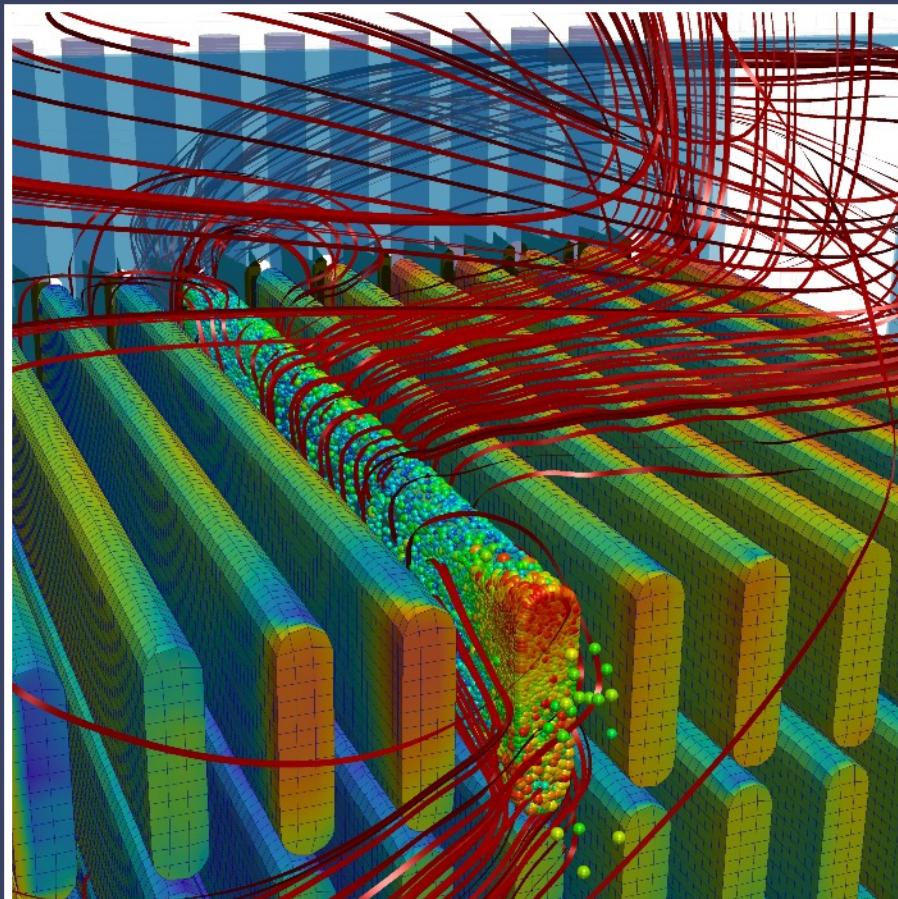




## CFD-Löser für Filteranwendungen



# DHCAE CFD-Löser für Filteranwendungen

Strömungssimulationen (CFD) werden vielfach eingesetzt, um Bauteile und Prozesse zu optimieren. DHCAE hat eine umfangreiche Erweiterung der renommierten CFD-Toolbox OpenFOAM® vorgenommen, um gezielt Filteranwendungen zu modellieren und die Anströmung und Auslegung von Filtern zu optimieren.

## Typische Anwendungsgebiete in der Filterentwicklung, -herstellung und im Anlagenbau:

Das Simulationstool kann überall dort eingesetzt werden, wo feste Partikel aus Gasen oder Flüssigkeiten mit dünnen Filtermedien in einer Anlage oder einem Gerät abgetrennt werden.

Typische Einsatzbereiche sind hierbei:

- **Luft-Filtrationsprozesse**, z.B. für Abgasreinigung, Säuberungsgeräte, Atemschutz, Raumreinhaltung
- **Flüssigkeits-Filtrationsprozesse**, z.B. für Wasserreinhaltung, Klärprozesse, Ölaufbereitung, Treibstoffreinigung
- sowie komplett Anlagen zur Luftreinhaltung oder Geräte, in denen dünnwandige Filter verwendet werden.

