

# Untersuchung zu dynamischen Einwirkungen auf Vordächer mit Hilfe von Fluid-Struktur-Interaktion

S. Brendler<sup>a</sup> & A. Haufe<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Regierungspräsidium Tübingen, Landesstelle für Bautechnik  
Kienestrasse 41, 70174 Stuttgart  
stefan.brendler@rpt.bwl.de

<sup>b</sup> DYNAmore GmbH, Industriestr. 2, 70565 Stuttgart  
andre.haufe@dynamore.de

## Abstract:

Vordächer sollen Gebäude und Menschen vor Nässe schützen, sollen optisch ansprechend sein und müssen gegenüber Eigenlasten, Wind- und Schneeeinwirkung ausreichende Tragfähigkeit haben. Oftmals können bei entsprechenden Konstruktionen Windeinwirkungen bemessungsrelevant werden. Die bisher gültige Fassung der Norm DIN 1055 Teil 4 [4] enthält nur ansatzweise Hinweise auf die Größenordnung der möglichen Windeinwirkungen. Teilweise werden Windlastgutachten, die auf Windkanalmessungen basieren oder auch Ansätze aus Normen anderer Ländern für die Bemessung verwendet. Abhängig von der Geometrie werden so maximale Winddruckbeiwerte oftmals ingenieurmäßig sehr grob abgeschätzt. Wirtschaftlich können Vordächer allerdings nur mit realistischen Einwirkungen bemessen werden.

Nachfolgend wird daher untersucht, ob sich die Windeinwirkung auf Vordächer auch simulationstechnisch sinnvoll erfassen lässt. Weiter soll geprüft werden, inwieweit sich die Simulationsergebnisse mit Versuchen in Einklang bringen lassen. Während letzteres für deformationssteife Konstruktionen im Allgemeinen mit gängigen CFD-Programmen untersucht wird, ist für nachgiebige Konstruktionen die Berücksichtigung von Effekten aus Fluid-Struktur-Interaktion notwendig. In diesem Beitrag wird daher eine prinzipielle Vorgehensweise gerade auch für nachgiebige Strukturen diskutiert.

## Keywords:

Windeinwirkung, Windlastnorm, Vordächer, Fluid-Struktur-Interaktion, Computational Fluid Dynamics, Finite Elemente

## 1 Einführung

### 1.1 Allgemeines

Vordächer sollen Gebäude und Menschen vor Nässe schützen, sollen optisch ansprechend sein und müssen gegenüber Eigenlasten, Wind- und Schneeeinwirkung eine ausreichende Tragfähigkeit haben. So sind zum Beispiel transparente Glasvordächer in Fußgängerzonen allgegenwärtig (Bild 1). Bei dieser Bauart können Windeinwirkungen bemessungsrelevant werden. In bautechnischen Prüfungen fällt weiter auf, dass unterschiedliche Einwirkungen auf entsprechende Bauteile angesetzt werden. Die bisher gültige Fassung der Norm DIN 1055 Teil 4 [4] enthält nur ansatzweise Hinweise auf die Größenordnung der möglichen Windeinwirkungen. Teilweise werden Windlastgutachten, die auf Windkanalmessungen basieren oder Ansätze aus Normen anderer Ländern [3], [5] verwendet. Abhängig von der Geometrie (Vordachlänge oder Verhältnis Gebäude- zu Befestigungshöhe) werden maximale Winddruckbeiwerte zwischen  $-2,2$  und  $+1,8$  ausgewiesen. Wirtschaftlich können Vordächer allerdings nur mit möglichst realistischen Einwirkungen bemessen werden.



Bild 1 Typisches Glasvordach

Im März 2005 ist die neue Fassung der Windlastnorm [1] im Weißdruck erschienen. Baurechtlich wird diese Norm voraussichtlich Anfang 2006 in die Liste der Technischen Baubestimmungen eingeführt und ist damit bei Bauvorhaben anzuwenden. Deutschland wird zukünftig in verschiedene Windzonen eingeteilt. Es erscheint einsichtig, dass der Wind in Küstennähe stärker bläst als im unebenen Mittelgebirgsland. Die Norm definiert die Kraftbeiwerte und damit die Einwirkungen auf verschiedene Gebäudegeometrien (Flachdächer, Walmdächer, Kugeln, Fachwerke, Schalen, Schornsteine usw.). Die Einwirkungen auf Fahnenmasten wurden reduziert, da heutige Fahnen, gewebt aus modernen luftigen Stoffen, dem Wind weniger Widerstand entgegensetzen als die schweren Stoffe aus vergangenen Tagen. Auch die Sogbeiwerte an Gebäudeecken wurden reduziert. So lassen sich für unzählige Geometrien aus der knapp einhundertseitigen Vorschrift Einwirkungen ermitteln. Unverständlich ist, warum keine Winddruckbeiwerte für Vordächer in der Neufassung der Norm enthalten sind.

In Einzelfällen können Ersatzgrößen in Analogie zu ähnlichen Geometrien abgeleitet werden. Zwei Hinweise sind hierzu enthalten:

1. Dachüberstände sind für den Unterseitendruck mit dem Wert der anschließenden Wand zu beaufschlagen. Auf die Oberseite kann der Druck der anschließenden Dachfläche angesetzt werden.
2. Druckbeiwerte für freistehende Dächer, die von einem leeseitig stehenden Gebäude teilweise versperrt werden, sind in [1], Tabelle 8 angegeben.

Alternativ zu möglichen Versuchen im Windkanal lässt sich die Wirkung von Wind auf Gebäudeteile in Simulationen untersuchen. Für nachgiebige Konstruktionen können Kräfte hieraus insbesondere dann abgeschätzt werden, wenn die Berechnung in der Lage ist, die Fluid-Struktur-Interaktion zu berücksichtigen. In diesem Beitrag werden die in Bild 2 dargestellten Parameter  $H$  für die Gebäudehöhe und  $h$  als Montagehöhe verwendet.

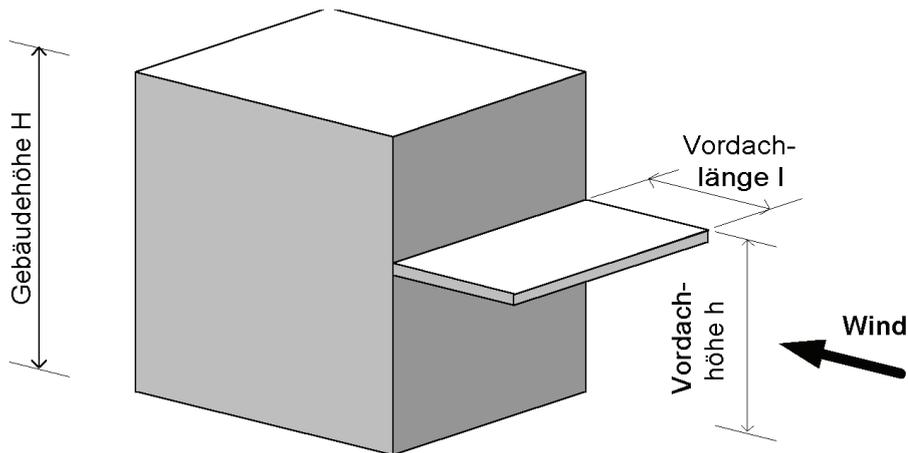


Bild 2 Definition der Parameter

## 1.2 Bauwerksbeanspruchung infolge Windeinwirkung

Die vom Wind hervorgerufenen Bauwerksbeanspruchungen können ermittelt werden, wenn eine Reihe von Modellen nacheinander abgearbeitet werden:

- Bestimmung des Windklimas
- Bestimmung der aerodynamischen Übertragungsfunktion
- Bestimmung der mechanischen Übertragungsfunktion
- Bewertung der entstehenden Beanspruchungen (Grenzwert-Überschreitung oder Ermüdung)

Das nachfolgende Diagramm zeigt die Nachweiskette (Bild 3).

