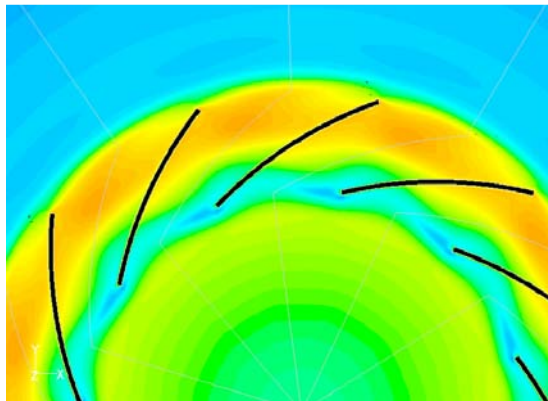


Auslegung von Ventilatorlaufrädern mit Hilfe von Strömungssimulation

Ein Beitrag von Dr. Axel Müller, HTCO

Computergestützte Berechnungsmethoden zur Lösung von praxisbezogenen und ingenieurmäßigen Fragestellungen gibt es seit etwa 40 Jahren. Ihre Entwicklung begann mehr oder weniger gleichzeitig mit dem Erscheinen stabiler Rechnerarchitekturen.

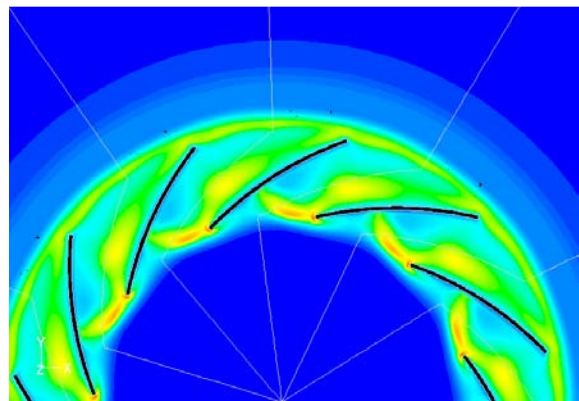
Mit der Methode der Finiten Elemente (FEM), deren Ursprung aus dem Bauingenieurwesen stammt, wurde bald darauf ein solides mathematisches wie auch anwendungsrelevantes Fundament geschaffen. Auf dieser Basis haben sich FEM Berechnungen heute zu einem Standardwerkzeug zur Simulation in der Strukturmechanik entwickelt.



In der Strömungsmechanik sieht dies etwas anders aus, da die dort geltenden physikalischen Gleichungen im Allgemeinen ungleich komplexer und numerisch instabiler sind. Der sichtbarste Ausdruck dessen ist das Auftreten von chaotischen Bewegungen – sprich Turbulenz.

Daher wurden erst Mitte der 70er Jahre erste praxisrelevante Fragestellungen auf dem Gebiet der Luft- und Raumfahrt mit speziell dafür entwickelten Diskretisierungs- und Lösungsverfahren angegangen. Die ersten kommerziellen Softwarepakete zur Simulation ‚allgemeiner‘ Strömungen kamen dann erst Mitte der 80er Jahre auf den Markt. Diese haben aber seit dieser Zeit eine rasante Entwicklung durchlaufen, sodass heute schon sehr komplexe industrielle Strömungsaufgaben – wie zum Beispiel der Strömungsverlauf in Ventilatorlaufrädern – mit hoher Genauigkeit erfolgreich bearbeitet werden können.

CFD (Computational Fluid Dynamics) – das international gebräuchliche Kürzel für die Computersimulation von Strömungen – ist daher eine vergleichsweise junge Disziplin und vielleicht erklärt gerade dies auch den Umstand, dass eine Produktentwicklung im Bereich der Strukturmechanik ohne die Zuhilfenahme der FEM Simulation schon bei



nahe als unseriös gilt, währenddessen der Strömungssimulation immer noch der Makel einer komplizierten, kosten- und zeitintensiven und zudem ‚unsicheren‘ Disziplin anhaftet.

Vielleicht liegt es aber auch – oder mit – daran, dass die Potenziale von CFD noch nicht in größerem Rahmen bekannt sind.

