

AEROELASTISCHE UNTERSUCHUNGEN EINER DACHSTRUKTUR

Bernd Hagenah¹, Helmut Steiner²

¹Gruner GmbH, Otto-Bauer-Gasse 6, 1060 Wien, Österreich
E-Mail: bernd.hagenah@gruner.at

²ÖBB Infrastruktur AG, Projektleitung Koralmbahn 1, Griesgasse 11, 8020 Graz, Österreich
E-Mail: Helmut.Steiner2@oebb.at

ABSTRACT

The Austrian Federal Railways (ÖBB) plan a new roof construction for the Graz main railway station. The open span of the arched steel beams has a width of up to 40m.

A large width between supports can lead to a risk of self induced displacement (flutter) of the roof, due to the dynamic interaction of air flow and the elastic behaviour of the structure.

A numerical analysis of the aerodynamic (Flutter) stability of the roof construction has been conducted with a 2D-Euler CFD method for moving grids. The following results were achieved:

- The analysed cases (lowest Eigenfrequencies) are aerodynamically damped and hence, stable for the applied air speeds.
- The aerodynamic damping decreases with increasing air speed.
- The aeroelastic stability of the roof construction for the air speed of 20.4 m/s(ÖNORM, 2009) has been confirmed.

KURZFASSUNG

Im Zuge des von der österreichische Bundesbahn (ÖBB) betriebenen Umbaus des Grazer Hauptbahnhofes ist es notwendig die vorhandenen Bahnsteigdächer im Zentralbereich zu ersetzen. Die geplante bogenförmige Dachkonstruktion mit Stützweiten über 40 m überdeckt mehrere Gleisachsen und Bahnsteige.

Bei Dachkonstruktionen großer Stützweite besteht die Gefahr selbst erregter Schwingungen, die auf die dynamische Wechselwirkung von Luftströmung und elastischer Struktur zurückzuführen sind.

Zur Untersuchung der aerodynamischen Stabilität der Dachkonstruktion wurde ein CFD-Verfahren auf Basis der 2D-Euler-Gleichungen genutzt. Die aeroelastischen Untersuchungen ergaben folgende Erkenntnisse:

- Alle betrachteten Rechenfälle sind aerodynamisch gedämpft.

- Mit zunehmender Anströmgeschwindigkeit nimmt die aerodynamische Dämpfung ab.
- Die aeroelastische Stabilität der Dachkonstruktion ist für die Anströmgeschwindigkeit gemäß ÖNORM von 20.4 m/s nachgewiesen.

EINLEITUNG

Der Bahnhof Graz Hauptbahnhof ist mit einer täglichen Kundenfrequenz von derzeit rund 30.000 und zukünftig 40.000 Personen einer der wichtigsten Verkehrsknotenpunkte Österreichs. Durch den Bau der Koralmbahn, des Semmering-Basistunnels und den Verbesserungen entlang der Pyhrn-Schober-Achse wird Graz zu einem Knotenpunkt mit weiterhin stark steigender nationaler sowie internationaler Bedeutung. Dies erfordert eine entsprechende Anpassung der bestehenden Eisenbahnanlagen an die zukünftig zu erwartenden betrieblichen Anforderungen und Erfordernisse.

DIE BAHNSTEIGDÄCHER

Die derzeit bestehenden Bahnsteigdächer stammen aus mehreren Epochen und wurden teilweise als Provisorien errichtet und entsprechen nicht mehr den heutigen Anforderungen, die an eine zeitgemäße Infrastruktur gestellt werden. Die durch den Bahnhofumbau erforderlichen neuen Abmessungen der Bahnsteige hinsichtlich Lage, Länge, Breite, Höhe machen den Abbruch der bestehenden Dächer unumgänglich.

Die vorhandenen räumlichen Randbedingungen des Grazer Hauptbahnhofes, ermöglichen eine Verbreiterung der Inselbahnsteige nur in sehr beschränktem Ausmaß. Durch die geplante zentrale Dachkonstruktion die mehrere Bahnsteige und Gleisachsen überdeckt wird eine möglichst stützenlose und somit gut nutzbare Bahnsteiggestaltung erreicht.

