

Anwendungsbereich und Hintergrund der neuen DIN 1055 Teil 4

Ihr Sicherheitskonzept beschreibt Lasten für die Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit

Die neue DIN 1055-4 liefert die Grundlage für die Bemessung der Tragfähigkeit und für den Nachweis der Gebrauchstauglichkeit von *Tragwerken*, nicht mehr von *Bauten*. Sie musste in das neue Sicherheitskonzept für die Tragwerksplanung im Konstruktiven Ingenieurbau eingebettet werden, das in DIN 1055-100 festgelegt ist. Dieses Sicherheitskonzept beruht, soweit die Einwirkungsseite der Nachweisgleichung betroffen ist, auf einem System von charakteristischen Lasten, Teilsicherheitsbeiwerten und Kombinationsfaktoren. Die grundlegend überarbeitete Windlastnorm beschreibt also charakteristische Lasten im Sinne der Nachweise der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit. Im folgenden Beitrag wird beschrieben, vor welchem klimatischen Hintergrund sie aufgestellt ist und für welchen Anwendungsbereich sie gilt.

Prof. Dr.-Ing. Hans-Jürgen Niemann



Jahrgang 1935; Studium des Bauingenieurwesens an der TH Hannover, Promotion und Habilitation an der Ruhr-Universität Bochum; seit 1981 Universitätsprofessor für Bauingenieurwesen; 1997 bis 2001 Dekan der Fakultät für Bauingenieurwesen der Ruhr-Universität Bochum; seit 2001 Gesellschafter der Ingenieurgesellschaft Niemann & Partner (Bochum)

1 Einführung

Die neue DIN 1055-4: *Einwirkungen auf Tragwerke – Windlasten* liegt als Gelbdruck 03/2001 im Entwurf vor. Sie soll die DIN 1055-4: *Lastannahmen für Bauten – Verkehrslasten, Windlasten bei nicht schwingungsanfälligen Bauwerken*, Ausgabe 8.86 ablösen. Der Wechsel in der Bezeichnung von *Bauten* zu *Tragwerke* bedeutet nicht, dass der Anwendungsbereich sich ändert: Die Norm dient zur Ermittlung der ungünstigen Wirkungen des natürlichen Windes auf die Tragkonstruktionen von baulichen Anlagen und ihrer Teile. Sie liefert damit die Grundlage für die Bemessung der Tragfähigkeit und für den Nachweis der Gebrauchstauglichkeit. Die Neufassung musste infolgedessen in das neue Sicherheitskonzept für die Tragwerksplanung im Konstruktiven Ingenieurbau eingebettet werden, das in DIN 1055-100 *Grundlagen der Tragwerksplanung, Sicherheitskonzept und Bemessungsregeln*, 3.2001 festgelegt ist. Das Sicherheitskonzept beruht, soweit die Einwirkungsseite der Nachweisgleichung betroffen ist, auf einem System von charakteristischen Lasten, Teilsicherheitsbeiwerten und Kombinationsfaktoren. Die grundlegend überarbeitete Windlastnorm beschreibt also charakteristische Lasten im Sinne der Nachweise der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit.

2 Gründe für die Neufassung der Windlastnorm

2.1 Stand der Windlastnormung in Deutschland

Die Windlastnorm dient zur Berechnung der ungünstigsten Wirkungen, die der natürliche Wind in der Überlagerung mit anderen Einwirkungen auf die tragenden Teile von Baukonstruktionen ausübt. Sie ist damit Grundlage für eine sichere Bemessung der Tragfähigkeit und den Nachweis der Gebrauchstauglichkeit.

Die z. Zt. gültige Windlastnorm DIN 1055 Teil 4 8/86 [3] geht in ihrem Konzept auf die Ausgabe Juni 1938 zurück: einheitliche Windgeschwindigkeit für das gesamte Geltungsgebiet, Erfassung der Böenwirkung durch eine geeignete Böengeschwindigkeit, Zunahme des Geschwindigkeitsdrucks mit der Höhe über Grund nach der bekannten Treppenkurve.

Materiell wurden 1941, 1961, 1977 und 1986 Anpassungen vorgenommen, die vor allem die aerodynamischen Beiwerte betrafen, so z.B. nach den negativen Erfahrungen bei der Sturmkatastrophe von 1961 in Schleswig-Holstein.

In der z.Zt. gültigen Norm wird für das gesamte Gebiet der BRD eine einheitliche Windgeschwindigkeit angenommen. Diese tritt nach Erläuterungen zu [3] in freiem Gelände in Süddeutschland etwa einmal in 50 Jahren, in der norddeutschen Tiefebene etwa einmal in 10 Jahren, entlang der Nord- und Ostseeküste einmal pro Jahr auf. Das führt zu regional sehr unterschiedlichen Sicherheitsniveaus.

Die Ausgabe 8.86 war vom damaligen Arbeitsausschuss als eine Zwischenlösung gedacht auf dem Wege einer grundlegenden Neubearbeitung mit dem Ziel [3] „... um eine Grundlage für eine wirklichkeitsnahe und allgemeingültige Beschreibung der Windwirkungen bei beliebigen Baukonstruktionen zu schaffen.“ Der Ausschuss schränkte den Anwendungsbereich im Titel auf nicht-schwingungsanfällige Bauwerke und in den Erläuterungen auf solche, bei denen die Windlast das Bemessungsergebnis nicht wesentlich bestimmt, ein.

Für turmartige Bauwerke wie Schornsteine und Antennentragwerke, bei denen die Windlast die Bemessung bestimmt, wurden daher zwischen 1984 und 1991 neue Normen [4,5] herausgegeben, in denen die Regelwerte der Windgeschwindigkeit in einer Windzonenkarte regional unterschiedlich festgelegt wurden. Damit war für diese Bauwerke ein im gesamten Geltungsbereich weitgehend gleichförmiges Sicherheitsniveau erreicht.

Wenn man die Norm durchgreifend ändert und nicht nur wie bisher ergänzt, muss man sich fragen lassen, ob der Gebäudebestand in der Vergangenheit nicht ausreichend sicher oder aber zu konservativ bemessen wurde, da doch der Wind der gleiche geblieben ist. Darauf gibt es eine Reihe von Antworten:

■ Tatsächlich weist die Versicherungswirtschaft seit vielen Jahren darauf hin, dass die Verluste bei Sturmschäden an Gebäuden ständig ansteigen [11]. Die Gründe sind vielfältig. Sie liegen u.a. darin, dass die versicherten Werte in den Gebäuden größer geworden sind. Alan G. Davenport, der Nestor der Windlast-

theorie, hat dazu bemerkt: „The adequate level of risk has not yet been clarified. In 10 years we double the amount of damage. Target risks must consider the social consequences.“ Auch wird nicht länger ausgeschlossen, dass sich das Sturmklima verschlechtert. Beide Trends können dafür sprechen, die Windlasten für die heute entstehende Bebauung anzupassen, um die Schadenshäufigkeit in der Zukunft zu begrenzen.