Vorteile der Strömungssimulation

Die Vorteile der Strömungssimulation liegen auf der Hand. Salopp ausgedrückt lassen sich diese so zusammenfassen: wissen statt vermuten. Bislang war man bei der Auslegung von Strömungsmaschi-

nen o. ä. auf den gesunden Menschenverstand (der leider bei nichtlinearen Problemen nicht hinreichend ist), sprich auf die Vielzahl der bisher durchgeführten Messungen, entsprechenden Entwicklungen und der daraus abgeleiteten Erfahrung und Intuition angewiesen. Die Grundlage dafür waren immer experimentelle Untersuchungen, die mit entsprechender Intelligenz und Aufwand durchgeführt werden müssen.

Nichtsdestotrotz können Messungen nicht die Gesamtheit der Strömung abbilden, da Messungen nur an ganz bestimmten (und im Allgemeinen wenigen) Punkten durchgeführt werden können – nämlich

dort, wo sich die Messsonde befindet – und, im schlechten Falle, die Strömung durch die Messung sogar so stören dass, die Situation verfälscht wird. Bei der Strömungssimulation hingegen werden sämtliche relevante Größen einer Strömung – insbesondere die drei Geschwindigkeitsrichtungen und der Druck – im gesamten (Rechen-) Gebiet der Betrachtung ungestört zugänglich. Die Reduktion auf nur einzelne verfügbare Daten (Messpunkte) entfällt. Daraus resultiert eine breite Einsicht in das Strömungsgeschehen (wissen) im Gegensatz zu einem Strömungsbild (vermuten), das sich aus der Interpolation zwischen zwei Messpunkten ergibt.

Letzteres ist gerade bei nichtlinearen System höchst gefährlich.

Die neue breite Sicht auf die Strömung hat direkte Konsequenzen: man kann sofort erkennen, wo kritische Stellen in der Strömung auftreten, wo sie herühren und wie man sie vermeiden könnte, was geradewegs zur Option der Optimierung führt. Eine Optimierung ohne die Zuhilfenahme von Simulation ist eine extrem zeit – und damit kostenintensive Angelegenheit. Es müssen jeweils neue Prototypen hergestellt werden, diese müssen vermessen werden und wenn man Glück hat geht es in die richtige Richtung. Wenn nicht war es umsonst (was keinesfalls kostenmäßig gilt).

Mit Hilfe der Simulation lassen sich dagegen Strategien entwickeln wie zu optimieren ist, da man am Rechner sehr schnell – und damit zeit- und Kosten sparend – neue Varianten untersuchen kann und die Wirkung der jeweiligen Variation verfolgen kann. Dieser schnelle Vergleich der Funktionalität verschiedener Designvarianten eines Bauteils ist letztendlich der entscheidende Vorteil der Strömungssimulation. Dies gilt nicht nur für die Aspekte der Optimierung, sondern in deren Schattensicht: der Vermeidung von Fehlern. Mit CFD lassen sich die prinzipiellen Strömungseigenschaften verschiedener Varianten eines Bauteils untersuchen – ohne dass dazu ein Prototyp hergestellt werden muss – und es wird im Vorfeld möglich zu entscheiden, welche Variante gut, besser oder schlecht ist. Dies reduziert die Wahrscheinlichkeit einer Fehlentwicklung deutlich. Was dies für Konsequenzen auf die Produktivität hat, liegt auf der Hand.

Laufräder für Radialventilatoren

Als Beispiel für den sinnvollen Einsatz von CFD im Ventilatorenbau soll hier die Strömungsberechnung eines freiausblasenden Laufrades eines Radiallüfters sein. Die primäre Auslegung eines Laufrades beruht zunächst auf den Festlegung des möglichen zu erzielenden Resultates, also: gewünschter Wirkungsgrad, Volumenzahl, Druckzahl, etc.. Dazu kommen dann weitere Restriktionen, die aus der vorgegebenen Bauteilserie, der Produktion oder anderen Randbedingungen folgen wie z. B.: Durchmesser Verhältnis, Schaufelbreitenverhältnis, Schaufelzahl, Breite des Radialspalts, etc.. Mit diesen Größen werden anschließend die weiteren Cha-

rakteristiken des Laufrads mittels empirischer Annahmen (Förderarbeit, Laufzahl) ermittelt, z. B.: die Krümmungsradien von Deckscheibe und Ansaugdüse oder die Schaufelwinkel.

