

# **Das neue WTG-Merkblatt zur numerischen Simulation von Windströmungen**

**Casimir Katz**

*SOFiSTiK AG*

**Zusammenfassung:** Die WTG-Richtlinie zu den Windkanalversuchen ist schon lange eine anerkannte Referenz im Bereich des Windingenieurwesens. Da die Anwendung von CFD-Verfahren immer breiteren Raum einnimmt, erschien es sinnvoll eine eigene Richtlinie für diese Verfahren zu erstellen. Der bestehende Eurocode EN 1991-1-4 sieht die Verwendung von experimentellen und numerischen Verfahren vor, sofern diese sorgfältig validiert werden. Die Validierung ist daher eine wesentliche im Merkblatt behandelte Fragestellung.

## **1 Zweck und Inhalt des Merkblatts**

Das Merkblatt soll einerseits Ingenieure und Architekten unterstützen, die numerische Windsimulationen durchführen lassen und die Ergebnisse anwenden. In der Fachwelt hat sich für diese Verfahren die Abkürzung CFD (Computational Fluid Dynamics) etabliert. Es soll andererseits für die ausführenden Untersuchungsstellen, die Ersteller der Berechnung, eine gemeinsame Basis zur Verfügung stellen im Hinblick auf Modellierungs- und Auswertemethoden sowie die Qualitätssicherung für Simulationen in der atmosphärischen Grenzschicht. Es kann und soll weder die Beschäftigung mit den Grundlagen der Strömungsmechanik noch die Verantwortung des Ingenieurs ersetzen.

Das Merkblatt enthält Leitlinien für die Durchführung von numerischen Simulationen in der Bauwerksaerodynamik. Für numerische Berechnungen muss die verwendete Software verifiziert sein, d.h. es muss durch den Hersteller sichergestellt sein, dass die Gleichungen korrekt implementiert sind. Sie muss aber durch den Anwender auch hinsichtlich der Eignung für das vorliegende Problem validiert werden. Der Anwender muss sich also darüber klarwerden, ob er die richtigen Gleichungen löst, d.h. das richtige Modell gewählt hat. Eine solche Validierung sollte anhand von Versuchen oder Naturmessungen erfolgen. Mit entsprechender Erfahrung kann dies auch mit bereits erfolgten ähnlichen Problemstellungen belegt werden. Die Begriffe Verifikation und Validierung sind im Bereich der Softwarelieferanten für numerische Simulationen seit langem bekannt und werden dort intensiv durchgeführt.

Die Hauptkapitel sind bezeichnet mit:

1. Einleitung
2. Windströmungen und Windwirkungen
3. Die natürliche Anströmung
4. Modellbildung
5. Qualitätssicherung
6. Numerische Umsetzung
7. Dokumentation
8. Anhang A – Atmosphärische Grenzschicht
9. Anhang B – Validierungsdaten

## 2 Windströmungen und Windwirkungen

Dieses Kapitel beschäftigt sich allgemein mit Windeffekten und der grundsätzlichen Unterschiede bei numerischen und experimentellen Untersuchungen. Jede Methode hat ihre Vor- und Nachteile und eine optimale Beurteilung kann auf der Verbindung beider Verfahren beruhen.

Je nach Anwendungsbereich können sich höchst unterschiedliche Aspekte ergeben. Das Merkblatt beschäftigt sich primär mit der Frage der Lastermittlung und damit auch den Anforderungen an die Tragwerksplanung und Standsicherheit.

Windlasten sind Lasten, bei denen alle Werte örtlich und zeitlich veränderlich und laut EN 1990 als veränderliche Einwirkung einzustufen sind. Nach Abschnitt 4.1.2, Absatz (7): ist bei veränderlichen Einwirkungen der charakteristische Wert  $Q_k$  für einen bestimmten Zeitraum als oberer Wert einer vorgegebenen Überschreitungswahrscheinlichkeit definiert. Und in Anmerkung 2 wird auf das „98%-Überschreitungsfraktile der Extremwertverteilung für einen Bezugszeitraum von 1 Jahr“ Bezug genommen. Daher besteht die einzige Möglichkeit zur Ermittlung von Extremwerten darin, diese aus Druck-Zeitreihen der Beiwerte, Windlasten oder Effekten der Windlasten statistisch zu ermitteln. Dabei ist zu beachten, dass Windlasten keiner Gauss-Verteilung gehorchen und dass die Effekte aus den Windlasten mit den Windgeschwindigkeiten nicht linear korreliert sind.

