unter der Voraussetzung normalverteilter Grössen lassen sich die charakteristischen Elemente der Sicherheitszone \tilde{Z} angeben zu

$$\begin{aligned} Z_m &= C_m - A_m \\ s_Z &= \sqrt{s_C^2 + s_A^2} \end{aligned} \quad (5)$$

Bild 4 macht das Ganze deutlich. Insbesondere ist ersichtlich, dass auch negative Werte von Z möglich sind. Gemäss (4) ist für diesen Bereich die Sicherheitsforderung nicht erfüllt.

Wie man aus Bild 4 entnehmen kann, ist die Sicherheitsforderung (4) gerade noch erfüllt, wenn

$$Z_m - \beta \cdot s_Z = 0 \quad (6)$$

ist. Da Z_m und s_Z aus den bekannten Grössen \tilde{A} und \tilde{C} nach (5) be-

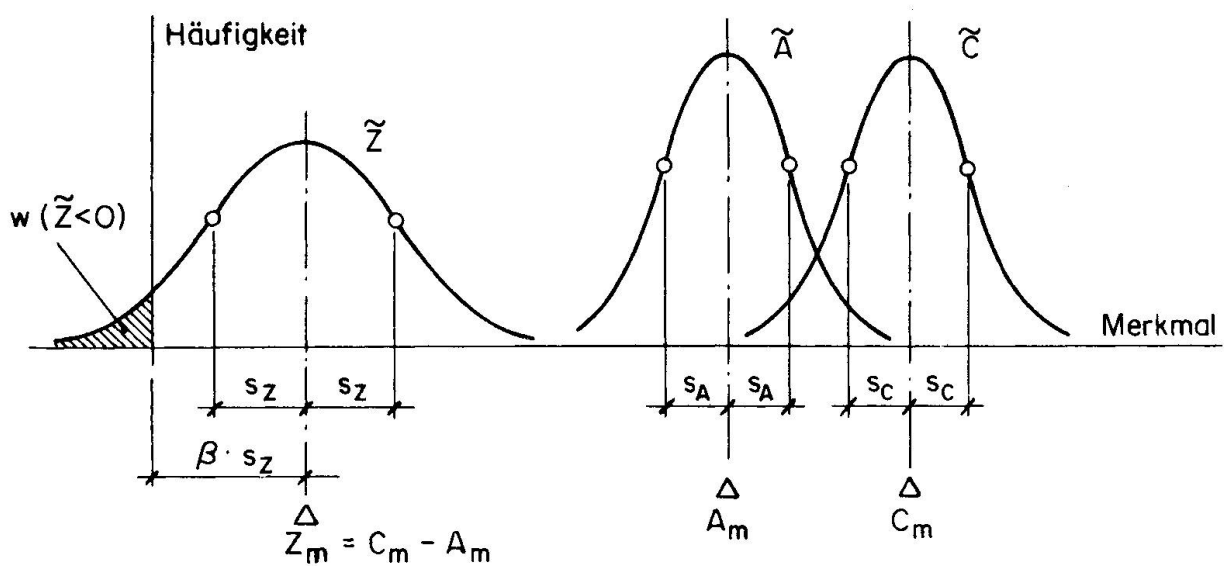


Bild 4: Die Sicherheitsforderung bei normalverteilten Ausgangsgrößen

stimmbar sind, lässt sich hieraus β ermitteln zu

$$\beta = \frac{Z_m}{s_Z} = \frac{C_m - A_m}{\sqrt{s_C^2 + s_A^2}} \quad (7)$$

Zu diesem β lässt sich dann aus Tabelle 2 die zugehörige Versagenswahrscheinlichkeit $w(\beta)$ ablesen. Hiermit ist grundsätzlich eine Optimierung gemäss Gleichung (3) möglich, wengleich die praktischen Schwierigkeiten mangels ausreichender Information über \tilde{C} und \tilde{A} meist erheblich sind.

