

HYBRIDES BERECHNUNGSVERFAHREN FÜR DIE NATÜRLICHE LÜFTUNG VON GROSSEN GEBÄUDEN

Dr.-Ing. Eckehard Fiedler

Fa. YIT, Forschung und Entwicklung Aachen

KURZFASSUNG

Dieses Dokument beschreibt eine Systematik für die Berechnung der natürlichen Lüftung großer Gebäude, die im Forschungslabor der YIT in Aachen entwickelt wurde.

Bei der Berechnung von Großgebäuden mit hohen inneren Lasten (z.B. Kraftwerksblöcke) werden CFD-Berechnungen zur Auslegung der notwendigen Öffnungsflächen eingesetzt. Üblicherweise sind bis zu 15 Auslegungsfälle zu untersuchen, was erhebliche Rechenzeiten und damit verbundene Kosten verursacht.

Grundlage des vorgestellten Rechenverfahrens ist eine tabellarische Berechnung der Temperaturentwicklung im Gebäude und der daraus resultierenden Auftriebsdrücke. Über geeignete Kenngrößen lässt sich die Lösung der tabellarischen Berechnung mit denen der CFD-Berechnung so koppeln, dass das tabellarische Modell kalibriert werden kann. Hierdurch lässt sich die Zahl der notwendigen CFD-Berechnungsläufe erheblich reduzieren, da die Projektarbeit vorwiegend auf Basis der tabellarischen Rechnung erfolgen kann.

Im Beitrag wird das Rechenverfahren anhand ausgeführter Projekte mit zahlreichen Bildern und Grundlageninformationen erläutert. Eine Übertragung des Verfahrens auf andere Anwendungsfälle ist leicht möglich, so dass das Thema von allgemeinem Interesse ist. Durch die Korrespondenz zweier unterschiedlicher Rechenverfahren lässt sich außerdem zeigen, dass ein erheblicher Gewinn an Auslegungssicherheit entsteht.

EINLEITUNG

Gekoppelte Lösungsmethoden können das Potential von numerischen Strömungsberechnungen erheblich erweitern. Typische Beispiele sind Fluid-Struktur-Interaktionen, bei denen sowohl das Strömungsfeld, wie auch der Effekt der Strömungskräfte auf den Festkörper berechnet werden [Schildhauer, 2011].

Je nach Einsatzbereich können simultan arbeitende Solver eingesetzt werden, bei denen alle Modelle quasi parallel konvergieren. Ebenso existieren alternierende Verfahren, bei denen jedes Modell individuell gelöst wird (sog. freeze flow) [Zizmann, 2007].

Hier wird zunächst z.B. das Strömungsfeld berechnet und die Struktur als fix angenommen. Dann wird die Strömung „eingefroren“ und die Strukturinteraktion berechnet. Diese Verfahren sind stabiler, benötigen aber ggfs. mehrere äußere Iterationen, bis eine Lösung gefunden wird.

Bei der Auslegung von natürlichen Lüftungssystemen für Großkraftwerke können ebenfalls gekoppelte Systeme eingesetzt werden. Möglich wäre eine Kopplung für:

- Innenraumströmung und Wärmeverteilung im Gebäude
- Windströmung um das Gebäude
- Simulation der Klappensteuerung zur Temperaturregelung

Für den praktischen Einsatz stellt sich die Problematik, dass viele unterschiedliche Lastfälle (typisch 15) mit einem solchen Modell zu berechnen sind. Da die Einzelmodelle je Lastfall z.T. mehrere Stunden bis Tage zur Lösung benötigen würde ein gekoppeltes Modell die zeitlichen Möglichkeiten erheblich sprengen.

Für die Auslegung von Großkraftwerken wurde daher ein hybrides Verfahren angewendet, bei dem die Modelle lediglich über Kennparameter gekoppelt werden. Die eigentliche Auslegungsberechnung kann hierbei mit einem schnellen tabellarischen Verfahren erfolgen.

Zum Verständnis des Verfahrens werden zunächst die Grundlagen der Berechnung der natürlichen Lüftung dargestellt. CFD-Methoden führen Druck- und Temperaturberechnung implizit durch, das tabellarische Verfahren basiert aber auf Berechnungsmethoden, die im folgenden erläutert werden.

