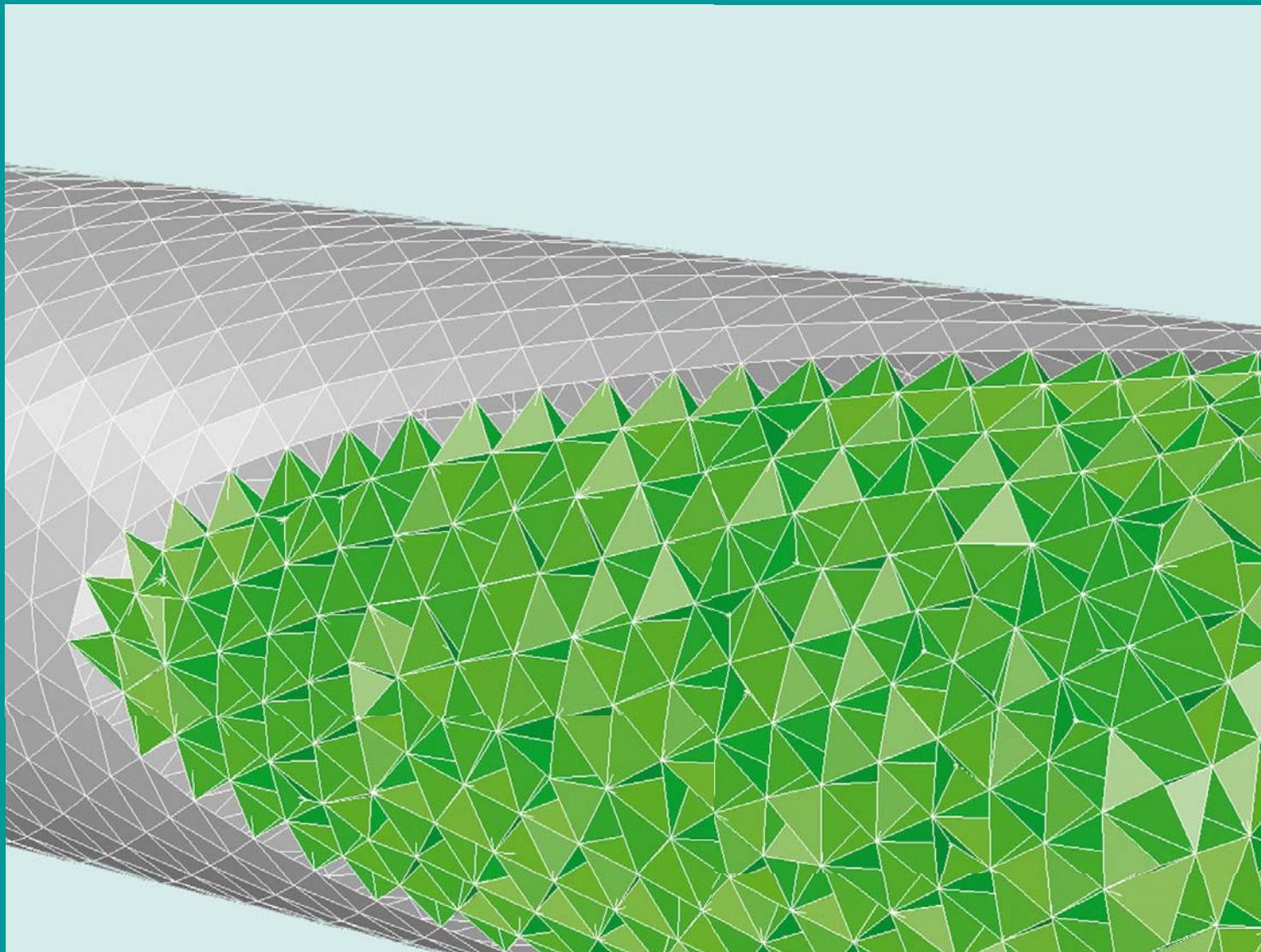




Strömungssimulation in der Umwelttechnologie

Effiziente Versuchsplanung mit CFD (Computational Fluid Dynamics)



An **Hessen** führt kein Weg vorbei.

Strömungssimulation in der Umwelttechnologie

Effiziente Versuchsplanung mit
CFD (Computational Fluid Dynamics)

**STRÖMUNGSSIMULATION
IN DER UMWELTECHNOLOGIE** Eine Veröffentlichung im Rahmen der Schriftenreihe
der Aktionslinie Hessen-Umwelttech des
Hessischen Ministeriums für
Wirtschaft, Verkehr und Landesentwicklung

Herausgeber: HA Hessen Agentur GmbH
Dr. Carsten Ott
Abraham-Lincoln-Straße 38-42
65189 Wiesbaden
Tel.: 0611-774-8350
Fax: 0611-774-8620
www.hessen-umwelttech.de

Erstellt von: Dr. Alexander Sonnenburg
Kessler + Luch Entwicklungs- und Ingenieurgesellschaft
mbH & Co. KG, Gießen
www.kesslerluch.de

Redaktion: Maria Rieping
(Hessisches Ministerium für
Wirtschaft, Verkehr und Landesentwicklung)
Dr. Carsten Ott, Dagmar Dittrich
(HA Hessen Agentur GmbH, Aktionslinie Hessen-Umwelttech)

© Hessisches Ministerium für
Wirtschaft, Verkehr und Landesentwicklung
Kaiser-Friedrich-Ring 75
65185 Wiesbaden
www.wirtschaft.hessen.de

Vervielfältigung und Nachdruck - auch auszugsweise -
nur nach vorheriger schriftlicher Genehmigung.

Gestaltung: ansicht kommunikationsagentur, Wiesbaden
www.ansicht.com

Bildnachweis: HA Hessen Agentur GmbH

Druck: Werbedruck Schreckhase, Spangenberg

Mai 2009

Der Herausgeber übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit
und Genauigkeit der Angaben sowie die Beachtung privater Rechte Dritter.

| | |
|---|----|
| 1. AUSGANGSSITUATION | 2 |
| 2. CFD-GRUNDLAGEN | 4 |
| 2.1 Was genau ist CFD? | 4 |
| 2.2 Weg einer CFD-Simulation | 5 |
| 2.3 Einbindung von CFD in den Arbeitsprozess | 10 |
| 2.4 Vor- und Nachteile von CFD im Vergleich zu Experimenten | 12 |
| 2.5 In welchen Arbeitsbereichen wird CFD verwendet? | 13 |
| 2.6 Wer führt CFD-Arbeiten aus? | 13 |
| 3. BEISPIELE AUS DER UMWELTTECHNIK | 14 |
| 3.1 Das hessische Modellprojekt: Weiterentwicklung einer Walzensandfang-Kompaktanlage | 15 |
| 3.1.1 Kurzzusammenfassung | 15 |
| 3.1.2 Ergebnisse im Detail | 16 |
| 3.2 Grundlagenforschung - CFD-Simulation der Porenkanäle von Schüttungen | 18 |
| 3.3 Grundlagenforschung - Entwicklung eines Schlammsimulationsmodells | 20 |
| 3.4 Steigerung der Durchsatzleistung in einer bestehenden siedlungswasserwirtschaftlichen Anlage | 21 |
| 3.5 Verbesserung der Dosierung von Chemikalien an einer bestehenden siedlungswasserwirtschaftlichen Anlage | 22 |
| 3.6 Lüftungstechnisches Konzept für eine Philharmonie | 23 |
| 3.7 Reduktion von diffusen Staubemissionen in einem Stahlwerk | 25 |
| 4. ANHANG | 27 |
| 4.1 Literatur- und Internetadressen | 27 |
| 4.2 Die Projektpartner | 28 |
| 4.3 Hessen ModellProjekte | 29 |
| 4.4 Aktionslinie Hessen-Umwelttech und Hessen-PIUS | 30 |



Vorwort

■ Der Erfolg der hessischen und der deutschen Umweltbranche basiert auf der Entwicklung immer wirkungsvollerer neuer Technologien sowie der stetigen Optimierung bereits bewährter Verfahren. Technologische Fortschritte sichern hessischen Umwelttechnologie-Anbietern eine Spitzenposition auf dem Weltmarkt und sind die Grundlage für eine ökonomisch und ökologisch zukunftsfähige Wirtschaft.

Entwicklungsarbeiten sind jedoch häufig mit hohen Kosten verbunden. Um die Funktionsfähigkeit neuer Verfahren in der Praxis zu überprüfen, müssen beispielsweise aufwändige Versuchsanlagen gebaut werden. Mithilfe computergestützter Simulationen lassen sich solche Kosten erheblich reduzieren. Von großer Relevanz für die Umwelttechnologiebranche ist die Strömungssimulation Computational Fluid Dynamics (CFD). Sie erlaubt exakte Prognosen für das Strömungsverhalten unterschiedlicher Medien, wie Wasser, Luft oder Sand unter definierten Rahmenbedingungen. Damit kann sie eine wertvolle Ergänzung bei der Entwicklung verschiedener Anlagen und Verfahren darstellen, etwa aus dem Bereich der Wasser- oder Luftreinhaltetechnik.

Der vorliegende Leitfaden der Aktionslinie Hessen-Umwelttech meines Hauses erläutert die Grundlagen der CFD-Simulation und zeigt auf, wie eine solche Simulation in die Versuchsplanung integriert werden kann. Er enthält eine Reihe praktischer Beispiele, in denen die CFD-Simulation bereits zum Einsatz gekommen ist, darunter auch ein hessisches Modellprojekt, in dessen Rahmen die Funktionsweise einer Walzen-Sandfanganlage überprüft wurde.

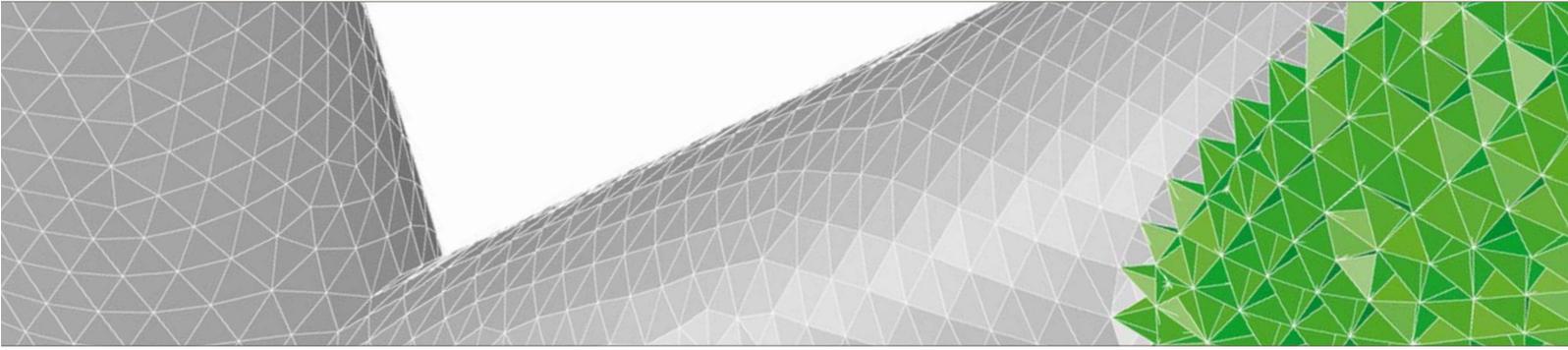
Ich möchte Sie herzlich dazu einladen, sich näher mit dem Thema Strömungssimulation zu befassen. Vielleicht ergeben sich mit diesem innovativen Ansatz auch für Ihre Entwicklungsarbeiten und Versuchsplanungen interessante Möglichkeiten.



Dieter Posch

Hessischer Minister für Wirtschaft, Verkehr und Landesentwicklung





1. Ausgangssituation

Am Anfang steht die Idee. Wir haben irgendwo etwas gesehen oder gehört, was uns inspiriert. Oder wir nutzen ein Produkt, von dem wir glauben, dass wir es besser gestalten könnten. Der Phantasie des Menschen sind glücklicherweise keine Grenzen gesetzt. Denn so entstehen neue Ideen, neue Produkte, neue Strategien. Doch ist der Weg von der Idee zum Produkt so frei wie die Entwicklung einer Idee? Oft wird, nicht nur in kleinen und mittelständischen Betrieben, nach dem Prinzip „Trial and Error“ produziert, ohne das „Handwerk“ der Versuchsplanung zu nutzen. Doch die effektive Umsetzung bekannter und bewährter Techniken aus der Versuchsplanung helfen das Problemverständnis wesentlich zu verbessern und dabei Kosten für die Produktentwicklung zu minimieren.

Und was hat CFD (Computational Fluid Dynamics) damit zu tun? CFD weckt Ideen, CFD deckt auf, CFD verhindert Fehler. CFD kann vielleicht am besten mit einem Flugsimulator verglichen werden. Die Projektionstechnologien der Flugsimulatoren sind mittlerweile soweit ausgereift, dass ein angehender Pilot den Eindruck hat sich in einer realen Situation in einem echten Flugzeug zu befinden. Sowohl reale Standardsituationen als auch Extremereignisse können am Flugsimulator durchgespielt werden, ohne Menschen und Material zu gefährden. Zudem

werden erhebliche Kosten durch die Ausbildung in der virtuellen Realität gespart.

Mit CFD verhält es sich ähnlich. Experimente können in einer virtuellen Realität am Computer durchgeführt und aus den Ergebnissen die realen Experimente besser geplant werden. Extremereignisse haben, bis auf mögliche Rechnerabstürze, bei der CFD-Simulation keine weiteren Folgen. Die Kosten für Experimente, insbesondere für maßstäbliche 1:1-Versuchsanlagen, können dadurch erheblich gesenkt werden.

CFD ist somit ein Instrument für

- » die Versuchsplanung,
- » die Versuchsdurchführung und -auswertung

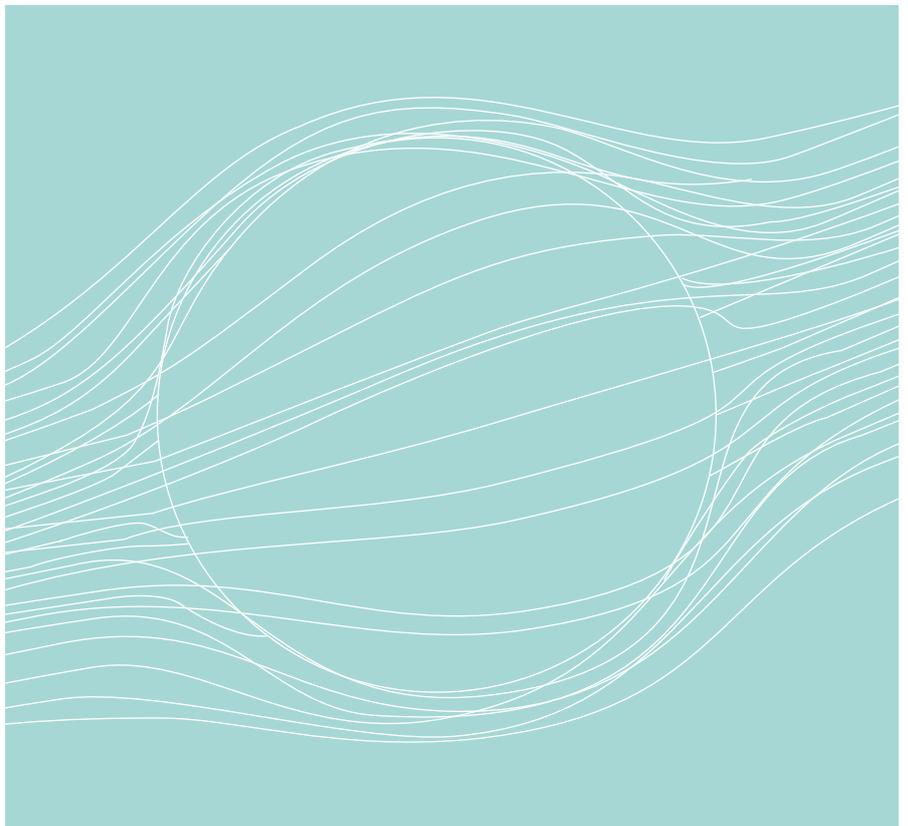
aber es ist auch ein allgemeines Planungsinstrument für alle Vorhaben, die sich in irgendeiner Form mit strömenden oder ruhenden Fluiden (z. B. Luft, Wasser, Schlämme, Öl, flüssige Metalle) auseinandersetzen.