Diese klassische Vorgehensweise ist auch beim Einsatz von CFD angebracht, da von einem Grunddesign für das Laufrad ausgegangen werden muss. Nach einer solchen ersten Grundauslegung kommt allerdings die Stärke der Strömungssimulation zum Tragen: es können ausgehend von einem ersten Design verschiedene Laufradvarianten sehr schnell simuliert werden, in manchen Fällen kann die Designvariation sogar parametrisiert werden, sodass der Aufbau eines neuen Simulationsmodells quasi automatisch geht. Innerhalb von Tagen lässt sich so eine ganze Reihe von Laufrädern durchrechnen und auf ihre Strömungseigenschaften, z. B. auf Ablösungen im Bereich der Schaufelkanten und ihrer Abhängigkeit vom Schaufelwinkel oder der Schaufelzahl oder auf die Ausprägung von Turbulenzbereichen zwischen den Schaufeln, wodurch Strömungsverluste entstehen, hin untersuchen. Als Beispiel dafür hier ein neu zu entwickelndes Laufrad mit 11 Schaufeln, wobei zunächst die Frage nach dem Einfluss des Schaufelwinkels auf den Wirkungsgrad im Vordergrund stand.

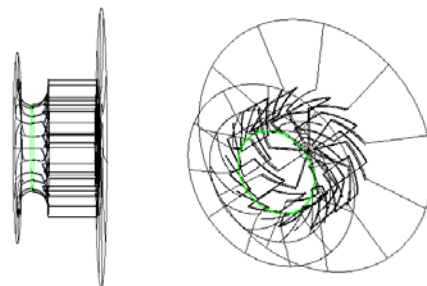


Abbildung 1

Abbildung 1 zeigt ein Laufrad mit 11 Schaufeln. Der Bereich des Radialspalts ist hier grün dargestellt. Variiert wurde hier wie gesagt der Schaufelwinkel.

Die folgenden Abbildungen 2 und 3 zeigen die Geschwindigkeiten auf einer Ebene zwischen den Schaufeln. Es ist deutlich zu sehen, dass große Geschwindigkeitsunterschiede (hohe Geschwindigkeiten rot, kleine blau) zwischen den Schaufeln entstehen.

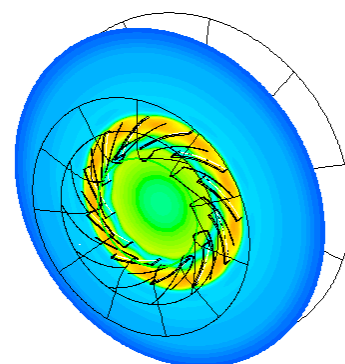


Abbildung 2

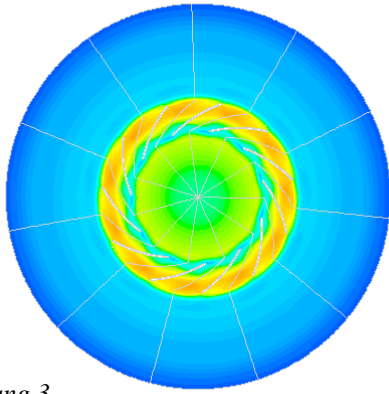


Abbildung 3

Abbildung 4 ist eine Vergrößerung von Abbildung 3. Hier wird insbesondere an der Unterseite der Schaufelvorderkante eine kleine Strömungsablösung sichtbar. Diese wird verdeutlicht durch Abbildung 5, die ein lokales Unterdruckgebiet an der Schaufelvorderkante ausweist.