GRUNDLAGEN

Berechnung der natürlichen Lüftung

Natürliche Lüftungssysteme nutzen den Auftrieb warmer Luft und benötigen daher keine Antriebsenergie. Sie sind umso effektiver, je höher das Gebäude und je höher die innere Wärmelast ist. Kesselhäuser von Großkraftwerken bieten dafür optimale Voraussetzungen mit Abwärmelasten bis zu 20MW bei Gebäudehöhen bis zu 170m. Um die geforderten

Temperaturgrenzen einzuhalten sind allerdings auch sehr große Luftmengen von bis zu $400 \text{ m}^3/\text{s} = 1,4 \text{ Mio m}^3/\text{h}$ notwendig, die allein über thermischen Auftrieb bewegt werden sollen.

Für die Auslegung wird eine hohe Sicherheit gefordert, da die Investitionen in Zuluftanlagen und Windleitflächenlüfter im ein- bis zweistelligen Millionenbereich liegen. Fehlentscheidungen in der einen wie der anderen Richtung können hier erhebliche Kosten verursachen und müssen daher unbedingt vermieden werden.

Für die natürliche Lüftung spielen drei Faktoren eine Rolle:

1. Die Änderung der Dichte der Luft durch Erwärmung. Da die Dichte sich annähernd proportional zur Lufttemperatur ändert spielt eigentlich die Temperaturschichtung im Gebäude die entscheidende Rolle bei der Druckentwicklung.
2. Die Dichte der Außenluft. Thermik entsteht durch das unterschiedliche Gewicht der Luftsäule im und außerhalb des Gebäudes. An der Innenfassade entsteht dadurch ein Druckprofil. Je nachdem, auf welche Höhe man eine Öffnung in das Gebäude setzt wird also eine unterschiedliche Luftmenge ein- oder austreten.
3. Auf der Aussenfassade wirkt zusätzlich der Wind, der ein Druckprofil auf der Aussenfassade erzeugt. Da Thermik und Wind relativ unabhängig voneinander wirken kann man beide Profile getrennt erfassen und lediglich bei der Berechnung der Volumenströme an den Gebäudeöffnungen überlagern.

Mit steigender Höhe nehmen die Windgeschwindigkeit erheblich zu. An Großkraftwerken werden bei Sturm Winddrücke von bis zu $\pm 500 \text{ Pa}$ ($= 50 \text{ kg/m}^2$) erreicht. Natürliche Lüftungssysteme müssen auch unter solch widrigen Bedingungen in der Lage sein eine geordnete Lüftungsfunktion aufrecht zu erhalten.

Als Anhaltswert für die Drücke, die durch Thermik entstehen, kann man von 1 Pa je m Höhe bei einem Temperaturunterschied von 25 K ausgehen. Das klingt zunächst wenig, bei Kesselhäusern mit 150 m Höhe und Raumtemperaturen bis 50°C entstehen im Winter aber leicht Auftriebs-Drücke von 300 Pa .

Thermischer Auftrieb

Thermischer Auftrieb entsteht, wenn in einer Luftsäule die Dichte geringer ist als in der Umgebungsluft. Im Falle **konstanter Temperatur** in einem Kamin oder Schacht (siehe Abbildung 1) ist die Berechnung des thermischen Auftriebs einfach, der Auftriebs-Druck ergibt sich zu

$$\Delta p_{\text{therm}} = (\rho_{\text{ausßen}} - \rho_{\text{innen}}) \cdot g \cdot H_{\text{gesamt}} \quad (\text{Gl. 1})$$

wobei H_{gesamt} die Gesamthöhe des Schachtes und g die Erdbeschleunigung ist. Die obige Gleichung gilt nur bei konstanter Temperatur über die gesamte Gebäudehöhe.

