

Strömungs-Simulationen in der Luft- und Kältetechnik

Von Dr.-Ing. Roy Mayer

In fast allen luft- und kältetechnischen Anlagen spielen Fluidströmungen (Gase und Flüssigkeiten) eine entscheidende Rolle. Auf Grund der Komplexität der Strömungsphänomene in diesen Anlagen stehen nicht immer in ausreichendem Maße analytische und experimentelle Methoden zur Verfügung, um die der Planungs-, Entwicklungs-, Optimierungsphase zu unterstützen. Strömungs-Simulationen (Computational Fluid Dynamics CFD) können daher einen entscheidenden Beitrag in der Luft- und Kältetechnik leisten. Die Einsatzmöglichkeiten von CFD soll an Hand einiger Beispiele verdeutlicht werden.

Einleitung

Wenn man sich mit technisch, wissenschaftlichen Phänomenen auseinandersetzt ist eine fundierte Kenntnis über theoretische Zusammenhänge unerlässlich. Wie die meisten naturwissenschaftlichen Phänomene, können auch Fluidströmungen durch mathematische Gleichungen beschrieben werden. Im Falle von Fluidströmungen sind das die sogenannten "Navier-Stokes-Gleichungen". Auf Grund der Komplexität dieses Gleichungssystems können nur für sehr einfache Strömungen, wie sie in der Luft und Kältetechnik nur selten vorkommen, Formeln analytisch entwickelt werden, um die relevanten Größen, wie Geschwindigkeit, Druck, Dichte, Temperatur etc. zu berechnen. Komplexere Strömungen können nur mit mehr oder weniger genauen empirischen Gleichungen beschrieben werden. Häufig stehen überhaupt keine mathematischen Formulierungen zur Verfügung. In diesen Fällen kann mit Hilfe von Computer-Simulationen versucht werden, das benötigte Wissen über die relevanten Vorgänge zu gewinnen. Dieses "numerische Werkzeug" wird als „Computational Fluid Dynamics (CFD)“ bezeichnet.

Bei CFD versucht der Computer an sehr vielen diskreten Punkten, dem sogenannten Rechengitter (Abb. 1), mit Hilfe von numerischen Rechenalgorithmen die Navier-Stokes-Gleichungen zu lösen. Bei

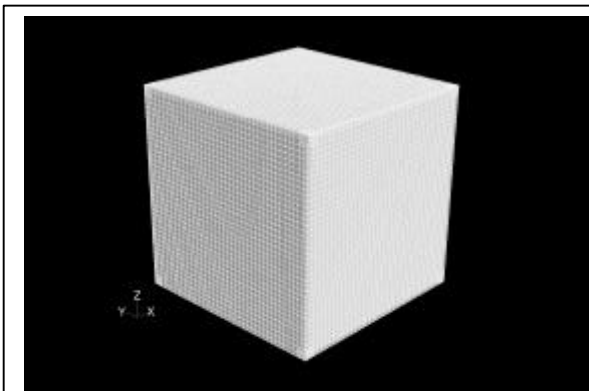


Abb 1.: Rechengitter

einer komplexen 3D-Geometrie sind häufig mehrere Millionen Gitterpunkte nötig. Die berechneten Strömungsgrößen an jedem der Gitterpunkte stellen die Basis für die weiteren Analysen dar. Auf Grund der vielen Gitterpunkte und der zeitaufwendigen numerischen Algorithmen war CFD früher nur auf Großrechnern möglich. Durch die enorm steigende Leistung von Personal Computern (PC) sind jedoch seit einigen Jahren Strömungssimulationen auch auf PCs mit einer Prozessortaktfrequenz von 1 GHz und einem Arbeitsspeicher von 2 Giga-Byte mit akzeptablem Zeitaufwand durchführbar.