Falls die tolerierbare Versagenswahrscheinlichkeit w^* vorgegeben ist, lassen sich mit zugehörigem β^* Aussagen über die erforderliche Grösse von Z_m in Funktion von s_Z machen. Aus (6) folgt

$$Z_m \geq \beta^* \cdot s_Z \quad (8)$$

Mit (5) ergibt sich

$$C_m - A_m \geq \beta^* \cdot \sqrt{s_C^2 + s_A^2} \quad (9)$$

Eine Separation der beiden Ausgangsgrößen gelingt mit der von Lind eingeführten Näherung

$$\sqrt{s_C^2 + s_A^2} \approx \alpha (s_C + s_A) \quad (10)$$

welche mit $\alpha = 0,7 \div 0,75$ für alle Bedürfnisse genügend genau ist. Führt man dies in (9) ein, erhält man mit $\beta = \alpha \cdot \beta^*$

$$C_m - \beta \cdot s_C \geq A_m + \beta \cdot s_A \quad . \quad (11)$$

Wie man durch Vergleich mit Bild 3 unschwer erkennt, handelt es sich beim Ausdruck der linken Seite um die untere, zu $\beta = \alpha \cdot \beta^*$ gehörige Fraktile $C_w(\beta)$ der Kapazität \tilde{C} , bei der rechten Seite um die obere, zu β gehörige Fraktile $A_w(\beta)$ der Anforderung \tilde{A} . Es gilt also als Sicherheitsforderung

$$C_w(\beta) \geq A_w(\beta) \quad . \quad (12)$$

Der Zusammenhang zwischen der tolerierten Versagenswahrscheinlichkeit w^* und dem Fraktilwert $w(\beta)$ ist rasch hergestellt: Ist beispielsweise $w^* = 10^{-5}$, so beträgt das zugehörige $\beta = 4,27$ (aus Tabelle 2). Mit $\alpha = 0,72$ ergibt sich $\beta = 0,72 \cdot 4,27 = 3,08$. Dazu gehören, wieder Tabelle 2 entnommen, die 1‰-Fraktile von \tilde{C} und \tilde{A} . Für andere Werte von w^* lassen sich die zugehörigen Fraktile dem Bild 5 entnehmen.

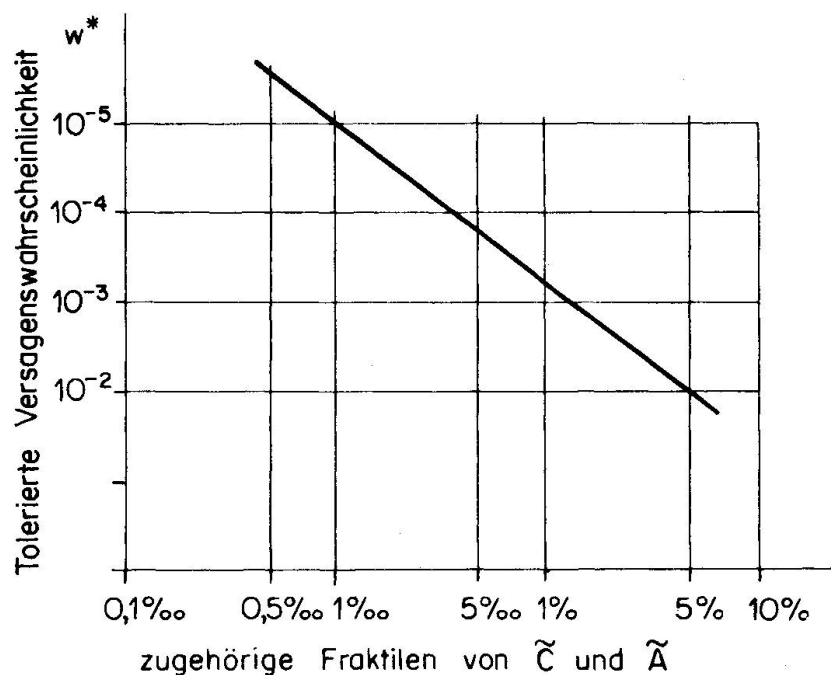


Bild 5: Zusammenhang zwischen tolerierter Versagenswahrscheinlichkeit w^* und den zugehörigen Fraktile von \tilde{C} und \tilde{A}

Wesentlich ist, dass die Sicherheitsforderung in der Schreibweise (12) auch für Grössen gilt, die nicht genau einer Normalverteilung entsprechen.