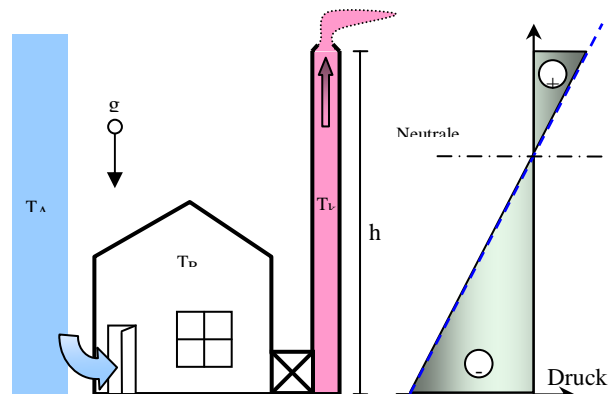


Abbildung 1: Thermik in einem Kamin (Schachtlüftung)

In realen Gebäuden ist die Lufttemperatur über die Höhe meist nicht konstant, so dass der tatsächliche Auftriebsdruck durch Integration der Dichte über die Höhe gewonnen werden muss. Man spricht hier von einem Druckprofil, das entscheidenden Einfluss auf den gesamt ausgetauschten Volumenstrom. Je weiter oben eine Wärmelast im Gebäude angeordnet ist, desto geringer kann sie zur Druckerhöhung beitragen (Abbildung 2).

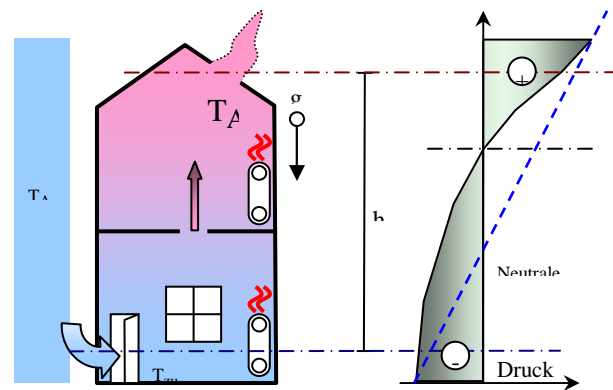


Abbildung 2: Thermik in einem Gebäude, reduzierte Druckentwicklung

a) Wird die gesamte Wärmelast im Bodenbereich frei (siehe Abbildung 3), dann wird die Luft dort auf ihren Endwert erwärmt und die Dichteänderung kann sich im gesamten Gebäude auswirken. Es stellt sich ein linearer Druckanstieg mit der Höhe ein. Der Auftriebsdruck kann mit Gleichung 2 (Schachtlüftung) berechnet werden.

b) Ist die Wärmelast gleichmäßig über die Höhe verteilt, dann steigt die Temperatur bei durchströmten Gebäuden proportional zur der Höhe an. Durch Integration ergibt sich ein quadratischer Druckanstieg mit der Höhe. Der Druckaufbau im unteren Gebäudeteil

ist dabei sehr gering, da die Temperaturen nur wenig höher sind als die der Umgebungsluft. Der gesamte Auftriebsdruck beträgt bei linearem Temperaturanstieg nur 50% des Falles der Schachtlüftung.

c) Ein identisches Ergebnis zeigt sich, wenn die gesamte Wärmelast in der Gebäudemitte frei wird. Die Luft in der unteren Gebäudehälfte besitzt die gleiche Temperatur wie die Umgebungsluft und erzeugt daher keinen Auftrieb.

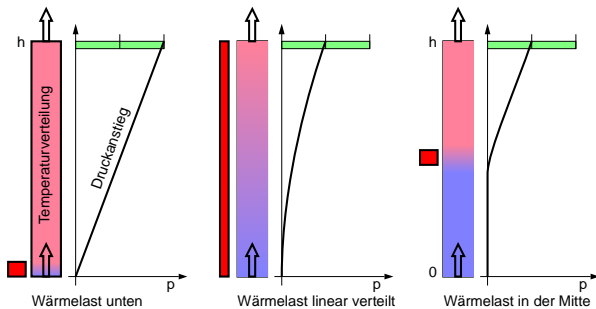


Abbildung 3: Unterschiedliche Druckwirkung bei gleicher thermischer Last

Eine Wärmelast erzeugt also einen umso höheren Auftriebsdruck, je weiter unten sie im Gebäude auftritt. Die Schachtlüftung stellt den Grenzfall maximaler Druckwirkung dar.