Trotz der genannten Vorteile ist der Einsatz von CFD-Technologien natürlich mit einem gewissen Aufwand verbunden, der insbesondere für kleine und mittlere Unternehmen eine Herausforderung darstellt. Ein Modellprojekt, das mit Mitteln des Hessischen Wirtschaftsministeriums und der EU gefördert wurde, hat allerdings aufgezeigt, dass die CFD-Technologie auch für mittelständische Firmen der Umwelttechnikbranche



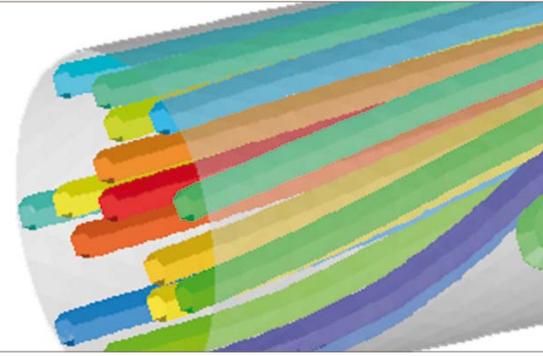
vielfältige Potenziale bietet. Durch die Zusammenarbeit mit externen Dienstleistern kann der Zugang zu dieser Highend-Engineering-Technologie erheblich erleichtert werden.

Am Beispiel des mittelständischen Unternehmens WERKSTOFF + FUNKTION Grimmel Wassertechnik GmbH wurden mittels CFD die physikalischen Wirkprinzipien einer Walzensandfang-Kompaktanlage untersucht und damit die Basis für eine Weiterentwicklung und Konsolidierung des Produktes geschaffen. Die erforderlichen Simulationen wurden maßgeblich von dem Bauingenieurbüro Dr. Sonnenburg GmbH & Co. KG und der Kessler + Luch Entwicklungs- und Ingenieurgesellschaft mbH & Co. KG durchgeführt. Die wissenschaftliche Begleitung des Projekts lag beim Institut für Siedlungswasserwirtschaft und anaerobe Verfahrenstechnik der Fachhochschule Gießen (ISAV). Kapitel 3.1 enthält eine ausführliche Beschreibung des Projekts. Kurzporträts zu den am Projekt beteiligten Unternehmen finden sich in Kapitel 4.2.



CFD IN DER UMWELTECHNIK

Durch die Simulation des Strömungsverhaltens von Wasser, Schlämmen oder Luft kann CFD Optimierungspotenziale für eine breite Palette an Umwelttechnologien erschließen. Hierzu gehören beispielsweise wasserwirtschaftliche Anlagen oder Anlagen der Lüftungstechnik sowie der Abluftreinigung. Kapitel 3 stellt verschiedene Beispiele im Detail dar.



2. CFD-Grundlagen

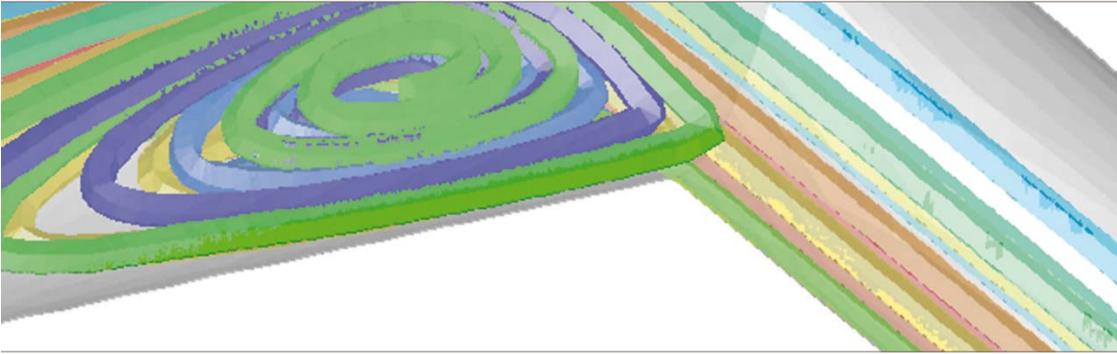
2.1 Was genau ist CFD?

Der Begriff Computational Fluid Dynamics (CFD) bezeichnet die numerische Simulation von Strömungen. Eine wichtige Grundlage bilden die Erhaltungssätze der Physik für Masse, Impuls und Energie (Navier-Stokes-Gleichungen). Ergänzend werden aber auch empirische Ansätze (Turbulenz, Wärmeübertragung zu Oberflächen, Schadstoffausbreitung, poröse Medien etc.) verwendet. Die Erhaltungsgleichungen führen auf ein System von partiellen Differentialgleichungen, welche, in diskretisierter Form, in CFD-Programmen mit Hilfe geeigneter Algorithmen iterativ gelöst werden. Weil der Lösungsbereich typischerweise in Tausende von Kontrollvolumina oder Rechenzellen unterteilt wird, spricht man auch von Feldmodellen. Die Modellierung kann dabei räumlich 2- oder 3-dimensional sowie zeitlich stationär oder instationär erfolgen.

Die Navier-Stokes-Gleichungen wurden von Claude Louis Marie Henri Navier und George Gabriel Stokes bereits vor ca. 200 Jahren entwickelt und liefern die exakte Beschreibung strömender Fluide. Die direkte simultane Lösung der Navier-Stokes-Gleichungen an jedem Punkt in der Strömung in alle drei Raumrichtungen zu jedem Zeitpunkt wird als Direkte Numerische

Simulation (DNS) bezeichnet. Bei der direkten numerischen Simulation muss jede turbulente Schwankungsbewegung direkt durch das Berechnungsgitter darstellbar sein. Dies führt dazu, dass selbst bei sehr geringen Turbulenzen Zellzahlen des Gitters von mehreren Milliarden erreicht werden. Da auf normalen PC-Rechnern zurzeit nicht mehr als ca. 5 bis 10 Millionen Zellen gerechnet werden können und auch die Cluster-Bildung mehrerer Rechner ihre Grenzen hat, bleibt die DNS zurzeit auf wenige Ausnahmen beschränkt.

Um die Probleme der DNS zu umgehen, werden Turbulenzmodelle verwendet, die je nach Vereinfachungsgrad mehr oder weniger große Unsicherheiten aber auch entsprechend große oder kleine Rechenzeiten aufweisen. Die zurzeit in der Praxis am weitesten verbreitete Strategie ist die RANS-Turbulenzmodellierung (Reynolds Averaged Navier Stokes), die eine ganze Gruppe von Gleichungsansätzen beinhaltet. Das bekannteste Modell ist das $k-\epsilon$ -Modell, das mit zwei Gleichungen die kinetische Energie und die isotrope Dissipationsrate beschreibt und bei vielen praktischen Fragestellungen ausreichend genaue Ergebnisse liefert. Da CFD-Programmpakete nicht nur die numerische Simulation der Strömung,



sondern auch thermische Beziehungen sowie physikalische und chemische Reaktionen verschiedener Phasen (z. B. Luft, Wasser, Sandpartikel) in Wechselwirkung miteinander beschreiben, sind mit der Zeit weitere Numerische Modelle hinzugekommen.

2.2 Weg einer CFD-Simulation

Für die Lösung der partiellen Differentialgleichungssysteme der Navier-Stokes-Gleichungen stehen verschiedene Methoden zur Verfügung. Das Standard-Verfahren ist die Finite-Volumen-Methode FVM, deren Lösungsweg im Folgenden in groben Zügen beschrieben wird.

Das Lösungsgebiet wird in eine diskrete Anzahl Kontrollvolumina (Zellen) überführt. Auf jede der Zellen werden die Gleichungen für Masse, Impuls, Energie u. a. angewendet und in eine algebraisch lösbare Form umgewandelt. Jeweils im Zellmittelpunkt werden die Fluid-Daten (z. B. Geschwindigkeit, Energie, Dichte, usw.) gespeichert. Die Aufstellung der Gleichungen für jedes der N Kontrollvolumen führt zu einer Gleichungsmatrix mit einer N -fachen (je nach zugeschaltetem Modellpaket) Anzahl von Gleichungen. Für diese Gleichungsmatrix stehen verschiedene mathematische Lösungsmodelle

zur Verfügung, die hier allerdings nicht Thema sein sollen.

Die praktische CFD-Simulation besteht aus vier Schritten:

- » der Geometrieerstellung,
- » der Geometrievernetzung / der Erstellung der Kontrollvolumina,
- » der numerischen Lösung mit den ausgewählten Modellen sowie
- » der Auswertung der Ergebnisse.

Die vier Arbeitsschritte können, je nach Programmpaket, mit einer einzigen Software oder in verschiedenen Softwarepaketen abgearbeitet werden. Es gibt beispielsweise CAD-Programme für die Geometrieerstellung und -vernetzung, die Austauschformate zu CFD-Gleichungslösern besitzen und ebenso Auswertungsprogramme, die über Austauschformate auf die Ergebnisse der CFD-Gleichungslöser zugreifen können. Allerdings sollte man sich hierbei vorab genau informieren, welche Austauschformate die CFD-Softwarepakete besitzen.

Die vier Arbeitsschritte werden nachfolgend exemplarisch an einem einfachen Bauteil (Rohrleitung mit Abzweig) erläutert.

Die Geometrieerstellung in **Schritt 1** erfolgt in der Regel über 3D-CAD-Programme, die Austauschformate zu CFD-Gleichungslösern besitzen. Das Rohr mit Abzweig (Abbildung 1) wird aus zwei Zylindern mit einem Innendurchmesser von 200 mm konstruiert, die ineinander verschnitten werden. In Schritt 2 müssen alle Flächen des CAD-Modells mit einem Gitternetz belegt werden. Dies würde auch für die Stärke der Rohrwandung gelten, würde diese im CAD-Modell berücksichtigt. Da bei der späteren Vernetzung in Schritt 2 bestimmte Vernetzungsregeln zu beachten sind, ist diese Vorgehensweise nicht zielführend. Geometrische Details die keinen Einfluss auf das Simulationsergebnis haben (wie z. B. die im Vergleich zum Rohrinne Durchmesser sehr geringe Stärke der Rohrwandung), aber zu Problemen bei der numerischen Lösung führen würden, sollten daher bei der Geometrieerzeugung vernachlässigt werden. Sämtliche Flächen des CAD-Modells, wie z. B. die Rohrwandinnenfläche, erhalten eine alphanumerische Kennung, um sie bei der numerischen Lösung in Schritt 3 mit Randbedingungen belegen zu können.

In **Schritt 2** wird das gesamte Innenvolumen mit Kontrollvolumina belegt (Abbildung 2), die aus verschiedenen Grundkörpern wie z. B. Hexaedern oder Tetraedern zusammengesetzt sind. An diese Kontrollvolumina sind bestimmte Erstellungsregeln geknüpft, deren Einhaltung die Güte der späteren numerischen Lösung erheblich beeinflussen kann. Eine dieser Regeln besagt, dass das Seitenverhältnis von Breite zu Länge eines Volumens nicht größer als 1:5 sein sollte. Ist ein Kontrollvolumen beispielsweise 30 cm lang aber nur 2 cm breit kann dies in der numerischen Lösung zu Instabilitäten führen. Bevor die numerische Simulationen gestartet werden kann, müssen in Schritt 2 sämtliche Randbedingungen definiert werden. Dazu gehört die Festlegung der Randart, z. B. Ein- oder Ausströmrand, oder auch die Eigenschaften des Randes, wie z. B. die Rauheit der Rohrwand. Zudem müssen vor der Simulation auch die Materialeigenschaften des zu untersuchenden Fluids (z. B. Wassertemperatur) definiert werden.

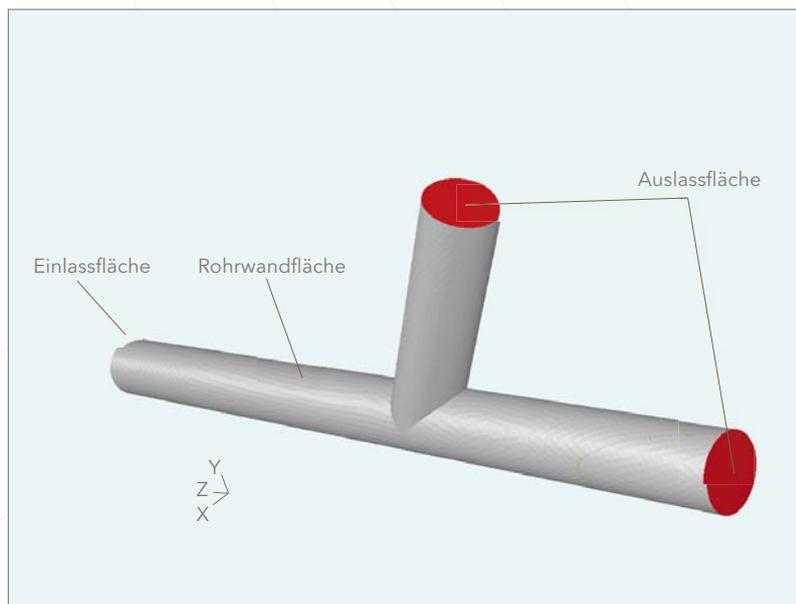


Abbildung 1: Bauteilgeometrie

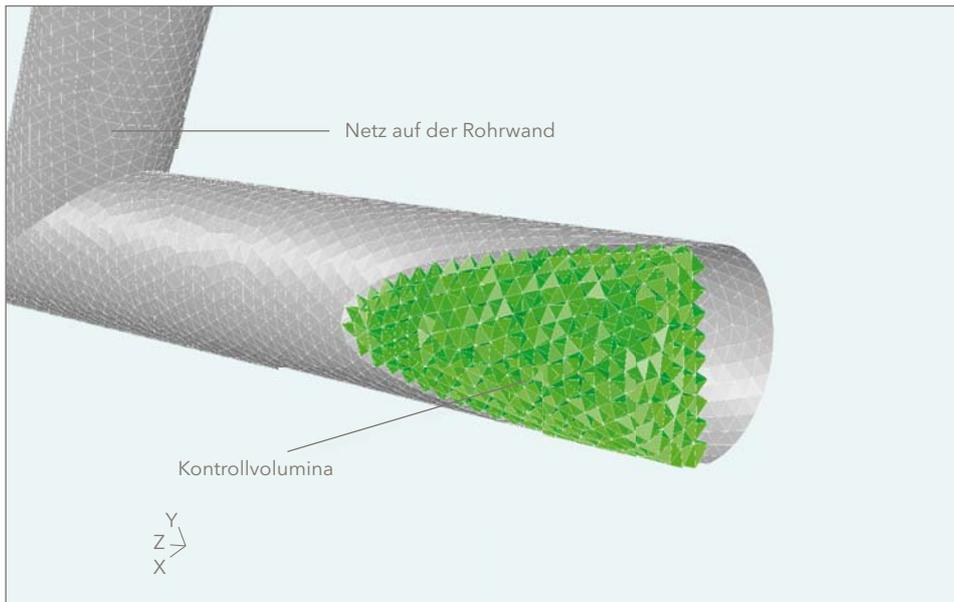


Abbildung 2:
Kontrollvolumina (grün) im
Bauteil und Kontrollflächen
(weiß) am Bauteilrand

Im Beispiel soll untersucht werden, wie sich Wasser in den beiden Rohren verteilt, wenn es auf einer Seite mit einer bestimmten Geschwindigkeit zugegeben wird. Es wird die Einströmgeschwindigkeit mit $v = 1,0 \text{ m/s}$ auf der Einlassfläche und die Druckverhältnisse mit Atmosphärendruck an den Auslassflächen vorgegeben (siehe Abbildung 1). Für die Rohrwandinnenfläche wird eine Rohrrauheit von $k = 0,4 \text{ mm}$ gewählt.

