

Aspekte und Hintergründe von abgesicherten numerischen Strömungs- und Sensitivitätsanalysen im Windingenieurwesen

Roland Wüchner¹, Suneth Warnakulasuriya¹, Cornelia Kalender², Ulf Winkelmann³

¹Institut für Statik und Dynamik, Technische Universität Braunschweig

²KalWin Engineering GbR

³Windingenieurwesen und Strömungsmechanik, Ruhr-Universität Bochum

Zusammenfassung: Numerische Strömungssimulationen können bei Beachtung windspezifischer Modellierungsaspekte physikalisch belastbare Ergebnisse im Windingenieurwesen erzielen. Dadurch werden simulationsinhärente Vorteile, wie z.B. Berechenbarkeit von Sensitivitätsinformationen, nutzbar. Dieser Beitrag geht auf wesentliche Aspekte und Hintergründe sowohl von numerischen Strömungs- als auch von Sensitivitätsanalysen im Windingenieurwesen ein.

1 Abgesicherte numerische Strömungssimulationen

Um eine Mindestqualität von CWE-Simulationen zu gewährleisten, wurden bereits in der Vergangenheit Empfehlungen entwickelt. Besondere Aufmerksamkeit gilt dem neuen "WTG-Merkblatt über numerische Methoden in der Bauwerksaerodynamik" [7] sowie dem Nachfolger der DIN EN 1991-1-4:2010-12 [3], Anhang K. Die folgenden windspezifischen Modellierungsaspekte sind in [5], [6] beschrieben und fassen explizit die besonders relevanten Einflüsse zusammen.

Aufgabenstellung und Simulationsart: Anhand der Aufgabenstellung muss grundsätzlich die Art der Simulation gewählt werden. Es ist zu entscheiden, ob stationäre RANS oder URANS Rechnungen mit den inhärenten Modellannahmen zulässig sind, oder ob anspruchsvollere Simulationsarten wie instationäre LES durchgeführt werden müssen.

Geometrie: Mögliche Vereinfachungen der Geometrie des Ingenieurbauwerks muss mit Blick auf die Zielparameter geklärt werden. Um den Rechen- und Modellierungsaufwand zu minimieren, sollten nur die für das Strömungsgeschehen und die Fragestellung wichtigen Details dargestellt werden. Der Einfluss von Umgebungsgebäuden und Topografie muss im konkreten Fall hinterfragt werden.

Untersuchungsraum: Der Untersuchungsraum sollte ausreichend groß sein, um das Strömungsgeschehen komplett abzubilden. Er sollte nicht zu groß sein, da viele Gitterzellen zu langen Rechenzeiten führen. Zudem kann sich die am Einströmrand definierte Windgrenzschicht stromaufwärts beim Durchlaufen großer Abstände ungewollt verändern. Der Untersuchungsraum darf nicht zu klein sein, um eine Beeinflussung durch zu nahe Randbedingungen oder Versperrungseffekte zu vermeiden.

Rechengitter: Der Einfluss des numerischen Rechengitters auf die Zielgrößen ist enorm und muss minimiert werden. Er sollte mit drei verschiedenen Gitterauflösungen im Rahmen einer für den Untersuchungsfall repräsentativen Gittersensitivitätsstudie überprüft werden. Im nahen Gebäudeumfeld in Bereichen hoher Strömungsgradienten sollten lokale Netzverfeinerungen mit nicht zu großen Sprüngen zwischen den Netzdichten genutzt werden. Wandnahe Gitterzellen müssen methodenspezifische Qualitätsanforderungen erfüllen, wie z.B. orthogonale Zellen (mit Prismenschichten). Wichtig: Eine Gitterverfeinerung verringert den numerischen Fehler und erhöht die Qualität der Rechnung, führt aber nicht zwangsläufig zu physikalischeren Ergebnissen. Hier wirkt der Modellfehler, der nur durch Validierung bestimmt werden kann.

Zeitschritt: Bei instationären Simulationen kann ein sehr kleiner Zeitschritt schnell zu einem sehr hohen Rechenaufwand führen. Ein zu großer Zeitschritt hingegen kann zum Crash der Simulation oder zu einem erhöhten Aufwand der Kopplung der Gleichungen innerhalb des Zeitschrittes führen. Er kann aber auch unphysikalische und unbrauchbare Ergebnisse erzeugen. Hierbei hilft die Betrachtung der Courant-Zahl.