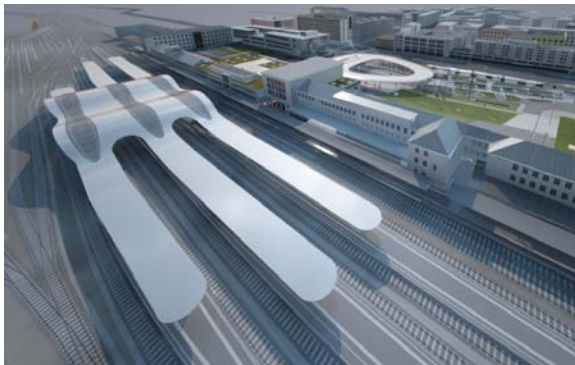


Abbildung 1 Draufsicht der geplanten Dachstruktur



Abbildung 2 Seitenansicht der geplanten Dachstruktur (oben) sowie Ansicht von einem Bahnsteig (unten)

Die sechs Bogenträger sind Zweifeldträger mit Spannweiten von über 40 m und werden als dichtgeschweißte Stahlkästen ausgebildet, die in ihrer Konfiguration dem Kräfteverlauf folgen und im Auflagerbereich bis zu 4 m Bauhöhe aufweisen. Pro Bahnsteig ist ein Hauptträgerpaar situiert. Der Abstand zwischen den Trägern weitet sich nach oben V-förmig auf, dadurch entsteht ein linsenförmiger „Spalt“ zwischen den Trägerpaaren, der zur natürlichen Belichtung des darunter liegenden Bahnsteiges genutzt wird.

Querträger / Pfetten sind in regelmäßigen Abständen an die Hauptträger angeschlossen und bilden die Unterkonstruktion der Dachhaut, die über den Bahnsteigen als transluzente PTFE-Membran und über den Gleisen als Alu-Gleitbügeldach ausgebildet wird. In den Randbereichen kragen die Querträger aus, um auch den äußeren Bahnsteigkanten einen Witterungsschutz zu bieten.

Die an die großflächige Bahnsteigüberdachung angeschlossenen „konventionellen“ Dächer entsprechen der ÖBB-Regelplanung.



Abbildung 3 Ansicht von einem Bahnsteig

GRUNDLAGEN

Aeroelastische Grundlagen

Gerät eine überströmte elastische Struktur infolge kleiner Störungen in Schwingungen, entstehen aufgrund der Auslenkungen instationäre Luftkräfte, die entweder dämpfend oder anfachend auf den Schwingungsvorgang wirken.

Die physikalische Ursache der Schwingungsanfachung liegt in der Phasenvoreilung der bewegungsinduzierten instationären Luftkräfte gegenüber der momentanen Auslenkung der Struktur. Dieses als Flattern bekannte aeroelastische Phänomen bewirkt im Mittel einer Schwingungsperiode einen Energiefluss von der Luftströmung in die elastische Struktur und führt zum Bruch der Struktur, sofern die aeroelastische Anfachung die strukturelle Eigendämpfung überwiegt (vgl. Försting, 1974).

Die das Flatterphänomen begünstigenden physikalischen Parameter sind niedrige Struktureigenfrequenzen gepaart mit einer bestimmten Gestalt der Eigenschwingungsformen. Setzt man in erster Näherung voraus, dass die instationären Luftkräfte, die neben der Dämpfung auch einen geringen Beitrag zu Masse und Steifigkeit des schwingungsfähigen Systems liefern, Eigenfrequenzen und Eigenformen der Struktur nicht ändern, reicht allein die Untersuchung der instationären Luftkräfte bei vorgegebenen Frequenzen und Schwingungsformen aus, um zuverlässige Aussagen über die aeroelastische Stabilität der Dachkonstruktion zu treffen.

Ein Maß für die aerodynamische Dämpfung bzw. Anfachung von Schwingungen der elastischen Struktur ist die vom Fluid während eines Schwingungszyklus an die Struktur abgegebene oder von dieser aufgenommene aerodynamische Arbeit.