In **Schritt 3** werden die für die Problemlösung notwendigen Modelle ausgewählt. In den meisten Fragestellungen ist von einer vollturbulenten Strömung auszugehen, daher sind zur numerischen Lösung des Strömungsproblems neben den Impuls- und Massenbilanzgleichungen Gleichungen zur Beschreibung der Turbulenz hinzuschalten. Für das Beispiel einer Rohrströmung lässt sich der turbulente Fall leicht über die Reynoldszahl nachweisen, die sich aus der Eintrittsgeschwindigkeit, dem Rohrdurchmesser und der Wasserviskosität zu $Re = 200.000$ berechnen lässt. Die Rohrströmung geht über einer kritischen Reynoldszahl von 2.320 von der laminaren in eine turbulente Strömung über. Für das Beispiel wird das Standard- $k-\epsilon$ -Turbulenzmodell gewählt, das in vielen verfahrenstech-

nischen Fragestellungen eine hinreichend genaue numerische Lösung der Turbulenz bietet. Da davon auszugehen ist, dass sich stationäre Verhältnisse im Rohr ergeben, wird das CFD-Modell stationär gerechnet.

Die numerischen Näherungsverfahren partieller Differentialgleichungen berechnen keine exakte Lösung, sondern nähern sich der Lösung iterativ an. Daher wird der Iterationsprozess in der Regel beendet, wenn eine bestimmte Fehlerschranke unterschritten wird. Die Schranke, die vom Nutzer aufgrund von Erfahrungen zu wählen ist, wird im Beispiel der Rohrverteiler auf 10^{-3} gesetzt. Die numerische Berechnung erfolgt entweder für eine definierte Anzahl von Iterationen oder bricht davor bei Unterschreitung der Fehlerschranke für alle Gleichungen ab. Im Beispiel des Rohrverteilers wird die Fehlerschranke zuletzt für die Gleichungen des Turbulenzmodells erreicht (Abbildung 3) und entsprechend nach 184 Iterationsschritten beendet.

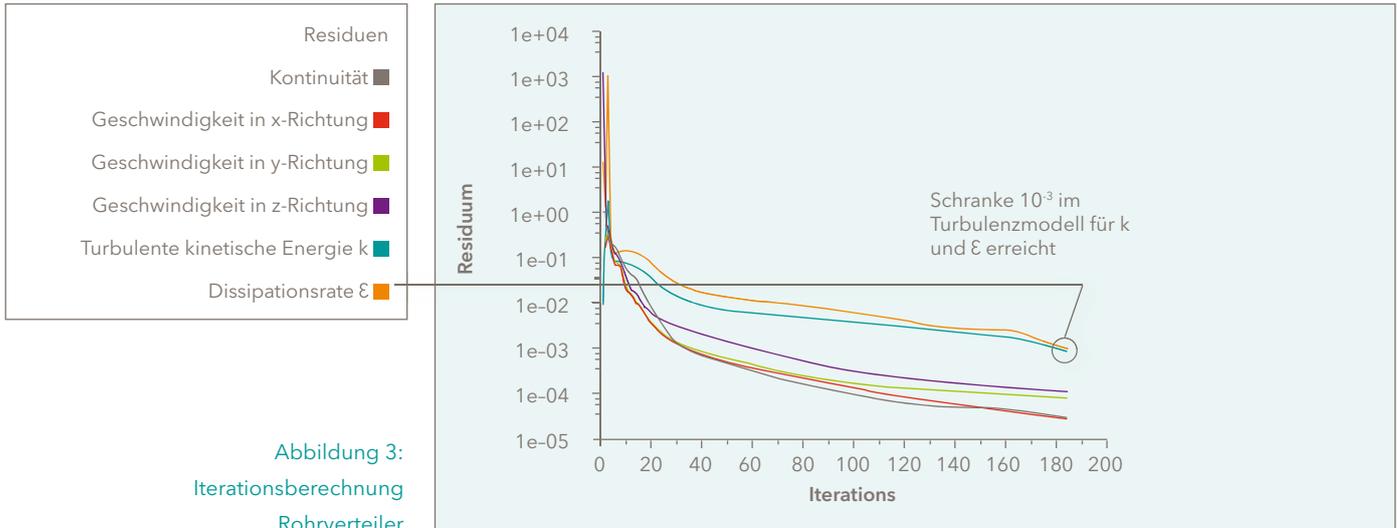
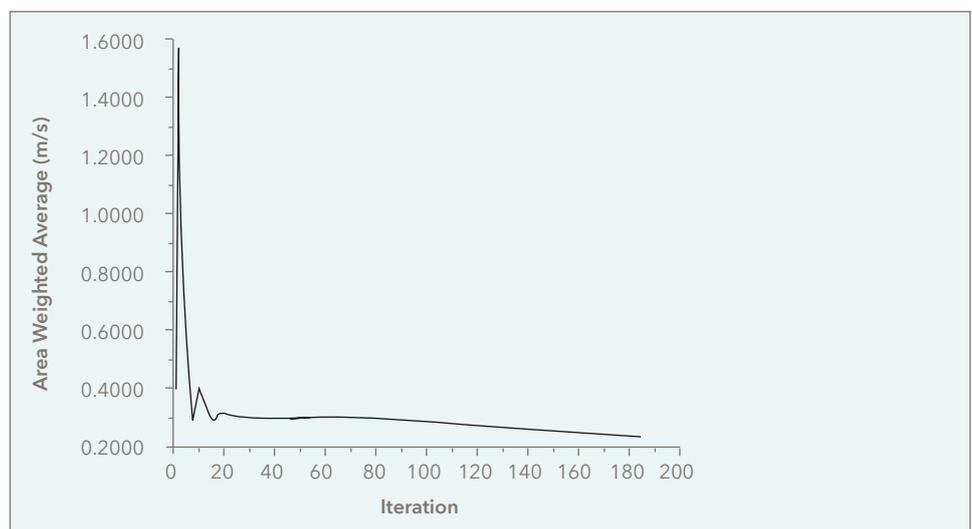


Abbildung 3:
Iterationsberechnung
Rohrverteiler

Zur Kontrolle des Lösungsfortschritts sollten neben der numerischen Fehler-schranke auch immer noch physikalische Modellparameter beobachtet werden. Abbildung 4 zeigt die Entwicklung der flächengemittelten Fließgeschwindigkeit an einem Auslassrand. Die Fließgeschwindigkeit am Auslass ändert sich über den iterativen Rechnungslauf erheblich und geht gegen Ende der Berechnung in eine waagrechte Linie über. Hier ist vom Nutzer zu entscheiden, ob die noch zu erwartende physikalische Änderung der Fließgeschwindigkeit am Auslass in nachfolgenden Iterationsschritten zu

vernachlässigen ist oder nicht. Im Beispiel wurde die Berechnung nach 184 Iterationen abgebrochen. Die flächengemittelte Fließgeschwindigkeit beträgt in diesem Auslass 0,23 m/s.

Abbildung 4:
Flächengemittelte
Fließgeschwindigkeit an
einem Auslass



Schritt 4 behandelt schließlich die Auswertung der Ergebnisse. Es sind sowohl numerische Ausgaben wie Massenströme möglich, als auch eindimensionale Funktionsgraphen mit Ergebnisparametern auf der Ordinatenachse (z. B. Fließgeschwindigkeit, Druck) und Orts- oder Zeitvorgaben auf der Abszissenachse (z. B. Länge, Iterationen, Rechenzeit). Typisch sind zweidimensionale Farbschnitte (Abbildung 5) oder dreidimensionale Graphiken (Abbildung 6). Auch animierte Zeichnungsobjekte gehören zur Bandbreite der CFD-Auswerteverfahren.

Unter den gegebenen Randbedingungen fließt das Wasser zu 72,6 % geradeaus weiter, während 27,4 % in den seitlichen Verteiler strömen. Ein typisches Detail, das im Experiment nur schlecht einzusehen ist, mit dem CFD-Modell aber visualisiert werden kann, ist beispielsweise die vektorielle Strömungsverteilung direkt am Verteiler. Deutlich ist in den Abbildungen 5 und 6 das Wirbelgebiet zu erkennen, das sich am Verteiler ausgebildet hat und sich ungünstig auf die Strömungsverteilung auswirken kann.

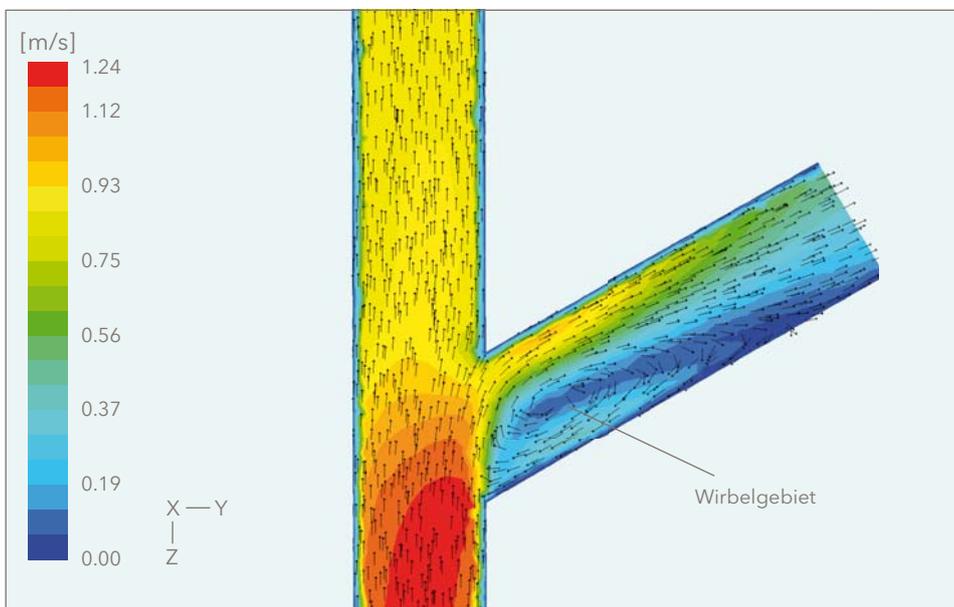


Abbildung 5:
Zweidimensionaler Schnitt durch den Rohrkörper, Darstellung des Betrags der Fließgeschwindigkeit (Farben blau bis rot) und der Fließgeschwindigkeitsvektoren

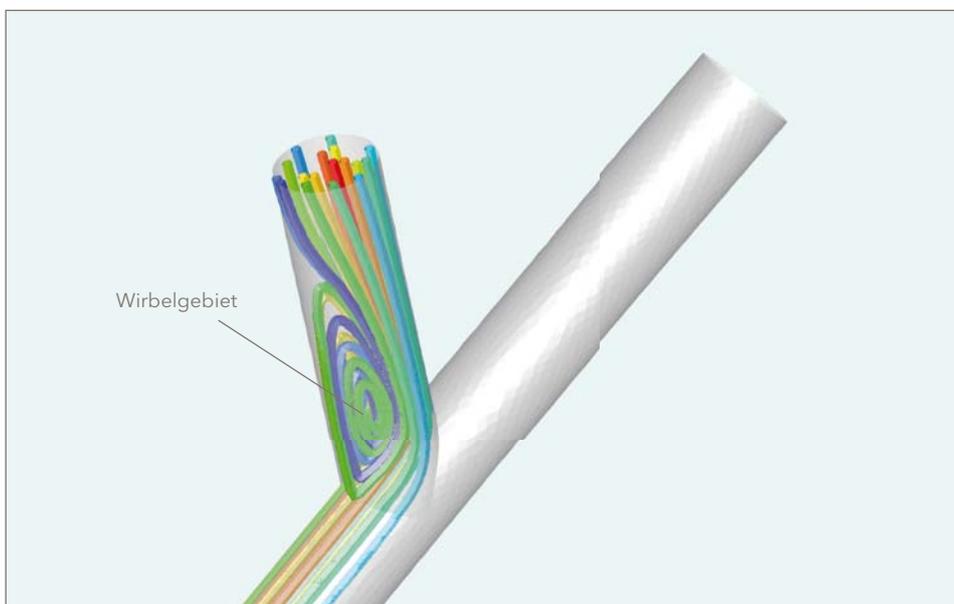


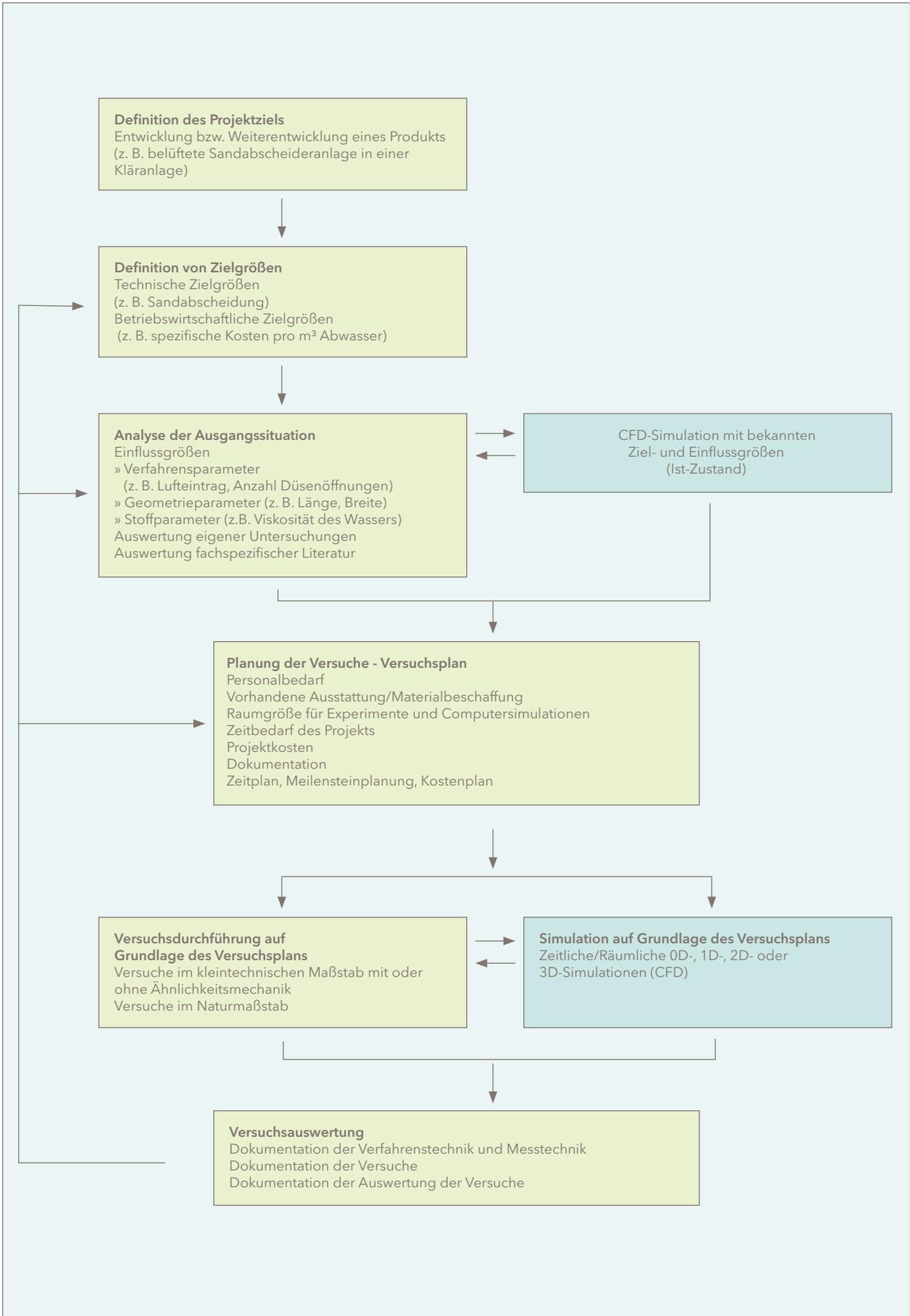
Abbildung 6:
Ausschnitt der Bauteilgeometrie mit Darstellung der Stromlinien im Seitenarm des Rohrverteilers

2.3 Einbindung von CFD in den Arbeitsprozess

Die Einbindung in den Arbeitsprozess ist natürlich vom Einsatzgebiet abhängig. Trotzdem lässt sich ein prinzipielles Schaubild erstellen, dass sich in praktisch jeder verfahrenstechnischen Versuchs- bzw. Konstruktionsplanung umsetzen lässt. Wichtig ist, dass CFD sehr früh in den Planungsprozess eingegliedert wird und die gesamte Projektphase begleitet.