Neben der Computerleistung sind ebenfalls hohe Anforderungen an den Benutzer von CFD

Programmen gestellt. Da aus strömungsmechanischer Sicht kein großer Unterschied zwischen einer Rohrströmung, der Strömung um ein Ventilatorblatt oder um ein Luftschiff besteht, sind die meisten CFD Programme für unterschiedlichste technische Prozesse einsetzbar. Das bedeutet, dass der Computer mit eine Reihe von Randbedingungen und Parametern gefüttert werden muss, um aussagekräftige Resultate zu erzielen. Diese Eingaben erfordert Erfahrung auf mathematischem, strömungsmechanischem und konstruktionszeichnerischem Gebiet.

Der wissenschaftliche Hintergrund und die Anwendung von CFD ist mit den kommerziellen FEM (engl.: Finite Elements Methods) Programmen aus dem Bereich der Mechanik vergleichbar. Auch

CFD ist in den unterschiedlichsten Stadien einer Produkt- oder Prozessentwicklung einsetzbar. Sie reichen von Grundlagenforschung bis zu Gesamtanalysen, von Parameterstudien bis hin zu Fehlerdiagnosen.

Die Einsatzmöglichkeiten von CFD in der Luft und Kältetechnik soll an Hand einiger Beispiele verdeutlicht werden. Alle hier dargestellten Fallbeispiele sind stark vereinfacht und sollen nur der Demonstration dienen.

Wärmetauscher-Platten

In vielen kältetechnischen Apparaten befinden sich Wärmetauscher, die dazu dienen thermische Energie von einem Medium an ein anderes zu übertragen. Designziel ist es diesen Energietransfer so effizient wie möglich zu gestalten. Das bedeutet, dass pro Flächeneinheit die übertragenen Wärmemenge maximiert und die benötigte Energie, um die Medien durch den Wärmetauscher zu transportieren, minimiert wird. Diese Transportenergie hängt vom Strömungswiderstand ab und wird häufig in der Form eines Druckverlustes ausgedrückt. Diese beiden Designziele werden hauptsächlich durch die strömungsmechanischen Zustände in der Geschwindigkeits- und thermischen Grenzschicht (Abb. 2) an den beiden Oberflächen der Wärmetauscherplatten bestimmt. Charakteristische

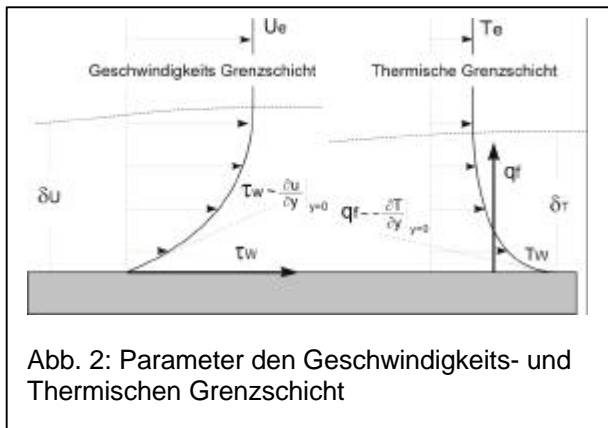


Abb. 2: Parameter den Geschwindigkeits- und Thermischen Grenzschicht

strömungsmechanische Parameter der Grenzschichten sind der Geschwindigkeitsbeziehungsweise der Temperaturgradient senkrecht zur Oberfläche. Diese beiden Parameter an jeder Position im Inneren eines Wärmetauschers experimentell zu bestimmen ist nur mit einem hohen Aufwand zu bewerkstelligen. Dieser Aufwand wird vor allem durch die eingeschränkten Zugänglichkeit verursacht. Aus diesem Grund gibt es nur wenige praktikable experimentelle Methoden in der Entwicklung und Optimierung von Wärmetauschern. Auf zwei dieser Vorgehensweisen soll hier kurz eingegangen werden.