Berechnung der instationären Luftkräfte

Zur Berechnung der auf die Dachkonstruktion wirkenden instationären aerodynamischen Kräfte wird ein vereinfachtes zweidimensionales Modell verwendet. Dies besteht aus einem in Längsrichtung (Gleisrichtung) des Daches geführten Schnitt, der in

der Mitte der Querausdehnung des Daches zu denken ist. In diesem Schnitt wird die Dachlinie entsprechend den strukturellen Eigenschwingungsformen in zeitharmonische Schwingungen versetzt. Die dadurch an der Dachoberfläche entstehenden instationären aerodynamischen Kräfte werden mit Hilfe eines CFD-Verfahrens (CFD: Computational Fluid Dynamics) in einer 2D-Feldrechnung ermittelt. Aus der an der Dachoberfläche wirkenden zeitabhängigen Druckverteilung wird dann die während eines Schwingungszyklus vom Dach aufgenommene bzw. abgegebene aerodynamische Arbeit berechnet, die Aufschluss über Anfandung oder Dämpfung der Schwingbewegung gibt.

Strukturdynamische Eigenformen

Die strukturdynamischen Eigenformen des Daches ergeben sich im Mittelschnitt als Kurven, die die Vertikalauslenkung der Dachoberfläche darstellen.

Ist die räumliche Auslenkung des Daches durch die Kurve $z_0(x)$ gegeben, lautet die jeweilige Eigenform

$$z(x,t) = z_0(x)\sin(\omega t) \tag{1}$$

mit der Kreisfrequenz $\omega = 2\pi f$, wobei f die in Hz gemessene Schwingfrequenz der jeweiligen Eigenform ist.

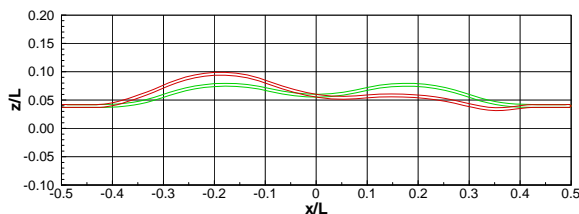


Abbildung 4 Antisymmetrische Eigenform 1, $f = 1.4$ Hz (rot: ausgelenkte Dachstruktur, grün: Ruhelage)

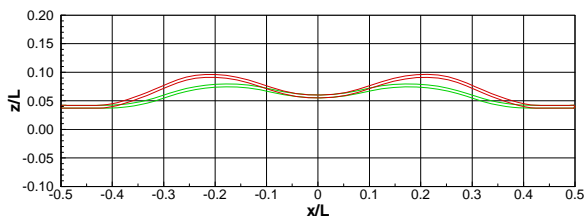


Abbildung 5 Symmetrische Eigenform 4 $f = 2.25$ Hz (rot: ausgelenkte Dachstruktur, grün: Ruhelage)

Unter den ersten berechneten 5 Eigenformen mit den niedrigsten Eigenfrequenzen sind die Eigenformen mit den Nummern 1,2,3,5 antisymmetrische Formen,

bei denen sich die beiden Kuppeln des Daches gegenseitig verformen (vgl. Abbildung 4), während die Eigenform 4 eine symmetrische Verformung aufweist (vgl. Abbildung 5).

Netzgenerierung

Zur Berechnung des instationären Strömungsfeldes um die schwingende Dachstruktur ist die Generierung eines konturangepassten Rechennetzes erforderlich. Verwendet wird ein so genanntes strukturiertes Rechennetz, das durch die Lösung eines elliptischen Differentialgleichungsproblems erzeugt wird. Das verwendete Netz besitzt eine C-Struktur und besteht aus einem einzigen Block, der die Dachkontur umschließt.