Das CFD-Modell ersetzt nicht nur einen Teil der Experimente, sondern deckt durch das „durchspielen“ des gesamten Planungs- und Versuchsablaufs, von dem Setzen der Randbedingungen bis zur Ergebnisauswertung, Planungsfehler frühzeitig auf. So kann bereits die Versuchsplanung durch die CFD-Simulation optimiert werden.





2.4 Vor- und Nachteile von CFD im Vergleich zu Experimenten

CFD-Simulationen können und sollen reale Experimente zurzeit nicht vollständig ersetzen. Die Simulationen ergänzen Experimente und liefern hierbei zusätzliche Aussagen oder ersetzen einen Teil der Experimente, um diese auf eine

bestimmte Auswahl zu beschränken. Im Vergleich von realen und virtuellen Experimenten lassen sich einige Vor- und Nachteile der virtuellen Experimente hervorheben:

VORTEILE der virtuellen Experimente mit CFD:

- » Es ist möglich physikalische Randbedingungen (z. B. Durchflüsse, Drücke, Oberflächenrauheiten) exakt vorzugeben und diese ebenso exakt zu kontrollieren.
- » Spezifische Probleme können isoliert betrachtet werden, bestimmte physikalische Effekte (z. B. Erdbeschleunigung) können gezielt aktiviert oder deaktiviert werden.
- » Experimentelle Untersuchungen liefern gegenüber der Simulation nur an ausgewählten Messpunkten oder Messebenen eine limitierte Anzahl an Messdaten, während die Simulation von jedem beliebigen räumlichen Punkt und von jedem beliebigen Zeitpunkt Messdaten liefert.
- » Ein Vielzahl von Strömungsparametern, die im Experiment nicht oder nur sehr aufwändig zugänglich sind, kann mit der Simulation erfasst werden.
- » Die schnelle Entwicklung virtueller Prototypen erlaubt eine Einbindung der Ergebnisse in frühe Planungs- und Entwicklungsphasen.
- » Die Entwicklung virtueller Prototypen reduziert die notwendige Anzahl realer Prototypen.
- » Es sind Parameterstudien in großem Umfang möglich, die zu einem größeren Problemverständnis führen können als reale Experimente.
- » Je nach Anwendungsfall können die Kosten wesentlich niedriger ausfallen als die Kosten für Experimente.

NACHTEILE der virtuellen Experimente mit CFD:

- » Es können Unsicherheiten durch numerische Fehler, vereinfachte Turbulenzmodelle und vereinfachte angenommene Randbedingungen entstehen.
- » Es können Unsicherheiten durch die Netzungenauigkeit (Größe und Struktur) entstehen. Es wird nur ein Wert pro Zelle berechnet und dazwischen interpoliert.
- » Rechenzeiten für große Modelle und komplexe Strömungsvorgänge sind z. T. sehr hoch.
- » Je nach Anwendungsfall können die Kosten wesentlich höher ausfallen als die Kosten für reale Experimente.

Ein Simulationsprogramm ist nur so gut, wie der Anwender, der es bedient. Der Modellaufbau, die Simulationdurchführung und -auswertung benötigt viel Erfahrung.

2.5 In welchen Arbeitsbereichen wird CFD verwendet?

Da die CFD-Programme auf den Grundgleichungen der Physik aufgebaut sind, sind die Anwendungsgebiete sehr vielfältig. Grundsätzlich beschränkt sich CFD natürlich auf die Simulation des Verhaltens von Fluiden. Da aber beispielsweise unsere gesamte Umwelt entweder von Wasser oder Luft umgeben ist, ist zu erahnen, dass die Anwendungsgrenzen sehr weit gesteckt sind. Nachfolgende Liste der Themen und Anwender gibt einen guten Überblick über die Vielfältigkeit des Einsatzes:

- » Umwelttechnik
- » Energietechnik
- » Elektrotechnik
- » Metallindustrie
- » Turbomaschinenbau
- » Chemie
- » Kunststoffverarbeitung
- » Verbrauchsgüterherstellung
- » Flugzeugbau
- » Fahrzeugbau
- » Halbleitertechnik
- » Schiffsbau
- » Meerestechnik
- » Bergbau
- » Biomedizin
- » Pharmazie
- » Glasfertigung
- » Hausgerätetechnik
- » Ernährungs- und Getränkeindustrie
- » Sportausrüstung

2.6 Wer führt CFD-Arbeiten aus?

Grundsätzlich gibt es für Firmen natürlich zwei Möglichkeiten der CFD-Anwendung. Entweder werden CFD-Simulationen in der eigenen Firma durchgeführt oder nach außen an entsprechende Dienstleister vergeben. Die Frage, ob es sich lohnt die CFD-Software anzuschaffen und Mitarbeiter darauf auszubilden oder die Dienstleistung vollständig fremd zu vergeben, hängt vom spezifischen Fall ab.

Dienstleister

CFD gibt es in den unterschiedlichen Disziplinen seit Anfang der 1980-iger Jahre, insbesondere im Maschinenbaubereich ist die CFD-Softwaretechnik bereits seit langem etabliert. Seit einigen Jahren beginnt sich die CFD-Technik aber in viele andere Forschungs- und Entwicklungsbereiche auszubreiten. CFD-Spezialisten finden sich vor allem an den forschenden Hochschulen, hier insbesondere in den strömungsmechanischen Instituten, aber in den letzten Jahren auch zunehmend in allen Bereichen, die sich mit strömenden Fluiden beschäftigen.

Neben den Hochschulen bieten auch einige hochspezialisierte privatwirtschaftliche Unternehmen CFD-Dienstleistungen an, meist in Verbindung mit anderen Leistungen im Forschungs- und Entwicklungsbereich. Dabei zeichnet sich wie an den Hochschulen auch eine Spezialisierung in einzelnen Fachgebieten ab. Ein CFD-Spezialist, der beispielsweise auf die Modellierung von Prozessen in PKW-Katalysatoren spezialisiert ist, muss nicht zwangsläufig das Sedimentationsverhalten von Sand in einer Sandfanganlage von Kläranlagen simulieren können.

Schließlich bieten auch Firmen aus der CFD-Softwareentwicklung und dem CFD-Softwarevertrieb CFD-Dienstleistungen an.

Es lassen sich im Wesentlichen vier Anbieterbereiche unterscheiden:

- » Privatwirtschaftliche Forschungs- und Entwicklungsunternehmen
- » Privatwirtschaftliche CFD-Softwareentwickler und -vertriebe
- » Hochschulen, Fachhochschulen, Universitäten
- » Gemeinnützige Forschungsvereine

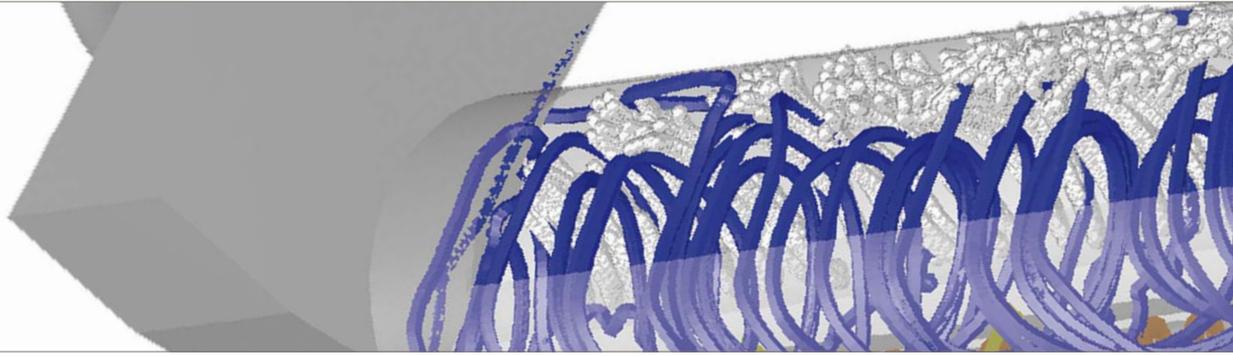
WER BILDET IM CFD-BEREICH AUS?

Die Ausbildung erfolgt größtenteils an den Universitäten innerhalb der dort angebotenen Vorlesungen. Beispielsweise bietet der Autor dieses Bandes am Institut WAR der TU Darmstadt die Lehrveranstaltung „Numerische Strömungs- und Stofftransportsimulation mit CFD in der Wasserwirtschaft“ an (<http://www.iwar.bauing.tu-darmstadt.de/personen/sonnenburg/sonne001.htm>). Daneben bieten alle kommerziellen CFD-Softwareanbieter eigene kostenpflichtige Anfänger- und Fortgeschrittenenkurse oder auch teilweise kostenlose Einführungsveranstaltungen an. Auch private CFD-Dienstleister bieten gelegentlich CFD-Kurse als Dienstleistung an.

WO GIBT ES WEITERE INFORMATIONEN?

Die internationale, englischsprachige CFD-Internet-Plattform www.cfd-online.com bietet einen sehr guten Überblick über alle möglichen Bereiche von CFD, unter anderem auch bezüglich der Ausbildung und der verfügbaren nicht kommerziellen und kommerziellen CFD-Programme.

Eine weitere englischsprachige Internet-Plattform bietet die NAFEMS (www.nafems.org) an. Hierbei handelt es sich um eine allgemeine Plattform zum Thema Simulation, die CFD als Unterthema mit behandelt.



3. Beispiele aus der Umweltechnik

In der Umweltechnik bieten sich vielfältige Einsatzmöglichkeiten für die CFD-Simulation. Die nachfolgenden sechs Beispiele decken jeweils einen typischen Anwendungsbereich ab.

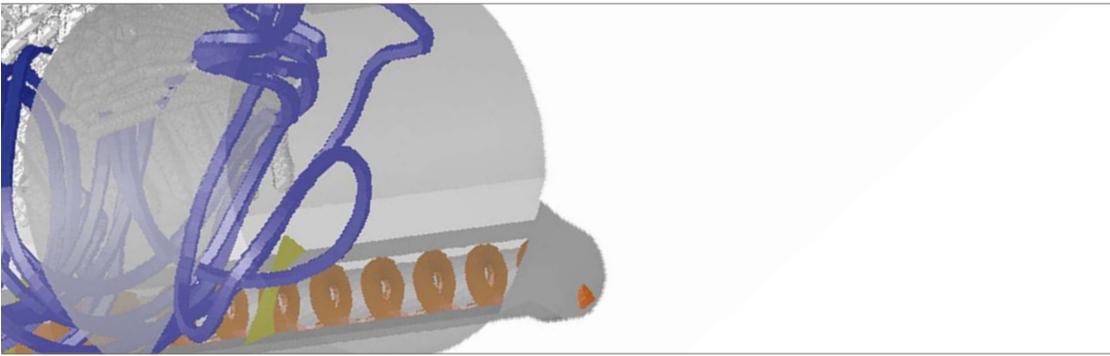
Im ersten Beispiel wird das hessische Modellprojekt „Einsatz des computer-gestützten physikalischen Strömungsmodellkonzepts CFD in der Umweltechnik - am Beispiel der Herleitung der wissenschaftlichen Grundlagen der Walzensandfang-Kompaktanlage WS“ vorgestellt. Hierbei ging es darum, mithilfe der CFD-Simulation ein Produkt zu optimieren, das in Zukunft in größerer Stückzahl verkauft werden soll.

In den beiden folgenden Beispielen werden Forschungsvorhaben mit CFD an der TU Darmstadt vorgestellt: zum einen eine Technik, die entwickelt wurde, um komplexe Geometrien in CFD vernetzen und anschließend lösen zu können, zum anderen ein Projekt in dem ein Zusatzprogramm für einen kommerziellen CFD-Code programmiert wurde.

Bei den Beispielen 4 und 5 handelt es sich jeweils um Optimierungen verfahrenstechnischer Prozesse in bestehenden siedlungswasserwirtschaftlichen Anlagen. Während in Beispiel 4 eine ganze Flockungsstufe mit einem Bauwerksdurchmesser von ca. 36 m

im CFD-Modell nachgebildet wurde, handelt es sich im Beispiel 5 nur um einen Kanal mit einer Breite von 0,7 m und einer Wassertiefe von ca. 0,6 m. In Beispiel 5 erschien es zunächst sinnvoll mit Hilfe von Versuchen vor Ort den Ist-Zustand zu erfassen, anstelle eine unter Umständen aufwändigere CFD-Simulation durchzuführen. Tatsächlich besaß der Kanal jedoch nicht nur eine Betonsohle und Betonwände sondern auch eine betonierete Decke, so dass der Kanal von keiner Seite zugänglich war. Die CFD-Simulation war somit die einzige Möglichkeit, dass Strömungsverhalten innerhalb des Bauwerks zu untersuchen.

In Beispiel 6 wird ein Lüftungstechnisches und energetisches Konzept für eine Gebäudeumnutzung als Beispiel für die Anwendung von CFD in der Lufttechnik unter Berücksichtigung der Energiegleichung (konvektive Wärmeströme und Wärmestrahlung) vorgestellt. Das siebte Beispiel zeigt den Einsatz von CFD zur Reduktion von diffusen Staubemissionen in einem Stahlwerk auf.



3.1 Das hessische Modellprojekt: Weiterentwicklung einer Walzensandfang-Kompaktanlage

3.1.1 Kurzzusammenfassung

Gegenstand des durch das Hessische Wirtschaftsministerium und die EU geförderten Projektes war der Einsatz von CFD an einem praktischen Beispiel der Umweltechnik. Als Projektbeispiel wurde die CFD-Simulationstechnik für die nachvollziehbare Herleitung der Wirkmechanismen in einer kompakten Sandfanganlage mit zylindrischem Grundkörper (Walzensandfang) verwendet. Die theoretisch im CFD-Modell ermittelten Daten wurden in einem aufgebauten Versuchsstand mit einer Sandfanganlage im Originalmaßstab praktisch überprüft. Maßgebende zu untersuchende Parameter waren die Strömungsbedingungen sowie die Sandabscheideleistungen des Sandfangs. Es kam ein kommerzielles CFD-Programm zum Einsatz.

Belüftete Sandfänge mit bautechnisch einfachen und damit kostengünstigen, meist trapezförmigen Querschnittsprofilen, werden derzeit auf vielen Kläranlagen eingesetzt. Das für die Ausbildung der Wasserwalze (Spiralströmung) und damit der Sandabscheidung optimale Rundprofil scheidet wegen der aufwändigen und kostenintensiven Schalungs- und Bautechnik aus. Neu entwickelt wurde ein belüfteter Walzensandfang mit rundem Querschnitt, welcher für Wasserzuflüsse bis ca. 80 l/s durch das Institut für

Siedlungswasserwirtschaft und anaerobe Verfahrenstechnik der FH Gießen (ISAV) im Jahr 2001 wissenschaftlich untersucht wurde. Im hier dargestellten Projekt wurde das Versuchsprogramm erweitert und um die CFD-Modellierung ergänzt.

Untersucht wurden die Strömungsgeschwindigkeiten und Sandabscheidegrade für unterschiedliche Zulaufmengen, Sandfrachten und Luftmengen. Nach DIN 19569 Teil 2 „Besondere Baugrundsätze für Einrichtungen zum Abtrennen und Eindicken von Feststoffen“ wird für Sandfanganlagen ein Abscheidegrad von 95 % für Partikel $\geq 200 \mu\text{m}$ gefordert.