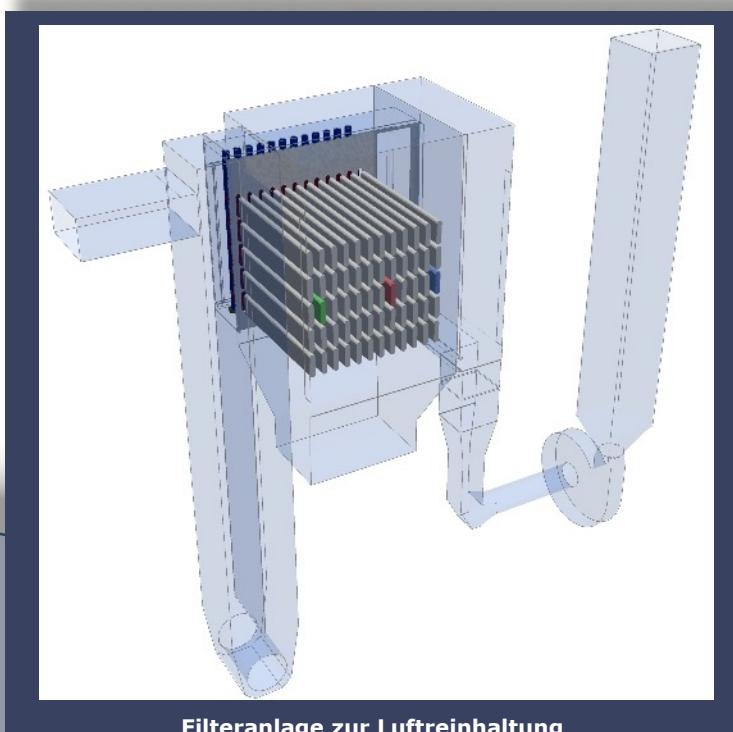
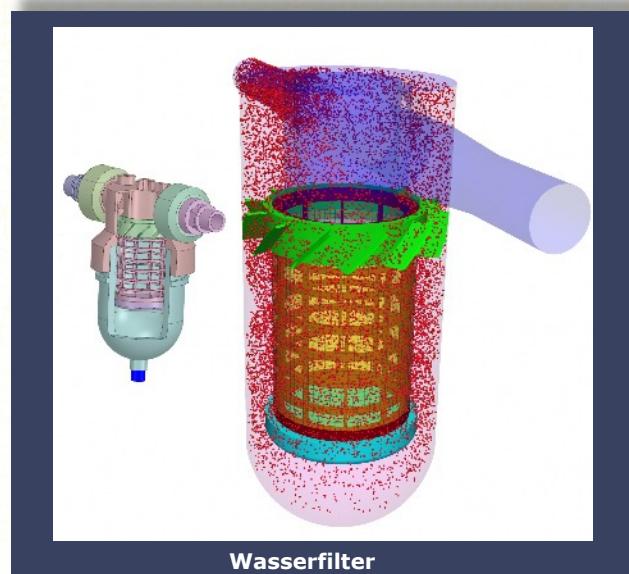
## Ihr Nutzen aus der Filtermodellierung:

Bereits in der Entwicklung, ohne einen Prototyp zu bauen, kann die Anströmung an den Filter optimiert werden. Dies führt zu einer

- höheren Filtereffizienz,
- besseren Ausnutzung des Filtermaterials und
- einer energetischen Prozessoptimierung durch einen geringeren Druckverlust.

## Modellierungsansatz

Die verwendete Modellierung beruht auf einem sogenannten Euler-Lagrangeschen Ansatz, der die kontinuierliche Strömung und die dispergierten Feststoffpartikel berücksichtigt. In dem Berechnungstool wird insbesondere die Rückwirkung der Partikel am Filter auf die Strömung, wie z.B. eine fortlaufende Verlagerung der Strömung in Zonen niedrigeren Widerstands, berücksichtigt.



Durch den gewählten Modellierungsansatz kann ein breites Spektrum an Anwendungsfällen abgedeckt werden:

Die Partikel können

- unterschiedliche Größen aufweisen (Berücksichtigung von Größenverteilungen),
- eine von der kontinuierlichen Strömung abweichende Bahnkurve verfolgen (z.B. aufgrund ihrer Trägheit, turbulenter Dispersion, Erdschwere oder anderen Kräften).

Die kontinuierliche Phase des Trägermediums kann ein Gas oder eine Flüssigkeit sein. Es können sowohl einzelne Filter als auch eine Vielzahl von Filtern mit unterschiedlichen Eigenschaften (wie z.B. unterschiedlicher Widerstands-Charakteristik) vorgegeben werden.