7. Ein konkreter Sicherheitsbegriff für die Bemessung

Uns Ingenieuren liegt - ob zu Recht oder nicht - die statisch-konstruktive Sicherheit besonders am Herzen. Wie sollen wir ein Bauteil bemessen? Mit W = Widerstand eines Bauteils an der Bruchgrenze und B = Beanspruchung des Bauteils unter Gebrauchslasten lassen sich die konventionellen Sicherheitsforderungen wie folgt schreiben:

- Prinzip der zul. Spannungen: $\frac{W}{\gamma} \geq B$ (13)

- Traglastverfahren : $W \geq \gamma \cdot B$ (14)

- Verfahren mit aufgeteilten Faktoren, z.B. CEB : $\frac{W}{\gamma_W} \geq \gamma_B \cdot B$ (15)

Der Faktor γ ist dabei der sog. Sicherheitsfaktor, der für viele Beanspruchungsarten bei rund 1,8 liegt. Doch damit ist noch gar nicht viel gesagt, denn weder W noch B sind mit ausreichender Schärfe definiert.

Die soeben hergeleitete Sicherheitsforderung (11) lautet mit den an die vorliegende Frage angepassten Bezeichnungen:

$$W_m - \beta \cdot s_W \geq B_m + \beta \cdot s_B \quad (11a)$$

Wir erkennen deutlich, dass die beiden Seiten dieser Beziehung wesentlich schärfer definiert sind als diejenigen der Ausdrücke (13) bis (15). Der Faktor β übernimmt hier die Aufgabe eines Sicherheitsfaktors und wirkt an der richtigen Stelle auf die jeweiligen, die Streuung charakterisierenden Standardabweichungen ein. Die Grösse von β hängt von der tolerierten Versagenswahrscheinlichkeit w^* ab.

Nehmen wir für das folgende an, dass die Versagenswahrscheinlichkeit unter den von der Gesellschaft als sicher bezeichneten Wert gedrückt werden soll, so wäre für w^* - bezogen auf ein Jahr - ein Wert von etwa 10^{-5} einzuführen. Für den folgenden Gedankengang ist jedoch die Grösse dieser tolerierten Versagenswahrscheinlichkeit nicht von wesentlichem Einfluss, weshalb eine ausführliche Diskussion hier unterbleiben kann. Zu $w^* = 10^{-5}$ gehört nach Tabelle 2 der Wert $\beta^* = 4,27$. Mit $\alpha \approx 0,7$ erhält man damit $\beta = \alpha \cdot \beta^* \approx 3$. Setzt man diesen festen Zahlenwert in die Sicherheitsforderung (11a) ein, erhält man

$$W_m - 3 \cdot s_W \geq B_m + 3 \cdot s_B \quad (16)$$

Die in die Sicherheitskontrolle einzuführenden Vergleichswerte für Widerstand und Beanspruchung liegen demnach um die dreifache jeweilige Standardabweichung unter bzw. über dem jeweiligen mittleren Erwartungswert.

Hier ist der Ansatzpunkt für die Formulierung eines konkreten Sicherheitsbegriffs! Betrachtet man nämlich "statistisches Material", so wird man - echte Fehler voraussetzungsgemäss ausgeschlossen - praktisch keine Werte des Merkmals ausserhalb des durch dreifache Standardabweichung vom Mittelwert nach oben und unten abgegrenzten Bereichs finden. Der *mathematisch* noch ohne weiteres (z.B. auch als 1%-Fraktile) *fassbare* Wert eines Merkmals bei der dreifachen Standardabweichung entspricht in Wirklichkeit einem *praktischen Grenzwert* des betrachteten Merkmals. Mit W' = unterer Grenzwert des Widerstandes und B' = oberer Grenzwert der Beanspruchung schreibt sich dann die Sicherheitsforderung (16) als

$$W' \geq B' \quad . \quad (17)$$

In Worten ausgedrückt: Der Ingenieur muss seine Massnahmen so lenken, dass der untere Grenzwert des Widerstandes eines Bauteils oder Bauwerks über dem oberen Grenzwert seiner Beanspruchung liegt. Dieser an sich triviale Satz wurde vom Verfasser schon früher (siehe [9]) ausführlich begründet. Er findet hier seine "wahrscheinlichkeitstheoretische" Bestätigung.