In der ersten Vorgehensweise werden kleine Segmente von Wärmetauscherplatten in einem Meßstand, in dem die Zugänglichkeit für experimentelle Methoden gewährleistet ist, untersucht. Hierbei können „lokale Strömungsgrößen“ wie Geschwindigkeit, Druck und Temperatur und ihre Beziehung zu der Plattengeometrie bestimmt werden. Allerdings bleiben die Strömungseffekte, die im fertigen Wärmetauscher auftreten (z.B. im Bereich der Ein- und Auslässe), unberücksichtigt, obwohl diese erheblich von dem Strömungszustand im Meßstand abweichen können. Auf der anderen Seite werden bei der Vermessung des fertigen Wärmetauschers nur die oben genannten integralen „Makro-Parameter“, übertragene Wärmemenge und Druckverlust bestimmt und die lokalen Strömungseffekte bleiben unbekannt. Dadurch können versteckte Optimierungspotentiale nicht aufgedeckt werden.

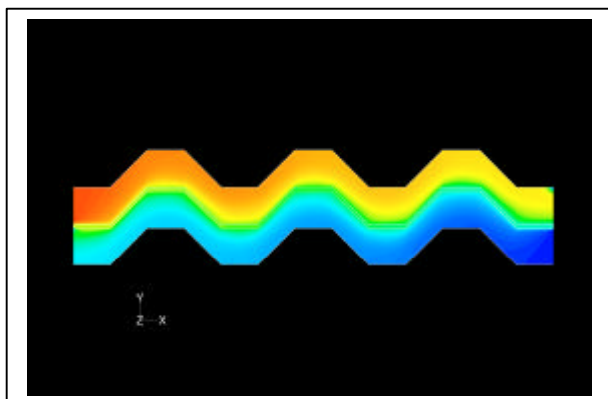


Abb. 3: Temperaturverlauf ein einem Wärmetauscher -Segment

Mit Hilfe von Strömungs-Simulationen kann versucht werden die Lücke zwischen Mikro- und Makroparameter zu schließen und die Vorteile beider experimenteller Methoden zu vereinen und ausreichende Informationen aus dem Inneren des Wärmetauschers zu erhalten. Zwei Beispiele werden in Abb. 3 und 4 gezeigt. In allen folgenden Abbildungen sind die Werte der präsentierten Strömungsgrößen durch verschiedene Farben dargestellt. Rot stellt hohe Werte und Blau niedrige Werte dar.

Abb. 3 zeigt die Temperaturverteilung einer vereinfachten zwei-dimensionalen Simulation der Strömung entlang einer Wärmetauscherplatte. In dieser Simulation strömt ein warmes Medium durch den oberen

Kanal von links nach rechts und ein kaltes Medium durch den unteren Kanal von rechts nach links. Durch den Temperaturgradient an der Trennwand zwischen den beiden Kanälen lassen sich Rückschlüsse ziehen an welchen Positionen die Wärmeübertragung hoch ist und welchen Stellen nicht.

Abb. 4 zeigt Geschwindigkeitsvektoren in einem Bündelwärmetauscher. Es sind deutlich Regionen mit niedrigen Geschwindigkeiten und Wirbelgebiete erkennbar, die sich nachteilig auf die übertragene Wärmemenge auswirken.

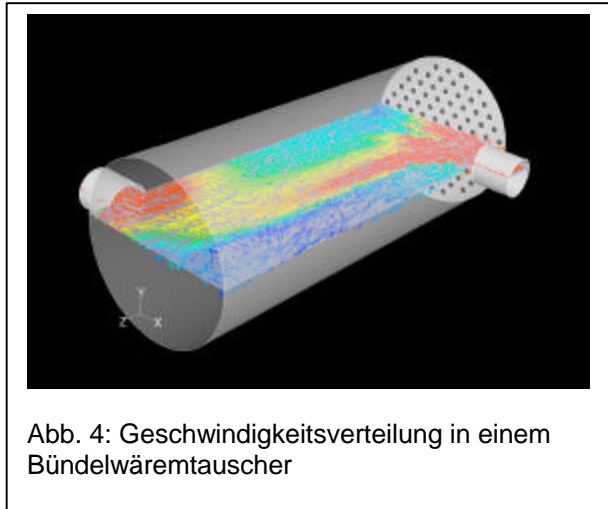


Abb. 4: Geschwindigkeitsverteilung in einem Bündelwärmetauscher

Ventilatoren

Will man die Arbeitsweise eines Ventilators auf einfache Weise umschreiben, so könnte man sagen ein Ventilator ist ein Apparat um ein Fluid in Bewegung zu bringen und dabei einen gewissen Widerstand zu überwinden. Dieser Widerstand drückt sich in einem Druckunterschied zwischen Strömungsein- und auslass aus. Dies geschieht mit Hilfe von Flügelblättern die sich in einem Gehäuse um eine Achse bewegen.

