

Neue Normenverfahren für die Berechnung wind-induzierter, dynamischer Tragwerksreaktionen

Rüdiger Höffer

Arbeitsgruppe Windingenieurwesen und Strömungsmechanik am Institut für Konstruktiven Ingenieurbau, Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften, Ruhr-Univ. Bochum

Zusammenfassung: Mit der bis voraussichtlich 2028 abgeschlossenen Einführung der zweiten Eurocodegeneration zu den Windeinwirkungen auf Bauwerke werden die Modelle der Windwirkungen und der Ersatzlasten für die Bestimmungen der Bauwerksantworten erheblich erweitert. Neben den äquivalenten quasistatischen Ersatzlasten für die Böenerregung in Längsrichtung, nunmehr auch für Schwingungsformen mit Vorzeichenwechsel, wird erstmalig die Behandlung der böeninduzierten Quer- und Torsionsanregung in zwei Anhängen geregelt sowie ein neues Modell für die Wirbelerregung eingeführt. Die Verfahren werden diskutiert.

1 Einführung

1.1 Stand des Normungsverfahrens

Der Ausschuss SC1 zum Eurocode 1: Actions on structures des Europäischen Normungskomitee CEN/TC250 für die Eurocodes im Konstruktiven Ingenieurbau hat die Umfragephase („Enquiry Phase“) für die Vornormen prEN 1991-1-1:2023 Dichten, Eigengewicht, Auflasten für Gebäude, prEN 1991-1-3 Schneelasten, prEN 1991-1-5:2023-03 Thermische Einwirkungen und prEN 1991-1-9:2023 Atmosphärische Vereisung und andere bereits abgeschlossen durch und wird über die konsolidierten Vornormen in seiner Sitzung im Januar 2024 abstimmen und den Mitgliedsländern zur Einführung bis voraussichtlich 2028 vorschlagen. Der Ausschuss CEN/TC250 SC1 leitete auch den Entwurf des Vorschlags für prEN 1991-1-4:2024-03 - Part 1-4: General actions — Wind actions [1] an das CEN-CENELEC Management Centre weiter, nachdem dieser von einem Projektteam ausgearbeitet, Fachkommentare der nationalen Spiegelausschüsse eingeholt und im Ausschuss diskutiert worden war. Ziel ist es, u.a. auch diese Vornorm in der letzten Umfragephase im März 2024 im Rahmen der CEN-Umfragestufe weiter abzustimmen. Die Inhalte des Entwurfes zur Vornorm werden dabei der Fachöffentlichkeit europaweit und etwas eingeschränkter auch darüber hinaus zur Diskussion zur Verfügung gestellt,

Kommentare gesammelt, nach Mitgliedsländern geordnet, in den entsprechenden nationalen Spiegelausschüssen bewertet und in der zuständigen Arbeitsgruppe „Working Group 1“ bzw. der „Task Group 2“ unter dem Dach des Ausschusses SC1 durch- bzw. eingearbeitet. Die Abstimmung über die konsolidierte Vornorm als Vorschlag zur Einführung in den Mitgliedsländern obliegt wiederum dem Ausschuss SC1. Danach müssen die fehlenden Prozessschritte für die Einführung der neuen oder überarbeiteten europäischen Normen unternommen werden. Eine vollständige Übersicht über den Zeitplan der Eurocode-Entwicklung nach derzeitigem Stand und zu den Prozessen und Verfahren sind auf der Website <https://boss.cenelec.eu/homegrowndeliverables/en/pages/> zu finden.