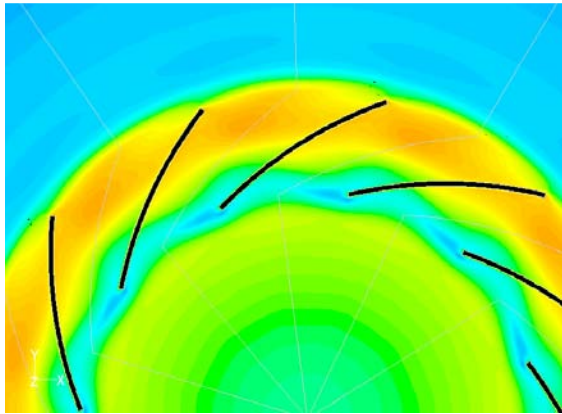


Abbildung 4

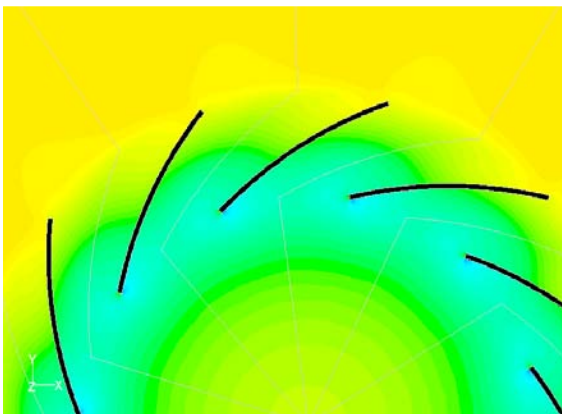


Abbildung 5

Abbildung 6 und Abbildung 7 zeigen für Laufräder mit unterschiedlichem Schaufelwinkel die turbulente kinetische Energie zwischen den Schaufeln, also die Bewegungsenergie die in kleinen turbulenten Wirbeln steckt. Hier wird besonders der starke Einfluss des Schaufelwinkels sichtbar. Bei steilerem Winkel treten die turbulenten Bereiche im Bereich der Schaufelvorderkante auf, wo hingegen bei flacherem Winkel sich diese Bereiche unter der Schaufel bzw. im Nachlauf konzentrieren.

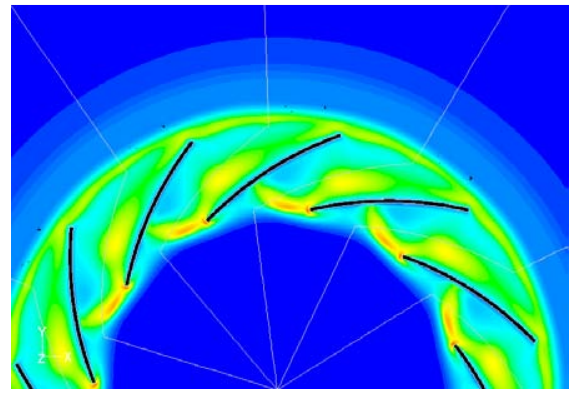


Abbildung 6

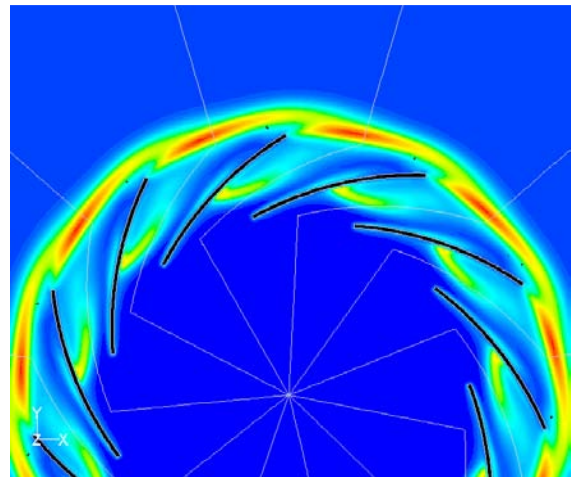


Abbildung 7

Abbildung 8 zeigt die turbulente Energie an Unterseite der Deckscheibe. Aus solchen Darstellungen lassen sich wiederum Schlüsse auf den Einfluss der Krümmungsradien auf die Turbulenzerzeugung im Eintrittsbereich und die Wirkung des Radialspalts ziehen.