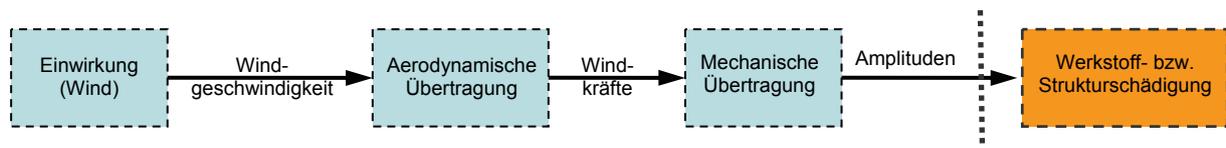


Bild 3: Bauwerksbeanspruchung infolge Windeinwirkung aus [2]

## 1.3 Vorschriften

Die DIN 1055 Teil 4 [4] in der Fassung von 1980 ist heute noch baurechtlich eingeführt und damit für Bemessungen vorgeschrieben. Nach der Einführung der Neufassung [1] muss bei der Bemessung erstmals der Standort des Gebäudes berücksichtigt werden. In Deutschland lassen sich die zu erwartenden Bemessungswinde in vier wahrscheinliche Windlastzonen einteilen. Die zugehörigen Windgeschwindigkeiten sind in Tabelle 1 aufgeführt.

Tabelle 1: Windzonen und Windgeschwindigkeiten, [1] Anhang A

Windzone (WZ)	Windgeschwindigkeiten $v_{ref}$ [m/s]	Geschwindigkeitsdruck $q_{ref}$ [kN/m <sup>2</sup> ]
WZ 1	22,5	0,32
WZ 2	25,0	0,39
WZ 3	27,5	0,47
WZ 4	30,0	0,56

Tabelle 2: Druckbeiwerte für Vorsprünge aus der ÖNORM B 4014-1 [3], Tabelle 13 (Parameter siehe Bild 2)

h/H	Winddruck von oben nach unten $c_p > 0$	Winddruck von unten nach oben $c_p < 0$
0,1	1,2	-0,4
0,2	0,7	-0,4
0,5	0,5	-0,4
0,75	0,4	$-0,4 - 0,15 \frac{h}{l} \geq -1,5$
1,0	0,4	$-0,5 - 0,5 \frac{h}{l} \geq -1,5$

## 2 Diskretisierung mit Finiten Elementen: Fluid-Struktur-Interaktion

### 2.1 Einführung

Für eine simulationstechnische Abschätzung des Winddrucks wird im Folgenden ein finite Elemente Modell mit dem Softwarepaket LS-DYNA aufgebaut. Dabei wird die in Abbildung 2 dargestellte Geometrie diskretisiert. Für das Vordach, die Hauswand und den Boden werden Schalenelemente herangezogen; für die Diskretisierung des Fluids wird auf einen Fluid-Struktur-Interaktionsalgorithmus (FSI) für kompressible Flüssigkeiten zurückgegriffen. Im vorgestellten Beitrag soll die prinzipielle Möglichkeit zur Lösung einer solchen Problemstellung mit LS-DYNA aufgezeigt werden. Im Weiteren wird daher auf eine Konvergenzstudie verzichtet. Ziel ist es, mit lediglich einer gegebenen Diskretisierung, die prinzipiellen Effekte zu identifizieren.

Der in LS-DYNA vorhandene und im Folgenden verwendete FSI-Algorithmus wurde für die Kopplung sich bewegender, beliebig deformierbarer Fluid-Gebiete mit deformierbaren Festkörper-Strukturen entwickelt. (vgl. [6]). In der hier vorliegenden Applikation wird jedoch das Arbitrary-Lagrange-Euler-Gebiet (ALE) weder bewegt noch deformiert. Dadurch ergibt sich im Grenzfall eine klassische Euler-Diskretisierung. Weiter wird für die vorliegende Prinzipstudie von starren Strukturelementen ausgegangen. Letztere Einschränkung kann natürlich für zukünftige Untersuchungen fallen gelassen werden. Gerade für leichte und flexible Fassaden oder Vordachkonstruktionen bzw. auch für abgespannte Seilnetzkonstruktionen ist daher die folgende Vorgehensweise mit möglichst diskretisierungsunabhängiger Kopplung vorteilhaft.

### 2.2 Räumliche Diskretisierung in LS-DYNA

Für die ALE-Methode wird eine beliebige Referenzkonfiguration gewählt. D. h. ein ideeller Betrachter bewegt sich nicht mehr mit einem Punkt der Materie mit (Lagrange'sche Beschreibung) oder befindet sich fix im Raum und betrachtet somit die vorbeiströmenden Materiepunkte (Euler'sche Beschreibung), sondern kann einer beliebigen, eigenen Bewegung. Es ist sofort ersichtlich, dass damit die Grenzen der beiden klassischen Betrachtungsweisen verschwimmen und diese sich als Sonderfall eines sich beliebig bewegenden oder auch feststehenden Referenzgebietes wiederfinden. Mathematisch führt dieses beliebige Referenzgebiet zu einem weiteren Term in den Bilanzgleichungen bzw. algorithmisch zu einem weiteren Satz von Feldgleichungen, die zu lösen sind, da die Netzynamik des bewegten Eulernetzes ebenfalls in die Lösung eingeht. Nachfolgend sind exemplarisch die Bilanzgleichungen angegeben, die entsprechend zeitlich und räumlich diskretisiert innerhalb von LS-DYNA

explizit gelöst werden. Dabei sind die zusätzlichen Terme durch die ALE-Betrachtungsweise farbig hervorgehoben.

$$\text{Impulsbilanz: } \rho \ddot{\mathbf{x}} + \rho \nabla \dot{\mathbf{x}}(\mathbf{v} - \dot{\mathbf{x}}) = \rho \mathbf{b} + \text{div } \boldsymbol{\sigma} \quad (1)$$

$$\text{Massenbilanz: } \dot{\rho} + \nabla \rho(\mathbf{v} - \dot{\mathbf{x}}) + \rho \text{div } \mathbf{v} = 0 \quad (2)$$

$$\text{Energiebilanz: } \rho \dot{\mathbf{u}} + \rho \nabla \mathbf{u}(\mathbf{v} - \dot{\mathbf{x}}) = \boldsymbol{\sigma} : \mathbf{D} + \rho \mathbf{r} - \nabla \mathbf{q} \quad (3)$$

Hierin bezeichnet  $\mathbf{v}$  jeweils die Materialgeschwindigkeit,  $\dot{\mathbf{x}}$  die Netzgeschwindigkeit,  $\rho$  die Dichte,  $\mathbf{b}$  eingeprägte Körperkräfte und die letzten beiden Terme in Gleichung (3) Temperaturquellen und -senken. Zu dieser vereinfachten Darstellung muss angemerkt werden, dass sich die Gleichungen (1) bis (3) für den ALE-Fall auf das ALE-Referenzsystem beziehen und bei entfernen der farbigen Terme auf das *Lagrange'sche* Referenzsystem. Wie bereits erwähnt ist für die in diesem Beitrag vorgestellten Modelle zunächst keine Bewegung des Fluid-Netzes notwendig bzw. vorgesehen.