1.2 Übersicht über die Fortschreibungen in der prEN1991-1-4:2024

Basierend auf dem Mandat M/515 der Europäischen Kommission (Mandat zur Änderung bestehender Eurocodes und zur Erweiterung des Anwendungsbereichs der Strukturellen Eurocodes) hat die vorgelegte Aktualisierung der ersten Generation der EN 1991-1-4 die im Vergleich der Einwirkungsnormen meisten Weiterentwicklungen erfahren: Es wird eine neue Formulierung zur Bestimmung der mittleren Geschwindigkeit und der Turbulenzintensität bis $z = 300$ m eingeführt. Die beiden in der aktuellen Norm definierten Verfahren zur Bestimmung des Strukturbeiwerts $c_s c_d$ werden vereinheitlicht, ebenso wie die ehemals zwei Ansätze zur Bestimmung der wirbelerregten Querschwingungsamplituden (informativ Anhänge F und H). Die Behandlung der Querwind- und Torsionseinwirkungen auf schwingungsanfällige Gebäude ist im informativen Anhang G aufgenommen, der sich allerdings mit dem Anhang H überschneidet. Neu aufgenommen werden Regelungen zur Auswirkung von Vereisung (informativer Anhang E) und der Windeinwirkung auf Silos sowie Tanks. Viele Werte der aerodynamischen Koeffizienten werden für Bauwerkformen hinzugefügt, die in der aktuellen Norm noch nicht berücksichtigt sind, um aktuelle architektonische Entwürfe abzudecken. In Anbetracht ihrer großen Anzahl werden sie in drei neue normative Anhänge C (Druckbeiwerte), D (Nettodruckbeiwerte und abgeleitete Kraftbeiwerte) und E (Kraftbeiwerte) übertragen. Es wird ein neuer Anhang J über das Verhalten von Stahlgittertürmen und abgespannter Masten hinzugefügt (übernommen aus EN 1993-3-1). In drei neuen Anhängen K, L und M werden Hinweise zur Ableitung von Bemessungsparametern aus Windkanalversuchen und numerischen Simulationen, zur Ableitung von Windgeschwindigkeiten aus Messungen an meteorologischen Stationen und zu probabilistischen Modellen für Windeinwirkungen gegeben.

2 Böenerregte Schwingungen in Windrichtung

2.1 Spektralanalyse

Die Spektralanalyse der dynamischen Reaktionen von Bauwerken auf Windanregungen erfolgt in der Regel nach dem Verfahren von Davenport, das in den frühen 1960er Jahren entwickelt wurde. Es wird davon ausgegangen, dass die Lastschwankungen nur aufgrund der Schwankungen des turbulenten Windes auftreten, während die körperinduzierte Turbulenz vernachlässigt wird. Für eine flexible Struktur, bei der eine dynamische Reaktion hervorgerufen wird, wird dieser Ansatz zu einem quasi-stationären Ansatz im

Frequenzbereich modifiziert, was dem Davenport-Verfahren hinterlegt ist. Das grundsätzliche Verfahren ist in Abb. 1 schematisch dargestellt.

Die spektrale Leistungsdichte (Spektrum) des turbulenten Windes („gust spectrum“) wird mit der Last, im Frequenzbereich dargestellt als „generalized force spectrum“, über die aerodynamische Admittanzfunktion („aerodynamic admittance“) in Beziehung gesetzt. Das Spektrum der Last und das Spektrum der Strukturantwort („response spectrum“) sind über die Übertragungsfunktionen (mechanische Impedanz, „transfer function“) miteinander verbunden. Obwohl weiterhin angenommen wird, dass die Last nur durch den Wind induziert wird, reagiert die Struktur nicht auf alle Lastfrequenzen gleichmäßig, sondern kann resonant überhöht werden. Im Frequenzbereich werden die Spektren bzw. die Übertragungsfunktion durch frequenzweise Multiplikation verknüpft, wie in Abb. 2 dargestellt.