# DHCAE Tools Erweiterungen für Filteranwendungen auf Basis der OpenFOAM®-Technologie

Das OpenFOAM®-Basissystem wurde von DHCAE Tools mit gezielten Modellerweiterungen an die Bedürfnisse der Industrie für Filterentwicklung und -herstellung angepasst. Diese Erweiterungen wurden in den von DHCAE Tools angepassten Lösern für die Filterindustrie bereits vorgenommen und werden Ihnen als Pakete vollständig zur Verfügung gestellt.

## Filtermodell: Beladungsabhängiger Widerstand

Der Filter wird durch eine Geometrie oder Gitterfläche detektiert. Dies ermöglicht eine einfache Erstellung im CAD-System und stellt eine weit geringere Anforderung an die Netzgenerierung als eine volumenbasierte Modellierung.

Basierend auf dieser Definition werden zwei Lösungsansätze zur Verfügung gestellt:

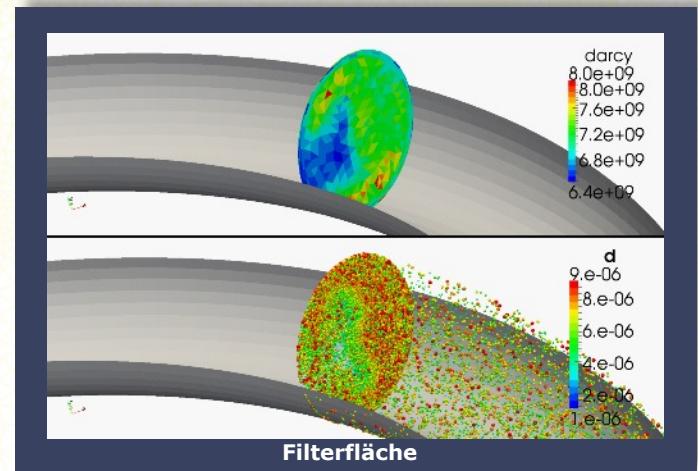
- Der Anwender kann sowohl den Grundwiderstand des unbeladenen Filters als auch die Widerstandserhöhung durch die Partikel durch die Flächenformulierung beschreiben.
- Der Grundwiderstand kann durch eine automatisch detektierte Volumenmodellierung vor und hinter dem Filter abgebildet werden, während die Widerstandserhöhung durch die Partikelbeladung durch die Fläche modelliert wird.

Mit den beiden Optionen lässt sich ein weites Spektrum mit unterschiedlichen Filtern, die stark unterschiedliche Grundwiderstandswerte aufweisen, numerisch effizient abbilden.

## Filterflächeneigenschaften

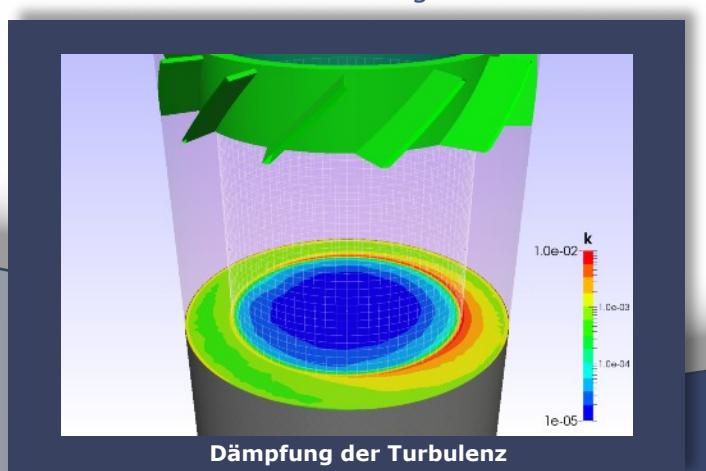
Für die weitere Modellierung werden in jeder dieser Flächen gespeichert:

- Lokale Partikelbeladung (z.B. Masse pro Kubikmeter)
- Anzahl der Partikeltreffer zur Beurteilung der statistischen Zuverlässigkeit der Ergebnisse
- Darcy & Forchheimer-Anfangswerte
- Variable Darcy & Forchheimer-Werte, abhängig von der Filterbeladung
  - Masse
  - Partikelgröße
  - Zeitraum der Beladung



## Kernfunktionalität

- Die Simulation berücksichtigt die veränderlichen lokalen Widerstände auf den Filterflächen.
- Es stehen verschiedene Widerstands-Charakteristika zur Verfügung.
- Es können mehrere verschiedene Partikelarten in das System eingegeben werden, die unterschiedlich mit dem Filter interagieren (z.B. können sehr kleine Partikel auch Filter passieren).
- Die Strömung kann beim Durchfließen des Filters umgelenkt werden, so dass das Fluid flächennormal abströmt.
- Die Turbulenz kann beim Durchströmen des Filters gedämpft werden.