Druckwirkungsgrad und Raumbelastungsgrad

Die Minderung, die sich durch die reale Verteilung der Quellen bei gleicher Wärmelast ergibt, kann man als Druckwirkungsgrad Φ_p bezeichnen:

$$\Phi_p = \frac{g \cdot \int_0^H \Delta\rho(h) \cdot dh}{\Delta\rho_{\max} \cdot g \cdot H} \quad (\text{Gl. 2})$$

$\Delta\rho$ ist hier die lokale Dichtedifferenz zur Außenluft, $\Delta\rho_{\max}$ die Druckdifferenz im Fall der Schachtlüftung.

Durch Linearisierung der Dichteberechnung¹ läßt sich der Druckwirkungsgrad vereinfacht berechnen [Fiedler, 2010]:

$$\Phi_p = \frac{\Delta\rho(T_{\text{mittel}} - T_U) \cdot g \cdot H}{\Delta\rho(T_{\text{max}} - T_U) \cdot g \cdot H} \approx \frac{T_{\text{mittel}} - T_U}{T_{\text{max}} - T_U} \quad (\text{Gl. 3})$$

¹ Dichte und Temperatur der Luft sind nicht exakt proportional, näherungsweise gilt im Bereich von 20°C

$$\begin{aligned} \Delta\rho &= \Delta\rho \cdot g \cdot H \\ &\approx 0.0397 \text{kg}/(\text{m}^2\text{s}^2\text{K}) \cdot \Delta T_{(\text{innen-aussen})} \cdot H \end{aligned} \quad (\text{Gl. 4})$$

Fehler! Nur Hauptdokument)

T_{mittel} ist hierbei die mittlere Raumtemperatur, T_{max} die Fortlufttemperatur.

In der Literatur hat sich als Begriff für die Beschreibung der Druckwirkung der mittlere „Raumbelastungsgrad“ eingebürgert [z.B. Nadler, 1995]. Dieser beschreibt, wie stark sich die freigesetzte Energie auf die mittlere Raumtemperatur auswirkt. Inhaltlich ist dieser Begriff mit dem des Druckwirkungsgrades identisch.

Der Druckwirkungsgrad ist eine entscheidende Größe für die Auslegung der natürlichen Lüftung. In der Regel sind die Energie- und Massenströme bei der Auslegung bekannt oder vorgegeben. Wird der Druckwirkungsgrad zu hoch angegeben oder – nicht selten – gleich 1 gesetzt, dann führt dies unweigerlich zu Fehlanslegungen. Im Ergebnis werden die Gebäudeöffnungen zu klein dimensioniert und es kommt zu Übertemperaturen im Gebäude.

Winddruck

Der thermische Auftrieb erzeugt an der Innenfassade ein vertikales Druckprofil. An der Außenfassade steht dem gegenüber eine wesentlich komplexere Druckverteilung, die durch den Wind entsteht. Dieser erzeugt an Gebädefassaden Zonen mit Über- und Unterdrücken.

Winddruckfelder können komplexe Strukturen haben und durch das Zusammenspiel unterschiedlicher Gebäudeteile unerwartete Formen annehmen. In der Tendenz entsteht nur an der Anströmseite (Luv) ein Überdruck, während am Dach und allen anderen Fassaden Unterdrücke entstehen (Abbildung 4). In aller Regel wird die Wirkung der natürlichen Lüftung durch den Winddruck verstärkt. Da der Winddruck ein Mehrfaches der Auftriebsdrücke annehmen kann, ist eine Abschätzung der Verhältnisse in der Planungsphase unumgänglich.

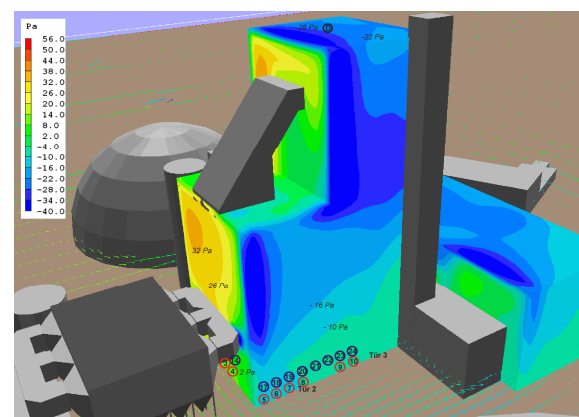


Abbildung 4: Druckverteilung an einem Großkraftwerk

Winddruckverteilungen können im Modellversuch oder mit numerischen Simulationsstudien ermittelt werden. Für die Modellversuche stehen spezialisierte

Grenzschichtwindkanäle zur Verfügung, die das natürliche Windfeld im verkleinerten Maßstab abbilden. Üblich sind hier Modellmaßstäbe von 1:200 – 1:500.