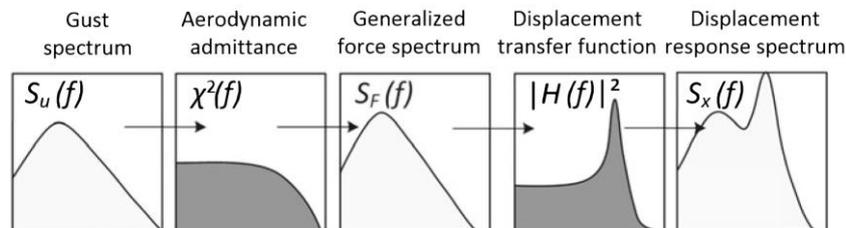


Abbildung 1: Alan G. Davenport wind loading chain and spectral analysis of along-wind effects on structures after Zhou and Kareem (2003), [6]

Vektor der mechanischen Übertragungsfunktionen (T transpon., $*$ konj. komplex)

$$\underline{H}_x^T = \begin{bmatrix} H_{xF_1} \\ H_{xF_2} \\ \dots \end{bmatrix}$$

$$\underline{H}_x^* = \begin{bmatrix} H_{xF_1}^* & H_{xF_2}^* & \dots \end{bmatrix}$$

Spektrale Dichtefunktion der Antwort

$$S_x = \underline{H}_x^* \cdot \underline{S}_F \cdot \underline{H}_x^T$$

Antwortvarianz

$$\sigma_x^2 = \int_0^\infty S_x(f) \cdot df$$

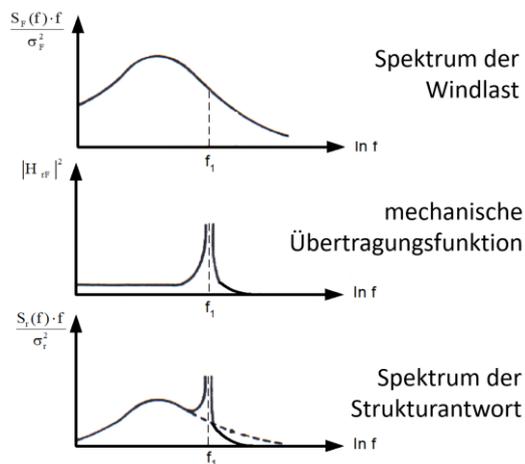


Abbildung 2: Spektralanalyse eines Mehrfreiheitsgradsystems

EN 1991-1-4 in der derzeitigen und zukünftigen Form bietet Berechnungsverfahren an, die die Reaktion der Struktur auf Windturbulenz beschreiben, wobei nur die erste Eigenform berücksichtigt wird. Mit ihnen können Bauwerke mit einer Höhe von bis zu 300 m sowie Brücken mit Spannweiten bis 200 m behandelt werden. Die derzeit eingeführte Norm ([3] in Verbindung mit [4]) behandelt nicht das Problem der Torsionsschwingungen oder der turbulenzinduzierten Querschwingungen. Die mechanische Übertragungsfunktion gilt für

eine Schwingungsform j , ist komplex mit der komplexen Größe i und im Frequenzbereich definiert. In Gleichung (1)

$$H_{x,j}(i\omega) = \frac{1}{m_j(\omega_j^2 - \omega^2 - 2i\xi_j\omega_j\omega)} \quad (1)$$

Bezeichnen x bzw. r interessierende Antwortgröße, z.B. eine Verschiebung, und j die Schwingungsform bzw. Modalform, m_j ist die modale Masse, ω_j ist die j . Kreiseigenfrequenz, ω ist die (breitbandig verteilte) Erregerfrequenz und ξ_j ist das kritische Dämpfungsverhältnis in der j . Modalform.

2.2 Äquivalente quasistatische Ersatzlast nach DIN EN 1991-1-4:2010

Für die praktische Tragwerksplanung soll auf ein vollständiges Vorgehen nach dem Frequenzbereichsverfahren verzichtet werden. Auch eine dynamische Berechnung soll vermieden werden – mit Ausnahme der Bestimmung einer Grundeigenfrequenz und der zugehörigen Eigenform. Stattdessen werden nach DIN EN 1991-1-4:2010-12 [3] & NA [4] und [1] quasistatische Ersatzlast bestimmt, die bei Ansatz zu einer äquivalenten Beanspruchung des untersuchten Schnittes des Tragwerks führen. Dies wird in [1], ebenso wie in [3] und [4], durch einen Strukturbeiwert realisiert, der auf eine statische Windkraftgröße aufmultipliziert wird, um resonante Überhöhungen ebenso wie Korrelationseinflüsse der fluktuierenden Oberflächendrücke einzuschließen.