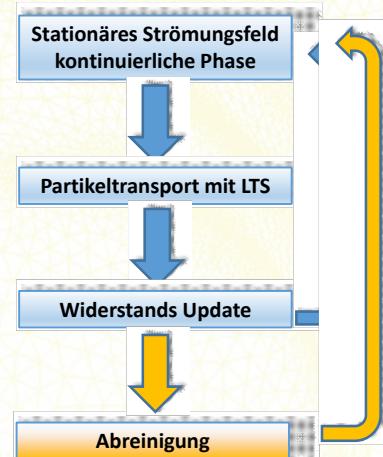


# Das Lösungsverfahren

## Allgemeiner Iterationsprozess

Das Ablagerungsmodell an Filterflächen mit Partikeltransport ist in einen Iterationsprozess mit der kontinuierlichen Phase integriert. Damit können die Wechselwirkungen der kontinuierlichen Phase mit einem oder mehreren Filtern berücksichtigt werden.

1. Bei der Berechnung mit dem Filtersolver wird im ersten Schritt das Strömungsfeld der kontinuierlichen Phase gelöst. Hier werden die Druck- und Geschwindigkeitsfelder für den unbefeuerten Filter berechnet.
2. Anschließend wird eine kleine Menge an Partikeln hinzugegeben und deren Endposition berechnet. Diese Position kann das Anhaften am Filter oder auch deren Ablagerung im Gehäuse sein.
3. Die am Filter abgelagerten Partikel erhöhen lokal den Widerstand gemäß einer vorgegebenen Charakteristik.
4. In einer iterativen Schleife wird die Rückwirkung auf die kontinuierliche Phase, wie z.B. eine Verlagerung der Strömung, berechnet. Die neu eingegebenen Partikel erhöhen an ihrem neuen Ablagerungsort auf dem Filter den Widerstand weiter. Der iterative Prozess zwischen lokaler Widerstandszunahme und Strömungsverlagerung wird solange fortgesetzt, bis die Gesamtmenge an gewünschter Partikelmasse hineingegeben wurde.
5. Auch kann die bei einigen Filtrationsprozessen übliche Abreinigung mit Start von einem neuen Grundzustand her berücksichtigt werden.



## Stabile und schnelle Berechnung

In diesen Iterationsprozess wurde eine Vielzahl von Maßnahmen zur Stabilisierung und Berechnungsbeschleunigung integriert:

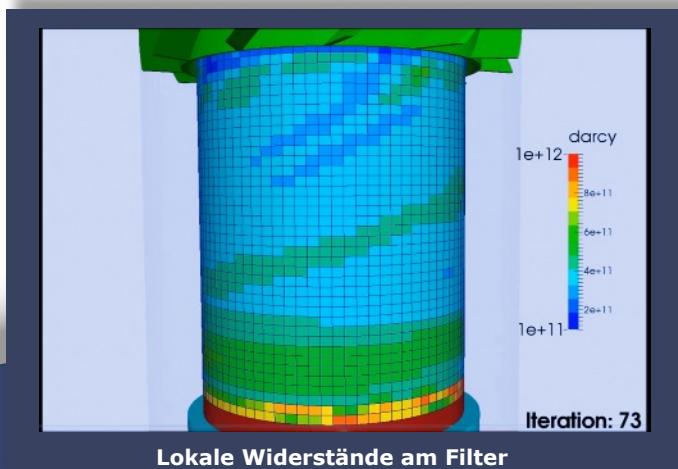
- Filterstabilisierung (z.B. durch lokale Unterrelaxation)
- Verbesserte parallele Berechnung des Partikeltransports
- Verschiedene Möglichkeiten der Iterationskontrolle bei der Kopplung

## Ihre Eingabedaten in die Berechnung sind hierbei:

- Eintrittsgeschwindigkeit in der kontinuierlichen Phase, wie z.B. ein Gas oder Flüssigkeitsvolumenstrom mit Stoffwerten (Viskosität, Dichte)
- Eine Partikeldichte, -menge und -größe oder auch eine Größenverteilung
- Die charakteristischen Eigenschaften Ihres Filters, beispielsweise der Grundwiderstand im unbefeuerten Zustand und die Widerstandserhöhung bei Partikelbeladung, wie sie im Versuchsstand ermittelt wurden.