Der klassische Ansatz für die Ingenieurpraxis gestaltet sich aber immer noch so, dass in den Normen eine Böengeschwindigkeit mit einem einzigen zugehörigen Druck- oder Kraftbeiwerte angegeben wird. Früher waren das Mittelwerte, heute ist in diese Beiwerte die Extremwertstatistik der Windlasten eingeflossen. Man könnte auch sagen: versteckt.

Die reine Verwendung von Extremwerten bei der Belastung erzeugt auch ein Problem der Gleichzeitigkeit der anzusetzenden Windlasten (Korrelationseffekte). Es gibt daher auch Ansätze zur Beschreibung des Windes aufgeteilt in Mittelwerte und variable Anteile, die dann jeweils auch unterschiedliche Sicherheitsbeiwerte erhalten können. Diese werden insbesondere im Brückenbau angewendet.

Eine Übertragung der Extremwertstatistik auf unterschiedliche Ergebnisse (z.B. Winddruck und Windsog oder Schnittgrößen) ist bei Windbeanspruchungen im Allgemeinen ausgeschlossen. Man müsste idealerweise diese Verfahren auf jede einzelne Lastkombination anwenden. Die Anforderungen der Normen beschränken sich aber auf den relativen

Nachweis, dass der Bemessungswert des Effekts aller kombinierten Einwirkungen  $E_d$  kleiner als der Bemessungswert der Widerstände  $R_d$  der Bauteile oder des Bauwerks ist:

$$E_d \leq R_d \quad (1)$$

Es ist deshalb unerlässlich, die Anforderungen an die numerischen Untersuchungen in entsprechende Gruppen einzuteilen, so dass sich aus den unterschiedlichen Genauigkeitsanprüchen auch unterschiedliche Verfahren ergeben.

Untersuchungsgegenstände	Beispiele	Mindest-Anforderungen				
		Genauigkeit	Räumlich	Zeitlich	Struktur	Num. Verfahren
Belastungen / Kräfte	Gesamtkräfte	G1	R1	Z1	S1/S2	▶ Gruppe 1
	Gemittelte Kräfte, Parameterstudien, Vorbemessung	G2	R2	Z1	S1/S2	▶ Gruppe 1
	Gemittelte Kräfte oder Kraftbeiwerte z.B. für Strukturquerschnitte, Brücken etc. für die Bemessung	G2	R2	Z2	S1	▶ Gruppe 2
	Ortliche Drücke	G3	R3/R4	Z3	S1	▶ Gruppe 3
Tragwerksantwort	Galloping	G1	R2	Z1	S2/S3	▶ Gruppe 1
	Einsetzgeschwindigkeit	G2	R3	Z2	S2/S3	▶ Gruppe 2
	Böenantwort	G2	R2	Z2	S2	▶ Gruppe 2
	Wirbelregte Querschwingungen	G3	R2	Z3	S4	▶ Gruppe 4
	Querschwingamplitude	G3	R2	Z3	S4	▶ Gruppe 4
Flattern, FSI						

Abbildung 1: Mindestanforderungen an numerische Verfahren zu verschiedenen Fragestellungen

### 3 Windströmungen und Windwirkungen

Ein wesentliches Merkmal des natürlichen Windes ist die Grenzschichtausbildung. Am Boden wird die Windgeschwindigkeit bis auf null an der Oberfläche reduziert. Mit steigender Höhe nimmt die Geschwindigkeit in der Regel zu. Die Turbulenzintensität fällt gleichzeitig mit steigender Höhe ab. Sollen mechanische Größen, wie z.B. Windlasten oder -geschwindigkeiten an Bauwerken, erfasst werden, muss die Windströmung inklusive Grenzschicht nachgebildet werden. Neutrale thermische Schichtungen sind typisch für die meisten Starkwinde und können somit für die Bestimmung von Windlasten an Bauwerken herangezogen werden.