Die Schwingungsanfälligkeit einer Konstruktion ist grundsätzlich an eine bestimmte Reaktionsgröße S gebunden. Der Spitzenwert S_p wird dazu aufgespalten in die mittlere Reaktion S_m und ihre Standardabweichung σ_S . Die Gesamtvarianz σ_S^2 setzt sich aus der quasi-statischen Varianz σ_{SB}^2 und der Varianz infolge Resonanz σ_{SR}^2 wie in Gl. 2 gezeigt zusammen. Der Dynamikfaktor in Gl. 3 spiegelt das Verhältnis der Tragwerksreaktion mit und ohne Resonanz wider.

$$S_p = S_m + k_p \cdot \sigma_S = S_m + k_p \cdot \sqrt{\sigma_{SB}^2 + \sigma_{SR}^2} \quad (2)$$

$$c_d = \frac{S_m + k_p \cdot \sqrt{\sigma_{SB}^2 + \sigma_{SR}^2}}{S_m + k_{pQ} \cdot \sigma_{SB}} = \frac{S_m + k_p \cdot \sigma_{SB} \cdot \sqrt{1 + \frac{R^2}{B^2}}}{S_m + k_{pQ} \cdot \sigma_{SB}} \quad (3)$$

Für lineares Tragverhalten erhält man den entsprechenden Zusammenhang für die jeweilige Windeinwirkung. Der Dynamikbeiwert kann dann gleichwertig aus den im Windkanal gemessenen Kraftgrößen abgeleitet werden. Anwendungen finden sich in [7] und [8].

Im Anhang B der DIN EN 1991-1-4 [3] ist ein Verfahren angegeben, mit dem Böengrundanteil B^2 und Resonanzanteil R^2 bestimmt werden können. Es nutzt dabei aus, dass die Intensität der Windkräfte praktisch proportional zur Intensität der Windturbulenz ist. Insofern ist es nur für die Windkraft in Windrichtung zur Ermittlung von Dynamikbeiwert c_d und Größenbeiwert c_s direkt anwendbar. Für andere Einwirkungen, die Querkraft und das Windmoment, trifft dies nicht zu. Das Berechnungsverfahren muss daher so angepasst werden, dass die Kraftwirkung der Grundströmung und der Windturbulenz separat eingebunden werden. In Voruntersuchung wurden Dynamikbeiwert und Größenfaktor daher einzeln anhand von Windkanalversuchen bestimmt. Eine ausführliche Darstellung zu diesem

Vorgehen ist in [5] angegeben. Das Verfahren gilt für die Grundeigenfrequenz und eine Schwindungsform ohne Vorzeichenwechsel.

2.3 Fortschreibung für die Vornorm prEN1991-1-4:2024

Die Fortschreibung konzentriert sich zum einen auf eine Restrukturierung und Aufteilung des Spitzenfaktors k_p . Der Spitzenfaktor k_B ist der linearisierte Spitzenfaktor für die Reaktion auf den Böengrundanteil, definiert als das Verhältnis zwischen dem erwarteten Maximalwert über 10 Minuten der fluktuierenden Hintergrundreaktion und seiner Standardabweichung. Der Spitzenfaktor k_R ist der Spitzenfaktor für die Resonanzreaktion, definiert als das Verhältnis des erwarteten Maximalwerts über 10 Minuten der fluktuierenden Resonanzreaktion zu ihrer Standardabweichung. Beide Spitzenfaktoren sind nicht gleich groß, da die Resonanzreaktion vom Energiegehalt der Leistungsdichte der Turbulenz um die betrachtete Eigenfrequenz abhängt, während die Antwort auf den Böengrundanteil sehr breitbandig ist und der zugehörige Spitzenfaktor vom Energiegehalt über die gesamte Frequenzbandbreite abhängt. Die aus der derzeitigen Formulierung des Strukturbeiwertes $c_s c_d$ (s. Gl. 4) nach [3] in Verbindung mit [4] entwickelte Fortschreibung liefert c_{sd} (s. Gl. 5).