Die Besonderheit dieses Netzes besteht nicht nur in einer wählbaren Konzentration von Netzpunkten in der Umgebung der Dachkontur, um Gradienten der Strömungsgrößen entsprechend aufzulösen, sondern auch in der Fähigkeit des Netzes, den Auslenkungen des Daches während des Schwingungsvorganges beliebig zu folgen. In Abbildung 6 ist das Rechennetz als Gesamtnetz dargestellt. Abbildung 7 und Abbildung 8 zeigen einen vergrößerten Ausschnitt der Dachmitte bzw. der Anströmkannte.

Das Rechennetz besteht aus 275 x 41 Netzpunkten mit 275 Punkten in C-Richtung (um die Dachkontur herum) und 41 Punkten in der Richtung von der Dachkontur zum Außenrand.

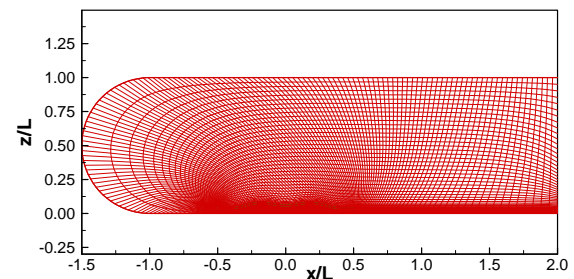


Abbildung 6 Gesamtnetz für aeroelastische Untersuchungen

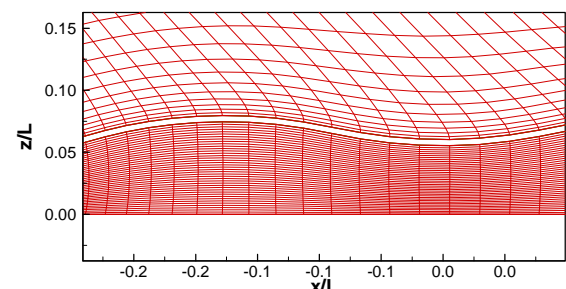


Abbildung 7 Ausschnitt der Dachmitte

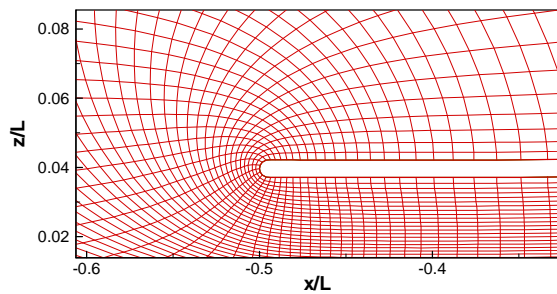


Abbildung 8 Ausschnitt an der linken Vorderkante des Daches / Anströmkannte

CFD-Verfahren / Rechenverfahren

Das verwendete CFD-Verfahren löst die 2D-Euler-Gleichungen für reibungsfreie instationäre Strömung. Eine Besonderheit des Verfahrens ist die ALE-Formulierung (Arbitrary Lagrange Euler) der Flussvektoren, bei der die durch die Netzbewegung entstehenden Zusatzflüsse bezüglich Masse, Impuls und Energie entsprechend berücksichtigt werden. Die räumliche Diskretisierung der Euler Gleichungen basiert auf dem Upwind-Verfahren von Roe und Pike, während für die zeitliche Diskretisierung das implizite AF-Verfahren (Approximate Factorization) von Beam und Warming verwendet wird.

Als Ergebnis der Strömungsberechnung ergeben sich das Geschwindigkeitsfeld $\vec{v}(x, y, t)$ sowie die beiden thermodynamischen Größen Druck $p(x, y, t)$ und Dichte $\rho(x, y, t)$. Aus diesen Variablen lassen sich die folgenden, zur Beurteilung der aeroelastischen Stabilität benötigten dimensionslosen bzw. dimensionsbehafteten Größen berechnen:

Druckbeiwert der instationären Strömung auf der Dachkontur (dimensionslos):

$$c_p(s, t) = \frac{p(s, t) - p_\infty}{A \rho_\infty / 2 U_\infty^2} \tag{2}$$

mit

- s dimensionslose Bogenlängenkoordinate der Dachkontur auf die Gesamtlänge L des Daches bezogen [-]
- p_∞ konstanter Druck der Anströmung [Pa]
- ρ_∞ konstante Dichte der Anströmung [kg/m³]
- U_∞ konstante Geschwindigkeit der Anströmung [m/s]
- A dimensionslose Amplitude (maximale Auslenkung / Gesamtlänge) [-]

lokaler Arbeitsbeiwert der instationären Strömung (dimensionslos):

$$w(s) = \int_0^T c_p(s, t) (\vec{n}(s, t) \cdot \vec{v}_{kin}) dt \tag{3}$$

mit

$\vec{n}(s, t)$ Normaleneinheitsvektor an der Dachkontur [-]

\vec{v}_{kin} Schwinggeschwindigkeit der Dachstruktur [s⁻¹]

T Schwingungsdauer eines Schwingungszyklus [s]

Arbeit pro Flächeneinheit während eines Schwingungszyklus ([J/m²]):

$$W = A \frac{\rho_\infty}{2} U_\infty^2 \int_0^{s_0} w(s) ds \tag{4}$$

mit

s_0 Gesamtbogenlänge der Dachstruktur [m]

mittlere Leistung pro Flächeneinheit während einer Periode ([W/m²]) ::

$$P = \frac{W}{T} \tag{5}$$

Validierung

Das benutzte CFD-Verfahren wurde in vielen Anwendungen zur Berechnung instationärer Luftkräfte herangezogen und im Vergleich mit experimentellen Daten validiert (vgl. Carstens, 1991, Carstens und Schmitt 1999, Grüber und Carstens 2000). Ein Beispiel für den Vergleich mit gemessenen Daten ist in den Abbildungen 9 und 10 dargestellt, die den Vergleich zwischen berechneter und gemessener Druckverteilung für die Beschauung eines Triebwerk-Verdichters zeigen, dessen Schaufeln Schwingungen in einer vorgegebenen Eigenform ausführen.

In Abbildung 9 ist zunächst die stationäre Druckverteilung dargestellt, die sich bei ruhender Beschauung in einem typischen Betriebspunkt des Verdichters einstellt. Obwohl auf der Saugseite der Verdichterprofile leichte Abweichungen von den gemessenen Werten zu beobachten sind, muss die Übereinstimmung als gut bezeichnet werden.

Abbildung 10 zeigt die sich der stationären überlagernde instationäre Druckverteilung, die sich einstellt, wenn die Verdichterschaufeln harmonische Schwingungen mit einer bestimmten Frequenz ausführen. Das obere Bild enthält den Absolutwert der Druckverteilung, das untere Bild die Phase gegenüber der Schwingbewegung. Die Abweichungen zwischen berechneten und gemessenen Werten im Absolutwert sind zwar signifikant, von

größerer Bedeutung ist jedoch die sehr gute Übereinstimmung der Phasenlage des lokalen Druckes gegenüber der Schwingbewegung.

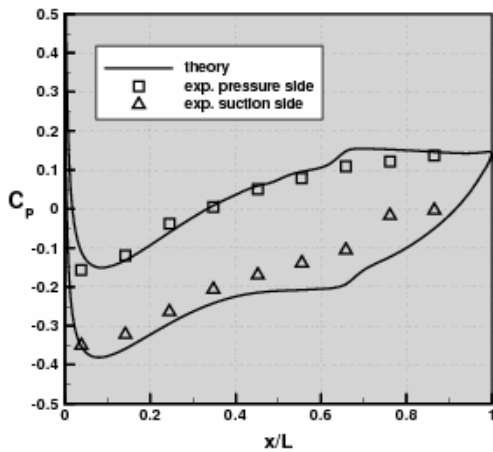


Abbildung 9 Stationäre Druckverteilung an der Beschauelfung eines Triebwerk-Verdichters