### 4 Modellbildung

In diesem Kapitel werden die Grundbegriffe der Strömungssimulation bzw. der Modellbildung der physikalischen Prozesse erläutert. Eine geschlossene Simulation der Navier-Stokes-Gleichungen viskoser Strömungen ist bei den im Windingenieurwesen auftretenden Reynoldszahlen technisch nicht möglich, daher müssen einige turbulente Prozesse modelliert werden.

Ein besonderes Augenmerk muss dabei auf die Möglichkeiten der Abbildung zeitlich veränderlicher Prozesse liegen. Diese reichen von den stationären RANS-Methoden zu den deutlich aufwändigeren LES-Methoden, die der Situation im Windkanal deutlich näher kommen.

## **5 Qualitätssicherung**

Die Auswahl eines Modells muss sich an der Aufgabenstellung orientieren um die wesentlichen Zielgrößen ausreichend genau abzubilden. Es gibt daher eine Mindestanforderung an die Komplexität in Abhängigkeit der Aufgabenstellung. Wenn aber die Komplexität des Modells gesteigert wird, entsteht nicht nur ein größerer Aufwand, sondern durch die Anzahl der neu eingeführten Parameter zusätzliche Unschärfen. Daher stellt die Wahl eines Modells immer einen Kompromiss zwischen erforderlichem Aufwand und erreichbarer Genauigkeit dar. Hochkomplexe Modelle sind infolge ihrer vielen streuenden Eingangsgrößen und deren Unsicherheiten weniger robust.

In Deutschland hat eine intensive Diskussion bei der Erstellung der VDI Richtlinie 6201 die Verantwortung des Ingenieurs für sein eigenes Tun bereits wieder in den Vordergrund gerückt. Diese Gedanken sind nun insbesondere auch das WTG-Merkblatt eingeflossen. Verifikation und Validierung sind für den Softwareersteller und den Anwender von Belang. Während eine Verifikation im Grundsatz nur die Ergebnisse „richtig“ oder „falsch“ liefert, bewertet eine Validierung eine ausreichende Genauigkeit, welche immer mit einer Toleranz verbunden ist.

### **5.1 Programm-Verifikation**

Eine Programm-Verifikation soll beweisen, dass das Programm im Rahmen seiner Voraussetzungen richtig rechnet, also die Gleichungen richtig löst. Dies ist im Wesentlichen die Aufgabe des Softwareerstellers. Sie kann aber auch als Eingangskontrolle bei Softwareupdates und bei der Verwendung von open-source Produkten erforderlich sein.

### **5.2 Prüfung durch den Anwender**

Die Überprüfung der Rechnung (oft als Lösungs-Verifikation bezeichnet) durch den Anwender soll sicherstellen, dass die Rechnung in sich konsistent ist, d.h. eine stabile Lösung erreicht wurde, bei der die erwarteten Effekte sich einstellen und von der verwendeten Modellbildung nicht mehr maßgeblich abhängen. Das umfasst auch die Kontrolle der Eingangsdaten und letztlich auch den Nachweis, dass die Grenzzustände der Tragfähigkeit oder des Gebrauchszustandes eingehalten werden. Der Eurocode verwendet für den Nachweis der Gleichung (1) ebenfalls den Begriff Verifikation.

### **5.3 Validierung**

Im Gegensatz zur Verifikation zeigt eine Validierung, dass die richtigen Gleichungen gelöst werden, die Simulation also mit dem gewählten Modell die gestellte Aufgabe hinreichend genau löst. (siehe ASME [9] und VDI 6201 [10] sowie VDI 3783). Jedes Modell hat

Voraussetzungen für seine Anwendung, die erfüllt sein müssen, aber nicht für alle Fragestellungen ist eine vollständige Modellierung aller Effekte erforderlich.

In diesem Kapitel des Merkblatts werden ausführlich Kriterien vorgestellt, mit denen eine Validierung bewertet werden kann. Es kann jedoch nicht Aufgabe einer Richtlinie sein, genaue Regeln aufzustellen, welche Methode und welche Person für die anstehende Aufgabenstellung aus-reichend qualifiziert ist.