$$c_s c_d = \frac{1 + 2 * k_p * I_v(z_s) * \sqrt{B^2 + R^2}}{1 + 7 * I_v(z_s)} \quad (4)$$

$$c_{sd} = \frac{1 + 2 * I_u(z_s) * \sqrt{(k_B * B)^2 + (k_R * R)^2}}{1 + 7 * I_u(z_s)} \quad (5)$$

Zur Verdeutlichung der Nichttrennbarkeit von c_d für die turbulente Anregung und c_s für den Korrelationseffekt aufgrund der Tragwerksausdehnung in der bautechnischen Anwendung, wird in der Fortschreibung $c_s c_d$ in c_{sd} umbenannt.

Ein zweiter Aspekt der Fortschreibung ist der Einbezug von zwei Konfigurationen für horizontal ausgedehnte Tragwerke, wie Brücken, die aufgrund ihrer Lagerungen Schwingungsformen mit wechselndem Vorzeichen aufweisen. Die behandelten Fälle sind in der Abb. 3 gezeigt. Die Zeichnungen sind einer Arbeitsversion aus der Komiteearbeit entnommen.

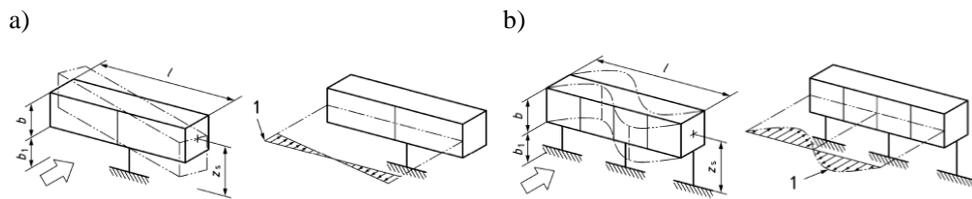


Abbildung 3: In [1] behandelte Schwingungsformen mit wechselnden Vorzeichen; die Bezugshöhe z_s hängt von den Lagegeometrien b_1 und b ab, „ l “ bezeichnet die der mittleren, konstant verteilten Windkraft überlagerte räumlich und zeitlich maximale Amplitude der schwankenden Windlast

3 Böen- und wirbelerregte Querschwingungen

Die folgenden Ausführungen sind eng an [9] aus Mai 2023 angelehnt, mehrere aktuelle Arbeiten stehen vor der Veröffentlichung.

3.1 Böeninduzierte Quer- oder Torsionsanregung von Bauwerken

Die Windlastnormung in der Bundesrepublik enthielt bislang noch keine Regelungen zur Ermittlung einer böeninduzierten Quer- oder Torsionsanregung von Bauwerken. In den verschiedenen Normengenerationen einschließlich der aktuell eingeführten Bestimmungen werden dynamische Anregungen von Schwingungen, die nicht Längsschwingungen sind, sich also quer zum Windvektor oder im Torsionsfreiheitsgrad auftreten, nur infolge der Wirbelerregung oder infolge aeroelastischer Effekte, wie etwa Galloping oder Brückenflattern, geregelt bzw. angesprochen. Dieses wird sich mit Einführung der zweiten Eurocodegeneration ändern. Die Tabelle 5.4 in [1] verweist dazu auf die Anhänge G für Bauwerke mit rechteckförmigem Grundriss und H für schlanke Bauwerke mit verschiedenen Querschnittsformen. Das Vorgehen teilt sich nach der bezogenen Schlankheit $h/\sqrt{(b \cdot d)}$ ein, h ist die Bauwerkshöhe und b sowie d sind Grundrissabmessungen, die Breite b ist wie üblich quer zum Wind orientiert. Für Werte zwischen 3 und 6 wird ein Vorgehen nach Anhang G vorgeschrieben, welches bereits seit zwei Jahrzehnten in einigen Normen weltweit eingeführt, somit erprobt und bekannt ist. Dieses Verfahren ist für vertikal orientierte Gebäude gedacht, fokussiert sich auf die Böenerregung, schließt jedoch Wirbelerregungsanteile nicht grundsätzlich aus und ist empirisch validiert. Bei höheren Schlankheiten ist nach Anhang H vorzugehen. Hier werden getrennte rechnerische Behandlungen der Böenerregung (Kapitel H.4), der Wirbelerregung (Kapitel H.5) sowie der aeroelastischen Effekte Galloping (Kapitel H.6) und Flattern (H.7) geregelt. Aktuelle Literatur dazu ist mit [10] erschienen.