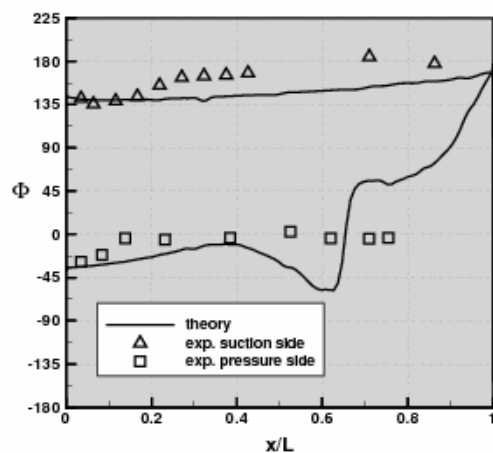
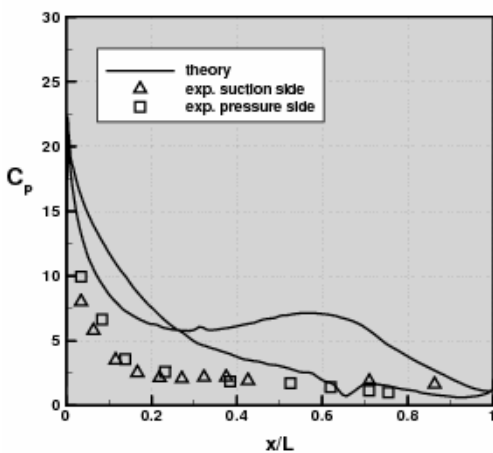


Abbildung 10 Instationäre Druckverteilung an der Beschauelfung eines Triebwerk-Verdichters, oberes Bild Absolutwert, unteres Bild Phasenlage gegenüber der Schwingbewegung

Diese Phasenlage steuert den Energietransfer zwischen Strömung und Struktur und ist damit entscheidend für die Selbsterregung (Flattern) oder Dämpfung der Struktur.

Strouhalzahl

Eine bedeutende Kennzahl der instationären Umströmung schwingender elastischer Strukturen ist die Strouhalzahl Str bzw. der 2π -fache Wert – die reduzierte Frequenz ω^* .

$$Str = \frac{fL}{U_\infty} ; \omega^* = \frac{2\pi fL}{U_\infty} \tag{6}$$

Physikalisch bedeutet die Strouhalzahl das Verhältnis zweier Zeiten, nämlich der Zeit $t_s = L/U_\infty$, die ein Strömungsteilchen benötigt, die Referenzlänge L zu durchlaufen, im Verhältnis zur Schwingungsdauer T der Struktur. Die zugehörige reduzierte Frequenz beschreibt dann den in der Zeit t_s durchlaufenen Schwingungswinkel im Bogenmaß. Bei kleinen Strouhalzahlen liegt quasi-stationäre Strömung vor, d.h. ein über die Referenzlänge strömendes Teilchen wird nur wenig von der zeitlichen Änderung der Kontur beeinflusst, bei mittleren und großen Strouhalzahlen bzw. reduzierten Frequenzen ist die zeitliche Deformation der Struktur beim Durchlaufen der Referenzlänge deutlicher spürbar. Setzt man als Referenzlänge für die reduzierte Frequenz die Längsausdehnung einer Kuppel zwischen zwei Unterstützungen an, ergeben sich für die 5 gegebenen Schwingungsformen die in Tabelle 1 angegebenen Werte für eine Zuströmgeschwindigkeit von 20 m/s.

Tabelle 1

Reduzierte Frequenzen der ersten Eigenformen

EIG.-FORM NR.	F _{EIGEN} [HZ]	REDUZIERTE FREQUENZ [-]
1	1.49	16.38
2	1.50	16.49
3	2.14	23.53
4	2.25	24.74
5	2.61	28.70

ERGEBNISSE

Zunächst wird für eine Zuströmgeschwindigkeit von 20 m/s die Strömung bei starrer, d.h. nicht schwingender Dachkontur berechnet. Diese stationäre Strömung dient jeweils als Startlösung für die Berechnung der instationären Umströmung der schwingenden Struktur. Nach Ingangsetzen der Schwingung gemäß den Eigenformen aus Gl. (1) wird

die Rechnung so lange fortgesetzt, bis sich ein eingeschwungener Zustand einstellt, d.h. bis sich die Amplituden der instationären Druckbeiwerte an der Dachkontur zwischen zwei aufeinander folgenden Schwingungszyklen nur noch um eine vorgegebene Fehlerschranke unterscheiden.