■ Die Methoden des Tragwerksentwurfs sind in den letzten Jahrzehnten ganz erheblich zugespitzt worden mit dem Ziel, Material und Kosten einzusparen. Das führt häufig dazu, dass früher vorhandene, versteckte Sicherheitsreserven aufgezehrt werden. Die heute möglichen, hochgenauen Berechnungen und Bemessungen werden jedoch auf der Eingabeseite mit einem Lastmodell durchgeführt, von dem wir wissen, dass es nur eine grobe, in vielen Fällen nicht-konservative Näherung ist. Die heutige Windlasttheorie ist seit etwa 1960 entstanden. Der Sprung gegenüber dem Stand von 1938 ist ähnlich groß wie der Fortschritt bei den Entwurfsmethoden. Heute stehen Windlastmastmodelle zur Verfügung, die sehr viel genauer sind als die alte Windlastnorm. Damit gelingt es, die modernen Möglichkeiten der Tragwerksoptimierung voll auszuschöpfen.

■ Auch die Bauweisen haben sich verändert; z.B. sind sehr viel leichtere Bauweisen möglich geworden. Das führt dazu, dass die Wirkung der Windlast gegenüber den Eigenlasten hervortritt und die Bemessung wesentlich bestimmt. Für den Tragwerksentwurf wird dann ein wirklichkeitsnahes Modell der Windlast und ihrer Wirkung auf das Tragwerk benötigt.

Wie erklärt sich dann, dass die Häufigkeit von Windschäden im gesamten Gebäudebestand offensichtlich in der Vergangenheit ein toleriertes Niveau nicht überschritten hat. Das liegt u.a. daran, dass die Vereinfachungen der jetzigen Norm in vielen Fällen durchaus konservativ sein können. Eine der Vereinfachungen besagt, dass sich das Bauwerk in offenem, glatten Gelände befindet und von allen Seiten frei zugänglich angeströmt werden kann. Tatsächlich trifft das nur in wenigen Fällen zu. Die große Mehrzahl ist durch Nachbarbebauung und Geländebewuchs geschützt; die hohen Windgeschwindigkeiten der exponierteren Lage im freien Gelände werden am Bauwerksstandort nicht erreicht.

Auch die weitere Annahme, dass die extreme Windgeschwindigkeit aus jeder beliebigen Richtung zu erwarten ist, ist konservativ, weil es bekanntlich bevorzugte Sturmwindrichtungen gibt. Viele Gebäude sind so ausgerichtet, dass die Windrichtung, bei der die höchsten vom Wind induzierten Beanspruchungen entstehen, nicht mit der Hauptwindrichtung zusammenfällt.

Die Neubearbeitung „von Grund auf“ [3] mit dem Ziel einer wirklichkeitsnahen Erfassung der Windwirkungen lief also auf eine stärkere Differenzierung und Detaillierung des Regelwerks hinaus.

Aufgabe des NABau-Arbeitsausschusses 00.02.03 war es vor diesem Hintergrund unter anderem,

- das Konzept der bestehenden Norm dort anzupassen, wo es sich als unzulänglich erwiesen hatte, und
- den Anwendungsbereich zu erweitern, um der Praxis für bisher nicht erfasste Anwendungsfälle genormte Verfahren an die Hand zu geben.

Die wesentlichen Randbedingungen werden im Folgenden kurz dargelegt.

2.2 Die Tragwerkssicherheit

Im Hintergrund der Tragwerksplanung steht die Aufgabe, das Risiko eines Bauwerks gegenüber den Kosten für Bau und Betrieb zu optimieren. Risiko wird hier als Produkt der Kosten einer Schädigung oder des Totalverlusts und der Wahrscheinlichkeit, dass er in der planmäßigen Lebensdauer eines Bauwerks eintritt, verstanden. Auch die Kosten von Unterhaltung und Ertüchtigung sind in dieser allgemeinen Definition unter dem Begriff des Risikos erfasst. Das Ziel der Optimierung besteht also darin, die Gesamtkosten für das Tragwerk zu minimieren.

Es wäre wünschenswert, jedes Risiko vollständig zu vermeiden. Dieses Ziel ist jedoch nicht zu erreichen, weil die Wahrscheinlichkeit für den Eintritt eines Schadens auch durch größten Aufwand bei der Herstellung nicht zu Null gemacht werden kann. Dafür gibt es zwei wesentliche Ursachen:

- Die Eingangsparameter, nämlich die Festigkeiten und die Einwirkungen, sind statistisch streuende Größen, so dass nicht ausgeschlossen werden kann, dass die Tragfähigkeit kleiner ist als der Einwirkungseffekt.
- Die Modelle, die der Prognose zu Grunde gelegt werden, sind unsicher oder ungenau. Dazu gehören die statischen und dynamischen Berechnungsmodelle ebenso wie die physikalischen Modelle für Lasten infolge Wind, Schnee, Erdbeben oder für Zwang infolge Temperatur, Baugrundbewegung, Montage usw. Im übrigen sind auch die Wahrscheinlichkeitsmodelle selbst mit Unsicherheiten behaftet.

Weitere Ursachen, die nach Eintritt eines Schadens häufig zu Tage treten, sind u.a. fehlende Redundanz und Robustheit des Tragwerks, Ausführungsmängel, menschlicher Irrtum bei Planung und Herstellung u.a.m. Sie können kaum durch Normung gehoben werden.

Die Minimierung der Gesamtkosten führt zu einem optimalen Höchstwert für die Versagenswahrscheinlichkeit oder allgemeiner für den Eintritt eines Schadens. Die Komplementärwahrscheinlichkeit, die Zuverlässigkeit, muss einen Mindestwert erreichen. Für die praktische Anwendung wird das Konzept an der historischen Schadensrate geeicht.

In der neuen Normengeneration, die zur Zeit entsteht, wird erstmals, und zwar mit DIN 1055-100 *Grundlagen der Tragwerksplanung, Sicherheitskonzept und Bemessungsregeln*, 3.200, das Nachweis-konzept vorgegeben und das geforderte Zuverlässigkeitsniveau zahlenmäßig festgelegt. Der Nachweis ist erbracht, wenn die durch den Teilsicherheitsbeiwert dividierte charakteristische Tragfähigkeit größer ist als der Einwirkungseffekt, der sich aus den mit den Teilsicherheitsbeiwerten vervielfachten charakteristischen Einwirkungen errechnet.

Die charakteristischen *Einwirkungen* sind als seltene Ereignisse im *oberen* Bereich der Wahrscheinlichkeitsverteilung, z.B. mit einer Überschreitungswahrscheinlichkeit von 0,98 definiert. Entsprechendes gilt für die Festigkeit im unteren Bereich ihrer Verteilung.

Man kann das geforderte Zuverlässigkeitsniveau einstellen, ohne Teilsicherheitsbeiwerte einzuführen, indem Bemessungswerte mit außerordentlich geringer Wahrscheinlichkeit der Über- bzw. Unterschreitung benutzt werden. Dieses Vorgehen hat jedoch einen wesentlichen Nachteil, der am Beispiel der Windlast besonders augenfällig wird: Ihr charakteristischer Wert hat eine Wiederkehrperiode von nominell 50 Jahren, ihr Bemessungswert eine solche von 2500 Jahren. Die Windstatistik umfasst etwa 50-jährige Beobachtungen. Es ist klar, dass der charakteristische Wert daraus zuverlässig prognostiziert werden kann, während bei der Extrapolation auf den extrem seltenen Bemessungswert der Erfahrungsbereich verlassen wird und die Prognose (wegen Klimaschwankungen, wegen Modellunsicherheiten des statistischen Modells u.a.m.) in erheblichem Maße unsicher bleiben muss. Es ist methodisch klarer und im Ergebnis sicherer, einen zuverlässigen Bemessungswert und einen einheitlichen Teilsicherheitsbeiwert zu benutzen.