Freilich bedarf dieser Satz noch der unter 4. diskutierten einschränkenden Ergänzungen: bei der Festlegung des unteren Grenzwerts W' des Widerstandes muss eine gewisse zumutbare Ausführungssorgfalt vorausgesetzt werden; bei der Festlegung des oberen Grenzwerts B' der Beanspruchung ist von der mit dem Besteller vereinbarten Nutzung auszugehen. Innerhalb der so abgesteckten Grenzen ist der Ingenieur - oder besser: sind wir Ingenieure mit unserem ganzen Normenwerk - für die Sicherheit der Konstruktionen verantwortlich. Der konkrete Sicherheitsbegriff lautet dann (siehe auch [9]):

Die Konstruktion ist so auszubilden, dass

der als sicher geltende untere Grenzwert W' des Widerstandes der betrachteten Konstruktion unter Annahme einer zumutbaren Ausführungssorgfalt grösser oder mindestens gleich ist dem oberen Grenzwert B' der möglichen Beanspruchung bei der vorgesehenen Nutzung.

Wie man erkennt, enthält dieser Sicherheitsbegriff im Gegensatz zu den konventionellen Sicherheitsbedingungen *keinen Sicherheitsfaktor*.

Der *obere Grenzwert B' der möglichen Beanspruchung* berücksichtigt die Lastannahmen und die Einflüsse des statischen Systems sowie die in diesen Einflussgrössen liegenden Unsicherheiten. Der obere Grenzwert ergibt sich

- durch *bauliche* oder *physikalische Begrenzung* der Beanspruchung (z.B. durch Abschränkungen, Ueberlaufen eines Behälters, durch Ansprechen von Sicherheitsvorrichtungen, Ueberschreitung der Festigkeit der die Beanspruchung übermittelnden Teile usw.).

- durch *Begrenzung* aufgrund *menschlichen Einflusses* (z.B. Beschränkung der Stapelhöhe, Beschränkung des genutzten Lagerflächenanteils, Beschränkung der Nutzlast, Signalisation, Vorschriften usw.). Die Sicherstellung der Begrenzung ist hier jedoch durch wirksame Kontrollen oder durch entsprechende Vorrichtungen von ausschlaggebender Wichtigkeit.
- durch *Vereinbarungen über die Begrenzung* an sich unbegrenzter Beanspruchungen (wie durch Wind, Schnee, Lawinen, Erdbeben, Waffenwirkungen usw.). Die Vereinbarung ist hierbei aufgrund der jährlichen Auftretenswahrscheinlichkeit der Beanspruchung zu treffen, wobei eine nach dem vorstehenden begründbare 1%-Fraktile wegleitend angenommen werden kann.

Bei der Festlegung des oberen Grenzwerts der Beanspruchung ist stets auch zu prüfen, ob nicht die vorgesehene Nutzung *sekundäre Begleiterscheinungen* nach sich zieht, welche für die Beanspruchung massgebend sind. Zum Beispiel ist die effektive Belastung von Wohnhausdecken sehr gering; kleine Explosionen (Sicherheitsventil Fenster), Wasserrohrbrüche usw. sind hier als sekundäre Begleiterscheinungen möglich und unter Umständen massgebend.