Durch die Rotation bildet sich um die Blätter eine Strömung aus, wodurch eine bestimmte Druckverteilung auf der Blattoberfläche und somit Auftrieb, ähnlich eines Flugzeugflügels, generiert wird. Dieser Auftrieb bestimmt den transportierten Volumenstrom. In Abhängigkeit von der Strömung um das Blatt, wirkt auf diese ein gewisser Widerstand, welcher sich niederschlägt in der für die Rotation benötigten Kraft und somit in der elektrischen Antriebsleistung. Das bedeutet die Beziehungen zwischen transportiertem Volumenstrom, Druckunterschied und Wirkungsgrad resultieren direkt aus dem lokalen Strömungszustand um das Blatt.

Durch die Rotation bildet sich um die Blätter eine

Ähnlich wie bei den Wärmetauscherplatten sind die lokalen Strömungsgrößen wie Druckverteilung und Strömungsfeld am Blatt und auch an der Gehäusewand nur schwer experimentell zu ermitteln. Deshalb beruht die derzeitige Blattentwicklung zum großen Teil auf "Trial and Error". Das bedeutet eine Blattform wird geometrisch festgelegt und die Makro-Parameter, wie der Volumenstrom, Drucksprung und elektrische Leistung des gesamten Ventilators werden in einem genormten Meßstand bestimmt. Werden die gewünschten Spezifikationen nicht erreicht, wird die Geometrie geändert und die Prozedur wiederholt sich. Für jede Geometrieänderung müssen neue Prototypen gebaut und getestet werden.

Demgegenüber bietet CFD mehrere zusätzliche Möglichkeiten. Abb. 5 zeigt die Druckverteilung über einem Axial-Ventilator. Abb. 6 stellt ein Beispiel für die Strömung um ein Blatt dar.