Der Teilsicherheitsbeiwert für die Windlast hat dabei den Sinn, mögliche Überschreitungen des charakteristischen Wertes der Windgeschwindigkeit sowie Modellunsicherheiten des meteorologischen Modells, des Lastmodells und des statistischen Modells abzudecken.

Zusammenfassend ergibt sich für die Windlast aus der Grundlagnorm DIN 1055-100 *Grundlagen der Tragwerksplanung, Sicherheitskonzept und Be-*

messungsregeln, 3.2001: Die Windlasten sind nicht-ständige Lasten, deren Lasthöhe mit einem statistischen Kennwert festzulegen ist. Für die Normwindlast wird bei Bauten mit üblicher planmäßiger Lebensdauer eine (auf den Zeitraum eines Jahres bezogene) Überschreitungswahrscheinlichkeit von 0,02 vorgegeben. Daraus ergibt sich näherungsweise, dass die anzunehmende extreme Windgeschwindigkeit eine Wiederkehrperiode von (mindestens) 50 Jahren aufweisen soll. Diese Forderung war die Grundlage für die Windzonenkarte, die eine der Neuerungen der DIN 1055-4: *Einwirkungen auf Tragwerke – Windlasten* ist.

2.3 Vorarbeiten

Der NABau AA 00.02.03 konnte auf wesentliche Vorarbeiten zurückgreifen, die in zwei vorangegangenen Ausschüssen geleistet worden waren. Es handelt sich zum einen um den Arbeitsausschuss *Lastannahmen für Bauten; Verkehrslasten; Windlasten* des NABau im DIN (Obmann Helmut Hirtz), der als Ergebnis langjähriger Arbeit im Jahre 1993 einen Normvorschlag DIN 1055 Teil 40 vorgelegt hatte. Diese Vornorm diente, als die europäische Windlastnorm aufgestellt wurde, als nationales Bezugsdokument.

Der zweite Ausgangspunkt war die Europäische Vornorm ENV 1991-2-4: *Eurocode 1: Grundlagen der Tragwerksplanung und Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 2.4: Windlasten*, des Europäischen Komitees für Normung, CEN, die ein Unterausschuss (Convenor Hans Ruscheweyh) des Technischen Komitees CEN/TC 250 im Mai 1995 vorgelegt hatte.

Die Arbeiten zur Neufassung wurden im übrigen mit dem parallelen CEN-Arbeitsausschuss für den Eurocode EN 1991-1-4: *Einwirkungen auf Tragwerke – Windeinwirkungen* abgeglichen. Durch die Mitarbeit des Autors in beiden Ausschüssen gelang es, die verschiedenen Änderungsvorschläge und Anregungen beider Ausschüsse soweit möglich zu harmonisieren. Wo das nicht möglich war, wurden im Hinblick auf das noch zu erstellende NAD (National Application Document) in den Eurocode entsprechende Öffnungsklauseln aufgenommen, die abweichende Regelungen in den Ländern erlauben, so dass das deutsche NAD basierend auf der neuen DIN 1055-4 entwickelt werden kann.

3 Struktur des Normvorschlags

Die Windlast im böigen Wind ist ein außerordentlich komplizierter Vorgang. **Abb. 1** zeigt den Fußabdruck von großräumigen Böen, die über ein

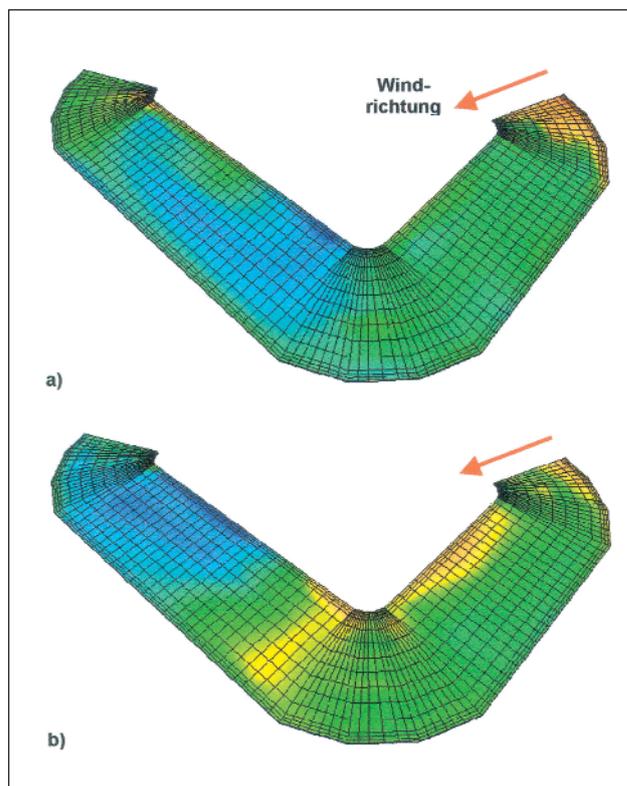


Abb. 1: Momentane Druckfelder auf der Oberseite eines Stadionsdaches: Ergebnisse eines Windkanalversuchs [12], rot: hoher Windsog, blau: niedriger Winddruck

Stadionsdach streichen, in den Drücken auf der Dachoberseite. Man erkennt die regellose Verteilung von Ausdehnung und Lage der hoch belasteten Bereiche. Ein erheblicher Aufwand ist erforderlich, um die Eingabedaten zu ermitteln und die Tragwerksreaktion zu berechnen. In der Mehrzahl der Fälle wirkt sich der Lastfall Wind auf die Kosten oder die Sicherheit eines Tragwerks nicht so stark aus, dass der Aufwand erforderlich wäre.

Eine wesentliche Aufgabe für die Windlastnorm bestand darin, die Wirkung dieser Lastabläufe auf die bemessungskritischen Tragwerksreaktionen vereinfacht zu erfassen. Der Grad der Vereinfachung wurde abgestuft, so dass der Tragwerksplaner einfache Verfahren für robuste Tragwerke ebenso findet wie genauere Verfahren für windempfindliche Bauwerke.

Die bekannte Windwirkungskette (**Abb. 2**) zeigt, wie die Tragwerksreaktion zustande kommt. Im ersten Schritt werden Windmessungen in ebenem, offenen Gelände statistisch ausgewertet, um den 50-Jahres-Wind als Kennwert zu erhalten und daraus eine Windzonenkarte zu erstellen.

Anschließend muss von dem Ort, an dem die Windmessung erfolgt, auf die Windverhältnisse am Bauwerksstandort geschlossen werden. Der Messort

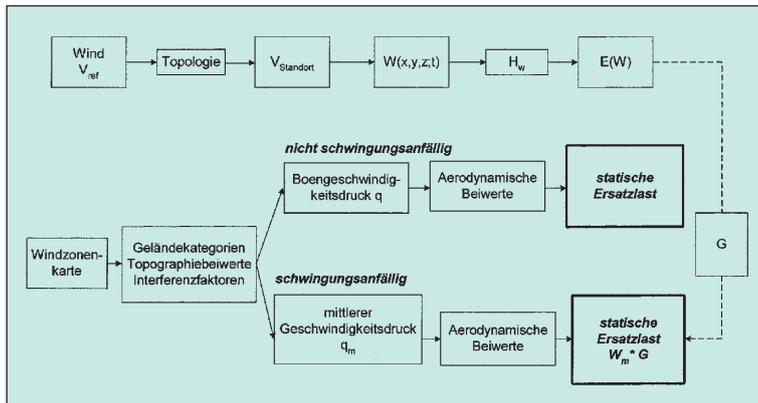


Abb. 2: Die Windwirkungskette und ihre Umsetzung für die Normung

liegt relativ exponiert, damit die Messung nicht gestört ist. Die jetzige Norm unterstellt, dass auch das Bauwerk gleichermaßen exponiert liegt. Diese konservative Annahme wird im Normvorschlag als Regelfall beibehalten.