Der als *sicher geltende untere Grenzwert des Widerstandes W'* wird sich im wesentlichen aus Abmessungen und Materialfestigkeiten herleiten lassen, wobei die Streuung dieser Werte sowie Ausführungsungenauigkeiten, die Güte des für die Voraussage verwendeten Gedankenmodells sowie der Charakter des Widerstandes berücksichtigt werden müssen. Es handelt sich im übrigen nicht nur um den statischen Bruchwiderstand, sondern - je nach Fragestellung - auch um den Widerstand gegenüber einer irgendwie definierten dynamischen Beanspruchung, und zum Beispiel auch um den unteren Grenzwert des Widerstandes, welcher zu einem noch als zulässig erachteten Risseverhalten der Konstruktion führt.

Bei der Festlegung von W' sind des weiteren auch Argumente wie die Wichtigkeit des betrachteten Bauteils im Rahmen der Gesamtkonstruktion sowie die *Art* der vorgesehenen Nutzung von Bedeutung.

Der hier vorgelegte Sicherheitsbegriff hat den Vorteil, dass er nicht auf die Festlegung von sogenannten Sicherheitsfaktoren hinausläuft, deren Auslegung als Last- oder als Widerstandsfaktor dann dem jeweiligen Zweck anpassbar ist; er fordert vielmehr ganz konkret, dass - etwas vereinfacht ausgedrückt - die grösste Beanspruchung kleiner sein muss als der kleinste Widerstand. Die ganze Arbeit läuft darauf hinaus, *sich ganz konkret Vorstellungen zu machen* über diese beiden bestimmenden Grössen. Ein weiteres Charakteristikum dieses Gedankens ist es, dass der sogenannte *Sicherheitsfaktor* durch eine Reihe von *Argumenten* ersetzt wird, die eine Vergrösserung bzw. Abminderung gewisser Rechengrössen rechtfertigen. Diese dienen dazu, sowohl obere Grenzwerte der Beanspruchung wie auch die als sicher zu bezeichnenden unteren Grenzwerte des Widerstandes festzulegen.

Die Aussage ist schliesslich: Die Konstruktion kann als sicher bezeichnet werden (im Rahmen der vorgesehenen Nutzung und unter Voraussetzung der zumutbaren Ausführungssorgfalt) oder: Sie kann nicht als sicher gelten. Es gibt keine abgestufte Sicherheit.

8. Auswirkungen auf die Ausarbeitung von Normen

Der vorstehend beschriebene Sicherheitsbegriff hat bei der Ausarbeitung von Normen unbestreitbare Vorteile, wird doch durch die Sicherheitsbedingung (16) bzw. (17) das Sicherheitsproblem in zwei *vollständig unabhängige Teilprobleme* aufgespalten. Hat man sich im Rahmen einer *Sicherheitsnorm* auf die grundlegenden Prinzipien geeinigt, ist es möglich, eine für alle Baustoffe und Bauweisen gleichermaßen gültige *Belastungsnorm* aufzustellen, welche den ganzen Bereich der Beanspruchung bis hin zum oberen Grenzwert der Beanspruchung einheitlich regelt. Es geht dabei im wesentlichen um die Aufgabe, aus oberen Grenzwerten von Lasten sogenannte Nennlasten herzuleiten, und um die Frage, wie diese Nennlasten zu kombinieren sind, um zu oberen Grenzwerten der Beanspruchung zu kommen. Es zeigt sich, dass ein solches, in sich geschlossenes System von Regeln, für die Ermittlung des oberen Grenzwertes der Beanspruchung durchaus so einfach und übersichtlich gehalten werden kann, dass es für die Praxis brauchbar bleibt.

Auf der anderen Seite stehen die auf *Baustoff und Bauweise hin orientierten Normen* (Stahl, Stahlbeton, Holz, Mauerwerk, Kunststoffe etc), welche für alle wesentlichen Beanspruchungsarten Regeln für die Ermittlung der unteren, als sicher geltenden Grenzwerte des Widerstandes geben müssen. Diese Baustoff-orientierten Normen sind frei in bezug auf den einzuschlagenden Weg. Einzig die für Belastungsnorm wie Baustoffnormen gleichermaßen geltenden grundlegenden Prinzipien sind einzuhalten.