Randbedingungen: Die Einstrombedingung zur Modellierung der turbulenten Windgrenzschicht ist besonders wichtig. So müssen Geschwindigkeitsprofile und Turbulenzprofile passend zum Untersuchungsfall und zum verwendeten Turbulenzmodell gewählt werden und ebenso zur gewählten Simulationsart passen. Fallspezifisch muss entschieden werden, ob die Windgrenzschicht bei Bauwerkabschnitten, wie Brücken, vernachlässigt werden kann. An Wänden mit Haftbedingungen sollte unterschieden werden, ob die Wandgrenzschicht räumlich im Gitter passend zum gewählten Turbulenzmodell aufgelöst und berechnet wird, oder numerisch mit Wandfunktionen modelliert wird. Hierzu hilft die Betrachtung der dimensionslosen Wandabstände. Angesetzte Oberflächenrauigkeiten können schnell im Widerspruch zur lokalen Gitterauflösung stehen.

Numerische Löser: Interpolationsverfahren, die z.B. im Rahmen der Finite-Volumen-Methode eingesetzt werden, sollten insbesondere bei den konvektiven Termen der Grundgleichungen höherer Ordnung, aber mindestens 2. Ordnung, sein. Die statistische Konvergenz der Zielgrößen muss über globale, normierte Residuen der iterativen Lösung für alle Gleichungen dokumentiert und ausreichend klein sein. Sie sollte zudem mithilfe passender Verfahren überprüft werden. Hierbei muss zwischen instationären und stationären Simulationsarten unterschieden werden. Bei Fluid-Struktur-Interaktion sollte die Adäquatheit der Kopplung der Strukturgleichungen und Fluidgleichungen innerhalb eines Zeitschrittes überprüft werden.

Auswertung, Validierung und Dokumentation: Die Simulationsergebnisse sollten generell anhand von Geschwindigkeits-, Druckfeldern und möglichen weiteren Zielgrößen auf Plausibilität überprüft werden. Anhand von veröffentlichten, belastbaren Daten sollte das gewählte numerische Modell für einen ähnlichen Fall validiert werden. Alle beschriebenen Modellierungsaspekte sollten nachvollziehbar und vollständig dokumentiert werden. Je nach

Anwendungsfall ist es erforderlich, die Simulationsdaten vergleichbar zu Windkanaldaten statistisch auszuwerten. Die Verwendung von stationären RANS Ergebnissen muss immer kritisch und problemspezifisch hinterfragt werden, da sie keine dynamische Windbeanspruchung abbilden können. Sie können nicht ohne Weiteres den für die Bemessung von Bauwerken üblicherweise genutzten, normgerechten charakteristischen Beiwerten, wie Druckbeiwerte, gleichgesetzt werden.

Software und Anwender:in: Es gibt eine große Anzahl an CFD-Software, kommerziell zu erwerben oder opensource frei verfügbar, die mit unterschiedlichen Methoden arbeiten. Hierzu gehören bspw. Finite-Elemente- (FEM), Finite-Volumen- (FVM), Partikelmethode sowie Lattice-Boltzmann Methoden (LBM). Jedes Verfahren hat spezifische Eigenschaften, die zusätzlich zu den beschriebenen Modellierungsaspekten zu berücksichtigen sind. Es ist möglich, dass die in der Regel visuell ansprechenden Simulationsergebnisse von geringer physikalischer Aussagekraft sind. Der Einsatz solcher Ergebnisse in der Praxis könnte zu fehlerhaften Bewertungen des Strömungs- und Lastgeschehens führen. Die Verantwortung liegt immer auf Seite der Anwenderin und des Anwenders. Eine verantwortungsbewusste und fachkundige Durchführung und Interpretation von Strömungssimulationen im Windingenieurwesen verlangt ein umfassendes Verständnis darüber, was mit den gewählten Modellen und Einstellungen abgebildet werden kann, noch viel entscheidender, was nicht. Die alleinige Fähigkeit zur Anwendung einer CFD-Simulationssoftware ist nicht ausreichend.