Tatsächlich herrschen am Bauwerksstandort wegen der Bodenrauigkeit, wegen topografischer Einflüsse und wegen Strömungsinterferenz mit der Nachbarbebauung andere Strömungsverhältnisse. Der Normvorschlag enthält eine Öffnungsklausel zum Einfluss der Bodenrauigkeit: er darf, da er fast immer lastmindernd wirkt, ausgenutzt werden. Die Auswirkung mehrerer Rauigkeitswechsel stromauf vom Bauwerksstandort muss dabei berücksichtigt werden.

In diesen Zusammenhang gehört eine weitere Öffnungsklausel, die sich auf die Stärkewindrose, den Zusammenhang von Windstärke und Windrichtung, bezieht: Im Regelfall ist anzunehmen, dass die extreme Windgeschwindigkeit aus jeder Himmelsrichtung zu erwarten ist. Die Stärkewindrose darf berücksichtigt werden, ohne dass festgelegt wird, in welcher Weise das geschehen soll.

Das Verfahren, mit dem die Böenwirkung erfasst wird, richtet sich nach dem Ausmaß der Resonanzreaktion des Tragwerks: überwiegt die quasi-statische Reaktion, so wird das Konzept der einhüllenden Böengeschwindigkeit herangezogen. Ist das Tragwerk dagegen schwingungsanfällig, so greift man auf das Verfahren mit Böereaktionsfaktor zurück. Die neue DIN 1055-4 gilt im Gegensatz zur bisherigen Ausgabe 8.86 also auch für solche Tragwerke, die schwingungsanfällig gegenüber der dynamischen Wirkung der Windböigkeit sind. Hier wird eine Lücke geschlossen.

Die Norm erfasst darüber hinaus auch periodische Strömungskräfte, die durch Wirbelablösungen bei schlanken Tragwerken wie Masten, Türmen oder Schornsteinen erzeugt werden. Sie können bei mäßi-

gen oder geringen Windgeschwindigkeiten zu Wirbelresonanzschwingungen mit großen Lastwechselzahlen führen und Ermüdung verursachen.

Diese Erweiterungen sind als Anhänge formuliert, um den Kern der Norm für das Alltagsgeschäft der Tragwerksplanung zu reservieren und ihn von Sonderfällen freizuhalten.

4 Die Windzonenkarte

Der Geschwindigkeitsdruck der derzeit geltenden Windlastnorm [3] nimmt nach der bekannten Treppenkurve mit der Höhe über Grund zu. Die Werte gelten unabhängig von der geographischen Lage einheitlich für das gesamte Gebiet Deutschlands. Tatsächlich ist das Windklima zwischen Küste und Binnenland sehr unterschiedlich. Die bestehende Regelung führt daher zu unterschiedlichen Sicherheiten. Die Versagenswahrscheinlichkeit für Gebäude in Süddeutschland ist weitaus geringer als in Norddeutschland. Es war daher geboten, die Sicherheit baulicher Anlagen in der BRD auf ein gleichmäßiges, kontrolliertes Niveau zu bringen. Die Windzonenkarte der neuen Norm ist die grundlegende Voraussetzung, um dieses Ziel zu erreichen. Die Auswertung der Windstatistik führt dazu, dass die charakteristische Windgeschwindigkeit in Süddeutschland geringer ist als bisher, während sie in Norddeutschland höher angenommen werden muss. Dieses Ergebnis war zu erwarten. Es ist im Sinne der Wirtschaftlichkeit und Zuverlässigkeit gerade leichter, windempfindlicher Konstruktionen.

Nach dem neuen Sicherheitskonzept der DIN 1055-100 „ist der charakteristische Wert in der Regel so festgelegt, dass er mit einer Wahrscheinlichkeit von 0,98 während einer Bezugsdauer von einem Jahr nicht überschritten wird“ (Abschnitt 6, Satz (8)). Als typischer Grund für eine Abweichung von dieser Regel wird eine geringere Nutzungsdauer angegeben. Die gleiche Anforderung ergibt sich im übrigen auch aus dem Eurocode. Die Ausarbeitung der Windzonenkarte bleibt im Rahmen dieser Vorgaben den nationalen Anhängen überlassen, d.h. eine verbindliche europäische Fassung ist nicht vorgesehen.

Ein erster Vorschlag für eine Karte aus dem Jahre 1973 stammt von König und Zilch [9]. Diese wurde bei den Arbeiten zur grundsätzlichen Neufassung der Windlastnorm weiterentwickelt und bildete die Grundlage der Karte für den Gelbdruck der DIN 1056 von 1978, die schließlich 1984 mit dem Weißdruck Normencharakter erhielt und später auch in die

DIN 4131, 4133 eingeführt wurde. Auf diese auf eine Windzonenkarte wurde zunächst zurückgegriffen

Gleichzeitig regte der Ausschuss den Entwurf einer neuen Karte an, um die seit 1980 vergrößerte Datenbasis und die verbesserten Auswertemethoden auszunutzen. Das Vorhaben, an der Ruhr-Universität Bochum durchgeführt, wurde von Mitgliedern des Ausschusses und einem Mitarbeiter des Deutschen Wetterdienstes betreut und in allen Phasen begleitet.

Der Entwurf der neuen Karte lag im Februar 2001 vor. Die BRD ist darin in fünf Windzonen mit mittleren Windgeschwindigkeiten von 22,5 bis 30 m/s unterteilt. Nach Diskussion des Vorschlags u.a. durch den Ausschuss und bei Fachtagungen sowie nach einem Abgleich der Windzongrenzen mit Nachbarländern wurde die Karte mit einigen Änderungen im Ausschuss am 14.12.2001 verabschiedet.

Abb. 3 zeigt die Windzonenkarte nach neuestem Stand. Sie gründet auf einer größeren Menge an meteorologischen Daten und erfasst insgesamt 183 Stationen des Deutschen Wetterdienstes, dem dafür Dank gebührt, dass er die Daten zur Verfügung gestellt hat.

Die Windzonenkarte enthält die Bezugsgeschwindigkeit v_{ref} , für die bestimmte, einheitliche Standardbedingungen festgelegt wurden:

- mittlere Windgeschwindigkeit, die über 10 min gemittelt ist,
- Jahrestremwert mit einer Rückkehrperiode von 50 Jahren, der unabhängig von der Windrichtung bestimmt wird,
- ebenes Gelände der Geländekategorie II,
- 10 m Höhe über Grund.