Von numerischen Studien wird hier ausdrücklich abgeraten, sofern es sich nicht um transiente Rechnungen, sogenannte LES²-Berechnungen, handelt [Gromke, 2007]. Denn die heute üblichen Rechenmodelle können die Windturbulenz nur unzureichend abbilden, so dass sich erhebliche Fehler in der Größenordnung von 30% des Absolutwertes ergeben können.

ZONENMODELL DES TEMPERATUR- UND DRUCKPROFILS

Die Temperaturschichtung in Kraftwerksgebäuden lässt sich durch so genannte Zonenmodelle abbilden. Zonenmodelle teilen das Gebäude in wenige (typisch 20 - 50) vertikale Zonen ein und berechnen innerhalb dieser die Massen und Energiebilanzen. Details der Innenraumströmung lassen sich in solchen Modellen natürlich nicht direkt abbilden, sie müssen durch entsprechende Annahmen und Ersatzmodelle dargestellt werden.

Auch wenn Zonenmodelle die Realität nur sehr vereinfacht wiedergeben, lassen sich darin Massen- und Energiebilanzen bilden. Grundsätzlich gilt in diesen Modellen der Massen- und Energieerhaltungssatz.

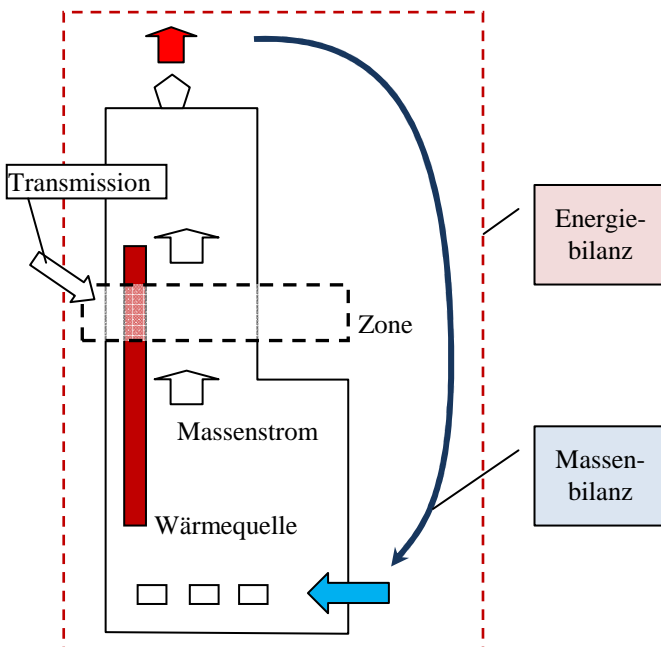


Abbildung 5: Einfaches Zonenmodell

Primär berechnet das Zonenmodell lediglich ein Temperaturprofil, wobei die Annahme getroffen

² LES = Large Eddy Simulationen berechnen auch die großen Wirbelstrukturen im Wind

wird, dass Luft stets nur von unten in eine Zone eintritt und oben wieder austritt. Diese Annahme erleichtert hier die Berechnung, führt natürlich aber zu erheblicher Ungenauigkeit der Darstellung.

Aus dem Temperaturprofil erhält man unmittelbar ein Druckprofil durch Integration der Dichtedifferenz über die Höhe:

$$\Delta p(H) = p_0 + g \cdot \int_0^H \Delta \rho(h) \cdot dh \quad (\text{Gl. 4})$$

p_0 ist der Druck auf Bodenniveau, der zunächst unbekannt ist.