FÖRDERUNG DES MODELLPROjekTS

Dieses Projekt wurde aus Mitteln des Landes Hessen gefördert, kofinanziert aus Mitteln der Europäischen Union (Europäischer Sozialfonds - ESF).

Hessisches
Ministerium für
Wirtschaft,
Verkehr und
Landesentwicklung



Die CFD-Sandpartikelsimulationen wiesen für Partikeldurchmesser $\geq 200 \mu\text{m}$ Sandabscheidegrade auf, die maximal 2 bis 3 % von den Sandabscheidemessungen in der Versuchsanlage abwichen. Damit wurde für die relativ komplexen dreidimensionalen und instationären verfahrenstechnischen Verhältnisse in der Walzensandfanganlage eine sehr gute Korrelation zwischen Modell und Versuchsanlage erreicht. Zudem konnte der Abscheidegrad in der Versuchsanlage von bis zu 97,4 % für Partikeldurchmesser $\geq 200 \mu\text{m}$ über das theoretische, physikalische CFD-Modell bestätigt werden. Somit konnte aufgezeigt werden, dass der Walzensandfang die Forderung der DIN 19569 erfüllen kann.

Außerdem konnte mit Hilfe des CFD-Modells das Wirkprinzip der Walzensandfanganlage hergeleitet und durch die CFD-Simulation der Strömungsverhältnisse im Aggregat auch nachgewiesen werden. Die theoretisch modellierten Strömungsverhältnisse wurden durch die Messungen am Versuchstand bestätigt. Qualitative Strömungsbedingungen wie der tangentielle Einlauf der Strömung in den zylindrischen Sandfangkörper, die Ausbildung der Walzenströmung durch die Belüftung und die Höhe des Wasserspiegels, konnten sehr gut nachgebildet werden.

Durch die Visualisierung der Strömungssituationen und der Feststoffkonzentrationsverhältnisse im Walzensandfang konnte der Wirkmechanismus und die Funktionalität plausibel nachvollzogen werden. Die Visualisierungen der CFD-Simulationen bilden ein sehr gutes Marketinginstrument, um interessierten Gesprächspartnern auf sehr anschauliche Weise die Funktionsweise der Walzensandfanganlage zu erläutern.

3.1.2 Ergebnisse im Detail

In Abbildung 7 ist die CFD-Modellgeometrie mit transparenter Walzenaußenwand dargestellt. Es wurde der Walzenrundkörper, der Sandaustragsraum mit Förderschnecke, der Einlaufbereich einschließlich der zuführenden Rohrleitungen und der Auslassbereich mit Überfall und abgehenden Rohrleitungen modelliert. Die Luftzuführung wurde über Rohrleitungen maßstabsgetreu erfasst.

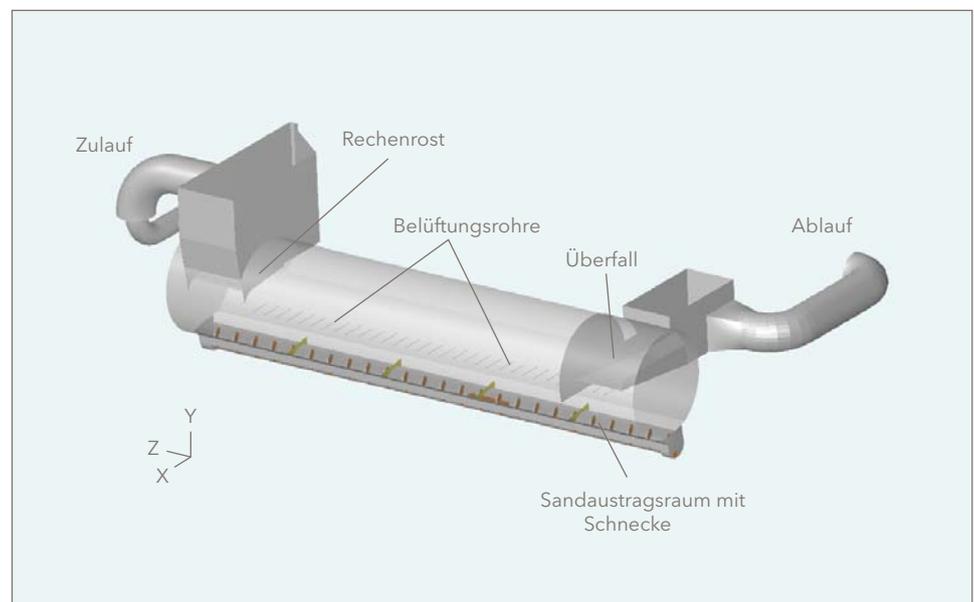
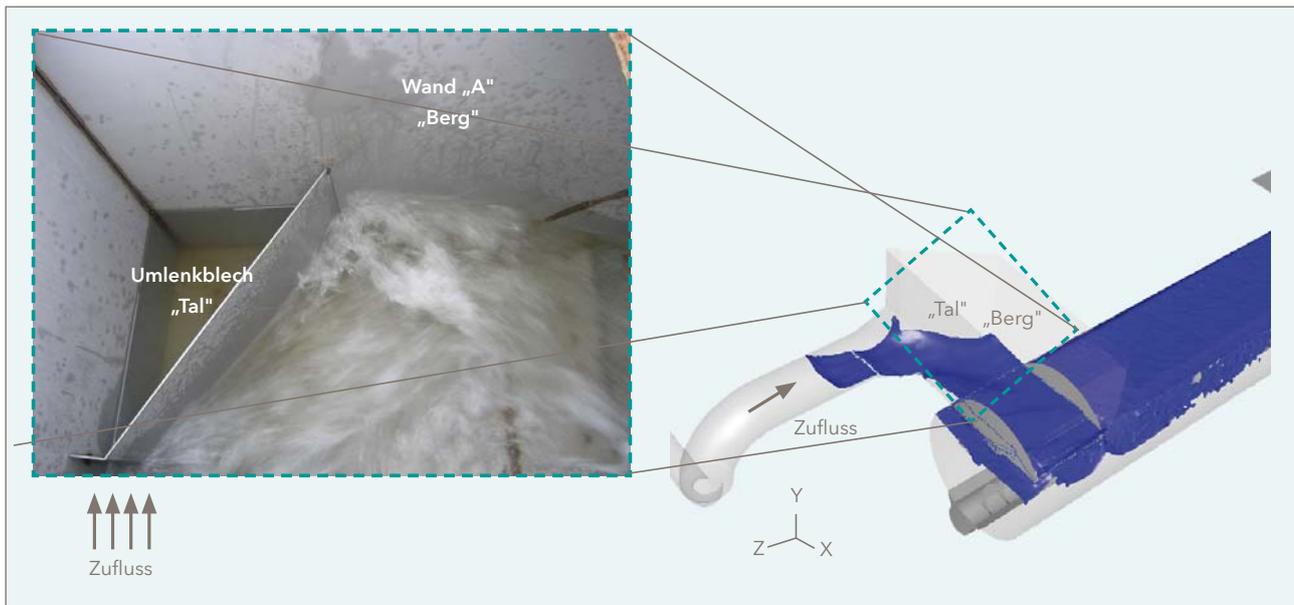


Abbildung 7 :
CFD-Modellgeometrie mit
transparenter Walzenwand

Wenn ein CFD-Modell die Fluideigenschaften innerhalb des strömenden Fluids darstellen kann, muss dies auch auf dessen Ränder zutreffen. Bei wasserwirtschaftlichen Fragestellungen kann daher der Wasserspiegel als erster visueller Maßstab für die Güte des CFD-Modells herangezogen werden.



In Abbildung 8, rechts ist der Wasserspiegel (blau) im CFD-Modell zu sehen. Der Geometriekörper der Versuchsanlage wurde grau-transparent dargestellt, um den Wasserspiegel besser erkennen zu können. Das Foto links zeigt einen Ausschnitt aus der Versuchsanlage, allerdings mit einem etwas steileren Winkel als das CFD-Modell. Das Wasser strömt unter Druck durch das Einlaufrohr (siehe Zufluss-Pfeile) und fließt kurz vor dem Beginn des Fotoausschnitts frei in einen Vorlagebehälter, der ansonsten die Rechanlage aufnimmt. Systembedingt wird das Wasser dort in einem 90°-Winkel mit Hilfe eines Umlenkblechs umgeleitet und strömt dann weiter in den zylindrischen Reaktionsraum. Durch die Umlenkung des Wassers kommen hierbei Zentrifugalkräfte zum Tragen, die zu einem höheren Wasserspiegel an der Außenwand führen. Insbesondere am Anfang und Ende des Umlenkblechs steht der Wasserspiegel besonders hoch an. An der Wand „A“ ist

sowohl im Modell als auch im Foto der Naturanlage ein „Wasserberg“ zu erkennen, während direkt am Umlenkblech sowohl im Modell als auch in der Natur ein „Wassertal“ zu sehen ist.

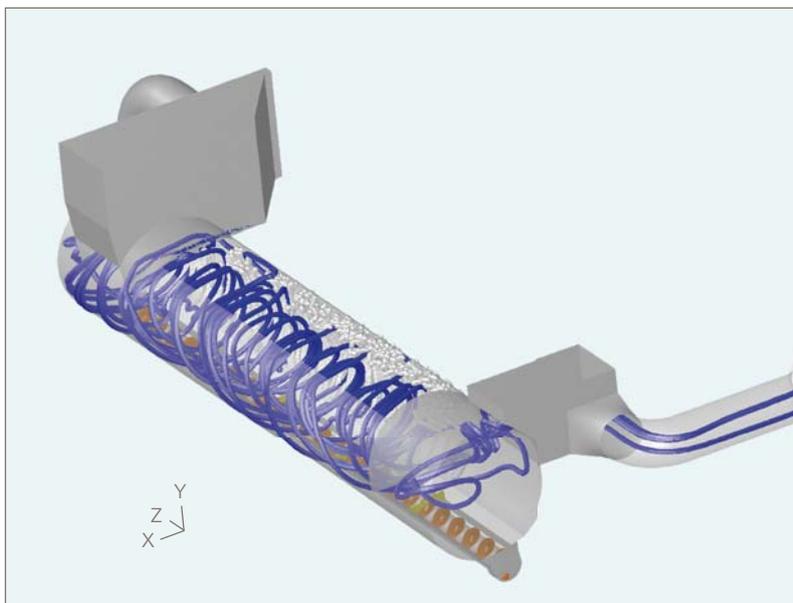
Weiterhin zeigten Wasserspiegelmessungen durch das ISAV eine Wasserspiegelhöhe an der Überfallkante des Ablaufs von ca. 8 cm, während im CFD-Modell eine Überfallhöhe von ca. 10 cm erreicht wurde. Mit einer mittleren Zellkantenlänge von 2 cm im Bereich des Wasserspiegels liegt die Modellgenauigkeit in der Größenordnung, die die Zellgröße erwarten lässt. Die Genauigkeit des Modells ist somit immer an die Zellgröße gekoppelt. Bezogen auf die gesamte Länge der Walze betrug der mittlere Fehler der Wasserspiegelhöhe im CFD-Modell nur ca. 1 cm.

Abbildung 8:
Wasserspiegel am Einlauf

Eine wesentliche Zielgröße des Projekts war der Nachweis der Walzenströmung im Walzensandfang. Dieser Nachweis wurde im CFD-Modell durch verschiedene Auswerteverfahren realisiert. Stromlinien (Abbildung 9) berechnen aus den Fließgeschwindigkeitsvektoren den Fließweg des Fluids und können so die Walzenströmung in Linienform visualisieren.

Die Strömungswalze konnte sowohl im CFD-Modell als auch über die Strömungsmessungen in der Versuchsanlage gut nachgewiesen werden. Durch einen Tracerversuch mit Schaumstoffpartikeln in der Versuchsanlage ließ sich zeigen, dass der Winkel der Strömungswalze mit zunehmender Fließlänge abnimmt, d.h. von der Walzenquerrichtung in die Walzenlängsrichtung übergeht. Dies wurde durch die CFD-Simulationen bestätigt. Die CFD-Modellierung zeigt weiterhin, dass die Walze fast vollständig durchströmt wird, d. h. dass keine Strömungstotzonen vorliegen außer systembedingt im Kernbereich der Walze.

Abbildung 9:
Strömungswalze (blau) und
Luftblasen (grau-weiß)



3.2 Grundlagenforschung – CFD-Simulation der Poren- kanäle von Schüttungen

In der Trinkwasseraufbereitung werden häufig Kontaktapparate zur Aufbereitung des Rohwassers zu Trinkwasser eingesetzt. Bedingt durch unterschiedliche Inhaltsstoffe im Rohwasser (z. B. Oberflächenwasser, Grundwasser) ist es oft erforderlich Kontaktapparate individuell mit Hilfe von praktischen Versuchen im Labor- oder halbtechnischen Maßstab auszulegen. In einem Kontaktapparat werden zwei oder mehr Phasen miteinander in Berührung gebracht, damit zwischen ihnen bestimmte Stoffänderungsprozesse ablaufen können. Dabei findet in Kontaktapparaten, die eine regellose Schüttung enthalten, zwischen den Fluiden und den Feststoffpartikeln ein Stoffaustausch an der Phasengrenzfläche der Feststoffpartikel statt.

Innerhalb eines Forschungsvorhabens des Fachgebiets Wasserversorgung und Grundwasserschutz der TU Darmstadt wurde untersucht, ob die Strömungskanäle in den Schüttungen mit Hilfe von CFD modelliert werden können und ob aus den Simulationsergebnissen Aussagen für die Bemessung von Kontaktapparaten abgeleitet werden können. Aufwändige Versuche im halbtechnischen Maßstab könnten dadurch minimiert bzw. gänzlich ersetzt werden. Dazu wurde eine Aktivkohleschüttung (Abbildung 11) mit Hilfe

eines Computertomographieverfahrens in ein dreidimensionales Softwareformat umgewandelt, in ein CFD-Programm eingelesen und anschließend die Strömung in den Porenräumen der Schüttung berechnet (Abbildung 12).

Es konnte gezeigt werden, dass die dreidimensionale CFD-Simulation der Strömungskanäle möglich ist. Es kann zwar zurzeit nicht der gesamte Kontaktapparat mit Hilfe dieses Ansatzes simuliert werden, es ist aber möglich ein repräsentatives Einheitsvolumen (REV) zu erstellen, von dem dann die Stoffeigenschaften für größere Bausteine eines Kontaktapparates abzuleiten sind.