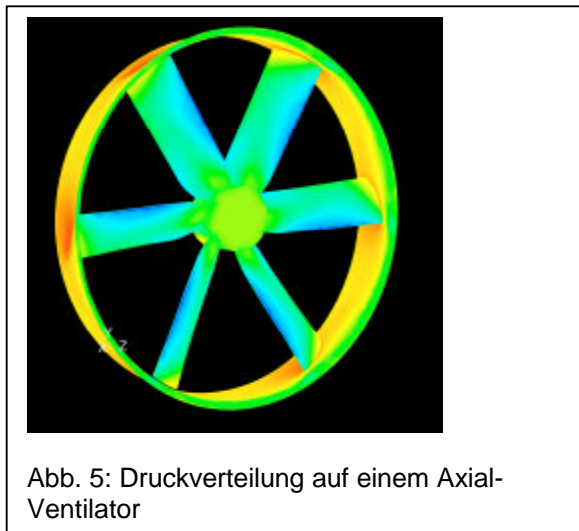


Abb. 5: Druckverteilung auf einem Axial-Ventilator

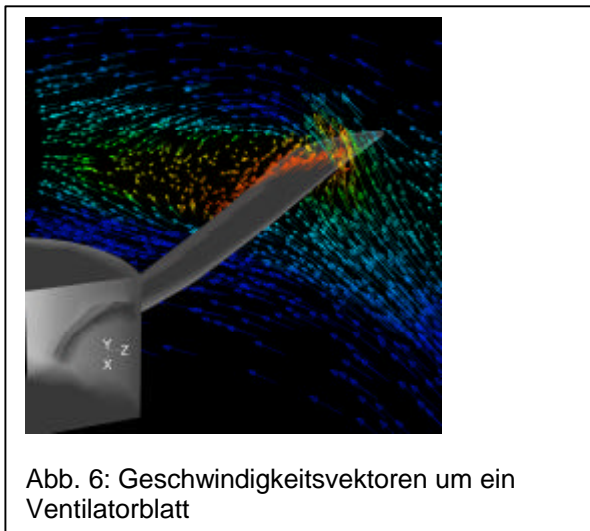


Abb. 6: Geschwindigkeitsvektoren um ein Ventilatorblatt

Auf der Rückseite des Blattes ist ein Wirbelgebiet zu sehen, wodurch die Strömung nach außen in Richtung der Blattspitze gebogen wird. Dieser Strömungszustand würde zu einem niedrigen Auftrieb und zu einem hohen Widerstand am Blatt führen, woraus ein niedriger Volumenstrom und ein niedriger Wirkungsgrad resultiert. Auch hier können auf der Basis der lokalen Strömungsdaten verborgene Optimierungspotentiale von real bestehenden Ventilatoren aufgedeckt werden oder Parameterstudien schnell und effizient durchgeführt werden. Ein Beispiel für eine Studie könnte eine Untersuchung von verschiedenen Blattspitzen und des Luftspalts zwischen Blattspitze und Gehäuse sein, die zum großen Teil für die fluiddynamische Geräuschentwicklung verantwortlich sind.

Neben diesen lokalen Größen kann natürlich auch die gesamte Kennlinie eines Ventilators durch Integration der angreifenden Kräfte an den Ventilatorblättern bestimmt werden. Durch diese numerische Bestimmung der Kennlinie kann die Anzahl der benötigten Prototypen deutlich reduziert werden.

Klimatisierung

Neben der Entwicklung von einzelnen Komponenten wie Wärmetauscher und Ventilatoren, ist auch die effiziente Anwendung dieser Komponenten ein wichtiges Teilgebiet der Luft und Kältetechnik, denn der beste Wärmetauscher und Ventilator ist nur wenig hilfreich, wenn er im Raum falsch platziert ist. Will man die Risiken von neuen innovativen Räumen und Gebäuden minimieren und/oder die Effizienz eines Klimasystems maximieren, sind bereits in der frühen Phase der Planung Informationen über lokale Größen wie Luftgeschwindigkeit, Temperatur, Feuchte und Ausbreitung von Schadstoffen bei Unglücksfällen von entscheidender Bedeutung. Diese Größen müssen für verschiedenste Varianten der Klimatisierung in verschiedenen Umgebungsszenarien bestimmt werden. Um diese große Matrix an benötigten Daten zu ermitteln gibt es wie in den oben beschriebenen Beispielen experimentelle und numerische Methoden.

Eine der experimentelle Methode sind Modelltests. In diesen Tests werden in verkleinerten Modellen mit Hilfe von Rauch oder Sand das Strömungsfeld qualitativ visualisiert und die signifikanten Größen gemessen. Allerdings sind die Ergebnisse dieser Modelluntersuchungen aus strömungsmechanischen Gründen nicht in allen Fällen direkt auf das reale Objekt übertragbar.

Neben den Modelltests kann die Bestimmung der signifikanten Größen auch mit Hilfe von Strömungs-Simulationen durchgeführt werden. Nachdem die drei-dimensionale Geometrie des gesamten Objektes im Computer modelliert und das Rechengitter erstellt sind, können die Kenngrößen der verschiedenen Komponenten des Klimasystems mit Hilfe der Randbedingungen der Simulation sehr flexibel verändert und der Einfluß auf das gesamte Klima studiert und daraufhin optimiert werden.