Abbildung 11 zeigt die stationäre Druckverteilung bei horizontaler Anströmung des Daches, also die sich einstellende lokale Kraftverteilung bei nicht schwingender Dachkontur, deren Strömungsfeld als Startlösung für die jeweiligen Schwingungslösungen dient.

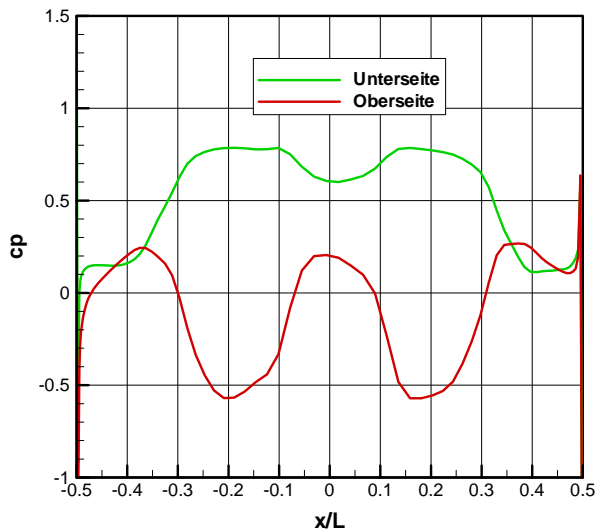


Abbildung 11 Stationäre Druckverteilung an der Dachkontur

Aufschluss über den lokalen Eintrag oder Entzug von Schwingungsenergie liefert der lokale Arbeitsbeiwert, dessen Definition durch Gl. (3) gegeben ist. Abbildung 12 und Abbildung 13 zeigen diese Funktion für die Eigenformen 1 und 4.

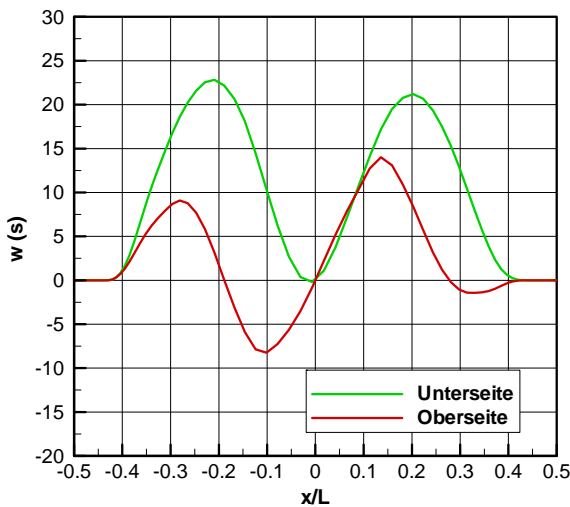


Abbildung 12 Stationäre Druckverteilung an der Dachkontur

Negative Werte des Arbeitsbeiwertes zeigen eine lokale Energieaufnahme, positive Werte eine Energieabgabe an. Bemerkenswerterweise weist nur die Eigenform 1 in einigen Bereichen der Dachoberseite eine Energieaufnahme auf, wogegen die Eigenform 4 sowohl auf der Dachunterseite als auch auf der Oberseite vollständig gedämpft wird.