Abbildung 10:
Aktivkohleschüttung
in einem Becherglas

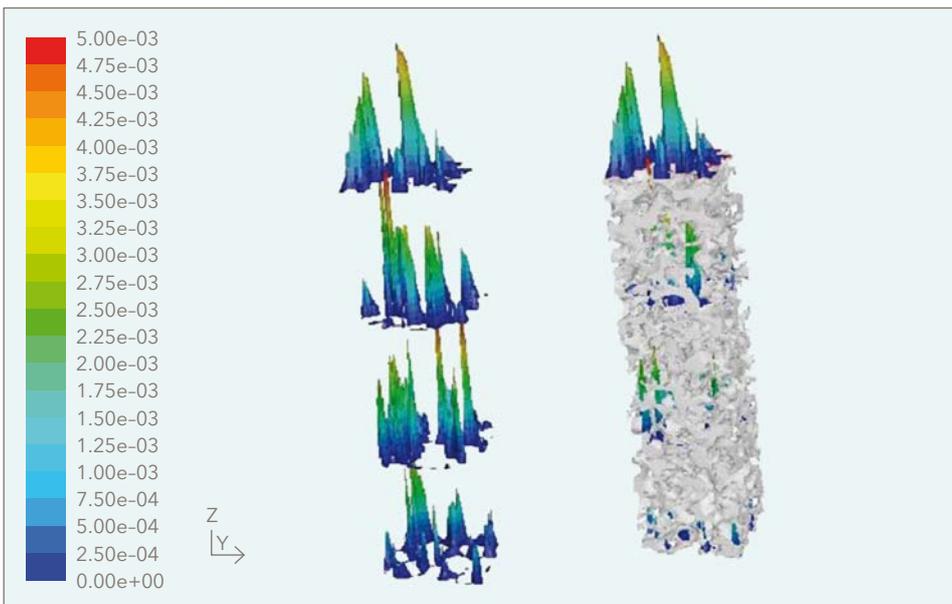
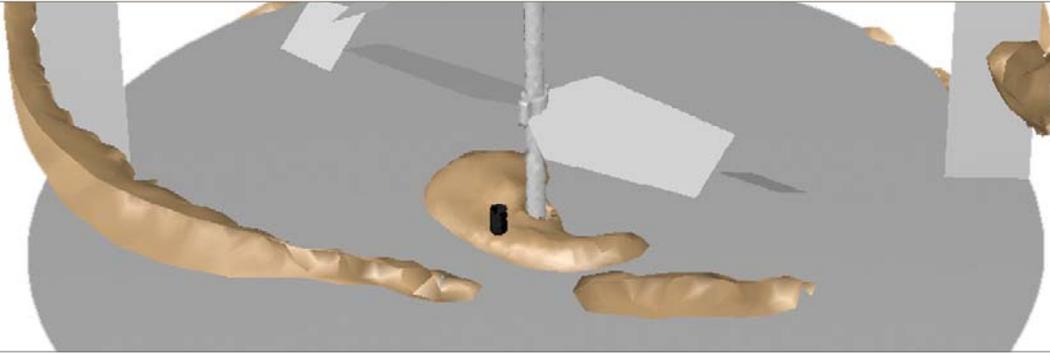


Abbildung 11:
Geschwindigkeitsprofile in
4 Höhen, Legende in [m/s]

Einsatzbereiche dieser Simulation liegen in der Konstruktion und Dimensionierung von Anlagen der Wasser- und Abwassertechnik. Entwickler und Hersteller entsprechender Anlagen und Komponenten können durch den Einsatz von CFD Optimierungen vornehmen.



3.3 Grundlagenforschung - Entwicklung eines Schlammsimulationsmodells

Bei den meisten CFD-Software-Codes ist es möglich eigene Unterprogramme einzubauen, um gezielt bestimmte Detailsimulationen durchführen zu können. In einem Forschungsvorhaben des FG Wasserversorgung und Grundwasserschutz der TU Darmstadt wurde der Schlamm der Flockungsstufe einer Wasseraufbereitungsanlage mit seinen spezifischen Eigenschaften in einem solchen Zusatzprogramm nachgebildet. Hierbei ist es gelungen das nichtlineare Absetzverhalten, die plastischen Materialeigenschaften, die nichtkonstante Diffusion und die Dichteffekte des Schlammes zu modellieren.

Die durchgeführten Experimente und Simulationen zeigten, dass mit Hilfe einfacher Absetz- und Viskosimeterversuche die Materialeigenschaften des Schlammes bestimmt und für die CFD-Simulationen der Gesamtanlage verwendet werden konnten. Mit Hilfe der CFD-Simulationen konnte die Wirkung verschiedener baulicher Veränderungen auf die Anlagenfunktion beurteilt werden.



Abbildung 12:
Rührbehälter (Höhe ca. 6,0 m)
mit erhöhten Schlamm-
konzentrationen (braun)

Wie im vorangehenden Beispiel liegen auch hier die praktischen Einsatzmöglichkeiten in der Konstruktion und Dimensionierung von Anlagen der Wasser- und Abwassertechnik. Das nachfolgende Beispiel zeigt einen Anwendungsfall auf.

3.4 Steigerung der Durchsatzleistung in einer bestehenden siedlungswasserwirtschaftlichen Anlage

Die Aufbereitung von Roh- zu Trinkwasser ist von den Inhaltsstoffen des Rohwassers abhängig. Wenn auch die Verfahrenstechniken für die Entfernung oder Reduzierung einzelner Inhaltsstoffe bekannt sind, so führt die Aufbereitung eines speziellen Wassers auch zu einer wasserspezifischen Kombination der Aufbereitungsschritte. Für Planung und Optimierung einer Wasseraufbereitungsanlage stehen daher oft praktische Versuche an, die in aufwändigen Maßstabsmodellen umgesetzt werden müssen. Da in einem verkleinerten Maßstabsmodell die auftretenden Kräfte nicht im gleichen Verhältnis wie in der Natur auftreten können, werden die Abweichungen mit kleiner werdendem Modell immer größer. Die Folge ist, dass ein bestimmter Maßstab nicht unterschritten werden sollte. In der

Wasseraufbereitung führt das zu Maßstabsmodellen von 1:5 bis 1:10.

Das folgende Beispiel zeigt eine bereits vorhandene Wasseraufbereitungsanlage, deren Durchsatzleistung erhöht werden soll. Das Bauwerk aus Abbildung 11 hat im Naturmaßstab einen Durchmesser von 36 m und eine Höhe von ca. 9 m. Mit den genannten Maßstabszahlen müsste für Versuche ein Modell mit einem Durchmesser zwischen 3,60 und 7,20 m bei einer Höhe zwischen 0,9 und 1,8 m gebaut werden. Im Maßstab 1:5 hat das Modell bereits eine Größe, wie sie in manchen Städten als Naturanlage anzutreffen ist. Das CFD-Modell behandelt die Aufbereitungsanlage im Maßstab 1:1 und passt hierbei in einen gewöhnlichen PC-Rechner mit 4 GB Hauptspeicher.

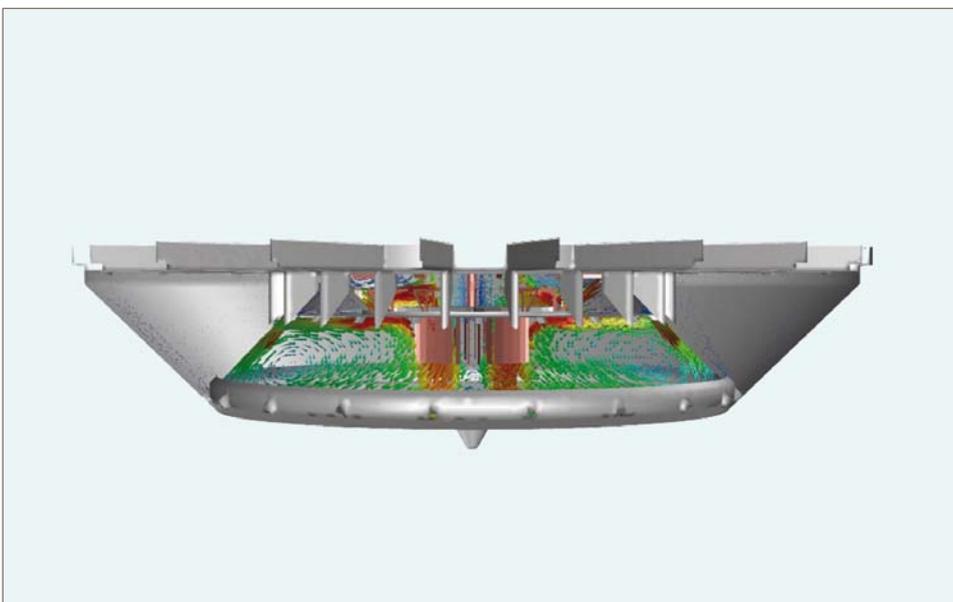


Abbildung 13:
Flockungsstufe einer
Wasseraufbereitungsanlage

Tatsächlich sind aber nicht alle verfahrenstechnischen Schritte der Anlage zu modellieren, da die mathematische Beschreibung einzelner Reaktionen oft nicht oder nur unzureichend bekannt ist. Das Beispiel behandelt die Flockungsstufe einer Wasseraufbereitungsanlage, in der Partikel durch Zugabe von Flockungsmitteln und die anschließend stattfindende Flockung in einen sedimentationsfähigen Zustand überführt werden. Es kann zwar bisher nicht die Flockenbildung simuliert werden aber die Simulation des gebildeten Schlammes und des strömenden Wassers, einschließlich beweglicher Elemente, hier z. B. eine Rührpumpe, sind möglich.

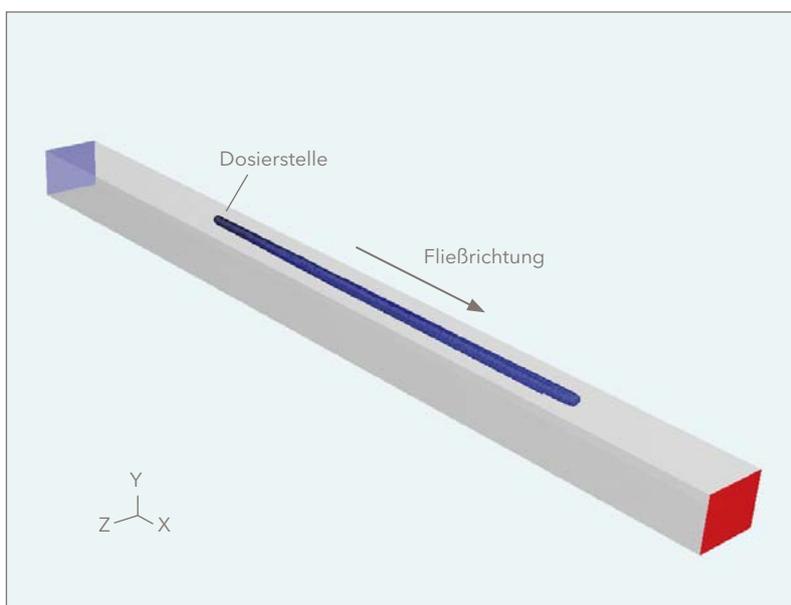
Wichtige Zielgrößen sind die Durchströmung des Reaktionsraums unter Berücksichtigung des Absetzverhaltens des Schlammes. Zu diesem Zweck wurde ein Schlammmodell am Fachgebiet Wasserversorgung und Grundwasserschutz der TU Darmstadt entwickelt, das das Flockenabsetzverhalten und den Einfluss der Schlammkonzentration auf das Strömungsverhalten des Wassers berücksichtigt (siehe Beispiel 3).

3.5 Verbesserung der Dosierung von Chemikalien an einer bestehenden siedlungswasserwirtschaftlichen Anlage

Nachfolgendes Beispiel behandelt eine typische Dosiertechnik für Zusatzstoffe in der Siedlungswasserwirtschaft. Der zudosierte Stoff wird über eine Rohrleitung oberhalb des Wasserspiegels des Rohwasserkanals zugegeben und so in den vorbei fließenden Rohwasserstrom eingeleitet. Die Durchmischung soll durch den Eintauchimpuls des Zusatzstoffstroms in den Rohwasserstrom und durch die turbulente Strömung erfolgen. In die-

sem Fall konnte nachgewiesen werden, dass eine ausreichende Durchmischung über die Länge eines rechteckigen Rohwasserkanals nicht möglich war und der einfließende Zusatzstoff an der Oberfläche des Kanals verbleibt (Abbildung 14, blauer Strang). Es wurde daher eine Dosiertechnik vorgeschlagen, die den Zusatzstoff über 9 Öffnungen im Rohwasserkanal gleichmäßig verteilt. Damit auch bei geringen Durchflüssen im Dosiersystem eine gleichmäßige Verteilung gewährleistet bleibt, müssen die Rohrleitungen des Dosiersystems nicht-linear verjüngt werden (Abbildung 16). Abbildung 15 zeigt die Verteilung des zudosierten Stoffs in den 0,7 m breiten und ca. 0,6 m tiefen Rohwasserkanal. Bereits nach wenigen Dezimetern Fließstrecke ist der Zusatzstoff gleichmäßig im Rohwasserstrom verteilt.

Abbildung 14:
Dosierung der Chemikalie
über die Wasseroberfläche



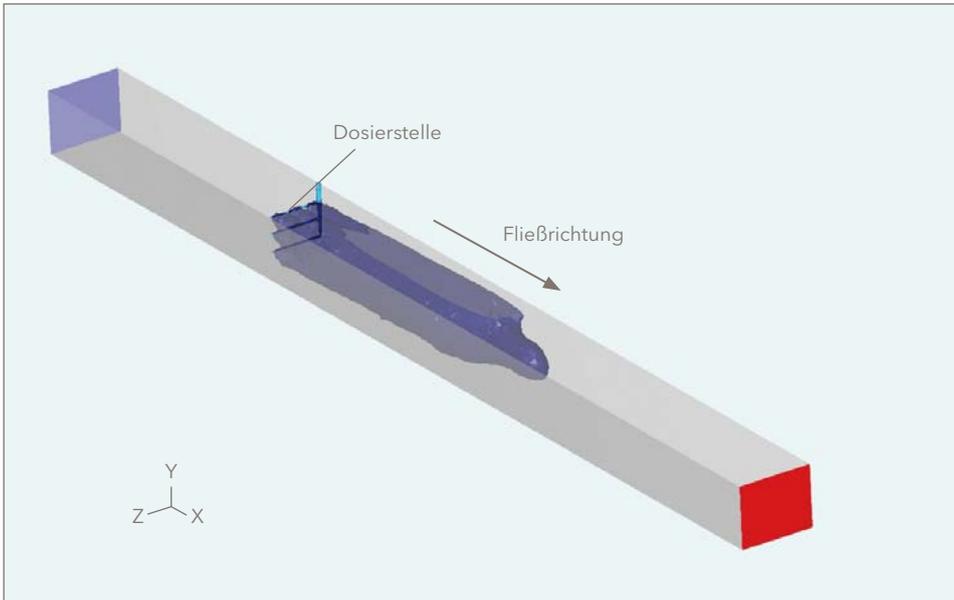


Abbildung 15:
Dosierung der Chemikalie mit
Hilfe von Dosierrohrleitungen

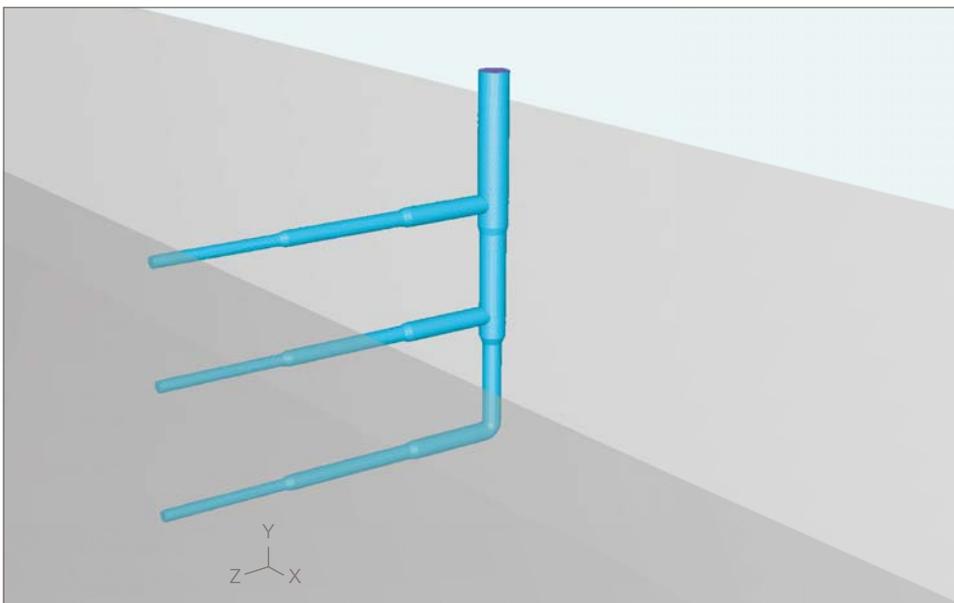


Abbildung 16:
Dosierung der Chemikalie
über Dosierrohrleitungen,
Ausschnitt

3.6 Lüftungstechnisches Konzept für eine Philharmonie

Das untersuchte Gebäude soll in Zukunft zwei Nutzungsarten ermöglichen. Zum einen besteht die Absicht zur Veranstaltung von Konzerten, zum anderen ist die Durchführung von Banketten oder ähnlichen Veranstaltungen geplant. Um die flexible Nutzung zu unterstützen ist der Boden des ansonst über die Sitzreihen ansteigenden Parketts für den Bankettbetrieb komplett in die Horizontale zu fahren. Für den Philharmoniebetrieb hingegen werden die einzelnen Stufen des Parketts in eine elliptisch ansteigende Position gebracht.