Daraus werden die für ein Tragwerk maßgebenden Windlasten berechnet. Einflussparameter sind hierbei:

- *Die Geländerauhigkeit:* sie führt zu einer u.U. erheblichen Abminderung der Windlast.
- *Die Böendauer:* der Anstieg der Windgeschwindigkeit in Böen erhöht die Windwirkung. Die maßgebende Böengeschwindigkeit hängt von der Böendauer ab. Im Regelfall sind 2 bis 3 sec Böendauer angemessen.
- *Die Höhe über Grund:* die Zunahme der Windgeschwindigkeit mit wachsendem Bodenabstand wird durch Geschwindigkeitsprofile der Böengeschwindigkeit und der Mittelgeschwindigkeit erfasst.
- *Die Andauer des betrachteten Zustands:* die angegebene, charakteristische Last gilt für eine planmäßige Lebensdauer des Bauwerks von etwa 50 Jahren.

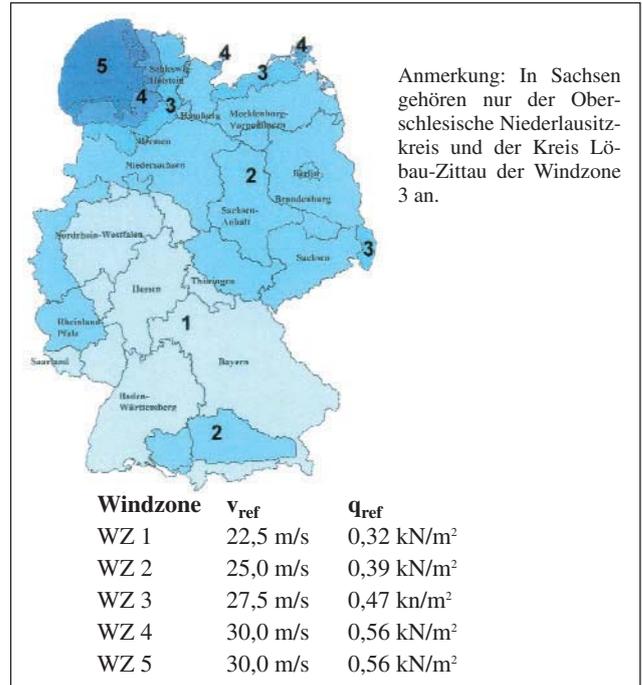


Abb. 3: Vorschlag für eine Windzonenkarte für die Windlastnorm

ge Lebensdauer des Bauwerks von etwa 50 Jahren. Für Zustände, die kürzere Zeit andauern, z.B. für Bauzustände können die Lasten ohne Verlust an Sicherheit abgemindert werden.

Zum Vergleich mit der gültigen Regelung der Windlastnorm Ausgabe 8/86 sind im Folgenden die Werte für den Böenstaudruck in 10 m und 40 m Höhe über Grund in ebenem, offenen Gelände zusammengestellt. Die Treppenkurve wird für den Vergleich durch eine stetige Kurve angenähert, die in den Erläuterungen zu DIN 1055 Teil 4, Ausgabe 8/86, angegeben ist.

Gültige Norm

Treppenkurve	$q(10) = 0,80 \text{ kN/m}^2$	$q(40) = 1,10 \text{ kN/m}^2$
stetige Kurve	$q(10) = 0,75 \text{ kN/m}^2$	$q(40) = 1,02 \text{ kN/m}^2$

Neue Windzonenkarte für ungeschützte Lagen

Windzone 1, ca. 40% der Fläche der BRD	$q(10) = 0,67 \text{ kN/m}^2$	$q(40) = 0,93 \text{ kN/m}^2$
Windzone 2, ca. 45% der Fläche der BRD	$q(10) = 0,82 \text{ kN/m}^2$	$q(40) = 1,14 \text{ kN/m}^2$
Windzone 3, ca. 10% der Fläche der BRD	$q(10) = 0,99 \text{ kN/m}^2$	$q(40) = 1,38 \text{ kN/m}^2$

Wie die Zusammenstellung zeigt, kann durch die differenzierte Einteilung in Windzonen der Geschwindigkeitsdruck im Süden und in der Mitte Deutschlands vermindert werden. In großen Teilen Norddeutschlands wird er nur geringfügig erhöht, und erst in Teilen von Schleswig-Holstein, Nieder-

Windzone mit v_{ref} in m/s		Böengeschwindigkeitsdruck in 10m Bodenabstand $q(10)$ in kN/m ² in Geländekategorie			
		I	II	III	IV
1	22,5	–	0,67 $(z/10)^{0,24}$	0,51 $(z/10)^{0,31}$	0,35 $(z/10)^{0,40}$
2	25,0	–	0,82 $(z/10)^{0,24}$	0,63 $(z/10)^{0,31}$	0,43 $(z/10)^{0,40}$
3	27,5	–	0,99 $(z/10)^{0,24}$	0,76 $(z/10)^{0,31}$	0,52 $(z/10)^{0,40}$
4	30,0	–	1,18 $(z/10)^{0,24}$	0,91 $(z/10)^{0,31}$	0,62 $(z/10)^{0,40}$
5	30,0	1,46 $(z/10)^{0,19}$	–	–	–

Tab. 1: Böengeschwindigkeitsdruck in den Windzonen in Abhängigkeit vom Geländetyp: I – offene See; II – offen, wenige niedrige Hindernisse; III – Vorstadt, Wald; IV – Stadtgebiete

sachsen und von Mecklenburg-Vorpommern ist eine spürbare Erhöhung von 25 bis 30% anzusetzen. In der Deutschen Bucht (Windzone 5) und entlang der Nordseeküste (Windzone 4) ist naturgemäß mit extremen Sturmstärken zu rechnen.

5 Geländeeinfluss

Je rauer die Geländeoberfläche ist, über die der Wind das Bauwerk anströmt, desto stärker nimmt – besonders in Bodennähe – die Grundgeschwindigkeit ab. Gleichzeitig wächst die Turbulenzintensität an. In rauerem Gelände sinkt also die statische Grundlast, gleichzeitig steigt der relative Anteil der durch Böen induzierten Last an. Die gesamte, aus beiden Anteilen resultierende Windlast wird durch Rauigkeit vermindert. Nur bei ausgeprägter Resonanz kann der dynamische Anteil vorherrschen und dadurch in rauerem Gelände zu höheren Beanspruchungen führen. Ist das Bauwerk von unterschiedlich rauem Gelände umgeben, so hängen diese Effekte zusätzlich von der Windrichtung ab.

Es wurden vier Kategorien der Geländerauigkeit definiert; **Tab. 1** enthält dafür die Profile des Böengeschwindigkeitsdruckes in den fünf Windzonen. Mit der Kategorie I wird die geringe Reibung zwischen einer Wasseroberfläche und der Luftströmung, also der Seewind erfasst. Er tritt nur in Windzone 5, d.h. auf den Inseln der Deutschen Bucht und in unmittelbarer Nähe zur Küste auf. Die Kategorie II gilt für freies, offenes Gelände mit einzelnen, weit auseinander liegenden, niedrigen Hindernissen. Sie wird konservativ als Regelfall festgelegt. Dadurch sind auch Standorte am Rande glatter Landflächen, z.B. Flughäfen, oder ausgedehnter Wasserflächen abgedeckt.

Der angenommene Regelfall ist eine relativ exponierte Lage des Bauwerks. Die Mehrzahl des Baubestandes liegt weniger exponiert in rauerem Gelände. Die Lastminderung ist u.U. sehr erheblich.