### 2.3 Advektion

Als Advektion wird der algorithmische Transport von Zustandsvariablen (Temperatur, Masse, interne konstitutive Variablen etc.) in einer nicht-Lagrange'schen Beschreibung verstanden. Diese Algorithmen sind je nach angewendetem Verfahren die Ursache für Abweichungen beim Übertragen der entsprechenden Zustandsvariablen. Tendenziell gilt, dass je geringer die tatsächliche Bewegungsdifferenz zwischen Netz und Material ist, desto geringer sind die transportierten Massen und desto kleiner ist *a priori* der Fehler aus dem Advektionsalgorithmus. Für kurzzeitdynamische Vorgänge werden im Allgemeinen Verfahren empfohlen, die zweiter Ordnung genau sind; LS-DYNA stellt hier unter anderen das sogenannte *van Leer*-Schemata zur Verfügung. In LS-DYNA werden durch die vorhandene Multi-Material-ALE-Formulierung bis zu acht unterschiedliche Materialien mit den entsprechenden Geschichts- und Zustandsvariablen übertragen. Ein weiterer Aspekt hinsichtlich der Genauigkeit des Advektionsschrittes betrifft den Zeitschritt. Um die Genauigkeit in einem akzeptablen Rahmen und die Verfahren stabil zu halten, wird der Materialtransport innerhalb eines Zeitschrittes nur bis in das erste viertel eines Elementes erlaubt. D. h. der Massenfluss bestimmt neben dem *Courant*-Kriterium in seiner klassischen Form direkt den Zeitschritt.

### 2.4 Kopplung

Neben der Gasdynamik ist auch die Struktur zu betrachten, die in der vorliegenden Applikation zunächst als starr angenommen wurde. Strukturelle Komponenten eines Modells werden im vorgestellten Ansatz in klassischer *Lagrange'scher* Weise diskretisiert. Damit stellt sich schließlich die Frage nach der Interaktion zwischen strömender Luft (bzw. Luftfraktionen bei der Multi-Material-Formulierung) und der Gebäudehülle. Hier bieten sich dem Anwender ähnlich wie bei üblichen Kontaktdefinitionen einerseits *constraint*-basierte Methoden und andererseits *penalty*-basierte Methoden. *Constraint*-basierte Methoden gelten als impulserhaltend, erhalten jedoch nicht die Energie. Dagegen erhalten *penalty*-Methoden die Energie, zeigen jedoch mitunter Stabilitätsprobleme. Im vorliegenden Fall wird eine *penalty*-Methode empfohlen, für die ein sogenannte *penetration*-Vektor ermittelt wird. Er erlaubt die Ermittlung einer Eindringtiefe des strömenden Gases in den mit Schalenelementen abgegrenzten Luftraum. Durch Vorgabe einer *pressure-penetration*-Beziehung werden hieraus *penalty*-Kräfte auf die Struktur und das Gas berechnet und so die gewünschte Kopplung erreicht.

### 2.5 Modellaufbau zur Fluid-Struktur-Interaktion in LS-DYNA

Für die Diskretisierung wird das Eulergebiet in mehrere Multi-Materialgruppen unterteilt. Zum einen ist dies für die Kopplung, die lediglich auf einer Seite einer Schalenstruktur wirken kann, notwendig. Zum anderen kann so eine visuelle Kontrolle der Kopplung leicht im Postprozessor erfolgen. Es werden daher der untere und der obere Luftraum auf Höhe des Vordachs unterteilt. Zusätzlich wird die seitlich eingeleitete Luft in ein unteres und ein oberes Reservoir unterteilt. Damit existieren für das Eulergebiet vier unterschiedliche Multi-Materialgruppen (MMG) mit identischen physikalischen Eigenschaften. Die unteren beiden und die oberen beiden MMG werden getrennt gegen die Schalen des Vordachs gekoppelt.

Für die Kopplung selbst wird auf eine *penalty*-Formulierung (CTYP=4 in der \*CONSTRAINED\_LAGRANGE\_IN\_SOLID-Karte) zurückgegriffen. Durch eine geeignete Wahl der Elementgröße lassen sich *leakage*-Effekte sicher vermeiden: Die charakteristische Elementgröße von Lagrange'scher und Eulerscher Diskretisierung ist ungefähr gleich. Eine zu hohe Anzahl an Kopplungspunkten ist daher nicht notwendig.

Wichtig erscheint es in diesem Zusammenhang nicht nur auf die Initialisierung der Multi-Materialgruppen hinzuweisen (siehe die \*INITIAL\_VOLUME\_FRACTION\_GEOMETRY-Karte), sondern auch auf die richtige Initialisierung des Anfangsdrucks (Umgebungsluftdruck) im Eulergebiet. Letzteres kann entweder bei Verwendung von MAT\_NULL und EOS über *E0* in den EOS-Karte erfolgen, oder bei Einsatz der \*MAT\_GAS\_MIXTURE-Karte über die Karte \*INITIAL\_GAS\_MIXTURE.

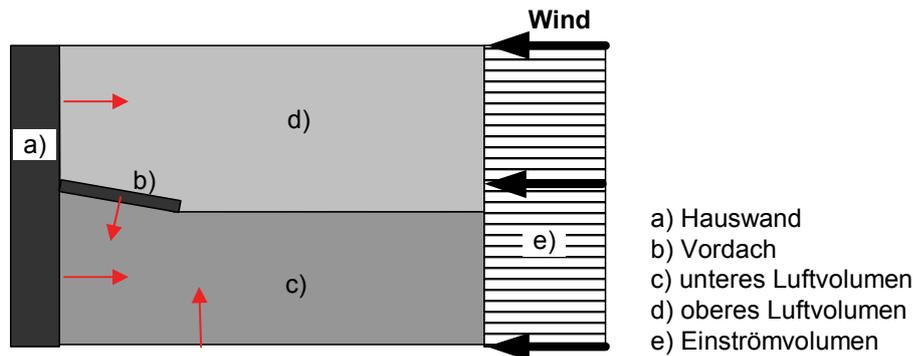


Bild 3: Prinzipieller Aufbau des finiten Elemente Modells mit Richtung der Schalennormalen (rot)

Weiter ist anzumerken, dass für diese Studien von einem ebenen Strömungszustand ausgegangen wird. Das heißt die Geschwindigkeitskomponenten senkrecht zur Diskretisierungsebene sind zu Null gesetzt. Dies entspricht der Simulation eines unendlich langen Gebäudes und wird tendenziell höhere Staudrücke liefern als in der Literatur für reale Gebäude dokumentiert. Letzteres ist insbesondere vor dem Hintergrund der normativ geregelten Staudrücke zu sehen.

Als Windlast werden 30 m/s entsprechend 115 km/h angesetzt dies entspricht Stürmen, die in Windzone 4 auftreten könnten. Bei freistehenden Gebäuden entspricht dies einem Staudruck von 0,56 kN/m<sup>2</sup>. Im Berechnungsmodell werden die Anfangs- bzw. Einströmgeschwindigkeiten aus Reservoir über eine Rampenfunktion eingestellt. Als Randbedingungen wird 1 bar Umgebungsdruck – auch im Reservoir – spezifiziert. Weiter wird von einer Temperatur von 293 K entsprechend 20° und eine Luftdichte von 1,205 kg/m<sup>3</sup> ausgegangen.