Die nachfolgenden CWE Anwendungsbeispiele demonstrieren die Leistungsfähigkeit von korrekt eingesetzten numerischen Simulationen. Für die Ermittlung von Windlasten auf Dachbereiche eines historischen Schlossbauwerkes (s. Abbildung 1) wurden CFD-Simulationen in Kombination mit Windkanalmessungen eingesetzt (s. Abbildung 2).

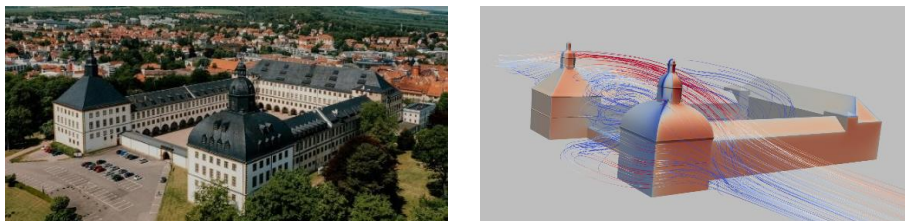


Abbildung 1: Links: Luftaufnahme des Bauwerks [9] Rechts: Visualisierung von Stromlinien und mittlere Oberflächendruckverteilung auf dem historischen Schlossbauwerk



Abbildung 2: Links: Fotos des West-Turmes, Mitte: Windkanalmodell, Rechts: numerisches Gitter

Der Modellaufbau folgt den zuvor beschriebenen Aspekten. Eine ausführliche Beschreibung aller Einstellungen und Randbedingungen sind [6] zu entnehmen. Nach einer Gitterstudie wurden für verschiedene Windrichtungen stationäre RANS Simulationen unter Verwendung des realizable $k-\epsilon$ Turbulenzmodells durchgeführt. Für beide in Abbildung 3 gezeigten

Windrichtungen zeigen die Druckabwicklungen, dass das numerische Modell eine Tendenz zur Überschätzung der Drücke und einer Unterschätzung der Söge, insbesondere auf der windabgewandten Seite, hat. Die Überschätzung der Drücke kann zu konservativen Lastannahmen führen, wohingegen die Unterschätzung der Söge zu einer Lastannahme führen kann, die nicht auf der sicheren Seite liegt.

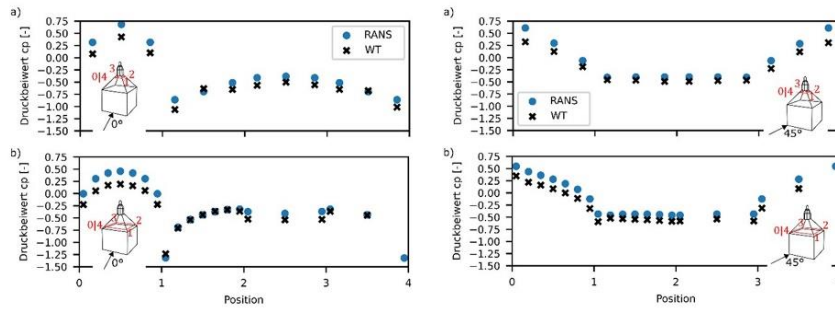


Abbildung 3: Mittlere Oberflächendruckbeiwerte aus Windkanal (WT) und Simulation (RANS) in zwei Höhen, Links: Wind auf die Frontseite (0 Grad), Rechts: Wind auf die Ecke (45 Grad)

Mit dem validierten Modell wurden weiterführende numerische Simulationen am Ost-Turm durchgeführt. Nach Analyse und Berücksichtigung verschiedener Einflüsse, wie Dachgauben und weitere Gebäudeteile, wurden die einhüllenden Windlasten nach quasi-statischer Methode und mit den mittleren Druckbeiwerten der RANS-Simulationen bestimmt. Für Spitzenwerte als Ersatzlast, z.B. bei kleinen Lastezugsflächen oder bei Berücksichtigung günstig wirkender Lasten, wurde die Spitzenfaktor-Methode mit Standardabweichungen der Windkanaldaten verwendet (Hybride Modellnutzung).