Die Lastminderung darf im Prinzip ausgenutzt werden. Dabei müssen aber einige Besonderheiten berücksichtigt werden. Die erste ist darin begründet, dass die Profile der **Tab. 1** sich erst nach einer gewissen Anlaufstrecke der Strömung über das rauere Gelände vollständig ausbilden. In Bodennähe, d.h. bei niedrigen Gebäuden genügen wenige 100 m, in großer Höhe setzt sich die Wirkung erst nach langer Anlaufstrecke, z.B. 30 km stromab von einem Rauigkeitswechsel durch. Im Übergangsbereich liegen Mischprofile vor. Bei der typischen, sehr ungleichförmigen Rauigkeit in Mitteleuropa erschien eine Regelung für die Berechnung der Mischprofile kompliziert und nicht für die Norm geeignet.

Ein grundsätzlicher Einwand besteht darin, dass bei Ausnutzung größerer Bodenrauigkeit die Sicherheit des Bauwerks davon abhängig gemacht wird, ob Bewuchs oder Bebauung der Umgebung dauernd vorhanden sein werden. Das muss vom Tragwerksplaner verantwortlich geprüft werden. Bei Innenstädten und vielen Vorstädten kann er sicher von dauerhafter Bodenrauigkeit ausgehen und die erhebliche Lastminderung ausnutzen, die dadurch entsteht.

Wenn die Windschutzwirkung nicht von der allgemeinen Bodenrauigkeit ausgeht, sondern von einem oder mehreren individuellen Nachbargebäuden, so liegt der Fall der Strömungsinterferenz in einer Gebäudegruppe vor. Die Schutzwirkung kann nicht ausgenutzt werden, da die Tragsicherheit von der Existenz der Nachbarbebauung abhängig gemacht wird. Jedoch müssen Lasterhöhungen infolge von Interferenzeffekten berücksichtigt werden.

Der Ausschuss hat, wie erwähnt, vor diesem Hintergrund das Profil der Kategorie II als konservativen Regelfall (außerhalb des Küstenbereichs) festgelegt. Jedoch ist eine Öffnungsklausel aufgenommen, die es dem Tragwerksplaner freigestellt, den Geländeeinfluss auszunutzen. Zu diesem Zweck sind die grundlegenden Windparameter für alle vier Geländekategorien in die Norm aufgenommen.

Der Ausschuss hat, wie erwähnt, vor diesem Hintergrund das Profil der Kategorie II als konservativen Regelfall (außerhalb des Küstenbereichs) festgelegt. Jedoch ist eine Öffnungsklausel aufgenommen, die es dem Tragwerksplaner freigestellt, den Geländeeinfluss auszunutzen. Zu diesem Zweck sind die grundlegenden Windparameter für alle vier Geländekategorien in die Norm aufgenommen.

6 Erfassung der Böenwirkung

6.1 Grundsätzliches Vorgehen

Der natürliche Wind wird als Überlagerung einer Grundströmung, die durch den 10-min-Mittelwert

erfasst wird, mit einer Zusatzbewegung infolge der Windböigkeit verstanden. Die Windlast besteht dementsprechend aus der statischen Grundlast, der eine schwankende Last aus der Windturbulenz überlagert ist. Die Böenlast tritt über ein breites Frequenzband verteilt auf. Die Reaktion des Tragwerks ist statisch auf die Grundlast, quasi-statisch auf die niederfrequente und resonant auf die höherfrequente Böenlast. Die wesentliche Schwierigkeit besteht darin, die durch die Böigkeit induzierte Last so zu abbilden, dass ihre Wirkung auf das Tragwerk und seine Bemessung zutreffend erfasst wird.

Der einfachen Handhabung wegen kam nur der Weg infrage, die Lastschwankungen und ihre Wirkungen auf das Tragwerk in Form von *statischen Ersatzlasten* zu erfassen. Für eine Windkraft F_w werden dabei je nach Schwingungsanfälligkeit zwei unterschiedliche Ansätze benutzt:

für eine nicht-schwingungsanfällige Konstruktion

$$F_w = c_f \cdot q(z) \cdot A_{\text{ref}} \quad (6.1)$$

für eine schwingungsanfällige Konstruktion

$$F_w = G \cdot c_f \cdot q_m(z) \cdot A_{\text{ref}} \quad (6.2)$$

(c_f – aerodynamischer Kraftbeiwert, A_{ref} – Bezugsfläche, q_m – mittlerer Geschwindigkeitsdruck in Bezugshöhe z).

Im ersten Falle wird der Böengeschwindigkeitsdruck q benutzt. Im zweiten Fall wird ein genaueres Verfahren herangezogen, das von der statischen Grundlast $F_{w,m} = c_f A_{\text{ref}} q_m$ ausgeht. Sie wird mit einem dynamischen Faktor, dem Böereaktionsfaktor G , vergrößert, der die Böenresonanz erfasst. Für den mittleren Geschwindigkeitsdruck gilt näherungsweise

$$q_m = \frac{\rho}{2} v_m^2 \quad (6.3)$$

mit der Luftdichte ρ .

6.2 Verfahren für nicht-schwingungsanfällige Bauwerke und Bauteile

Bei den meisten Tragwerken ist der Resonanzanteil kleiner als 10% und damit vernachlässigbar. Für solche Fälle wird das bisherige, vereinfachte Konzept der Böengeschwindigkeit beibehalten: darin wird eine statische Ersatzlast festgelegt, von der angenommen wird, dass sie zeitlich und räumlich konstant wirkt. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass die Böenlast tatsächlich nicht gleichzeitig an allen Oberflächenpunkten eines Baukörpers auftritt. Mit zunehmender Größe der Lasteinzugsfläche wird die Korrelationsabnahme immer größer, die Böenlast

durch die mechanische Übertragung immer stärker räumlich gemittelt und damit schließlich die gleichwertige Ersatzlast geringer.

Der Böengeschwindigkeitsdruck q für die Ersatzlast wurde anhand der quasi-statischen Böereaktion bestimmt:

$$q = (1 + 2gQ_0I_v) \cdot q_m \quad (6.4)$$

Der Klammerausdruck ist der quasi-statische Böereaktionsfaktor. Darin ist q_m der Geschwindigkeitsdruck der Grundgeschwindigkeit, g der Spitzenfaktor, I_v die Turbulenzintensität und Q_0 der Böengrundanteil der Böereaktion, ein Parameter, der die Korrelationsabnahme erfasst. Es wurde ein typischer Wert $gQ_0 = 3$ gewählt und damit auf eine typische Größe der Lasteinzugsfläche von ca. 50 m² abgestellt. Die entsprechende Böengeschwindigkeit wird aus dem Geschwindigkeitsdruck rückgerechnet:

$$v_b = \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot q} \quad (6.5)$$

Sie erweist sich bei der gewählten Lasteinzugsfläche als ein Mittelwert über eine Böendauer von $t_b = 2$ bis 3 sec.

7 Erfassung der Böenwirkung bei merklicher Böenresonanz

Das genauere Verfahren geht von der Vergrößerung einer typischen statischen Reaktionsgröße durch die böeninduzierte Windkraft aus. Dieser Böereaktionsfaktor G wird benutzt, um die statische Grundlast zu vergrößern und damit eine statische Ersatzlast mit gleicher Wirkung, wie sie der wirkliche stochastische Erregerprozess zumindest für die betrachtete Antwortgröße hat, zu gewinnen. Der Böereaktionsfaktor für die Tragwerksreaktion x ist demnach wie folgt definiert:

$$G = \frac{x_m + g \cdot \sigma_x}{x_m} = 1 + g \cdot \frac{\sigma_x}{x_m} \quad (7.1)$$

Dabei ist x_m der statische Mittelwert der Reaktion x , σ_x ihre Standardabweichung und g der Spitzenfaktor.