### 3 Validierung des Finite Elemente Modells

Zur Validierung des Modells wird eine ebene, unendlich lange Gebäudefläche ohne Vordach angeströmt (vgl. Bild 3). Als Referenz dienen Hinweise der Norm [1] wonach einer Windgeschwindigkeit von 30 m/s wird ein Druck von 0,56 kN/m<sup>2</sup> zugeordnet wird; letzterer gilt für umströmte Gebäude. Als Anfangsbedingungen für die Umgebungsluft wurden die Parameter aus Tabelle 1 verwendet.

In Bild 4 ist der Verlauf des Druckes über die Wandhöhe dargestellt. Man kann erkennen, dass nach Erreichen eines quasi-stationären Zustands der Anfangsdruck von 1,013 bar auf im Mittel ca. 1,025 bar ansteigt. Die Kurve E repräsentiert dabei einen Punkt nahe der Traufe, wo durch die Ablösung der Strömung ein Unterdruck entsteht. Vergleicht man die Druckdifferenz von 0,012 bar mit dem Referenzwert von 0,0056 bar aus der Norm so erkennt man grob einen Faktor von zwei, der auf die Diskretisierung eines unendlich langen Gebäudestreifens zurückzuführen ist. Dieser absolute Wert ist bei den folgenden Berechnungen mit Vordach kritisch zu diskutieren. Als Grund für die Abweichung wird die bereits erwähnte Umströmungsbehinderung im Simulationsmodell angenommen, die zur Abbildung eines unendlich langen Vordachs führt.

Tabelle 1: Materialkennwerte

Bezeichnung	Wert	Einheit
Luftdichte	$\rho = 1,205$	kg/m <sup>3</sup>
Luftdruck	1 013	HPa
Temperatur	20	°C

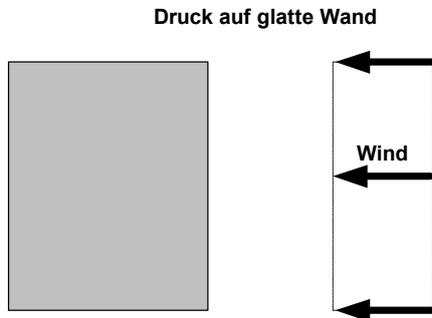


Bild 4 Validierung des Modellaufbaus anhand des Staudrucks einer glatten Wand

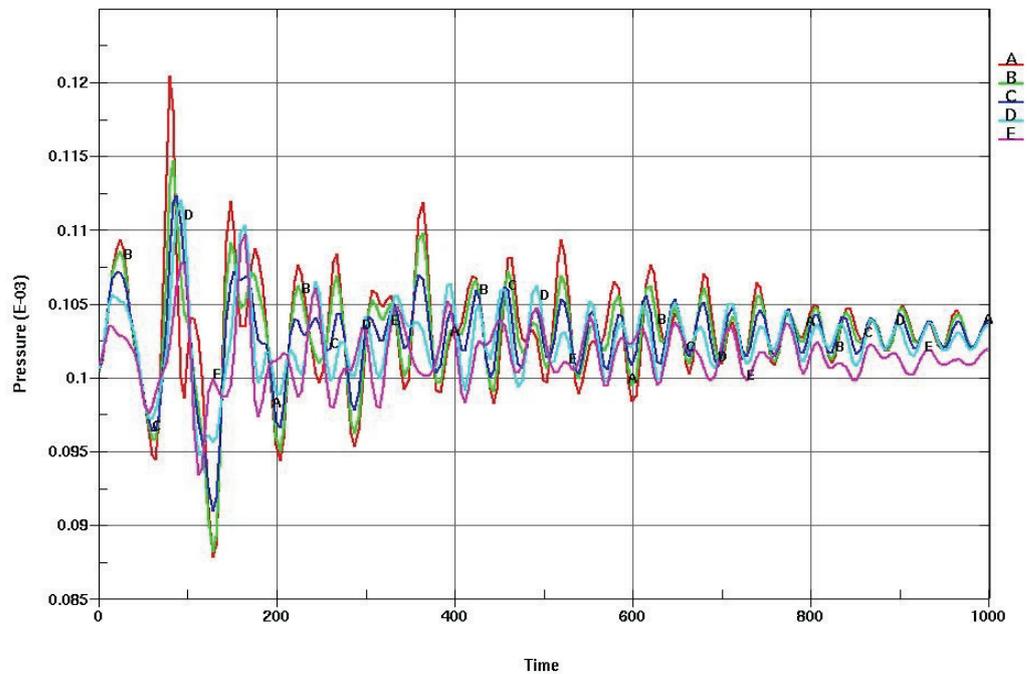


Bild 5: Druckverlauf über die Wandhöhe

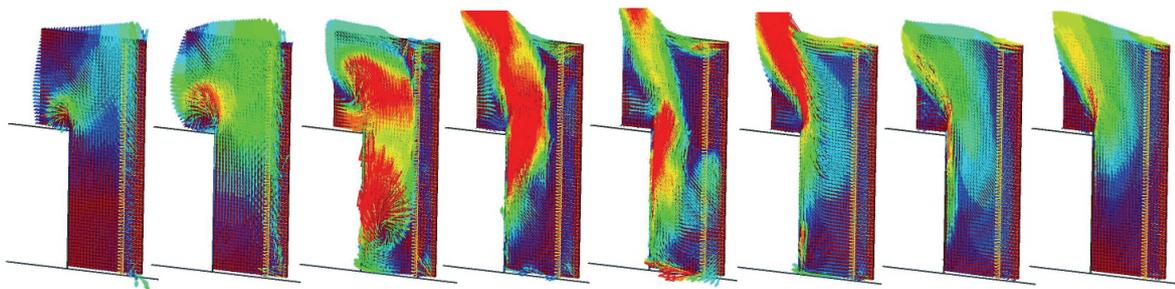


Bild 6: Verlauf der Geschwindigkeitsvektoren von 5 m/s (grün) bis 40 m/s (rot) von 20 ms bis 1000 ms

## 4 Parameterstudie

### 4.1 Allgemeines

Ob das Vordach mit Wind von unten oder Windeinwirkung von oben nach unten beansprucht wird, hängt maßgeblich vom Verhältnis Montagehöhe des Vordachs zur Gebäudehöhe ab. In Bild 7 sind die unterschiedlichen Windeinwirkungen qualitativ für unterschiedliche Höhenverhältnisse dargestellt.

In den nachfolgend dargestellten numerischen Simulationen wird das Verhältnis  $h/H = 0,64$  untersucht. Dies entspricht dem Fall, dass das Vordach relativ hoch in Bezug auf die Gebäudehöhe angebracht ist. Die resultierende Windeinwirkung drückt das Vordach nach oben. Auf der Unterseite des Vordachs herrschen höhere Drücke als auf der Oberseite. In den dargestellten Simulationen wird ein kurzer Abschnitt der Vordach – Gebäude – Situation berechnet. Die Ebenen parallel zur Ansicht wurden mit Symmetrierandbedingungen versehen. Der prinzipielle Einfluss unterschiedlicher Geometrien kann mit diesen Modellen mit reduziertem Rechenaufwand dargestellt werden. Allerdings gestattet diese Simulation kein Abströmen rechts und links um das Gebäude. Der geführte Windstrom erzeugt höhere Drücke als bei frei stehenden Häusern wie sie in der Norm behandelt werden. In Innenstädten sind Häuseranordnungen denkbar, die ein solches Modell rechtfertigen würden.