Als zweites Anwendungsbeispiel sind mittlere Kraft- und Momentenbeiwerte auf einen Brückenquerschnitt in Abbildung 4 gezeigt. Für Anstellwinkel zwischen $\pm 10^\circ$ wurden 2D Unsteady Reynolds-Averaged Navier-Stokes Simulationen (URANS) mit dem $k - \omega$ SST Turbulenzmodell durchgeführt und mit Windkanalergebnissen verglichen.

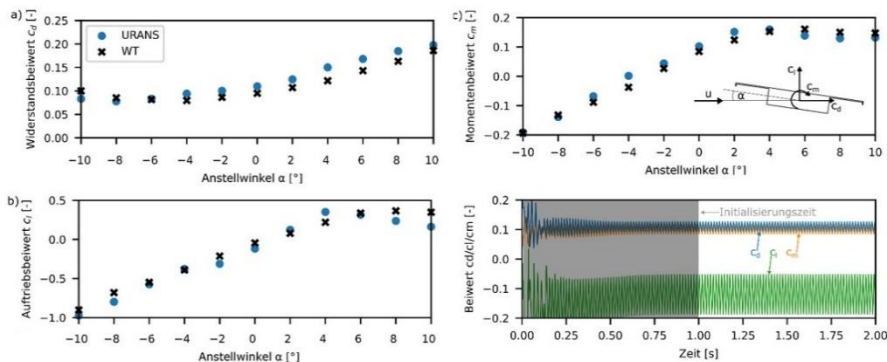


Abbildung 4: Mittlere Kraft- und Momentenbeiwerte auf einen Brückenquerschnitt unter verschiedenen Anstellwinkeln, Rechts unten: exemplarischer Zeitverlauf und Mittelungsintervall

Alle Simulationsdetails finden sich in [5],[6]. Der Vergleich zu den Windkanalmessungen zeigt eine zufriedenstellende Übereinstimmung mit sehr geringen Abweichungen. Auf Basis

der Frequenz des Auftriebsbeiwertes kann die Strouhalzahl, also die normierte Wirbelablösefrequenz, die für die Berücksichtigung von wirbelinduzierten Schwingungen interessant ist, berechnet werden. Für den Anstellwinkel von $\alpha = 0^\circ$ und der Berücksichtigung der Höhe H ist die Strouhalzahl der URANS Simulationen $S_t = 0.122$ und somit im Vergleich zu den Windkanalergebnissen mit $S_t = 0.135$ leicht unterschätzt.