Abb. 4 zeigt die spektrale Verteilung S_x der Varianz σ_x^2 des Fußeinspannmomentes eines Kragsystems über die Frequenz n , wie sie in einem Windkanalversuch gemessen wurde. Man erkennt den Böengrundanteil, der ohne Resonanzüberhöhung, d.h. qua-

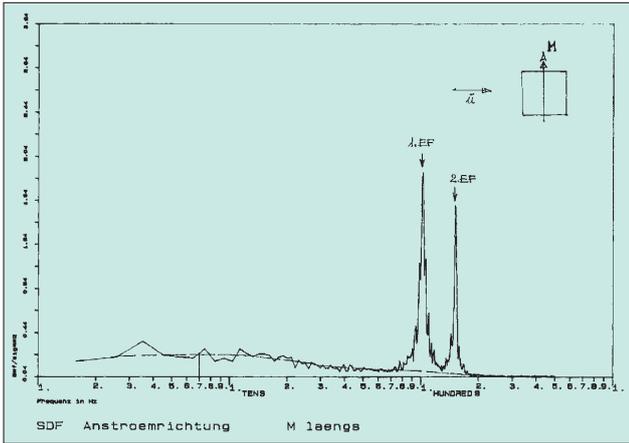


Abb. 4: Spektrale Dichte des Fußmoments eines Hochhausturmes

si-statisch übertragen wird, und die ausgeprägten Resonanzspitzen im Bereich der ersten zwei Eigenfrequenzen. Die Aufspaltung der beiden Anteile erfolgt im Frequenzraum anhand der Übertragungsgleichung. Einzelheiten dazu folgen später. Die Varianz der Antwort erhält man aus dem Antwortspektrum zu

$$\sigma_x^2 = \int_0^{\infty} S_x(n) \cdot dn \quad (7.2)$$

S_x bezeichnet die Spektraldichte. Sie setzt sich additiv aus quasi-statischem (oder Böengrund-) und Resonanzanteil zusammen. Daraus ergibt sich eine Aufspaltung der Standardabweichung σ_x gemäß:

$$\frac{\sigma_x}{x_m} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_{xQ}}{x_m}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{xR}}{x_m}\right)^2} \equiv 2I_V \sqrt{Q_0^2 + R_x^2} \quad (7.3)$$

Der zweite Teil der Gleichung definiert die normierten Parameter Q_0 und R_x , die in der Norm für die beiden Anteile benutzt werden. Der Böereaktionsfaktor ist damit

$$G = 1 + 2gI_V(z_{eff}) \sqrt{Q_0^2 + R_x^2} \quad (7.4)$$

Die Windlasttheorie zeigt, dass die bezogene Tragwerksreaktion auf die Böenlast annähernd proportional zur Turbulenzintensität I_V ist. Q_0 und R_x sind Proportionalitätsfaktoren, die von der speziellen Umständen abhängen und in der Norm angegeben werden.

Böengrundanteil: Für den Böengrundanteil gilt nach Gl. (7.3):

$$\frac{\sigma_{xQ}}{x_m} = 2 \cdot I_V \cdot Q_0 \quad (7.5)$$

Zur Erläuterung der Bedeutung von Q_0 wird das Fußmoment eines vertikalen Kragsystems be-

trachtet. Die quasi-statische Standardabweichung lässt sich ohne Transformation in den Frequenzbereich berechnen, weil die zugehörige mechanische Übertragung unabhängig von der Frequenz ist. Die Breite des Bauwerks ist b , die Höhe h . Mittelwert und Standardabweichung der quasi-statischen Reaktion erhält man zu

$$x_m = \int_h c_f(z) \cdot b(z) \cdot q_m(z) \cdot z \cdot dz = q_{m,h} c_f h^2 b \frac{1}{2(1+\alpha)}$$

$$\sigma_{xQ} = 2I_V q_{m,h} c_f h^2 b \left\{ \frac{1}{b^2} \iint \rho_b(y_1, y_2) \cdot dy_1 dy_2 \cdot \frac{1}{h^4} \iint_h z_1^{1+\alpha} \cdot z_2^{1+\alpha} \cdot \rho_h(z_1, z_2) \cdot dz_1 dz_2 \right\}^{1/2} \quad (7.6, 7.7)$$

Dabei ist mit α der Profilexponent des Windprofils bezeichnet, ρ_b und ρ_h sind die Korrelationen der Turbulenzstruktur in Breiten- und Höhenrichtung. Den normierten Böengrundanteil erhält man daraus zu

$$Q_0 = \frac{1}{2I_V} \frac{\sigma_{xQ}}{x_m} = 2(1+\alpha) \left\{ \frac{1}{b^2} \iint \rho_b(y_1, y_2) \cdot dy_1 dy_2 \cdot \frac{1}{h^4} \iint_h z_1^{1+\alpha} z_2^{1+\alpha} \cdot \rho_h(z_1, z_2) \cdot dz_1 dz_2 \right\}^{1/2} \quad (7.8)$$

Q_0 ist bestimmt durch die Korrelationskoeffizienten ρ . Die Abnahme der Korrelation in der Turbulenz zwischen zwei Punkten wird gekennzeichnet durch eine charakteristische Korrelationslänge, das Integralmaß L_i . Die Korrelationsabnahme über die Oberfläche des Bauwerks hängt deshalb von den Verhältnissen der Bauwerksbreite und Bauwerkshöhe zum Integralmaß oder allgemeiner von der Größe einer Lasteinzugsfläche ab. Die u.U. erhebliche Verringerung des Böengrundanteils mit wachsender Größe der Lasteinzugsfläche zeigt **Abb. 5**.

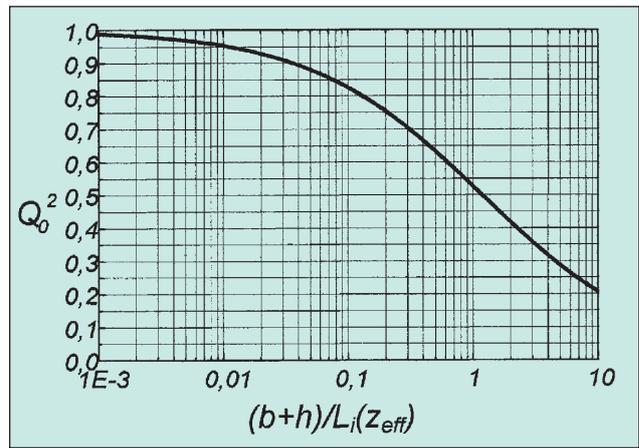


Abb. 5: Böengrundanteil

Resonanzanteil: Das Vorgehen im Normenvorschlag für den Resonanzanteil soll anhand eines 1-Freiheitsgrad-Schwingers kurz erläutert werden. Als Antwortgröße wird die Verschiebung x der Masse betrachtet. Die Resonanzreaktion lässt sich im Frequenzbereich d.h. im Antwortspektrum $S_x(n)$ identifizieren, indem der quasi-statisch übertragende Antwortanteil abgespalten wird. Man geht dazu von der Übertragungsgleichung im Frequenzraum aus, die den Zusammenhang zwischen dem Erregerkraftspektrum S_F und dem Antwortspektrum S_x beschreibt:

$$S_x(n) = \frac{V_x^2}{(m \cdot \omega_1^2)^2} S_F(n) = \frac{1}{(m \cdot \omega_1^2)^2} S_F(n) + \frac{V_1^2 - 1}{(m \cdot \omega_1^2)^2} S_F(n) = S_{xQ}(n) + S_{xR}(n) \quad (7.9)$$

Darin ist m die Masse, ω_1 die Eigenkreisfrequenz und $V_x(n)$ die mechanische Vergrößerungsfunktion des Schwingers. $V_x^2 = 1$ bedeutet statische Übertragung, der darüber hinausgehende, mit $(V_x^2 - 1)$ übertragende Anteil ist demnach durch Resonanz bedingt.