3.2 Fortschreibung des Wirbelerregungsmodells

Eine besondere, auch den zukünftigen deutschen nationalen Anhang betreffende Frage ergibt sich für die Regelungen zur Wirbelerregung im Anhang H. Das seit vielen Jahrzehnten u.a. in der Bundesrepublik laut [4] eingeführte Verfahren 1 zur Berechnung der Querschwingungsamplituden gemäß Kapitel E.1.5.2 (Korrelationslängenverfahren) im Anhang E ([4]) wird nicht mehr im Vorschlag zur Vornorm [1] enthalten. Stattdessen ist das derzeitig unter E.1.5.3 beschriebene Verfahren 2 (Spektralverfahren) in einer stark überarbeiteten Form eingefügt worden, so dass es nun auch für verschiedene Tragwerkstypen anwendbar ist. Grund ist zum einen die Forderung des CENTC250 für die Fortschreibung der Eurocodes, alternative Rechenabläufe zu vermeiden, und zum anderen der technische Hinweis, dass Rechenergebnisse nach dem Korrelationslängenverfahren für besondere, turbulenzarme Klimate nicht immer zu auf der sicheren Seite liegenden Tragwerksauslegungen liegen, was dagegen von einem Spektralverfahren mit expliziter Berücksichtigung eines Turbulenzparameters erwartet werden darf. Es existieren mehrere neue Veröffentlichungen, die dies belegen, aber auch feststellen, dass zumindest das in der Bundesrepublik derzeit nicht eingeführte Verfahren 2 nach E.1.5.3 nicht selten zu ökonomisch ungünstigeren Lösungen führen kann. Diese Ergebnisse sind in Abb. 4 an Beispielen nachvollziehbar.