2 Sensitivitätsanalyse zur Entwurfsunterstützung

Wie im vorherigen Abschnitt erläutert wurde, können im Windingenieurwesen mittels numerischer Strömungssimulation physikalisch belastbare Ergebnisse erzielt werden. Die eingesetzten Modelle und Simulationsmethoden können als Basis zur Ermittlung von weitergehenden Informationen, wie z.B. Sensitivitäten, genutzt werden. Bei der Sensitivitätsanalyse wird der Einfluss von einer infinitesimalen Änderung der Entwurfsparameter auf eine Zielfunktion quantifiziert. Beispiele für Zielfunktionen im Windingenieurwesen sind Gesamtwindkraft auf ein Tragwerk oder Objekt in der Umgebung, Einspannmomente eines Hochhauses infolge Windumströmung, windkomfortbeeinflussende Strömungsgeschwindigkeiten und Wirbelablösefrequenzen. Die genannten skalaren Größen hängen von vielen Parametern ab, wobei im Windingenieurwesen die umströmte Form einen dominanten Einfluss hat. Die Oberflächengeometrie kann auf verschiedene Arten parametrisiert werden, was Konsequenzen für die Anzahl der Entwurfsvariablen und auch die Formfreiheit hat. Bei CAD-basierter Formbeschreibung können Geometrien i.d.R. mit weniger Parametern beschrieben werden als bei der knotenbasierten Geometrieparametrisierung [4]. Bei Letzterer wird die Geometrie durch die Position der Oberflächennetzknotten bestimmt. Diese knotenbasierte Formbeschreibung erlaubt durch die große Parameterzahl das Finden von sehr komplexen und auch nicht-intuitiven Freiformgeometrien [1]. Die Anzahl der formbestimmenden Parameter hat einen direkten Einfluss auf die möglichen Vorgehensweisen bei der Sensitivitätsberechnung. Die konzeptionell einfachste Variante ist die globale Finite-Differenzen-Methode, wobei die Zielfunktion für eine infinitesimale Änderung jeder einzelnen Entwurfsvariable separat ausgewertet werden muss, was bei n Entwurfsvariablen auf $n+1$ Zielfunktionsauswertungen führt. Bei einer hohen Anzahl an Variablen ist dieses Vorgehen im Windingenieurwesen wegen der numerisch sehr aufwändigen CFD-Berechnung damit praktisch nicht durchführbar. Als Alternative kann man die sogenannte adjungierte Sensitivitätsanalyse durchführen, bei der zunächst das adjungierte (duale) Problem gelöst wird und in einem zweiten Schritt die totale Ableitung der Zielfunktion durch Einsetzen der vorher bestimmten adjungierten Variablen berechnet wird [8]. Diese adjungierte Formulierung hat den großen Vorteil, dass sie unabhängig von der Anzahl der Entwurfsparameter nur eine Lösung des adjungierten Problems und eine Zustandsberechnung erfordert, weshalb sie vor allem bei einer großen Anzahl an Entwurfsparametern der methodisch sinnvolle Zugang zur Sensitivitätsanalyse ist. Insbesondere in frühen Entwurfsphasen hat man meist eine größere Flexibilität bei der Formgestaltung, weshalb die adjungierte Sensitivitätsermittlung dort besonders vorteilhaft eingesetzt werden kann und wertvolle Hinweise auf Verbesserungspotenziale bei der Zielfunktion durch gezielte Formmodifikationen gibt. Dies kann beispielsweise durch auf der Oberfläche dargestellte Sensitivitätsintensitäten visualisiert werden („sensitivity maps“), wodurch eine besonders intuitive Einbindung in den Entwurfsprozess möglich wird.

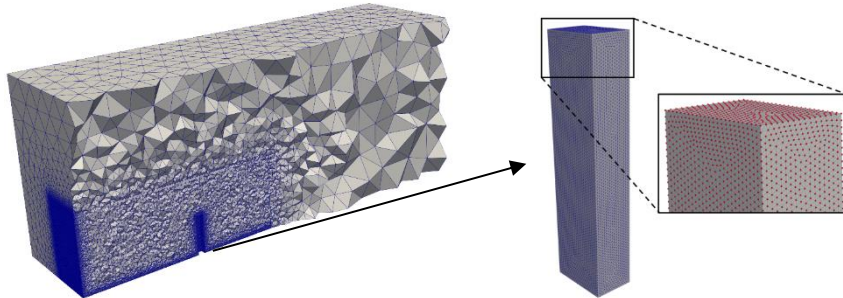


Abbildung 5: links: Strömungsnetz, Mitte: Hochhausgeometrie, rechts: Oberflächenknoten, die mittels ihrer Position die Form definieren

Zur Illustration solcher Sensitivitätskarten wird die Sensitivitätsverteilung auf der Oberfläche eines quaderförmigen Hochhauses dargestellt. Details zu diesem Beispiel können [2] entnommen werden. Die Zielfunktion ist in diesem Fall das Moment an der Einspannung und die Geometrie wird durch eine knotenbasierte Parametrisierung festgelegt. Jeder der in Abb. 5 dargestellten Oberflächenknoten trägt mit seinen 3 Koordinaten im Raum zur Formbeschreibung bei, was in diesem Beispiel zu ca. 25.000 Entwurfsvariablen führt. Die in Abb. 6 dargestellten Sensitivitäten sagen aus, wie stark die Positionsänderung eines Knotens auf der Oberfläche den Zielfunktionswert ändert. Erwartungsgemäß wird eine Modifikation an den Kanten und insbesondere im oberen Teil als besonders effektiv zur Auflagermomentmanipulation ermittelt. Die auf der rechten Seite abgebildete modifizierte Form ist entsprechend der Sensitivitäten vorgenommen worden und reduziert den Zielfunktionswert (hier: Gesamteinspannmoment).