Im Rahmen einer Studie ist das geplante Luftführungskonzept, einschließlich der energetischen Konzeptionierung, in einer numerischen Strömungssimulation (CFD) nachgebildet und das resultierende Strömungsbild bewertet worden. Die CFD-Studie beinhaltet die Berechnung der Zu- und Abluftströmungen unter Berücksichtigung der freigesetzten Wärmelasten. Die maßgeblich im Saal freiwerdenden Wärmelasten können grob unterteilt werden in solche der elektrischen Betriebsmittel und in jene, welche

aufgrund der Wärmeabgabe durch den Menschen verursacht werden. Das Modell beinhaltet die Berücksichtigung der Wärmelasten in Form konvektiver Wärme und Wärmestrahlung. Zielgrößen sind die hohen Anforderungen an die Temperierung und Behaglichkeit im Saal.

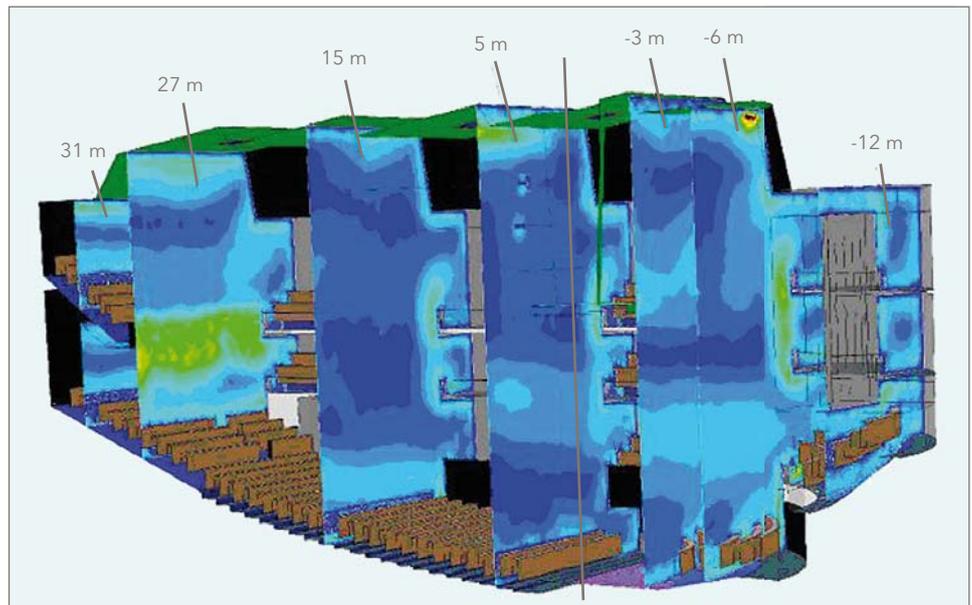


Abbildung 17:
Saal mit Schnittebenen

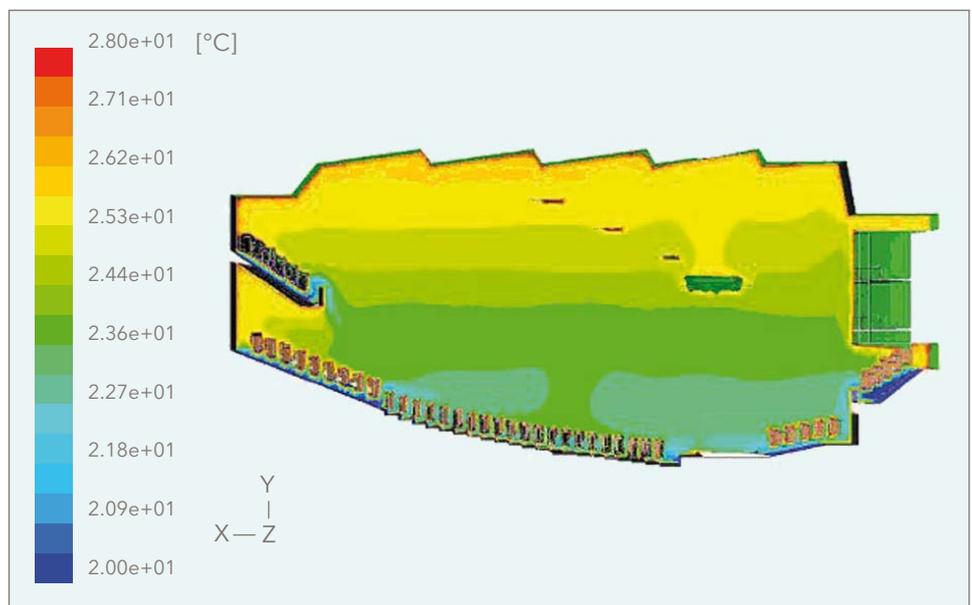


Abbildung 18:
Lufttemperaturen im
Vertikalschnitt

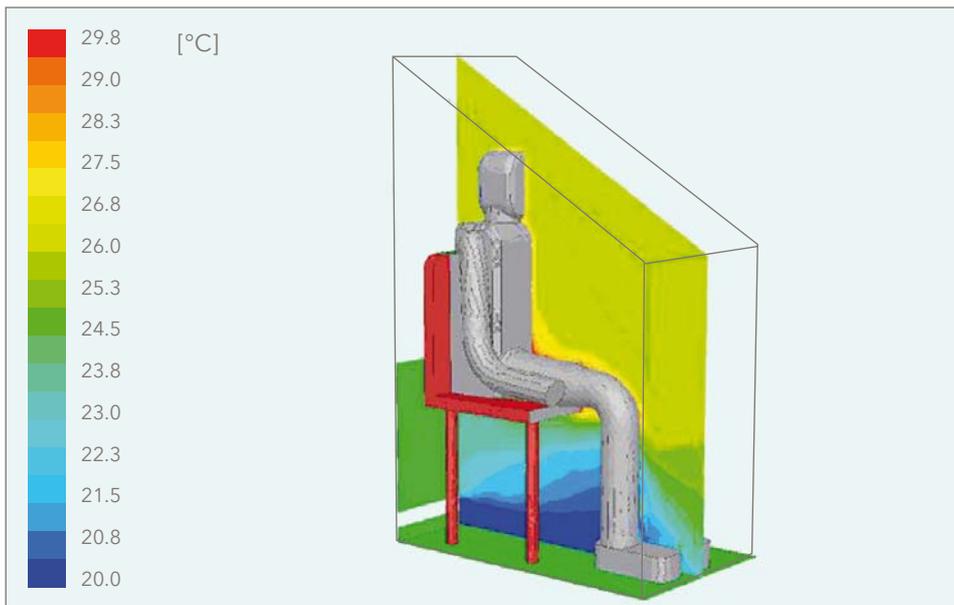


Abbildung 19:
Lufttemperatur im vertikalen
Schnitt am Zuschauer

3.7 Reduktion von diffusen Staubemissionen in einem Stahlwerk

In Elektrostahlwerken wird mit Hilfe von Elektro-Lichtbogenöfen Schrott eingeschmolzen. Die Öfen sind mit einer Primärentstaubung ausgerüstet, die in den Ofendeckel integriert ist. Die aus den Öfen abgesaugten Emissionen werden einer Filteranlage zugeführt. Die Primärentstaubung kann konstruktionsbedingt nur bei geschlossenem Ofendeckel wirksam werden. Für bestimmte Betriebszustände ist die Primärentstaubung daher nicht oder nur bedingt einsetzbar. Aus diesem Grund verfügen die Stahlwerke ergänzend über eine Sekundärentstaubung, die unterhalb des Daches thermisch aufsteigende Emissionen absaugen. Diese Emissionen werden ebenfalls einer Filteranlage zugeführt. Durch die unzureichende Wirksamkeit der Sekundärentstaubung treten seitlich Emissionen in die Halle aus, die durch Rückströmungen in den unteren Raumbereich gelangen und sich diffus über offene Tore, und andere Hallenflächen in die Umwelt ausbreiten.

In einer Studie werden Maßnahmen erarbeitet, um diese Sekundärentstaubung zu verbessern. In einer Bestandsaufnahme werden zunächst Messungen der Volumenströme und Videoaufzeichnungen der einzelnen Betriebszustände an den Elektroöfen angefertigt, deren Auswertung die Analyse der freigesetzten Emissionsströme (Thermikströme) ermöglicht. Auf Grundlage dieser Bestandsaufnahme wird ein physikalisches Ähnlichkeitsmodell im Strömungslabor (Abbildung 20, rechts) sowie ein CFD-Modell (Abbildung 20, links) erstellt, mit Hilfe derer die Luftvolumen- und Wärmeströme im Ist-Zustand realitätsnah simuliert und verbesserte Varianten der Sekundärentstaubung entwickelt werden können. Ziel ist die Verbesserung der Sekundärentstaubung zur Reduzierung diffuser Emissionen in die Umwelt.

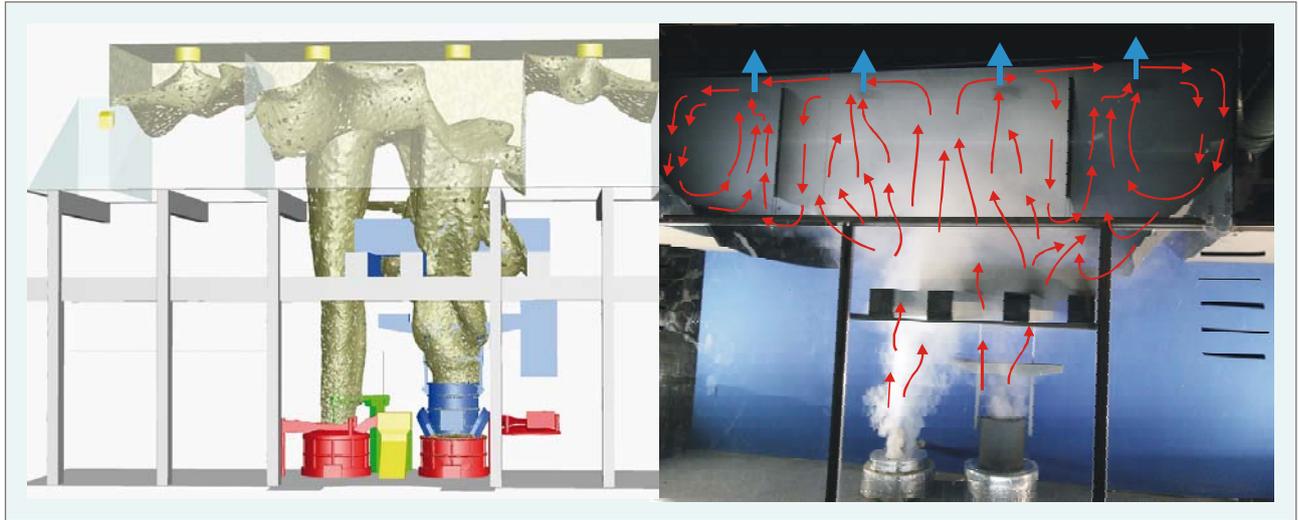
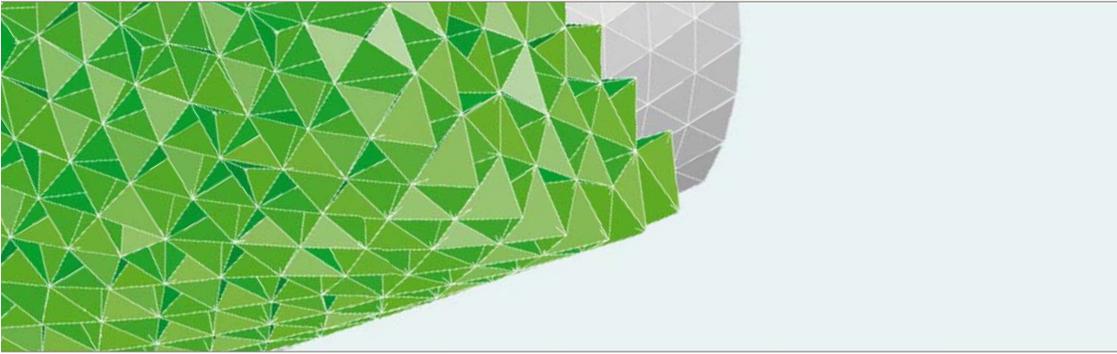


Abbildung 20:
Optimierte Variante
Sekundärentstaubung,
CFD-Modell (links),
Modellbau (rechts)



4. Anhang

4.1 Literatur und Internetadressen

Literatur

Versuchsplanung:

Kleppmann, W.; Brunner, F.
Taschenbuch Versuchsplanung – Produkte und Prozesse optimieren.
Hanser Fachbuchverlag

Klein, B.
Versuchsplanung – DoE. Oldenbourg Wissenschaftsverlag.

Rasch, D.
Planung und Auswertung von Versuchen und Erhebungen.
Oldenbourg Wissenschaftsverlag.

CFD:

Griebel, M.; Dornseifer, T.; Neunhoeffler, T.
Numerische Simulation in der Strömungsmechanik. Vieweg Verlag.

Internetadressen

www.cfd-online.com

www.nafems.org

4.2 Die Projektpartner

**Institut für
Siedlungswasserwirtschaft
und anaerobe
Verfahrenstechnik (ISAV)
der FH Gießen-Friedberg**



Das Fachgebiet Siedlungswasserwirtschaft und anaerobe Verfahrenstechnik ist in den Fachbereich Bauwesen der FH Gießen-Friedberg eingebunden. In Forschung und Lehre werden die nachfolgenden Bereiche abgedeckt: Abwasserableitung, Regenwasserbehandlung, Wassergewinnung und -aufbereitung, Wasserverteilung, Abwasserreinigung, Membrantechnik, Klärschlammbehandlung, anaerobe Abwasser- und Abfallbehandlung, Biogastechnologie, Organisation und Finanzierung von Infrastrukturprojekten, Energieeffizienz von Abwasseranlagen.

In verschiedenen Forschungsvorhaben, finanziert durch das DBU, BMBF, FNR, AiF, Land Hessen, Kommunen und Industrieunternehmen, wurden in den vergangenen Jahren insbesondere Aspekte der Abwasserbehandlung, Membrantechnik, Biogastechnologie sowie Klärschlammbehandlung bearbeitet. Das Fachgebiet wird geleitet von Prof. Dr.-Ing. Ulf Theilen.

**Kessler + Luch
Entwicklungs- und
Ingenieurgesellschaft
mbH & Co. KG**



Die Kessler+Luch Entwicklungs- und Ingenieurgesellschaft (K+L) bietet für den gesamten Bereich der Lufttechnik und der Hygiene in der technischen Gebäudeausrüstung ein umfangreiches Dienstleistungsportfolio. Das Team besteht aus Ingenieuren mit umfangreichen Erfahrungen für Anlagen der Luft- und Wassertechnik im industriellen, verwaltungstechnischen und kommunalen Bereich.

K+L bietet Ingenieur-Know-how sowie langjährige Erfahrung bei der Konzeption von technischen Anlagen. Hierbei arbeitet das Team eng mit dem Kunden zusammen, um optimale Lösungen zu entwickeln. Zum Leistungsspektrum gehören unter anderem CFD-Simulationen für Lüftungstechnische und energetische Konzepte sowie CFD-Simulationen zur Optimierung von wasserbaulichen Anlagen.