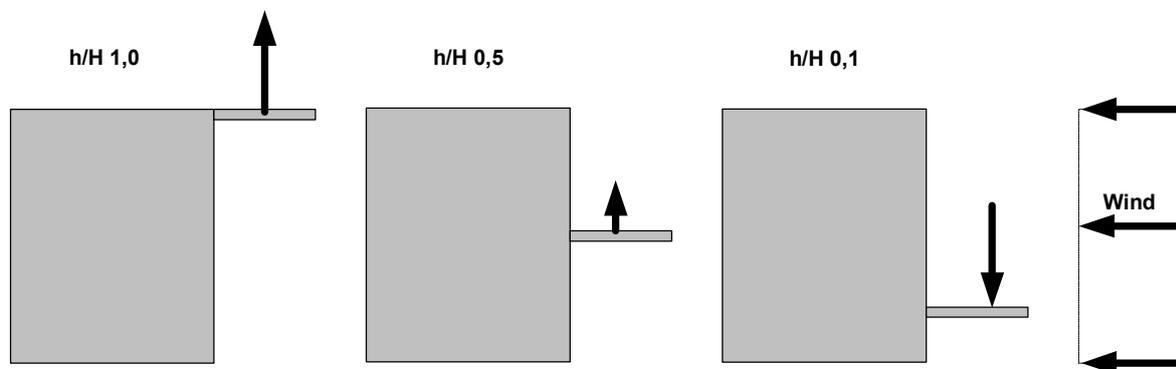


Bild 7: Windeinwirkung auf das Vordach in Abhängigkeit vom Verhältnis  $h/H$

### 4.2 Horizontal auskragendes Vordach

Die in Abschnitt 4.2 bis 4.4 vorgestellten Modelle gehen von folgenden geometrischen Randbedingungen aus:

- Gebäudehöhe von 5,5 m
- Vordachhöhe von 3,5 m
- Vordachlänge von 1,5 m

In Bild 8 ist ein horizontal auskragendes Vordach dargestellt. Die Simulation zeigt Druckunterschiede zwischen der Ober- und Unterseite des Vordachs. Damit wirken abhebende Windkräfte auf das Vordach. Die Messpunkte A bis C in Bild 9 liegen vor der Gebäudewand. Der unterste Punkt A befindet sich in einem Meter Höhe. Fortlaufend wird der Abstand jeweils um einem Meter erhöht. Die Punkte D und E liegen an der Unterseite des Vordachs.

Damit sind die Aussagen der Norm [1] bestätigt, wonach bei hoch angeordneten Vorsprüngen (Dachüberständen) näherungsweise der Druck, der auf die Wand wirkt, zusätzlich als von unten wirkend angesetzt werden kann (siehe Abschnitt 1.1). Die Messstellen F und G, die geringere Drücke aufweisen, liegen auf der Oberseite. Bei 400 ms stellt sich nahezu ein quasi-stationärer Zustand mit Drücken zwischen  $0,102$  bis  $0,103 \cdot 10^{-3}$  kN/mm<sup>2</sup> ein. Beim Umströmen des Vordachs bilden sich Wirbel; deren räumliche Entwicklung im Modellgebiet können der Bildfolge 10 entnommen werden.

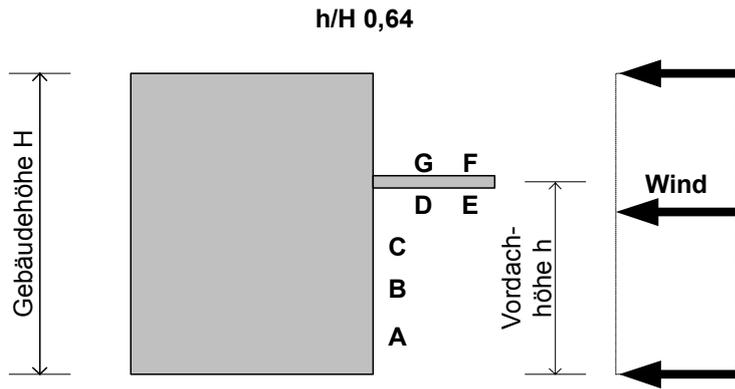


Bild 8: Horizontal auskragendes Vordach (Auswertestellen A – G siehe Bild 9)