## Ergebnis der Simulation:

- Die lokale Beladung der Filter als Masse oder Massenanteil
- Die lokalen Widerstände
- Die Drücke und Stromlinien für die kontinuierliche Phase
- Die allmähliche Verlagerung der Strömung durch lokale Widerstandserhöhung am Filter während eines Zyklus

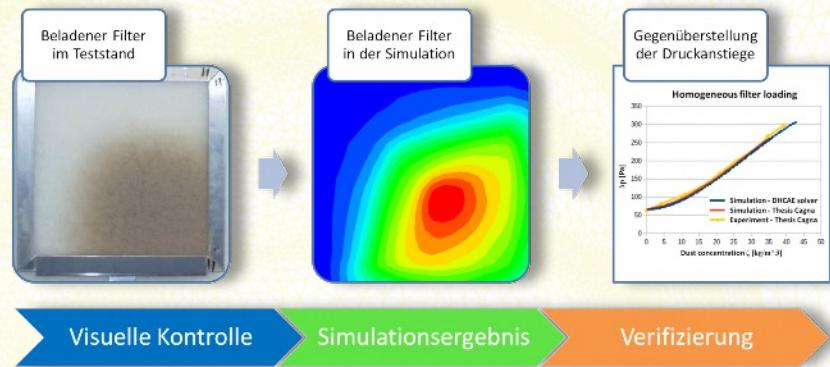


## Validierung an Realwelt-Anlagen

Die Modellierungsansätze am Filterelement wurden durch Reproduktion von Literaturdaten validiert.

### Verifizierung mit Literatur-Quellen

Die hier entwickelten Teil-Modelle wurden an Literaturbeispielen verifiziert. Hierzu diente beispielsweise die Arbeit von Michele Cagna [1]. Unter Laborbedingungen konnten hier die lokale Partikelverteilung, Widerstandserhöhung und Strömungsverlagerung sowohl numerisch als auch experimentell abgebildet werden.



Der Druckanstieg bei der homogenen Partikelbeladung konnte exakt nachgebildet werden, so dass der Nachweis der richtigen Modellumsetzung erbracht werden konnte. Ebenso konnte die Partikelablagerung bei einer inhomogenen Partikelbeladung in der Simulation gut wiedergegeben werden.

[1] Cagna, M. (2003). Numerische Modellierung des zeitlichen Verhaltens von Strömungen in der Umgebung von Tiefenfiltern. Dissertation, Universität Karlsruhe.

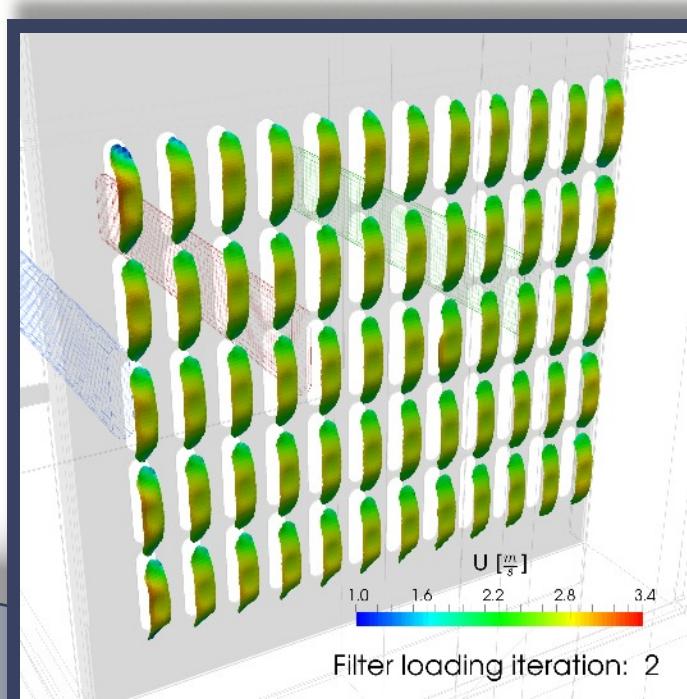
### Realwelt-Anlagen

Darüber hinaus steht uns für die explizite Nutzung zu Validierungszwecken eine Versuchsanlage mit 60 Taschenfiltern und Filterabreinigung mittels Druckstoß zur Verfügung.