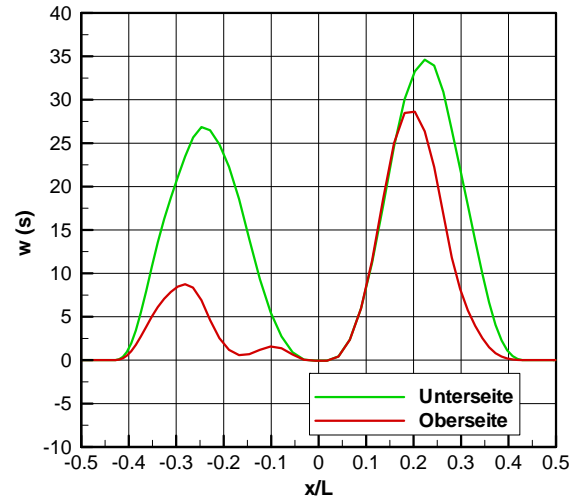


Abbildung 13 Stationäre Druckverteilung an der Dachkontur

Entscheidend für die aeroelastische Stabilität der Dachkontur ist der integrale Wert des lokalen Arbeitsbeiwertes, der sich durch Integration dieser Funktion über die Unterseite und Oberseite der Dachkontur ergibt. Es zeigt sich, dass die schwingende Dachstruktur für alle 5 Eigenformen bei einer Zuströmgeschwindigkeit von 20 m/s aeroelastisch stabil ist. In nachfolgender Tabelle 2 sind die aerodynamischen Arbeiten und mittleren Leistungen der 5 betrachteten Eigenformen aufgelistet.

Tabelle 2

Reduzierte Frequenzen der ersten Eigenformen

EIG.-FORM NR.	F _{EIGEN} [HZ]	AERODYN. ARBEIT [J/M ²]	MITTLERE LEISTUNG [W/M ²]
1	1.49	6.4	9.5
2	1.50	6.2	9.3
3	2.14	15.4	33.0
4	2.25	9.4	21.1
5	2.61	26.5	69.2

Führt man die Untersuchungen für sukzessive gesteigerte Zuströmgeschwindigkeiten bis zu 36 m/s durch, erweisen sich alle betrachteten Eigenformen ebenfalls als stabil, allerdings mit verminderten Dämpfungswerten. Tabelle 3 zeigt die Ergebnisse für die Eigenform 1 bei steigender Geschwindigkeit.

Tabelle 3

Aerodynamische Arbeit und mittlere Leistung für Eigenform 1 bei steigender Zuströmgeschwindigkeit

EIG.- FORM NR.	F _{EIGEN} [HZ]	AERODYN. ARBEIT [J/M ²]	MITTLERE LEISTUNG [W/M ²]
1	20	6.4	9.5
1	24	4.1	6.3
1	26	2.9	4.3
1	28	2.2	3.3
1	36	1.7	2.6

ZUSAMMENFASSUNG

Zur Untersuchung der aerodynamischen Stabilität der geplanten Dachkonstruktion mit Spannweiten von über 40 m wurde ein CFD-Verfahren auf Basis der 2D-Euler-Gleichungen genutzt. Die aeroelastischen Untersuchungen ergaben folgende Erkenntnisse:

- Alle betrachteten Rechenfälle sind aerodynamisch gedämpft.
- Mit zunehmender Anströmgeschwindigkeit nimmt die aerodynamische Dämpfung ab.
- Die aeroelastische Stabilität der Dachkonstruktion ist für die Anströmgeschwindigkeit gemäß ÖNORM von 20.4 m/s nachgewiesen.

LITERATUR

- Försching, H., Grundlagen der Aeroelastik, Springer Verlag Berlin / Heidelberg, 1974
- ÖNORM B 1991-1-4 Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke, Österreichisches Normungsinstitut, 2009
- Carstens, V., Schmitt, S. Comparison of Theoretical and Experimental Data for an Oscillating Transonic Compressor Cascade, ASME Turbo Expo 1999, Indianapolis, IN, USA, June 7-10, 1999, ASME Paper, 99-GT-408, 1999
- Carstens, V., Computation of the Unsteady Transonic 2D Cascade Flow by an Euler Algorithm with Interactive Grid Generation, 73rd Specialists' Meeting of the ADARD Structures and Materials Panel on Transonic Unsteady Aerodynamics and Aeroelasticity, San Diego, CA, USA, October 7-11, 1991, AGARD Conference Proceedings 507, 1991
- Grüber, B., Carstens, V., The Impact of Viscous Effects on the Aerodynamic Damping of Vibrating, Transonic Compressor Blades, Journal of Turbomachinery, Vol. 123, Nr. 2, pp. 409-417, 2001, also published as ASME Paper, 2000-GT-383, 2000