## 6 Numerische Umsetzung

In diesem Kapitel werden praktische Tipps zum Ablauf von CFD-Berechnungen und Möglichkeiten zur Anwenderverifikation angegeben.

## 7 Dokumentation

Zur Unterstützung der eigenen Qualitätssicherung und damit Ergebnisse einer Berechnung durch Dritte nachvollzogen oder bewertet werden können, sind die umfangreiche Informationen zum Programm und zu den Eingabedaten erforderlich. In diesem Abschnitt werden aber auch die Fragen der Auswertungen für Windfelder, Drücke und quasistatische Beiwerte sowie die Kräfte behandelt. Die Ermittlung charakteristischer Werte erfolgt nach den gleichen Regeln, die auch im Windkanal angewendet werden. Es werden jedoch auch Hinweise zu den quasistatischen Verfahren gegeben, die in einigen Bereichen des Windingenieurwesens noch anwendbar sind.

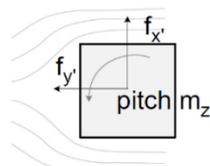
## 8 Anhänge

Nach einem Anhang A mit Hinweisen auf erweiterte Modelle zur Beschreibung der atmosphärischen Grenzschicht, werden in einem Anhang B einige Quellen für Referenzwerte und grundsätzliche Anmerkungen zu den vorliegenden Daten angegeben.

In vielen veröffentlichten Fällen fehlen genauere Angaben zum Windfeld und man muss sehr genau bewerten, welche Ergebnisse wirklich übertragbar sind.

## 9 Beispiel Kraftbeiwerte eines quadratischen Querschnitts

In einem Benchmark wurden mittlere Kraftbeiwerte für Querschnitt ermittelt



Windgeschwindigkeit	$U = 40 \text{ m/s}$ ( $Re = 80 \cdot 106$ )
Turbulenzintensität	$I = 14.8 \%$
Integrales Längenmaß	$L_y = 250 \text{ m}$
Daraus abgeleitete Mischweglänge	$31.2 \text{ m}$
Kantenlänge = 30 m, Bezugslänge $a_{ref}$	$= 42.43 \text{ m}$ (Diagonale)

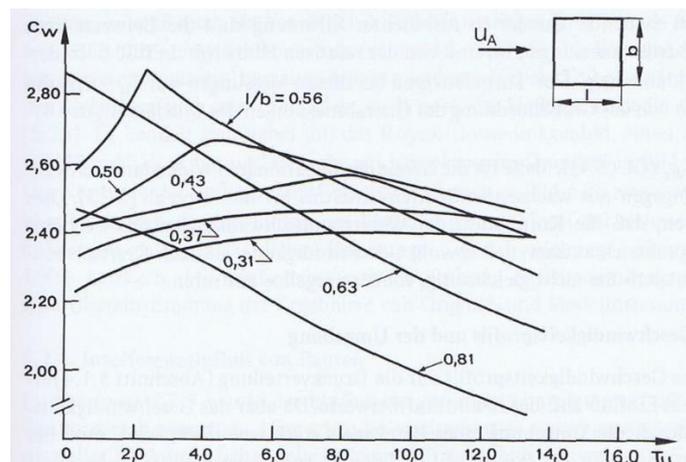
Wenn man nun diese Werte mit verschiedenen numerischen Modellen (RKE oder RNG-Turbulenzmodell) und Eingangsparemtern (Mischweglänge  $L_{mix}$ ) mit den Werten aus den Normen vergleicht, erkennt man deutliche Differenzen:

Square Configuration 0°	$L_{mix}$	$C_{f-y,rke}$	$C_{f-y,mg}$
No-slip Boundary condition	72 m	1.198	1.296
	31 m	1.149	1.218
	16 m	1.127	1.203
Roughness $k = 0.03$ m, $z_o = 0.9$ m	72 m	1.156	1.241
	31 m	1.130	1.175
	16 m	1.089	1.171
DIN EN 1991-1-4 Fig. 7.23	-	2.15/1.41 = 1.52	
Sockel (Experiment und alte DIN)	Bild 5.20	1.90/1.41 = 1.35	
	Bild 5.25	1.70/1.41 = 1.20	
	DIN 1055-4 (1986)	1.90/1.41 = 1.35	