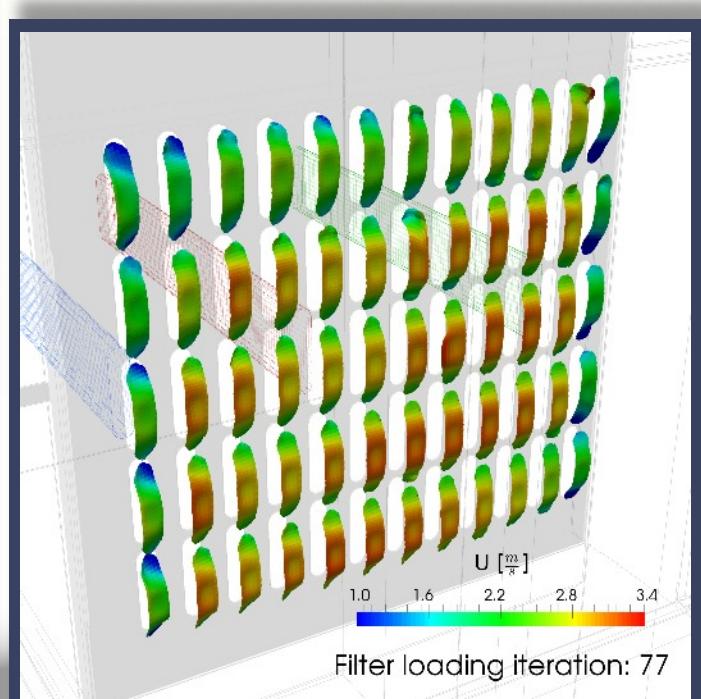
Hier werden im Rahmen von Master-Arbeiten die numerischen Modelle validiert und zusätzliche Effekte, wie z.B. der Einfluss von Fluid-Struktur-Interaktion, genauer untersucht. Neu gewonnene Erkenntnisse und die gesammelten Erfahrungen fließen direkt in die weitere Softwareentwicklung ein.

### Strömungsverlagerung durch beladungsabhängigen Widerstand

Die steigenden Tendenzen der Strömungsgeschwindigkeit in den inneren Filtern respektive die fallenden Tendenzen in den äußeren Filtern konnten in der Simulation korrekt reproduziert und damit die kontinuierliche Strömungsverlagerung nachgewiesen werden. Durchgeführte Messungen der Filterströmungen zeigten, dass sich die äußeren Filter zuerst mit Partikeln zusetzten. Die Gasströmung verlagerte sich dann zunehmend in den Innenbereich des Filterblocks.



Strömungsverlagerung an Filtern: In den ersten Beladungszyklen werden die äußeren Schlauchfilter stärker durchströmt.

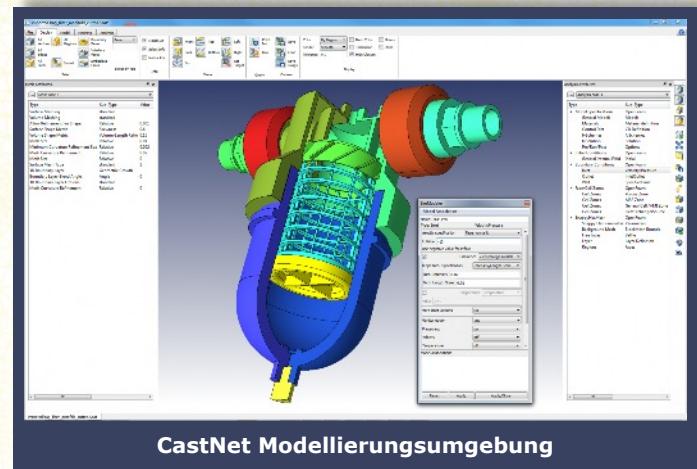


In den späteren Beladungszyklen hat sich der Widerstand auf den äußeren Filtern erhöht und die inneren Schlauchfilter werden stärker durchströmt.