Um die Varianz des Resonanzanteils zu berechnen, wird nach Gl. (7.2) über die Frequenz integriert.

$$\sigma_{xR}^2 = \int S_{xR}(n) \cdot dn = \frac{1}{(m \cdot \omega_1^2)^2} \int (V_x^2 - 1) S_F \cdot dn \quad (7.10)$$

Betrachtet man die Vergrößerungsfunktion genauer, vereinfacht sich die Integration. Es ist

$$V_x^2 = \frac{1}{(1 - \eta^2)^2 + \left(\frac{\delta}{\pi} \eta\right)^2} \quad (7.11)$$

(η – Frequenzverhältnis $\eta = n/n_1$; δ – logarithmisches Dämpfungsdekrement). Die Dämpfung ist üblicherweise klein, so dass für die Vergrößerungsfunktion an der Resonanzstelle gilt:

$$V_x(\eta = 1) = \frac{\pi}{\delta} \gg 1 \quad \text{d.h.} \quad V_x^2 - 1 \approx V_x^2 \quad (7.12)$$

Weiterhin ist der Frequenzbereich der Resonanz, wo n in der Umgebung von n_1 ist, schmalbandig, so dass sich die breitbandige Spektraldichte der Erregerkraft dort, wo der größte Beitrag zum Integral entsteht, nur wenig ändert und konstant angenommen werden darf:

$$S_F(n_1 - \Delta \leq n \leq n_1 + \Delta) \approx S_F(n_1) \quad (7.13)$$

Die Integration von Gl. (7.10) führt mit diesen Vereinfachungen auf

$$\sigma_x^2 = \frac{n_1 S_F(n_1)}{(m \cdot \omega_1^2)^2} \int_0^\infty V_x^2 \cdot d\eta = \frac{n_1 S_F(n_1)}{(m \cdot \omega_1^2)^2} \frac{\pi^2}{2 \cdot \delta} \quad (7.14)$$

Um daraus R_x abzuleiten, sind noch zwei weitere Überlegungen anzustellen. Zunächst wird für den 1-Freiheitsgrad-Schwinger die statische Verschiebung unter der Wirkung der statischen Last eingesetzt:

$$x_m = \frac{F_{w,m}}{m \cdot \omega_1^2} \quad (7.15)$$

Weiterhin wird das Spektrum der Erregerkraft auf das Turbulenzspektrum S_v zurückgeführt. Wie beim Böengrundanteil muss auch beim Resonanzanteil die Korrelation berücksichtigt werden. Sie hängt außer von der Lasteinzugsfläche auch von der Frequenz ab. Dieses Verhalten wird mit folgendem Ansatz erfasst:

$$\frac{S_F(n)}{F_{w,m}^2} = (2 \cdot I_v)^2 \cdot R_h(n, h/L_i) \cdot R_b(n, b/L_i) \frac{S_v(n)}{\sigma_v^2} \quad (7.16)$$

Darin sind R_b und R_h die aerodynamischen Übertragungsfunktionen in Horizontal- und Vertikalrichtung quer zur Windrichtung. Die Gl. (7.15) und (7.16) werden in (7.14) eingesetzt und man erhält schließlich für den normierten Resonanzanteil:

$$R_x^2 = \left(\frac{1}{2 \cdot I_v} \right)^2 \left(\frac{\sigma_x}{x_m} \right)^2 = \frac{\pi^2}{2\delta} \cdot R_h(n_1) \cdot R_b(n_1) \cdot \frac{S_v(n_1) \cdot n_1}{\sigma_v^2} \quad (7.17)$$

Die Gleichung (7.17) lässt sich direkt auf einzelne Schwingungsformen eines kontinuierlichen Schwingers anwenden. Die Schwingungsform geht dabei in die aerodynamischen Übertragungsfunktionen ein, d.h. sie sind als modale Größen zu ermitteln. Der Ansatz der Norm gilt für die Grundschiwingung.

Genau genommen muss über alle Eigenformen summiert werden. Bei kleiner Dämpfung und ausreichendem Abstand zwischen den Eigenformen dominiert die Grundschiwingung. Die übrigen Beiträge sind zu vernachlässigen. Schwingt das Tragwerk merklich in mehreren Eigenformen, z.B. bei einem massiven Turm mit flexiblem Mastaufsatz, so müssen ins Einzelne gehende Berechnungen herangezogen werden. Das Normverfahren stößt hier an seine Grenzen.

Literatur

- [1] DIN 1055-100: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 100: Grundlagen der Tragwerksplanung, Sicherheitskonzept und Bemessungsregeln, 03.2001
- [2] E DIN 1055-4: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 4: Windlasten, Entwurf 03.2001
- [3] DIN 1055 Teil 4: Lastannahmen für Bauten – Verkehrslasten, Windlasten bei nicht schwingungsanfälligen Bauwerken – 08.1986
- [4] DIN 1056: Freistehende Schornsteine in Massivbauart – Berechnung und Ausführung, 10.1984
- [5] DIN 4131: Antennentragwerke aus Stahl, 11.1991; DIN 4133: Schornsteine aus Stahl, 11.1991
- [6] G. Böllmann, G. Jurksch: Ein Beitrag zur Festlegung der Grundwind- und Nennböengeschwindigkeit im Binnenland der Bundesrepublik Deutschland für die DIN-Norm 1055, Teil 4, Meteorol. Rdsch. 37, S. 1-10, 1984
- [7] C. P. W. Geurts: External pressure coefficients and peak factor for buildings in ENV 1991-2-4 : Wind Loads, TNO-report 2000-CON-DYN-R2021, April 2000
- [8] W. Bächlin: Belastung von Gebäuden durch den windinduzierten Innendruck, Sonderforschungsbereich 210 „Strömungsmechanische Bemessungsgrundlagen für Bauwerke“, Universität Karlsruhe (TH), März 1985
- [9] König, G., und K. Zilch: Untersuchung zur Schaffung von Unterlagen für wirtschaftliche und sichere Annahmen über Windlasten – Windgeschwindigkeitskarte Deutschland, Forschungsbericht T.H. Darmstadt 1973
- [10] Niemann, H.-J., und M. Hortmanns: Die neue DIN 1055 T4: Windlasten, in Windeinwirkungen im Bauwesen, 7. Dreiländertagung D-A-CH 2001 der Windtechnologischen Gesellschaft, Hrsg. Udo Peil, Aachen 2001
- [11] Berz: The increasing significance of windstorms and the IDNDR. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 41-44 (1992) pp. 23-25
- [12] Stadion Borussia Mönchengladbach: Windkanaluntersuchung zu den statischen und dynamischen Windlasten, Interner Bericht der Ingenieurgesellschaft Niemann & Partner, Bochum, und PSP – Technologien im Bauwesen, Aachen, Mai 2002