Bei etwaigen Abweichungen des klimatechnischen Ist-Zustand im fertiggestellten realen Objekt vom geplanten Soll-Zustand kann CFD ebenfalls eine hilfreiche Unterstützung sein, welches durch Experimente nur sehr schwer zu ersetzen wäre. Dies gilt vor allem für sehr große und geometrisch komplexe Räume. Zum einen ist die minimale Anzahl an Messpunkten sehr hoch um ausreichende Informationen über die gesamte klimatische Situation zu erhalten und zum zweiten können die Messpunkte schwer zugänglich sein. Messungen von Geschwindigkeiten unter 1 m/s (die in der Klimatechnik häufig vorkommen) sind zudem schwierig, da sie sehr anfällig gegen Störungen aus der Umgebung sind. Bei der Suche nach den Gründen für die Abweichung vom Soll-Zustand steht die Genauigkeit von CFD weniger im Vordergrund, als vielmehr mit Hilfe der umfassenden Menge an Informationen eine tiefere Einsicht in das Zusammenspiel zwischen den Kenngrößen der klimatechnischen Aggregate und dem resultierenden Strömungszustand zu erhalten, um die notwendigen kostspielige Anpassungsmaßnahmen zu minimieren.

Vor allem die Planung von Kühlhäuser für sensible Gütern ist klimatechnisch besonders anspruchsvoll. Es ist entscheidend, dass jedes Produkt dieselbe Kühlleistung erhält. Das bedeutet im Idealfall sollte die Geschwindigkeit und die Temperatur der Luft, die die Produkte umströmt, konstant sein. Außerdem muß diese Forderung bei einem möglichst kleinen Energieverbrauch der Anlage gewährleistet werden. Abb. 7 und Abb. 8 zeigen die Geschwindigkeits- beziehungsweise die Temperaturverteilung in einem Kühlhaus.

Dieses besteht aus einer Ventilatorwand, die Luft durch ein Kühlmodul (zwischen den blauen halbdurchsichtigen vertikalen Wänden) fördert. Von dort gelangt die gekühlte Luft durch Regalböden, auf denen die Produkte liegen. Danach wird die durch die Produkte erwärmte Luft von den