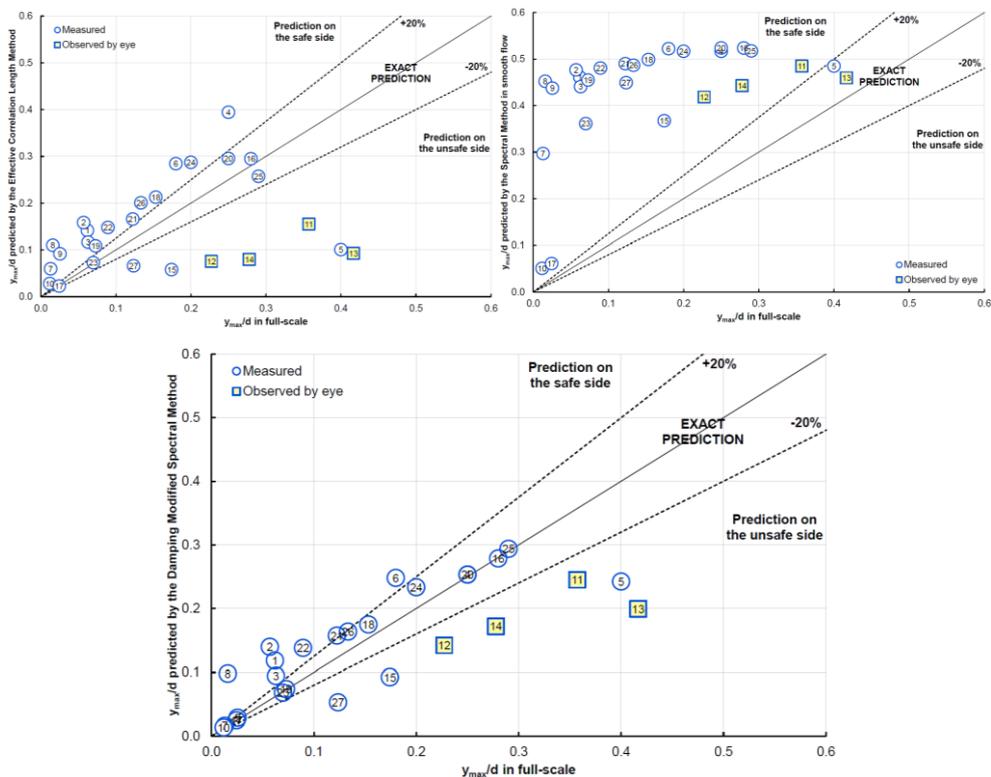


Abbildung 4: Rechnerisch bestimmte, normalisierte Schwingungsamplituden für 27 ausgeführte Schornsteine, aufgetragen über den beobachteten Werten;
 ob. links: rechnerisch bestimmt nach dem Wirklängenverfahren (E.1.5.2 in [3])
 ob. rechts: rechnerisch bestimmt nach dem Spektralverfahren (E.1.5.3 in [3])
 unten: rechnerisch bestimmt, Fortschreibung in [1], Anhang H, Kapitel H.5)
 (entnommen aus [11])

Es sind ausgeführte Stahlschornsteintragwerke beobachtet und die sich einstellenden Queramplituden gemessen (Kreissymbole) oder geschätzt (Rahmensymbole) worden. Mit den bekannten Eigenschaften der Tragwerke sind sodann Prädiktionen mithilfe des Korrelationslängenverfahren nach E.1.5.2 (in oberer Teilabbildung behandelt), mittels des Spektralverfahrens nach E.1.5.3 (in mittlerer Teilabbildung behandelt) sowie mittels dem verbesserten Verfahren aus [1], Anhang H, Kapitel H.5, erstellt und den Beobachtungswerten gegenübergestellt worden. Eine strenge Übereinstimmung der vorhergesagten und der beobachteten Amplituden würde sich dann ergeben, wenn alle Ergebnispunkte auf der Diagonalen liegen würden. Abweichungen nach oben bedeuten eine Vorhersage auf der sicheren Seite (liegt im mittleren Teilbild durchgängig vor, tlw. unökonomisch weit auf der sicheren Seite), Streuungen nach unten bedeuten eine unsichere Vorhersage (im oberen Teilbild zu erkennen, tlw. als unsicher zu bewerten). Das Potential des überarbeiteten, in [1] aufgenommenen Spektralverfahrens wird aus dem unteren Teilbild erkennbar, wo zu sehen ist, dass sich die Ergebnispunkte dem Diagonalbereich am besten annähern. Trotz der in einigen Ergebnisfällen erkennbaren Unsicherheiten im oberen Teilbild hat man bei der Anwendung des Wirklängenverfahrens jahrzehntelang gute Erfahrungen gemacht. Das

Verfahren ist durchgängig wissenschaftlich-technisch begleitet, als weitgehend fachlich richtig und erprobt bewertet worden. Zudem ist es den mit derartigen Berechnungen befassten Tragwerksplanerinnen und Tragwerksplanern in den anwendenden Ländern bekannt. Somit kann das Verfahren als eine Regel der Technik betrachtet werden. Deshalb und wegen seiner starken Marktdurchdringung ist beabsichtigt, das Verfahren auch bei Einführung der zweiten Normengeneration weiterhin anwenden zu können, zumindest als Alternative zu dem in einer einzuführenden Norm enthaltenen Spektralverfahren.