Aus dem Druckprofil können alle relevanten Druckdifferenzen an der Fassade abgegriffen werden durch Interpolation über die Höhe. Auf diese Weise kann für jede Gebäudeöffnung ein individueller Massenstrom ermittelt werden. p_0 beeinflusst also direkt alle Massenströme durch Gebäudeöffnungen. Durch Variation von p_0 kann daher die Massenbilanz abgeglichen werden und damit auch eine Lösung für p_0 gefunden werden.

Iterative Lösung

Tabellarische Verfahren lassen sich sehr einfach z.B. in MS-Excel implementieren. Durch die komplexen Wechselbeziehungen zwischen Massen- und Energieströmen im vorgestellten Berechnungsweg werden allerdings numerische Lösungsverfahren benötigt, um alle Bilanzgleichungen zu befriedigen.

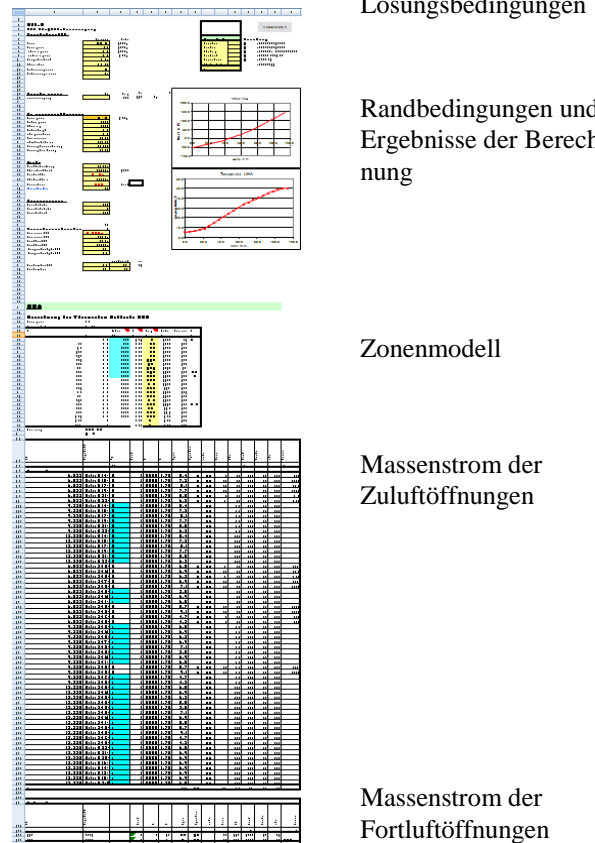


Abbildung 6: Struktur des Zonenmodells

Excel besitzt für solche Aufgaben einen leistungsfähigen SOLVER, der bis zu 200 Variablen gleichzeitig manipulieren kann. Die Bilanzgleichungen müssen hierzu z.B. über eine Fehlerquadratsumme zu einer Lösungsvariablen zusammengefasst werden, so dass lediglich ein Optimierungskriterium existiert.

Iterative Berechnungen in komplexen Arbeitsblättern können eine erhebliche Rechenleistung benötigen. Im Gegensatz zu CFD-Rechnungen liegen die Rechenzeiten hier allerdings maximal im Minutenbereich.

Berechnung der natürlichen Lüftung mittels CFD

Für die Temperaturschichtung in einem Gebäude spielen interne Strömungsvorgänge eine große Rolle. Oberhalb von Wärmequellen bilden sich so genannte „Plume“, in denen Warmluft aufsteigt und sich im oberen Gebäudeteil einschichtet. Die Temperaturverteilung hängt also nicht nur von der Lage der Wärmequellen ab, sondern auch von der Art der Schichtbildung (Abbildung 7 und Abbildung 8).

Es bietet sich an, für die Berechnung der inneren Wärmeverteilung numerische Strömungssimulationen einzusetzen. Diese können – mit gewissen Einschränkungen – das Temperaturfeld in einem Kesselhaus zuverlässig darstellen. Selbstverständlich werden bei der numerischen Modellierung die Verhältnisse in einem Kesselhaus nur vereinfacht dargestellt. Bei sorgfältiger Modellierung lassen sich diese Effekte aber berücksichtigen, um so zu belastbaren Ergebnissen zu kommen.