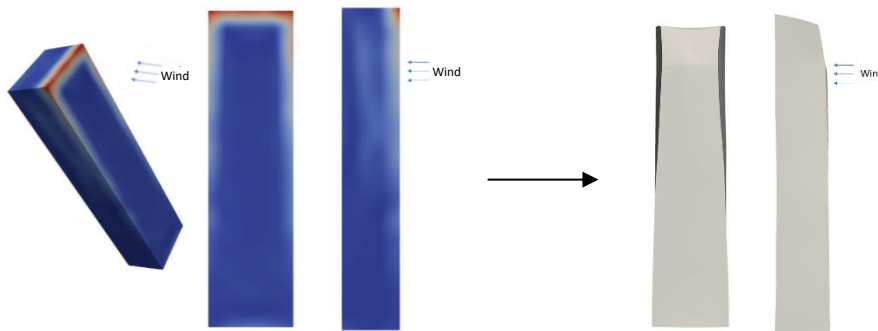


Abbildung 6: links: Sensitivitätskarte auf der Hochhausgeometrie in verschiedenen Ansichten, rechts: modifizierte Geometrie entsprechend der ermittelten Sensitivitäten in Front- und Seitenansicht

Ein weiteres Beispiel zur Nutzung von Sensitivitätsinformationen beim Entwurf von windumströmten Bauwerken ist der in Abb. 7 gezeigte Brückenquerschnitt (ähnlich dem des Viaduc de Millau) mit Windschutzaufbauten. Hierbei sollen diese Windbarrieren so gestaltet werden, dass die auf einen LKW wirkende seitliche Windkraft möglichst reduziert wird, was somit die abzuleitende Zielfunktion ist. Das Strömungsnetz, der Brückenquerschnitt und die durch die Knotenpositionen definierte Geometrie der Windbarrieren sind in Abb. 7 dargestellt. Infolge der gewählten Formparametrisierung und der feinen Netzauflösung an der Oberfläche hat dieses Modell knapp 400.000 Entwurfsvariablen, was wiederum die

adjungierte Sensitivitätsanalyse erfordert. In Abb. 8 sind die simulierte Umströmung und die ursprüngliche sowie die durch Berücksichtigung der Sensitivitäten modifizierte Geometrie dargestellt. Im Detailausschnitt oberhalb des Brückendecks sind die Sensitivitäten auf der Oberfläche der Windbarrieren aufgetragen.

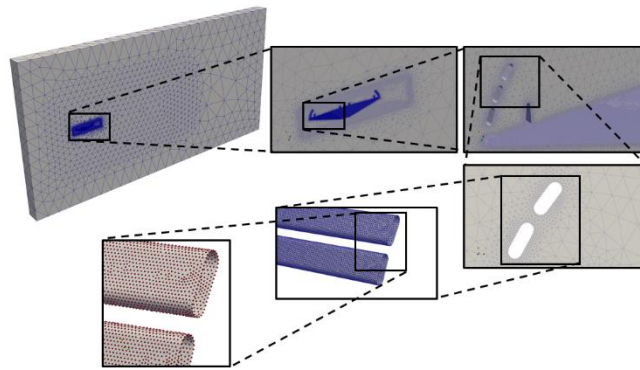


Abbildung 7: Strömungsnetz mit Brückenquerschnitt und knotenbasierte Formdefinition