**Bauingenieurbüro
Dr. Sonnenburg
GmbH & Co. KG**

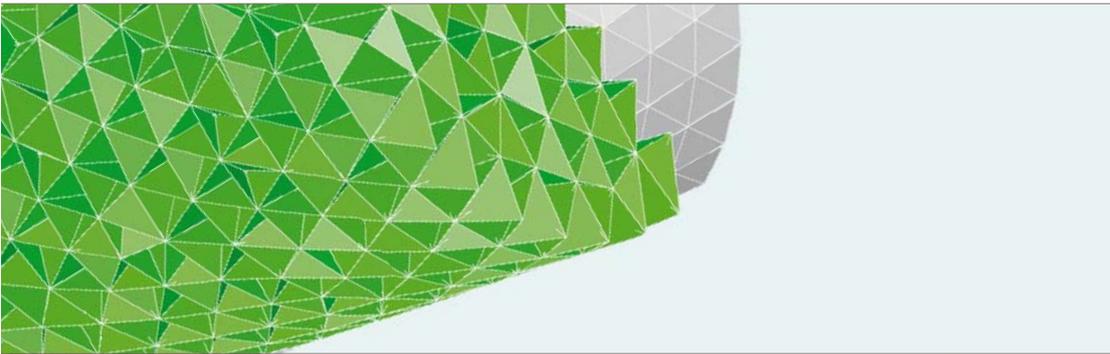


Das Bauingenieurbüro wurde 1962 in Hungen (Hessen) gegründet und ist seitdem bundesweit erfolgreich tätig. Auch Auftraggeber aus Österreich und der Schweiz waren bereits Kunden. Seit 1968 wird in Duisburg-Hamborn (Nordrhein-Westfalen) eine Niederlassung betrieben. Im Jahre 1991 entstand der Standort in Chemnitz-Grüna (Sachsen). Ein erfahrenes Mitarbeiterteam erarbeitet innovative, individuelle und wirtschaftliche Lösungen in den Bereichen der Wasserwirtschaft, der Siedlungswasserwirtschaft sowie der Straßen- und Verkehrsplanung. Neben den klassischen Tätigkeitsbereichen eines Ingenieurbüros wird seit 2006 die numerische Strömungssimulation mit CFD für wasserwirtschaftliche bzw. siedlungswasserwirtschaftliche Anlagen angeboten.

**WERKSTOFF + FUNKTION
Grimmel Wassertechnik GmbH**



Ein erfolgreiches Unternehmen mit Firmensitz im mittelhessischen Ober-Mörlen, welches sich seit Firmengründung im Jahr 1993 durch die Entwicklung innovativer Maschinenteknik zu einem verlässlichen Partner der Betreiber kommunaler und industrieller Abwasserreinigungsanlagen entwickelt hat. Anwender im In- und Ausland bescheinigen den Maschinen, wie zum Beispiel dem Flach-Feinsiebrechen oder der Walzensandfang-Kompaktanlage, ein hohes Maß an Funktionalität und Betriebsfreundlichkeit.



4.3 Hessen ModellProjekte

Im Rahmen der Förderung angewandter Forschungs- und Entwicklungsprojekte werden bis zu 49 % der Projektausgaben von technologieorientierten Vorhaben kleiner und mittlerer Unternehmen (KMU) im Verbund mit weiteren Partnern der Wirtschaft, Hochschulen oder Forschungsinstituten gefördert.

Zur Förderung angewandter Forschungs- und Entwicklungsprojekte stehen derzeit drei Maßnahmenlinien zur Verfügung:

- » **LOEWE – Landes-Offensive zur Entwicklung Wissenschaftlich-ökonomischer Exzellenz mit der Förderlinie 3: LOEWE-KMU-Verbundvorhaben.**
Dieses Förderprogramm besteht seit 2008, wird aus Landesmitteln finanziert. Die Hessen Agentur fungiert als Projektträger für das Hessische Ministerium für Wissenschaft und Kunst (HMWK). Bezuschusst werden hiermit Forschungsvorhaben, die durch kleine und mittlere Unternehmen (KMU) im Verbund mit Hochschulen und Forschungseinrichtungen aus Hessen realisiert werden.
- » **KMU – Modell- und Pilotprojekte, kurz MPP,** für Forschungs- und Entwicklungsprojekte zwischen KMU mit unterschiedlichen Kernkompetenzen mit Vorrang in Nord- und Mittelhessen sowie der Odenwaldregion. Hierzu stehen Mittel des Europäischen Fonds für Regionale Entwicklung (EFRE) zur Verfügung, die durch Mittel des Landes Hessen kofinanziert werden. Die Hessen Agentur fungiert als Projektträger für das Hessische Ministerium für Wirtschaft, Verkehr und Landesentwicklung (HMWVL).
- » **Modellhafte Forschungs- und Entwicklungsprojekte mit Schwerpunkt im Automotivebereich.** Die neue Förderlinie unterstützt die Diversifizierung des Produktsortiments und die Erschließung neuer Märkte. In diesem Rahmen sind neben Verbundprojekt-förderung auch einzelbetriebliche Förderungen möglich. Hierzu stehen Mittel des Landes Hessen zur Verfügung, die durch den Europäischen Fonds für Regionale Entwicklung (EFRE) kofinanziert werden. Die Hessen Agentur fungiert als Projektträger für das Hessische Ministerium für Wirtschaft, Verkehr und Landesentwicklung (HMWVL).

Zur pragmatischen Realisierung von Projektvorhaben berät das Team von Hessen ModellProjekte Unternehmen im Vorfeld einer Antragstellung, ob und unter welchen Rahmenbedingungen ein Projektansatz Aussicht auf eine Förderung hat. Dabei erhalten die Unternehmen auch Hilfestellung bei der Suche nach einem Technologiepartner, einer geeigneten Forschungseinrichtung oder einer alternativen Finanzierungsvariante.



KONTAKT HESSEN MODELLPROJEKTE

Frank Syring
Leiter Hessen Modellprojekte

HA Hessen Agentur GmbH
Abraham-Lincoln-Str. 38-42
65189 Wiesbaden

Tel.: 0611-774-8615
Fax: 0611-774-58615

frank.syring@hessen-agentur.de
www.innovationsfoerderung-hessen.de



4.4 Aktionslinie Hessen-Umweltech und Hessen-PIUS

Die Aktionslinie Hessen-Umweltech ist die zentrale Plattform des Hessischen Wirtschaftsministeriums für die Umwelttechnologiebranche. Sie stärkt die Wettbewerbsfähigkeit und Innovationskraft von hessischen Herstellern und Dienstleistern der Umwelttechnik und fungiert – insbesondere im Hinblick auf den Produktionsintegrierten Umweltschutz (PIUS) – als Schnittstelle zu Umwelttechnologie-Anwendern.

Die Aktionslinie bietet Informationen, Kommunikationsangebote und Kooperationsmöglichkeiten für Umwelttechnologieanbieter und -anwender z. B. aus den Segmenten Abfalltechnologie, Wasser- und Abwassertechnologie, Energietechnologie und Luftreinhaltung. Sie berät Unternehmen, fördert den Technologietransfer und stellt die Kompetenzen der hessischen Umwelttechnologie dar.

Hessen

Umweltech



KONTAKT
HESSEN-UMWELTECH

Aktionslinie Hessen-Umweltech
Dr. Carsten Ott, Projektleiter
Dagmar Dittrich

HA Hessen Agentur GmbH
Abraham-Lincoln-Straße 38-42
65189 Wiesbaden

Tel: 0611-774-8350, -8645
Fax: 0611-774-58350, -58645

carsten.ott@hessen-agentur.de
dagmar.dittrich@hessen-agentur.de
www.hessen-umweltech.de



Folgende Angebote können Unternehmen bei Hessen-Umweltech nutzen:

- » **aktuelle Brancheninfos** im Print-Newsletter Hessen-Umweltech NEWS (vierteljährlich) und in den E-Mail NEWS Hessen-Umweltech (monatlich)
- » **themenspezifische Informationsbroschüren** und Leitfäden
- » **Fachtagungen und Workshops** zum Informationsaustausch und Kontaktknüpfen
- » **Teilnahme an Messeständen**, die von Hessen-Umweltech organisiert werden
- » **Innovationsradar Umweltrecht**: aktuelle Information über Marktpotenziale, die sich durch Änderungen des Rechtsrahmens ergeben
- » **Hessen-PIUS**: Vermittlung von Informationen und geförderten Beratungen zum Produktionsintegrierten Umweltschutz in Hessen
- » **zentraler Ansprechpartner** und Lotse für alle Fragen aus dem Bereich Umwelttechnologie

Mit der Durchführung der Aktionslinie Hessen-Umweltech ist die HA Hessen Agentur GmbH beauftragt. Die 100-prozentige Landestochter bündelt alle nicht-monetären Aktivitäten der hessischen Wirtschaftsförderung. Die Aktionslinie Hessen-Umweltech stellt für den Bereich Umwelttechnik die zentrale Schnittstelle dar und arbeitet im Rahmen ihrer Lotsenfunktion unter anderem mit folgenden Einrichtungen eng zusammen:

- » Hessen Modellprojekte,
- » TechnologieTransferNetzwerk (TTN),
- » Beratungszentrum für Wirtschaftsförderung,
- » hessische Anlaufstelle für das „Enterprise Europe Network“,
- » Transferstelle Internationaler Emissionshandel Hessen und
- » Wasserstoff- und Brennstoffzellen Initiative Hessen.

Innovationsradar Umweltrecht

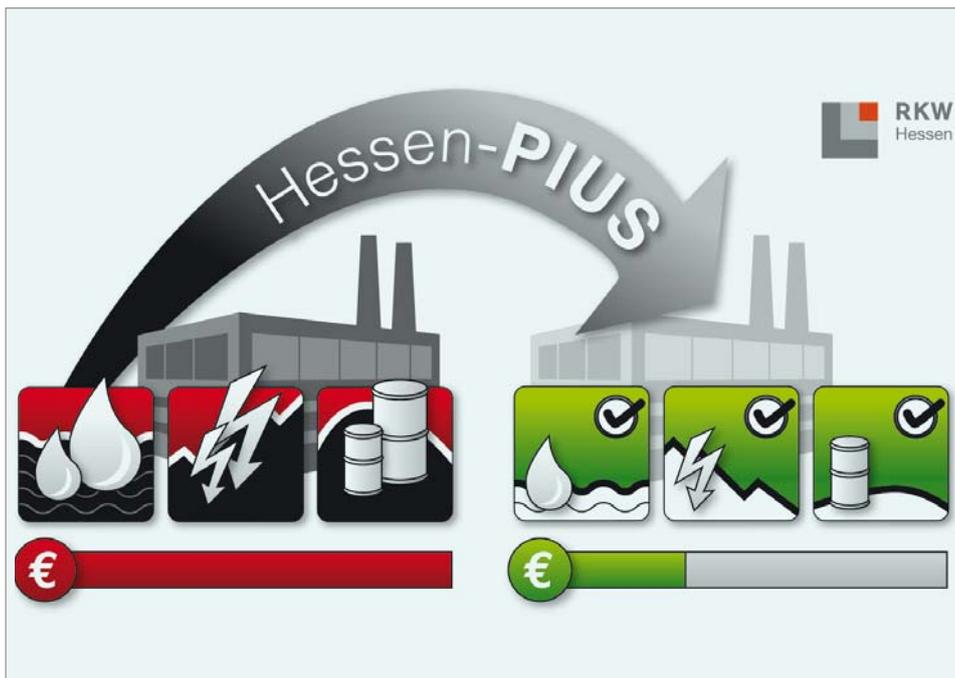
Ein besonderer Service der Aktionslinie Hessen-Umweltech ist das Innovationsradar Umweltrecht. Ausgehend von der Überlegung, dass Umweltrecht wirtschaftliche Impulse setzt, die die Entwicklung und Anwendung innovativer Technologien vorantreiben, bietet das Innovationsradar einen aktuellen Überblick zu rechtlichen Neuerungen und deren wirtschaftliche Bedeutung für unterschiedliche Umwelttechnologie-Segmente. Es steht in einer regelmäßig aktualisierten Version auf der Homepage der Aktionslinie Hessen-Umweltech zur Verfügung. Darüber hinaus erscheint in den Hessen-Umweltech NEWS alle drei Monate eine Zusammenfassung der wichtigsten marktrelevanten Rechtsakte.

www.hessen-umweltech.de (Rubrik Innovationsradar Umweltrecht)

Hessen-PIUS®: Umwelt schützen - Kosten senken

Für Unternehmen wird es immer wichtiger Ressourcen wirtschaftlich einzusetzen. Der Produktionsintegrierte Umweltschutz (PIUS) bietet hier ein wirksames Instrument und eröffnet sowohl Umwelttechnik-Anbietern als auch -Anwendern interessante Chancen. Aus diesem Grund hat das Hessische Wirtschaftsministerium ein PIUS-Beratungsprogramm für kleine und mittlere Unternehmen in Hessen gestartet. Ziel ist es, durch die Optimierung unternehmensinterner Prozesse einen effizienten Umgang mit Ressourcen wie Energie, Wasser, Luft, Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffen zu erreichen und damit Kosten einzusparen. Die Projektdurchführung des PIUS-Beratungsprogramms liegt bei der RKW Hessen GmbH.

Die Aktionslinie Hessen-Umwelttech koordiniert alle weiteren Aktivitäten zu Hessen-PIUS und ist seit 2008 Kooperationspartner am mit rund 25.000 Einzelnutzungen pro Monat meistgenutzten PIUS-Portal Deutschlands www.pius-info.de. Betrieb und finanziert wird das PIUS-Portal gemeinsam mit der Effizienz-Agentur NRW (EFA) in Duisburg und der Sonderabfall-Management-Gesellschaft Rheinland-Pfalz mbH (SAM) in Mainz.



Geförderte Beratung:

Die Förderung des Hessischen Wirtschaftsministeriums und des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung für eine PIUS-Beratung kann pro kleinem oder mittlerem Unternehmen bis zu 8.000 Euro (9.000 Euro in EFRE-Vorranggebieten) innerhalb von 3 Jahren betragen. Dabei deckt das Programm nicht nur die Verbesserung von Produktionsprozessen ab, sondern zeigt auch Chancen für eine umweltfreundliche und effiziente Ausrichtung von Dienstleistungs- und Handelsunternehmen auf.

PIUS® ist ein eingetragenes Warenzeichen der Effizienz-Agentur NRW.



KONTAKT
RKW HESSEN GMBH

RKW Hessen GmbH
Kay Uwe Bolduan,
Jürgen Müller

Düsseldorfer Str. 40
65760 Eschborn

Tel.: 06196-9702-40
Fax: 06196-9702-99

pius@rkw-hessen.de
www.rkw-hessen.de
www.hessen-pius.de

Schriftenreihe

der Aktionslinie Hessen-Umwelttech des
Hessischen Ministeriums für Wirtschaft, Verkehr
und Landesentwicklung

**Band 1 Einsatz von Nanotechnologie in
der hessischen Umwelttechnologie**
Innovationspotenziale für Unternehmen
(gemeinsam mit der Aktionslinie
Hessen-Nanotech)

**Band 2 Mittel- und Osteuropa - Zukunftsmärkte
für hessische Umwelttechnologie**
Beispiel Abwassermarkt der Slowakei

**Band 3 Auslandsmärkte - Zukunftspotenziale für
hessische Umwelttechnologieunternehmen**

**Band 4 Unternehmenskooperation am
Beispiel des Recyclings gemischter
Bau- und Abbruchabfälle**

**Band 5 Produktionsintegrierter
Umweltschutz (PIUS) für KMU in Hessen**
- Umwelt schützen - Kosten senken

**Band 6 Umwelttechnologie-Anbieter in Hessen
Bestandsaufnahme 2007**
- Zusammenfassung

**Band 7 Umwelttechnologieforschung für
die Unternehmenspraxis -
Beispiele anwendungsnaher Forschung
an hessischen Hochschulen**

**Band 8 Praxisleitfaden -
Energieeffizienz in der Produktion**

**Band 9 Strömungssimulation in
der Umwelttechnologie**
Effiziente Versuchsplanung mit CFD
(Computational Fluid Dynamics)

Informationen/
Download/
Bestellung

www.hessen-umwelttech.de



HessenAgentur

HA Hessen Agentur GmbH

Hessen

Umwelttech

www.hessen-umwelttech.de