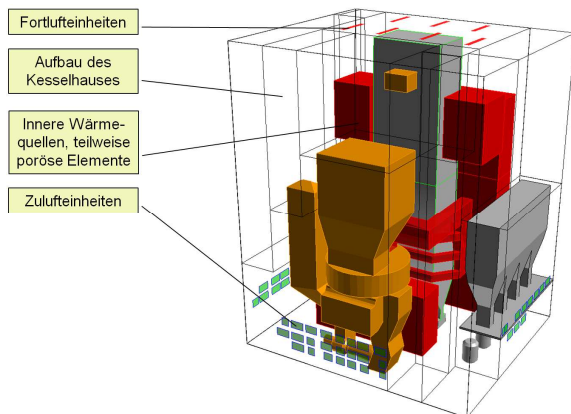


Abbildung 7: Wärmelasten im Kesselhaus

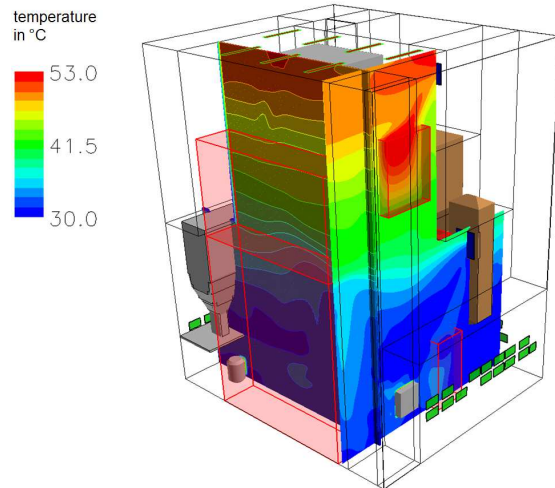


Abbildung 8: Temperaturverteilung im Kesselhaus

Haupt-Nachteil der Numerik sind die sehr hohen Rechenzeiten. Trotz einer Vereinfachung des Gebäudeinnenlebens liegen die Rechenzeiten bei mehreren Stunden bis Tagen für jeden Berechnungslauf. Bei typisch ca. 15 notwendigen Variantenberechnungen sind daher erhebliche Rechenkapazitäten vorzuhalten oder es werden sehr lange Projektlaufzeiten erreicht.

HYBRIDES BERECHNUNGSVERFAHREN

Wünschenswert wäre eine Kombination der Präzision der CFD-Modelle mit der Geschwindigkeit und Flexibilität von tabellarischen Berechnungen. Um dieses Ziel zu erreichen wurde im Forschungslabor der YIT in Aachen ein hybrides Berechnungsverfahren entwickelt, bei dem beide Rechenmethoden parallel eingesetzt werden.

Abbildung 9 zeigt den Vergleich zweier Temperaturprofile. Im tabellarischen Modell können solche Profile direkt abgegriffen werden (rote Kurve), während im CFD-Modell (blaue Kurve) hierzu geeignete Auswerteverfahren verwendet werden müssen.

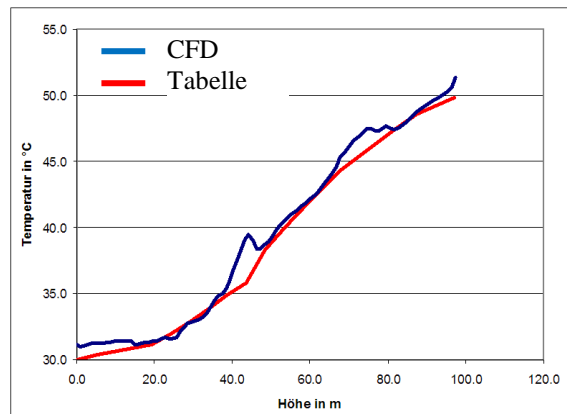


Abbildung 9: Vergleich der Ergebnisse beider Rechenverfahren

Ohne Abgleich können beide Berechnungen erhebliche Abweichungen aufweisen. Werden alle Wärmequellen mit ihrer physischen Position im Modell eingebracht, dann werden relevante Effekte der Plume-Bildung nicht abgebildet.