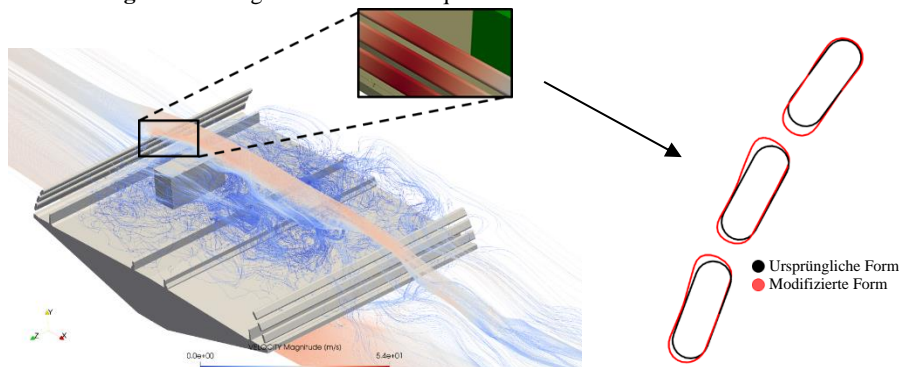


Abbildung 8: links: Umströmung des Brückenquerschnitts mit LKW, oben: Ausschnitt der Windbarrieren mit Sensitivitäten, rechts: Querschnittsmodifikation basierend auf Sensitivitäten

3 Fazit

Die Ermittlung von Windlasten im Bauwesen erfolgt durch etablierte Modelle in der Norm sowie durch Untersuchungen in geeigneten Grenzschichtwindkanälen, die seit Mitte des letzten Jahrhunderts als anerkannter Stand der Technik gelten. Die zusätzliche Anwendung der numerischen Strömungsmechanik (CFD) im praktischen Windingenieurwesen wird in den letzten Jahren intensiv untersucht. Trotz der rasanten Entwicklung von Soft- und Hardware ist der Einsatz von CFD im Windingenieurwesen (Computational Wind Engineering - CWE) nach wie vor anspruchsvoll und erfordert umfassende Expertise in verschiedenen Disziplinen, wie u. a. Strömungsmechanik, numerische Methoden und Gebäudeaerodynamik. Bei Beachtung windspezifischer Modellierungsaspekte und entsprechender Fachexpertise können mit CWE physikalisch belastbare Ergebnisse fallspezifisch im Windingenieurwesen erzeugt werden [6]. Hiermit können

simulationsinhärente Vorteile, wie z.B. die Verfügbarkeit von Daten in Bereichen, die von der Messtechnik nicht erreicht oder aufgelöst werden können oder die im Realmaßstab mögliche Simulation ohne geometrische Skalierung, ausgenutzt werden. Des Weiteren können durch geeignete Verfahren auch Sensitivitätsinformationen berechnet werden, die im Entwurfsprozess Anregungen z.B. für die Formgestaltung bringen und zukünftig evtl. auch in Optimierungsprozesse eingebunden werden können.

Literatur

- [1] ANTONAU, I.; WARNAKULASURIYA, S.; BLETZINGER, K.-U.; BLUHM, F. M.; HOJJAT, M.; WÜCHNER, R. Latest developments in node-based shape optimization using vertex morphing parameterization, *Structural and Multidisciplinary Optimization* 65, 198 (2022)
- [2] BRAUN, A. L.; AWRUCH, A. M. Aerodynamic and aeroelastic analyses on the CAARC standard tall building model using numerical simulation, *Computers and Structures* (2009) S. 564-581
- [3] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., „Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-4: Allgemeine Einwirkungen – Windlasten“; Beuth Verlag, 2023.
- [4] BLETZINGER, K.-U.; FIRL, M.; LINHARD, J.; WÜCHNER, R. Optimal shapes of mechanically motivated surfaces, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Volume 199, Issues 5–8 (2010), S. 324-333
- [5] 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*, Verlag Ernst & Sohn, 2022
- [6] KALENDER, C.; WÜCHNER, R.; WINKELMANN, U. Zur aktuellen Situation der numerischen Strömungssimulation im praktischen Windingenieurwesen, In: *WTG-Berichte Nr. 18*, Kemper, F.; Lieb, R.D.; Ruscheweyh, H. (Hrsg.)
- [7] Windtechnologische Gesellschaft WTG e.V., *WTG-Merkblatt M3 – Numerische Simulation von Windströmungen*, Aachen, 2023
- [8] WARNAKULASURIYA, S. Development of Methods for Finite Element-Based Sensitivity Analysis and Goal-Directed Mesh Refinement Using the Adjoint Approach for Steady and Transient Flows, *Dissertation*, Technische Universität München, 2022
- [9] <https://www.mdr.de/nachrichten/deutschland/panorama/heizkosten-energiepreise-schloesser-kultur-fonds-100.html>, Bildrechte: Schloss Friedenstein