**Tabelle 1:** Gegenüberstellung der Ergebnisse mit Referenzen

Die alte DIN 1055-4 (1986) könnte sich auf die echten Mittelwerte beziehen, die neueren Normen der DIN EN 1991 sicher auf die charakteristischen Beiwerte. Welche Korrekturen dort eingeflossen sind ist aber unbekannt. In diesem Falle ist zumindest eine Berücksichtigung der atmosphärischen Grenzschicht nicht als relevant anzusehen, da alle Versuche und Rechnungen an einem 2D-Modell mit homogenem Strömungsfeld erfolgten.

Die grün markierten Werte sind diejenigen, die der Bearbeiter für die Mittelwerte verwenden würde. Der RNG-Wert weicht von dem alten Normwert nur um 9.8% ab aber im Vergleich zu den Versuchsbeiwerten wird klar, dass die Werte von der angesetzten Turbulenz abhängen:



**Abbildung 2:** Einfluss der Turbulenz und Seitenverhältnis auf Kraftbeiwerte von Rechteckquerschnitten [12]

## **10 Zusammenfassung**

Im EN1991-1-4 gibt es im Abschnitt 1.5 eine generelle Öffnungsklausel: „In Ergänzung zu dieser Norm können Windkanalversuche und bewährte und/oder anerkannte numerische Verfahren zur Bestimmung von Lasten und Systemreaktionen angewandt werden, wenn die Struktur und der natürliche Wind zutreffend modelliert werden.“

Zutreffend bedeutet, dass eine Validierung erfolgen muss. Beim ersten Mal muss das sorgfältig erfolgen, danach kann man bei ähnlichen Projekten den Aufwand reduzieren. Aber die letzte Verantwortung liegt beim Ersteller der Rechnung, nicht beim Ersteller der Software.

Das WTG-Merkblatt zu den numerischen Simulationen der Windströmungen will den Ersteller und dem Auftraggeber solcher Untersuchungen dafür Hilfestellungen geben.

## Literatur

- [1] WINDTECHNOLOGISCHE GESELLSCHAFT WTG e.V., WTG-Merkblatt Nr. WTG 001/ 1996 – Windkanalversuche in der Gebäudeaerodynamik, Aachen, 1996
- [2] WINDTECHNOLOGISCHE GESELLSCHAFT WTG e.V., WTG-Merkblatt M1 – Windkanalversuche in der Gebäudeaerodynamik, Aachen, 2023
- [3] WINDTECHNOLOGISCHE GESELLSCHAFT WTG e.V., WTG-Merkblatt M3 – Numerische Simulation von Windströmungen, Aachen, 2023
- [4] ENGINEERING DATA SCIENCE UNIT, Characteristics of atmospheric turbulence near the ground: strong winds (neutral atmosphere), Data Item 74031, 1974
- [5] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG e. V., DIN EN 1990:2010: Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung, Beuth-Verlag, 2010
- [6] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG e. V., DIN EN 1991-1-4:2010-12: Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-4: Allgemeine Einwirkungen – Windlasten, Beuth-Verlag, 2010
- [7] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG e. V., DIN EN 1991-1-4/NA:2010-12: Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-4: Allgemeine Einwirkungen – Windlasten, Beuth-Verlag, 2010
- [8] FRANKE J., HELLSTEN A., SCHLÜNZEN, H., CARISSIMO, B., Best Practice Guideline for the CFD Simulation of Flows in the Urban Environment - COST Action 732, 2007
- [9] ASME Guide for Verification & Validation in Computational Solid Mechanics, 2006
- [10] VDI Richtlinie 6201, Softwaregestützte Tragwerksberechnung, 2015
- [11] VDI Richtlinie 3783 Blatt 9: Umweltmeteorologie - Prognostische mikroskalige Windfeldmodelle - Evaluierung für Gebäude- und Hindernisumströmung, 2017
- [12] SOCKEL, H., Aerodynamik der Bauwerke, Vieweg, 1984