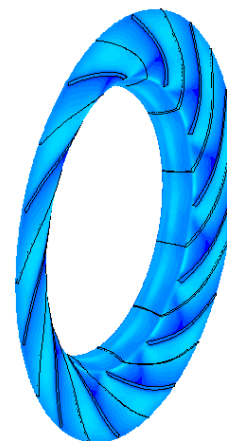


Abbildung 8

Einbettung von CFD in die Laufradentwicklung
Die vorstehende Auslegung eines Laufrades mit Hilfe von CFD soll exemplarisch zeigen, welche neuen Erkenntnisse sich aus der Strömungssimulation ergeben können. Gerade der enorme Einfluss des Schaufelwinkels auf den Wirkungsgrad lässt sich ohne CFD nicht in dieser Weise erklären, da es

keine Möglichkeiten gibt, mit denen die verschiedenartige Ausbildung der turbulenten Bereiche zwischen den Schaufeln so erkannt werden kann. Andererseits kann der Einsatz von CFD Experimente nicht völlig ersetzen. Der Grund dafür liegt in der Sache selbst: CFD ist eine Methode um die physikalischen Gleichungen (Navier-Stokes-Gleichungen) der Strömung numerisch zu lösen. Dies sind partielle Differentialgleichungen, die nur unter der Vorgabe eines Satzes von Randbedingungen lösbar sind. In der Simulation sind diese Randbedingungen sozusagen ideal, d.h. sie werden immer von den realen Gegebenheiten ein wenig abweichen. Ein Beispiel hierzu ist, dass Begrenzungsflächen eines Strömungsgebietes in der Simulation fast immer als ideal glatt angenommen werden, wohingegen in der Realität solche Flächen immer eine gewisse Rauigkeit aufweisen. Oder, um bei den Ventilatoren zu bleiben, wird es nicht oder nur mit enormem Aufwand möglich sein, einen ganzen Prüfstand nach DIN zu simulieren, um exakt dieselben Ergebnisse in der Simulation zu erreichen, die eine solche experimentelle Prüfstandmessung ergibt. Experimentelle Stützpunkte sind also immer nötig, um diese prinzipiellen Unterschiede zwischen den realen und idealen Randbedingungen zu justieren, die CFD Berechnungen also zu kalibrieren. Ist diese Kalibrierung allerdings einmal durchgeführt, so lässt sich die Anzahl von aufwendigen Versuchen auf ein Minimum reduzieren, neue Geometrievarianten oder Änderungen der Betriebsbedingungen (z. B. Variation der Anströmsituation etc.) schnell und kostengünstig untersuchen.

Vollständigsterweise sollte allerdings noch darauf hingewiesen werden, dass trotz der enormen Entwicklung, den die kommerziellen CFD Codes voll-

zogen haben, die Anwendung von CFD bei weitem keine ‚black-box‘ Anwendung ist und von jedermann unkritisch angewandt werden sollte. Der Grund hierfür liegt weniger in der Handhabung der Software, diese lässt sich selbst bei solch komplexen Tools wie es CFD Codes nun mal sind, früher oder später erlernen, sondern dass strömungsphysikalisches Know-how zum erfolgreichen Einsatz von CFD nötig ist. Zum Beispiel ist für die Güte der Simulation die räumliche Diskretisierung (FE-Netz) von zentraler Bedeutung. Bereiche mit starken lokalen Veränderungen der Strömung oder großen Gradienten (Grenzschichten) müssen sehr fein vernetzt werden, da sonst die Ergebnisse grob falsch werden können, z. B. wenn das Netz zu grob ist um relevante Wirbel überhaupt aufzulösen und sichtbar zu machen. Auch beim Einsatz von Modellen zur Behandlung von Turbulenz, die alle auf semi-empirischen Ansätzen beruhen, kommt es oftmals auf die Auswahl des richtigen Turbulenzmodells an. Alle diese Dinge, z.B. auch wie viel Raum vor und hinter einem Lüfterlaufrad mitmodelliert werden muss, wie weit sich der Einzugsbereich des Lüfters im Modell zu erstrecken hat, obliegen der Entscheidung des CFD Benutzers.

Aus diesem Grund sollten Strömungssimulationen daher von erfahrenen CFD Anwendern durchgeführt oder begleitet werden.

Beachtet man allerdings alle diese Punkte, wird CFD an der richtigen Stelle, ergänzend und weiterführend zu experimentellen Untersuchungen und mit dem entsprechenden Fachwissen in die Produkt(vor)entwicklung eingebunden, so ist CFD ein eigentlich unentbehrliches Hilfsmittel zur Erhöhung der Produktqualität. Eben: Wissen statt vermuten.