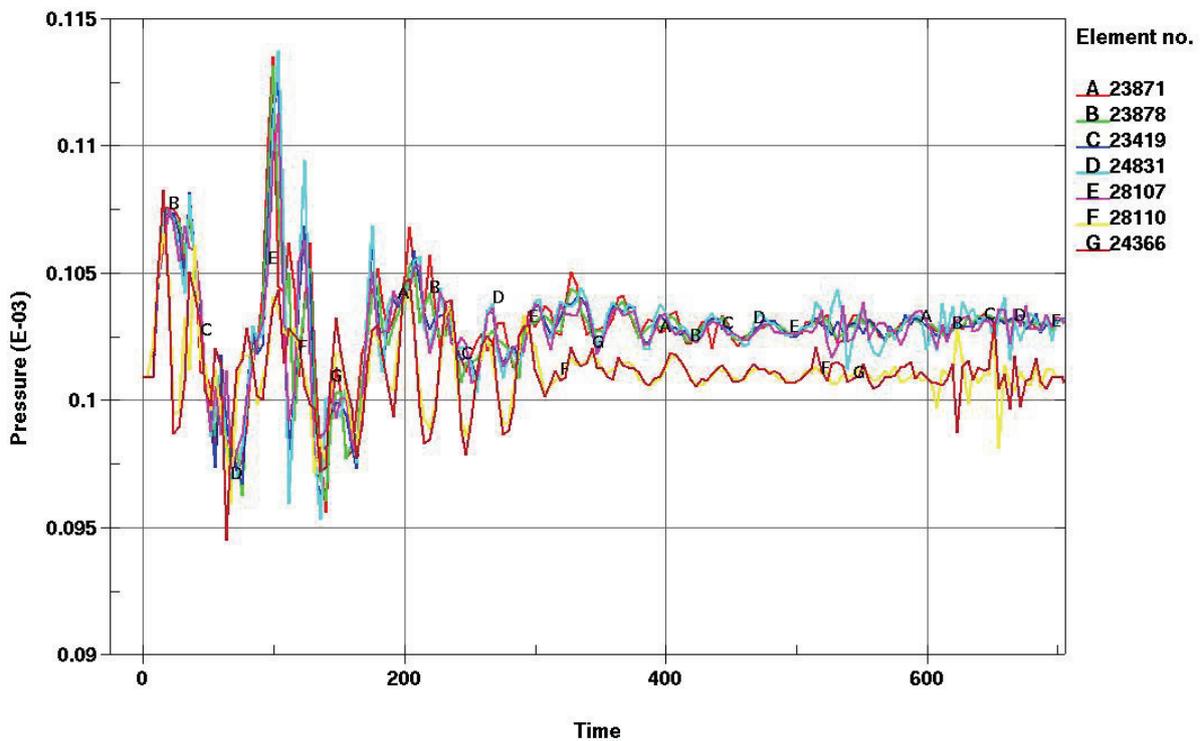


Bild 9: Druckverlauf über die Wandhöhe

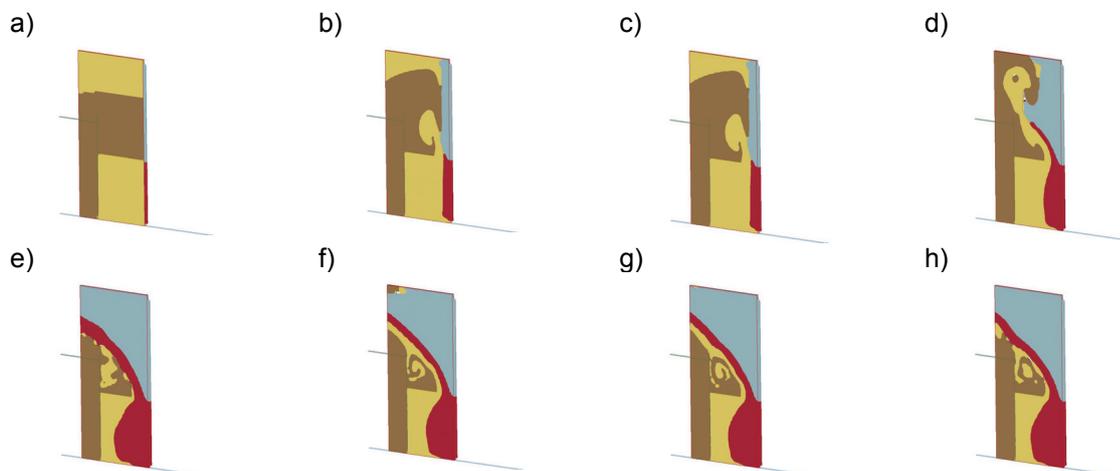


Bild 10: Windbewegungen über die Zeit farblich dargestellt in vier Multimaterialgruppen

### 4.3 Vordachneigung 15°

Gegenüber der Simulation des Abschnitts 4.2 wird das Vordach um 15° geneigt. Die Messstellen G und H liegen auf der Vordachoberseite und zeigen geringere Drücke als die Punkte E und F auf der Vordachunterseite bzw. A bis D vor der Gebäudewand. Ab 400 ms bildet sich wieder ein nahezu quasi-stationärer Zustand mit Drücken zwischen 0,102 bis 0,103·10<sup>-3</sup> kN/mm<sup>2</sup> aus. Somit hat die Neigung des Vordachs um 15° noch keinen nennenswerten Einfluss auf die Veränderung der Windkräfte gegenüber dem horizontalen Vordach.

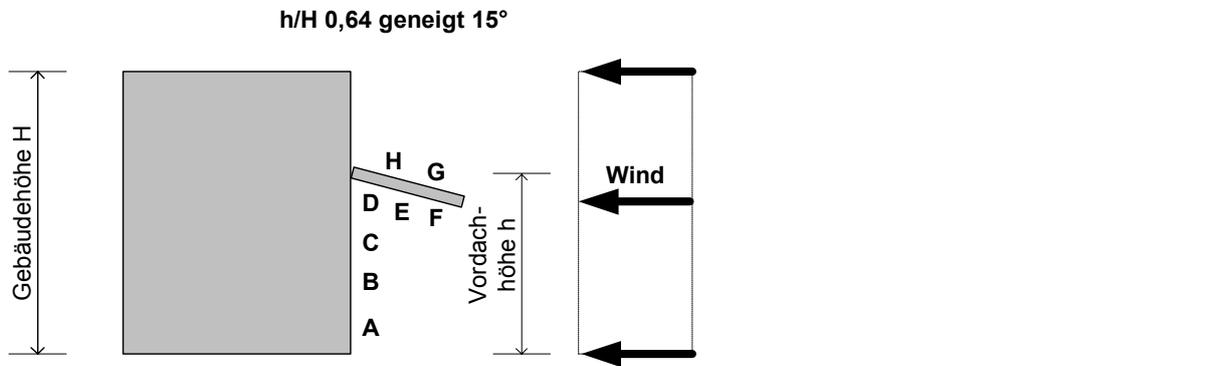


Bild 11: Geneigtes Vordach (Auswertestellen A – H siehe Bild 12)

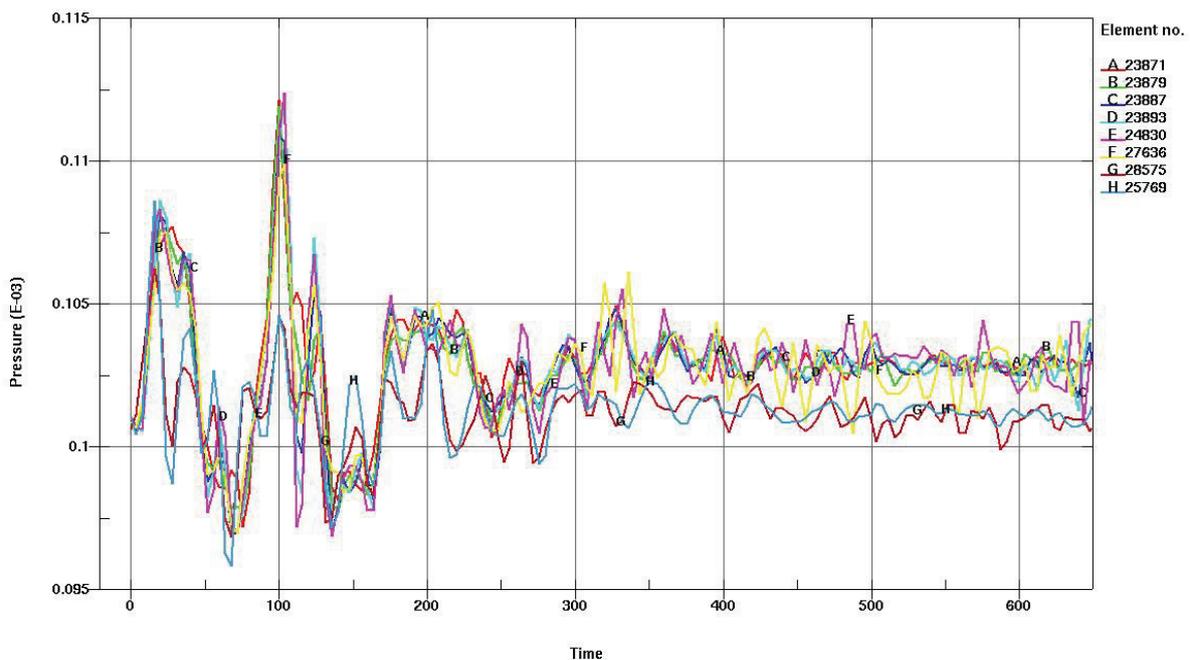


Bild 12: Druckverlauf über die Wandhöhe im Zeitbereich von 0 bis 650 ms

### 4.4 Frei umströmtes Vordach 15° geneigt

In der folgenden Untersuchung wurde das Vordach vom Gebäude um 200 mm abgerückt. Damit kann die Luft durch den entstandenen Spalt strömen. Die Geometrie der Simulation kann Bild 13 entnommen werden. Das zugehörige Finite-Elemente-Netz ist in Bild 14 dargestellt. Der Spalt wird simulationstechnisch erst wirksam, wenn das Eulernetz hinreichend fein ist und der Spalt zwischen Hauswand und Vordachkante durch die Diskretisierung des Eulernetzes aufgelöst werden kann. Bild 15 zeigt die Drücke an verschiedenen Messstellen. An den beiden Messstellen über der Vordachoberseite wurde ein geringfügig kleinerer Druck als auf der Unterseite berechnet. Der geringere Druckunterschied verglichen mit dem Beispiel aus Abschnitt 4.3 (Vordach ohne Spalt) bewirkt kleinere abhebbende

Kräfte. In diesem Fall kann also durch die Simulation bestätigt werden, dass durch Abrücken des Vordachs die Einwirkung infolge Wind reduziert werden kann.