Effekte der Schichtbildung in Warmluftschichten können in Großkraftwerken gut über eine Lastverschiebung abgebildet werden. Hierdurch wird die eingebrachte Leistung einer über der Wärmequelle liegenden Zone zugeordnet. Hinweise, wie eine geeignete Art der Lastverschiebung aussehen kann, lassen sich direkt aus dem CFD-Ergebnis ableiten. Sehr gute Erfahrungen wurden allerdings auch mit vereinfachten Annahmen über die Verschiebung der Lastverteilung gemacht, sofern dieser auf Basis eines Ergebnisvergleichs (Abbildung 9) validiert wurden.

Durch Testrechnungen wurde nachgewiesen, dass für den vorliegenden Fall ein Abgleich beider Modelle auch eine Extrapolation auf andere Lastfälle erlaubt. Grundsätzlich ist es hier notwendig, die Einsatzgrenzen sorgfältig zu wählen und ggfs. durch zusätzliche CFD-Läufe zu validieren. Innerhalb eines festgelegten Parameterbereiches erlaubt die Methode aber, Auslegungsfälle mit hoher Genauigkeit bereits im tabellarischen Modell durchzurechnen.

Zusätzliche Sicherheit

CFD-Modelle haben den Vorteil einer hohen räumlichen Auflösung und einer daraus resultierenden höheren Genauigkeit zur Darstellung der inneren Vorgänge der Wärmeverteilung. Die Komplexität der Modelle und verwendeten Programme birgt prinzipiell allerdings auch die Gefahr, dass sich bei der Modellierung Fehler einschleichen. Da es sich bei den Lösungsverfahren stets um Näherungsverfahren handelt, gibt es i.d.R. kein klares Kriterium der „Richtigkeit“ der Rechnung.

Das vorgestellte Verfahren basiert auf dem Abgleich zweier sehr unterschiedlicher Modellierungsverfahren. Im Fall von Eingabe- oder Berechnungsfehlern in einem der Modelle wird es schnell unmöglich, eine quantitativ gleiche Lösung zu finden. Im praktischen Einsatz bedeutet dies, dass sich die Modell gegenseitig kontrollieren und hierdurch eine erhöhte Auslegungssicherheit entsteht.

Fazit

Die Arbeit mit „hybriden“ Rechenverfahren erfordert ein sehr gutes Verständnis der physikalischen Zusammenhänge im untersuchten Objekt. Durch den manuellen Abgleich zweier Modelle ist die Methode weniger „eleganter“ als andere Methoden der gekoppelten Berechnung. Für die ingenieurmäßige Arbeit bietet das Verfahren aber entscheidende Vorteile:

- Da die wesentlichen Zusammenhänge mit zwei vollkommen unabhängigen Verfahren berechnet

werden ergibt sich eine gegenseitige Kontrolle beider Modelle. Modellierungsfehler werden sehr schnell offensichtlich.

- Es können sehr unterschiedliche Methoden gekoppelt werden. Anstelle von numerischen Untersuchungen der Außenströmung hätten auch Windkanalergebnisse einbezogen werden können.
- Die Zahl der notwendigen Rechenläufe für die CFD-Berechnung kann erheblich gesenkt werden. In der Regel reichen 3 Grundvarianten aus, um die Hauptfälle kalibrieren zu können.
- Variantenuntersuchungen und Testszenarien können mit geringem Aufwand und in großer Zahl vorgelegt werden. Hierdurch vertieft sich das Verständnis für die besondere Dynamik im Projekt bei allen Beteiligten.

LITERATUR

- Fiedler, Eckehard, Natürliche Lüftung großer Gebäude, TAB 7/2010, Bauverlag
- Gromke, Christoph, Strömungsfelder in Strassenschluchten, Fachtagung „Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik“, Rostock 2007
- Nadler, Norbert, Modellierung der Raumlufttemperatur bei Quelllüftung und Flächenkühlung, HLH (1995) Nr. 3
- Schildhauer, Markus, Simulation von Fluid-Struktur-Interaktion mit ANSYS CFX, Masterarbeit Nr. 117/10, Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig
- Zitzmann, Tobias, Dynamisch-thermisches CFD-Verfahren mit angepaßter Regelungsmethode, Bauphysik 7 FEB 2007, Ernst&Sohn Verlag