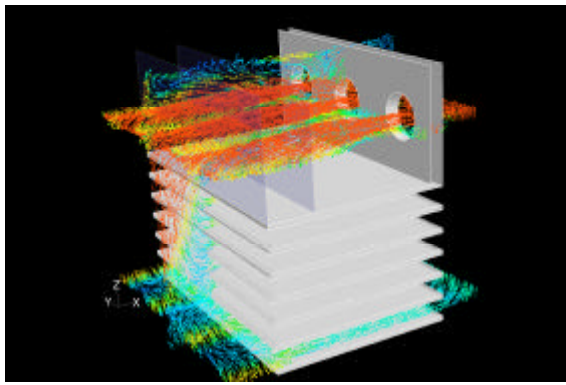


Abb. 7: Geschwindigkeitsverteilung in einem Kühlhaus

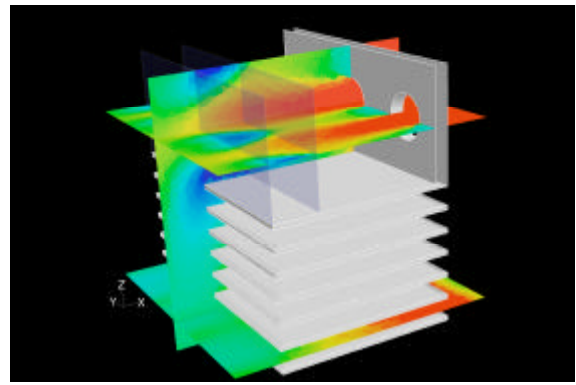


Abb. 8: Temperaturverteilung in einem Kühlhaus

Ventilatoren angesaugt. In dieser vereinfachten Simulation sind weder Geschwindigkeit noch die Temperatur für jeden Regalboden konstant. Auch zeigt die Simulation, dass die Geschwindigkeitsverteilung im Kühlmodul nicht konstant ist, welches sich nachteilig auf den totale Luftwiderstand und die Kühlleistung auswirkt. Neben der Geschwindigkeit und der Temperatur ist bei der Planung mancher Gebäude auch die Verteilung von Luftfeuchtigkeit von Bedeutung. Zum Beispielen bei Eishallen kann es bei bestimmten klimatischen Verhältnissen zu Bildung von Nebel in der Halle kommen. Dieses führt vor allem bei Fernsehübertragungen von Veranstaltungen in der Halle zu erheblichen Sichtproblemen, welches zum vollständigen Abbruch der Veranstaltung führen kann. Abb. 9 zeigt die Verteilung von Nebelfelder in einer Eishockey-Halle (Ansicht: schräg von Oben). Die Farben symbolisieren die Höhe der Nebelfelder über der Eisfläche. Durch Anpassen der

Geschwindigkeit und der Richtung der in die Halle eingeblasenen Frischluft kann das Risiko für Nebel erheblich minimiert werden.

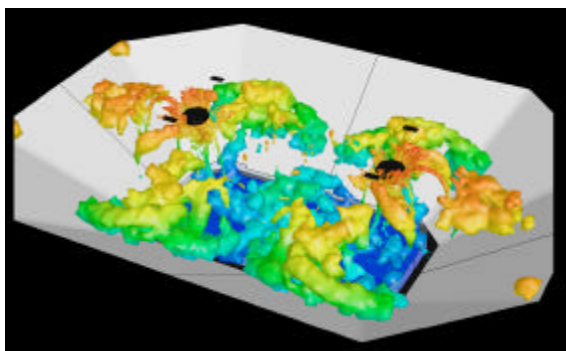


Abb. 9: Nebelfelder in einer Eishockey-Halle

Kühltürme

Bei der Planung und Entwicklung von Kühltürmen gelten ähnliche Planungs- und Entwicklungsziele wie bei der Klimatisierung von Räumen. Allerdings wird dies durch die noch stärkere Interaktion zwischen den Strömungszuständen im Inneren des Kühlturmes und den Strömungszuständen um den Kühlturm herum erschwert. Diese äußeren Strömungsverhältnisse werden nicht nur durch das Wetter bestimmt, sondern auch durch die lokale Topographie und die Gebäude in der Nähe des Kühlturmes. Eines der wichtigsten strömungstechnischen Designziele von Kühltürmen ist die Minimierung von Rezirkulationen. Hierbei wird feuchte und warme Luft zurück in sich selbst oder in einen benachbarten Kühlturm eingesogen, welches zu einer Reduzierung der Kühlleistung führt.

Wie auch bei den anderen Anwendungsbeispielen gibt es bei der Planung von Kühltürmen das Hilfsmittel Windkanalexperimente und Strömungssimulationen. Die Vorzüge des jeweiligen Hilfsmittels sind mit denen der Klimatisierung vergleichbar. Als Beispiel für die

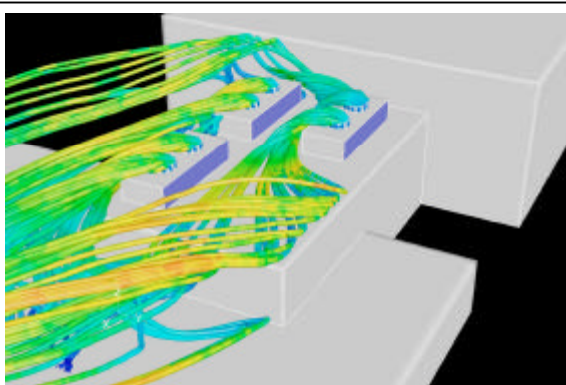


Abb. 10: Stromlinien aus den Ventilatoren von Kühlmodulen

Strömungssimulation zeigt Abb. 10 Stromlinien (Weg der Luftströmung), die die Ventilatoren von

Kühlmodulen auf dem Dach einer Fabrik verlassen. Bei der betrachteten Windrichtung kommt es durch die Anwesenheit der Gebäude zu Rezirkulation in die linken Lufteinlässe der Kühlmodule.