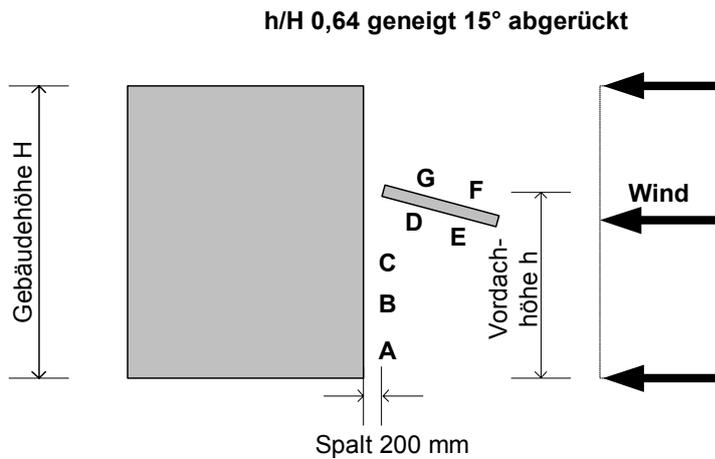


Bild 13 Skizze für das abgerückte Vordach (Auswertestellen A – G siehe Bild 15)

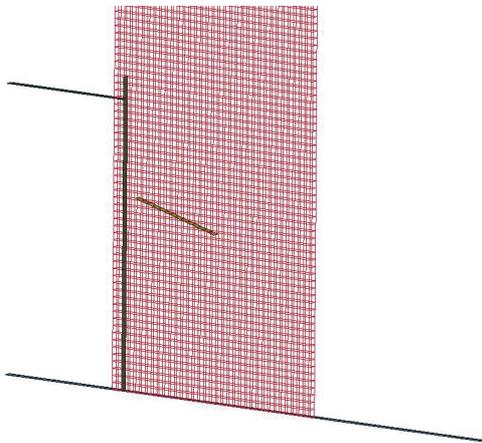


Bild 14: FE-Netz des abgerückten Vordachs

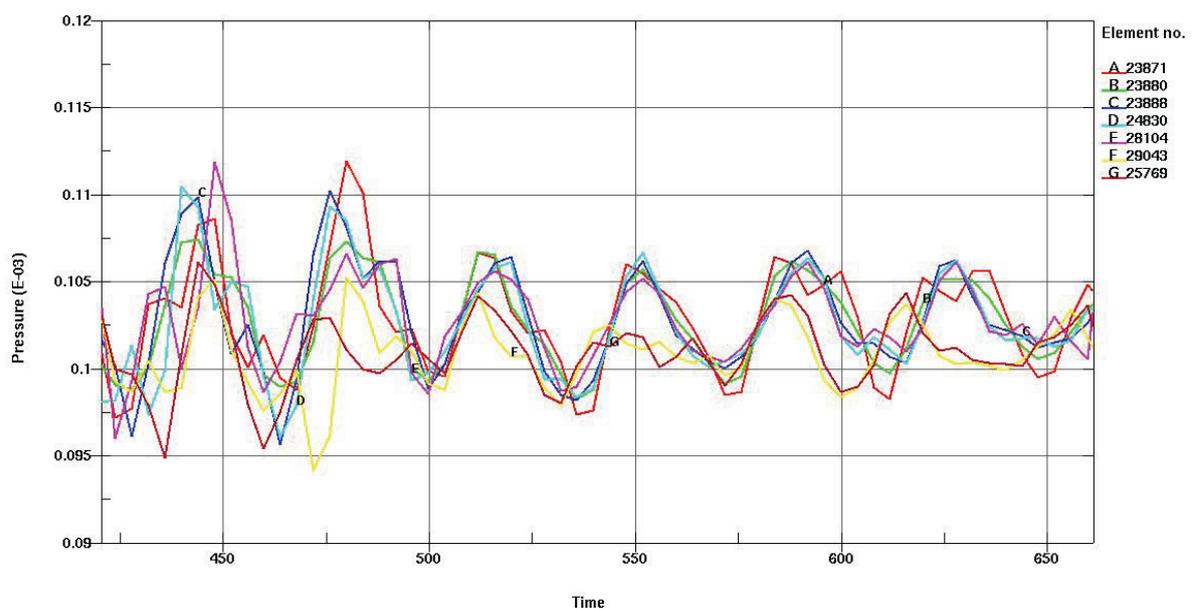


Bild 15: Druckverlauf über die Wandhöhe im Zeitbereich von 425 bis 650 ms

5 Gegenüberstellung der Varianten

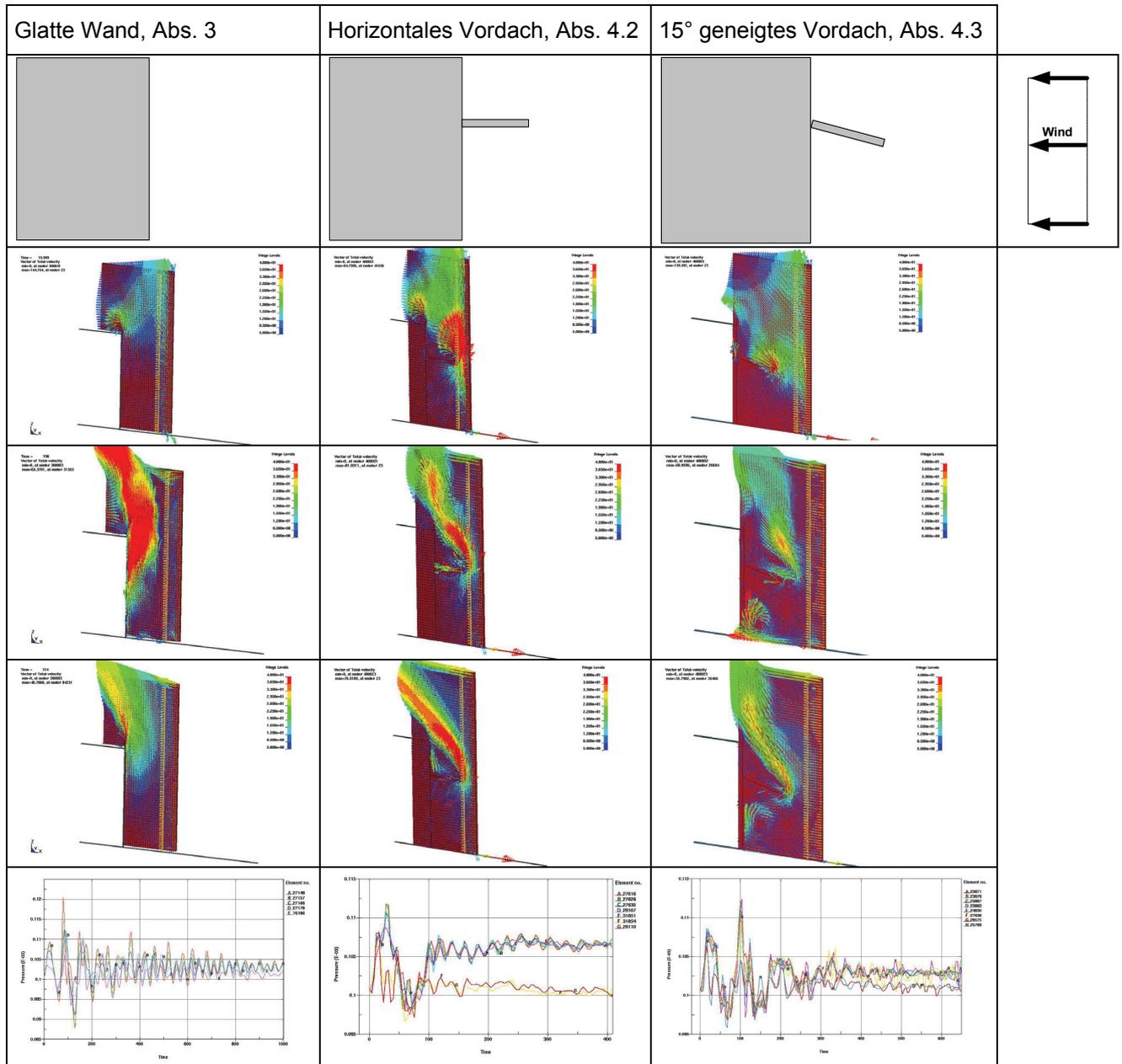


Bild 16: Gegenüberstellung der Varianten

In Bild 16 sind die Simulationsergebnisse der Anströmung auf eine glatte Wand, der Störung infolge eines Vordachs bzw. eines abgerückten Vordachs gegenübergestellt. In den mittleren Bildern bedeuten rote Bereiche jeweils hohe Windgeschwindigkeiten über 40 m/s. Besonders an der Vordachkante sind hohe Umströmungsgeschwindigkeiten zu beobachten. In der untersten Zeile sind Diagramme der Winddrücke verschiedener Orte vor der Gebäudewand, bzw. unter und über den Vordächern nochmals gegenübergestellt. Hier zeigt das Diagramm in der mittleren Spalte zwei Messstellen mit geringeren Winddrücken. Diese liegen auf der Oberseite des Vordachs. Damit wirkt die resultierende Windeinwirkung abhebend von unten nach oben auf das Vordach.

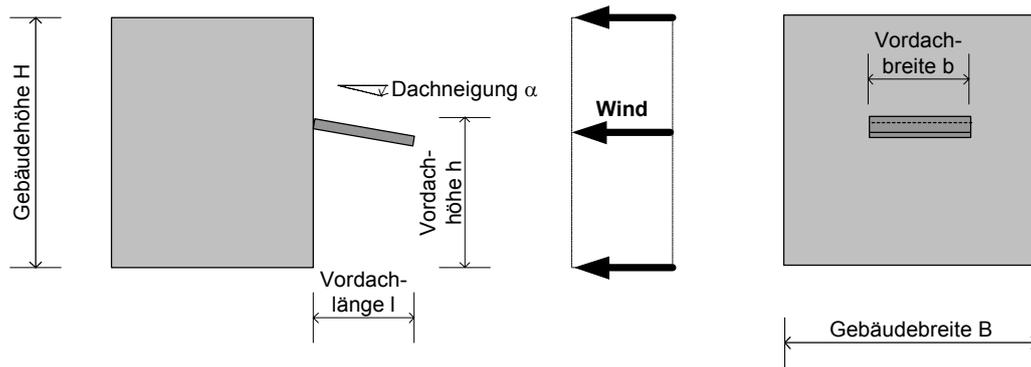


Bild 17: Geometrische Parameter, die die Einwirkungen verändern werden

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Jede Finite-Elemente Berechnung sollte anhand von Versuchsdaten validiert werden. Im vorliegenden Artikel wurde die glatte Wand (siehe Abschnitt 3) als Referenzlösung gewählt. Gegenüber dem in der Norm [1] angegebenen Referenzdruck wird in der Simulation ohne eine Umströmungsmöglichkeit (Symmetriebedingungen) ein etwa doppelt so hoher Druck berechnet. Für Bemessungsaufgaben wäre es erforderlich, Modelle mit Umströmungsmöglichkeiten aufzubauen und diese zunächst an Windkanalversuchen zu kalibrieren. Ausgehend von einem solchermaßen validierten Modell könnte jede beliebige Geometrie mit hoher Aussagegenauigkeit simuliert werden. Allgemeingültige Winddruckbeiwerte für das hier betrachtete Vordach ließen sich berechnen, wenn eine Parameterstudie neben verschiedenen Windrichtungen die in Bild 17 dargestellten geometrischen Randbedingungen in einer vollen dreidimensionalen Diskretisierung berücksichtigen würde.