Danksagung

Der Autor dankt der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Förderung der Forschungsarbeiten unter den Projektnummern 426322127 und 493357786, deren Ergebnisse hier mit eingeflossen sind, den Kollegen aus dem CEN/TC250-Projektteam SC1-T3-EN1991-1-4, Dr. Svend Ole Hansen/Dänemark, Dr. John Rees/Großbritannien, Prof. Dr. Francesco Ricciardelli/Italien und Pierre Spehl/Belgien, für die Überlassung von Materialien zur Verwendung für diesen Aufsatz, der Geschäftsstelle der Bundesvereinigung der Prüfeningenieure für Bautechnik e.V., BVPI, dem Verband der Beratenden Ingenieure, VBI, sowie dem Sekretariat des CEN/TC 250/SC1, welches beim DIN liegt, für die Unterstützungen bei der Normenarbeit.

Literatur

- [1] Draft of prEN 1991-1-4:2024, Eurocode 1: Actions on structures — Part 1-4: General actions — Wind actions; CEN/TC 250, Secretariat BSI, 2023-03-30.
- [2] Denton, S. (2023). Overview Eurocodes. Eurocode Conference, Deutsches Institut für Bautechnik, Berlin, May, 24th, 2023.
- [3] DIN EN 1991-1-4:2005+A1:2010+AC:2010, Ausgabe Dezember 2010. Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-4: Allgemeine Einwirkungen, Windlasten, Deutsche Fassung EN 199114:2010, Deutsches Institut für Normung e.V.
- [4] DIN EN 1991-1-4/NA, Ausgabe Dezember 2010. Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-4: Allgemeine Einwirkungen – Windlasten
- [5] Niemann, H.J., Höffer, R. & Hölischer, N.: Windeinwirkungen auf weit gespannte Balkenbrücken, In: Festschrift Gerhard Hanswille, 2011, pp. 303-309
- [6] Zhou, Y., Kareem, A.: Aerodynamic Admittance Functions of Tall Buildings. Technical Report. University of Notre Dame, USA (2003)
- [7] Höffer, R., Thiele, K., Lupi, F., Winkelmann, U., Hubert, W., Kalender, C., Wüchner, R., Chen, C: Aktuelle Modelle und Methoden zur Windlastermittlung; in: Stahlbau-Kalender 2022, April 2022, Verlag Ernst & Sohn, ISBN: 978-3-433-03361-6
- [8] Meskouris, K., Butenweg, C., Hinzen, K.-G., Höffer, R.: Structural Dynamics with Applications in Earthquake and Wind Engineering. 2nd edition, Springer-Verlag

GmbH Germany, part of Springer Nature, 2019, <https://doi.org/10.1007/978-3-662-57550-5>, Library of Congress Control Number: 2018949059

- [9] Höffer, R.: Eine neue Norm für die Bestimmung von Windeinwirkungen zur Bemessung der Tragfähigkeit von Bauwerk und Bauteil - Erste Einblicke in die Neuerungen im Entwurf für die Vornorm prEN1991-1-4:2024. In: *Der Prüflingenieur*, Ausgabe 62, Mai 2023, S. 94ff., Hrsg. Bundesvereinigung der Prüflingenieure für Bautechnik e.V., Berlin
- [10] Ricciardelli, F.: prEN 1991-1-4:2021: The draft Second Generation Eurocode on wind actions on structures - A personal view. *Wind and Structures*, Vol. 37, No. 2 (2023) 79-94, <https://doi.org/10.12989/was.2023.37.2.079>
- [11] Lupi, F.; Niemann, H.-J.; Höffer, R.: A novel spectral method for cross-wind vibrations: Application to 27 full-scale chimneys; *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, Elsevier, 2017, <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2017.10.014>