Einige auf internationaler Ebene ausgearbeitete Baustoff-orientierte Empfehlungen setzen sich nach Ansicht des Verfassers allzu leicht über die Tatsache hinweg, dass Lasten keine gegebenen Grössen sind, sondern Ergebnis von eingehenden Ueberlegungen im Rahmen eines übergeordneten Sicherheitsbegriffs. Es ist nicht zulässig, innerhalb von Baustoff-orientierten Normen souverän über den für alle Bauweisen gleichen Anteil Beanspruchung zu verfügen. Eine bedauerliche Unübersichtlichkeit jedes nationalen oder internationalen Normenwerks wäre die Folge. Zudem lässt sich die Gefahr nicht von der Hand weisen, dass durch unkontrolliertes Zusammenfügen von verschiedenen, nicht auf den gleichen Grundlagen beruhenden Normen eine Situation entstehen könnte, die von der betroffenen Gesellschaft bereits als unsicher bezeichnet werden müsste. Es sollen deshalb auf nationaler wie internationaler Ebene intensive Anstrengungen gemacht werden, zunächst wenigstens im Bereich des Sicherheitsbegriffs und der grundlegenden Prinzipien zu einer Einigung zu gelangen.

9. Literatur

- [1] J. Schneider, Ueber den Rang der Entscheidung in der Arbeit des Ingenieurs. Schweizerische Bauzeitung 2. Januar 1969
- [2] S.P. Mauch/Th. Schneider, Die unmittelbare Gefährdung unseres Lebensraumes. Schweizer Archiv, Heft 6, 1971
- [3] Statistisches Jahrbuch der Schweiz, 1972
- [4] Ergebnisse der Unfallstatistik 1963-1967, Bericht der SUVA
- [5] F.K. Ligtenberg, Structural Safety and Catastrophic Events. In IVBH, Berichte der Arbeitskommission, Band 4, Schlussbericht des Symposiums über neue Aspekte der Tragwerkssicherheit, London 1969
- [6] Rüschi/Rackwitz, Die Bedeutung des Begriffes der Versagenswahrscheinlichkeit in der Sicherheitstheorie für Bauwerke; in "Entwickeln, Konstruieren, Bauen". Festschrift der Firma Held + Francke
- [7] E. Basler, Untersuchungen über den Sicherheitsbegriff von Bauwerken. Schweizer Archiv für angewandte Wissenschaft und Technik, Heft 4, 1961
- [8] C.A. Cornell, A Probability - Based Structural Code. ACI-Journal, Dezember 1969
- [9] J. Schneider, Ueberlegungen zu einem konkreten Sicherheitsbegriff für die Bemessung von Bauwerken. Schweizerische Bauzeitung, 22. Juli 1971
- [10] Rüschi, Stahlbeton/Spannbeton Band I, Werner-Verlag

ZUSAMMENFASSUNG

Ausgehend von der Einstellung des Menschen einer Gefährdung gegenüber wird das Sicherheitsbedürfnis unserer heutigen Gesellschaft diskutiert. Dies führt zu einer wahrscheinlichkeitstheoretischen Schreibweise der Sicherheitsforderungen, die sich jedoch - zumindest für die Bemessung von Tragwerken - in einen konkreten und auch einfach zu handhabenden Sicherheitsbegriff überführen lässt. Dieser hat auch für die Ausarbeitung von Normen bemerkenswerte Vorteile.

SUMMARY

The behaviour of man in front of dangerous situations is discussed and leads to some remarks on the safety demand of our society. An adequate formulation of safety requirements naturally is probability-based, but can - at least for the design of structures - be transformed to a tangible and simple safety concept. This concept shows considerable advantage also for code elaboration.

RESUME

Partant de la réaction de l'homme vis-à-vis des différents dangers, l'exigence de sécurité de la société d'aujourd'hui est discutée. Une notion adéquate se trouve naturellement sur une base probabiliste qui, au moins pour le dimensionnement des structures, peut être transmise à une notion de sécurité concrète et suffisamment simple. Cette notion renferme aussi des avantages considérables pour l'évaluation des différentes normes.

Leere Seite
Blank page
Page vide