Die aerodynamische Übertragung, das heißt, die resultierenden Windkräfte infolge der vorbeiströmenden Luft hängt maßgeblich von der Gebäudegeometrie ab. In der Windlastnorm [1] sind nur für Standarddetails aerodynamische Kraftbeiwerte angegeben. Die Windeinwirkung auf Fassaden und den Anbauteilen (Vordächern) kann jedoch bemessungsrelevant sein. Werden Gebäude mit komplexer Gebäudegeometrie oder besonderen Standortfaktoren, wie z.B. eine „Düsenwirkung“ in Innenstädten infolge trichterförmig vorgesetzter Gebäude, dimensioniert, können diese Situationen Kraftbeiwerte erfordern, die sowohl unter als auch über den Standardangaben der Norm liegen.

Stand der Technik sind in diesen Fällen Windkanalmessungen an Kleinmodellen. Alternativ bietet die hier vorgestellte rechnerische Simulation mit LS-DYNA mit der angewendeten Fluid-Struktur-Kopplung eine Möglichkeit, die Windeinwirkung auf die Gebäudeteile zu simulieren. Vorhandene Tragwerkssteifigkeiten können in diesen Berechnungen zusätzlich berücksichtigt werden. Die Einflüsse unterschiedlicher Vordachgeometrien auf den Winddruck und die Windgeschwindigkeiten wurden an einem geraden, einem um  $15^\circ$  Grand geneigten und einem mit 200 mm Spalt montieren Vordach diskutiert.

## 7 Literatur

- [1] DIN 1055-4:2005-03, „Einwirkungen auf Tragwerke- Teil 4: Windlasten,“ Deutsches Institut für Normung
- [2] Ingenieurbüro Peil & Partner, Braunschweig, <http://www.ipp-bs.de/windengi.htm>
- [3] ÖNORM B 4014-1: 1993-05-01, „Belastungsannahmen im Bauwesen - Statische Windwirkungen (nicht schwingungsanfällige Bauwerke)“, Österreichisches Normungsinstitut
- [4] DIN 1055-4:1980, „Einwirkungen auf Tragwerke- Teil 4: Windlasten“, Deutsches Institut für Normung
- [5] British Standard BS 6399 Part 2, 1999 “Code of practice for wind loads”
- [6] Olovsson, L. (2000) "On the Arbitrary Lagrangian-Eulerian Finite Element Method" Ph. D. Thesis, Linköping University, Sweden.