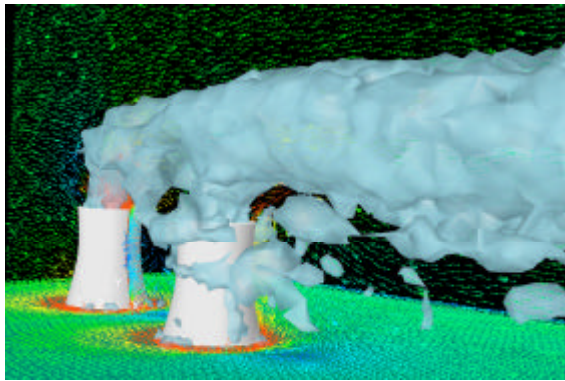


Abb . 11: Wasserdampffahne und Geschwindigkeitsvektoren in der Umgebung zweier Kühltürme

Ebenso wichtig wie die Minimierung von Rezirkulation ist die Bestimmung der Ausbreitung der Wasserdampffahne während der Planung des Kühlturmes. Große Wasserdampffahnen beeinträchtigen auf viele Weise die Umgebung. Zwei davon sind Schattenbildung und erhöhte Eisbildungsgefahr. Aus diesen Gründen wird mit hohem technischen Aufwand versucht die Ausbreitung zu reduzieren. Um die Wirksamkeit dieser Maßnahmen für die meisten auftretenden Wetterbedingungen und Betriebszuständen zu überprüfen, ist der Umfang einer solchen Untersuchung in den meisten Fällen sehr groß. Abb. 11 zeigt die Wasserdampffahne zweier in Windrichtung stehenden Kühltürme. Auf Grund der Interaktion der Strömungsfelder um die Kühltürme herum, kommt es in dem zweiten

Kühlturm zu Rezirkulationen.

Neben der Rezirkulationsuntersuchung kann mit Hilfe dieser Simulationen ebenfalls die Windbelastung auf die Konstruktion des Turmes berechnet werden, weil zur Simulation der Ausbreitung des Wasserdampfes das gesamte Strömungsfeld um den Kühlturm herum berechnet werden muß.

Dr. Ing. Roy Mayer
FlowMotion Germany
26.02.03

Zusammenfassung und Ausblick

Die Strömungsmechanik, als wissenschaftliche Disziplin, die sich mit der Bewegung von Fluiden beschäftigt, stellt die Basis der Luft- und Kältetechnik dar. Das bedeutet, dass strömungsmechanisches Wissen eine entscheidende Rolle bei der Planung, Entwicklung und Optimierung luft- und kältetechnischer Apparate und Prozesse spielt. Um sich einen ausreichenden Einblick in die entscheidenden Strömungsphänomene zu verschaffen, gibt es in den meisten Bereichen der Luft- und Kältetechnik sowohl experimentelle, wie auch numerische Methoden (CFD).

Bei beiden Methoden werden bestimmte Vereinfachungen und Annahmen getroffen, das bedeutet die erhaltenen Resultate repräsentieren nur einen Ausschnitt der Realität und nicht die Realität selbst. Um sich ein möglichst vollständiges Bild über die signifikanten Vorgänge zu machen, ist es daher sinnvoll die beiden Methoden nicht als zwei austauschbare Werkzeuge zu sehen, sondern viel mehr die Vorzüge beider Methoden in Abhängigkeit der jeweiligen Fragestellung zu nutzen, wie dies zum Beispiel in der Flugzeugentwicklung seit vielen Jahren durchgeführt wird. An Hand der beschriebenen Beispiele ist versucht worden die Einsatzmöglichkeiten der jeweiligen Methode zu verdeutlichen.

Es ist festzustellen, dass durch die rasante Entwicklung der Computerkapazitäten und der numerischen Methoden und die daraus resultierende Reduzierung der Annahmen und Vereinfachungen bezüglich der Realität, CFD in einer steigenden Anzahl von Phasen des Planungs- und Entwicklungsprozesses sinnvoll eingesetzt werden kann.

Dr. Ing. Roy Mayer, FlowMotion, NL-Delft / FlowMotion, D-Marl