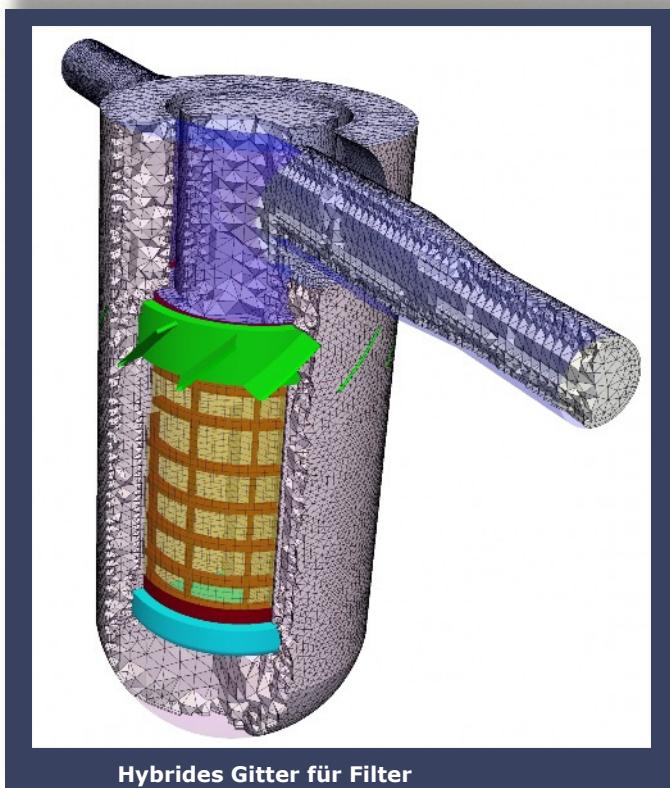
## CastNet Integration

Zum Arbeiten mit dem Filtersolver stehen dem Anwender zwei Möglichkeiten zur Verfügung:

- Das textfile-basierte Arbeiten, wie unter OpenFOAM® üblich. Diese Arbeitsweise eignet sich für erfahrene OpenFOAM®-Anwender, oder wenn Sie bereits einen CFD-Workflow für OpenFOAM® in Ihrem Unternehmen integriert haben.
- Alternativ können Sie Ihren Filterberechnungsfall in CastNet definieren: CastNet ist ein von DHCAE Tools entwickeltes Pre-Prozessing- und Berechnungskontrollsysteem für die frei verfügbaren CFD/FEA-Systeme OpenFOAM® und CalculiX. Durch gezielte Anpassungen und Erweiterungen von OpenFOAM® für Filteranwendungen wurde von DHCAE Tools ein kosteneffizientes, zuverlässiges und stabiles Auslegungswerkzeug für die Filterindustrie geschaffen.



Sollten Sie neben Filtern andere Anwendungsbereiche im Bereich der Strömungssimulation oder Strukturmechanik besitzen, können Sie diese ebenfalls mit CastNet modellieren: Es steht Ihnen der volle Funktionsumfang zur Verfügung.



Hybrides Gitter für Filter

## Vernetzung für Filteranwendungen

In CastNet werden die Modelle aus Ihrem CAD-System im hochwertigen CAD-Kernel-Format eingelesen und stehen dort zur Vernetzung und Definition der Lösereinstellungen zur Verfügung.

Die von CastNet bereitgestellten Vernetzungs-technologien ermöglichen die Berücksichtigung unterschiedlicher Anforderungen an die Gittergenerierung:

- In der hybriden Vernetzung können durch Prismen-Layer auf den Filtern Details und Drucksprünge besonders gut aufgelöst werden. Hexaeder-Kern-Gitter führen zu zuverlässigen und stabilen Ergebnissen. Wandnahe Bereiche werden mit Prismen-Boundary-Layern vernetzt.
- Alternativ steht die Netzgenerierung mit snappyHex-Mesh in CastNet zur Verfügung. Mit wenigen Minuten Definitionsauwand können auch sehr große, hexaeder-dominante Gitter für komplexe Filteranordnungen auf mehreren CPU-Kernen parallel generiert werden.

## Modellierung für Filteranwendungen

Die Modellierung für Filteranwendungen wird dem Anwender besonders einfach gemacht:

- Die Filterflächen können direkt im CAD-Modell angewählt werden.
- Die Definition der Filterparameter und der Lösungseigenschaften in der Kopplung der Partikel mit der kontinuierlichen Phase wird direkt im GUI vorgenommen.
- Durch vorgefertigte oder eigenerstellte Templates ist der Berechnungsfall mit wenigen Klicks definiert.
- Der gesamte Prozess mit allen Ausgabedateien ist in den automatischen Workflow integriert.

## Maßgeschneiderte Anwendungspakete

### Support und Anpassung inklusive:

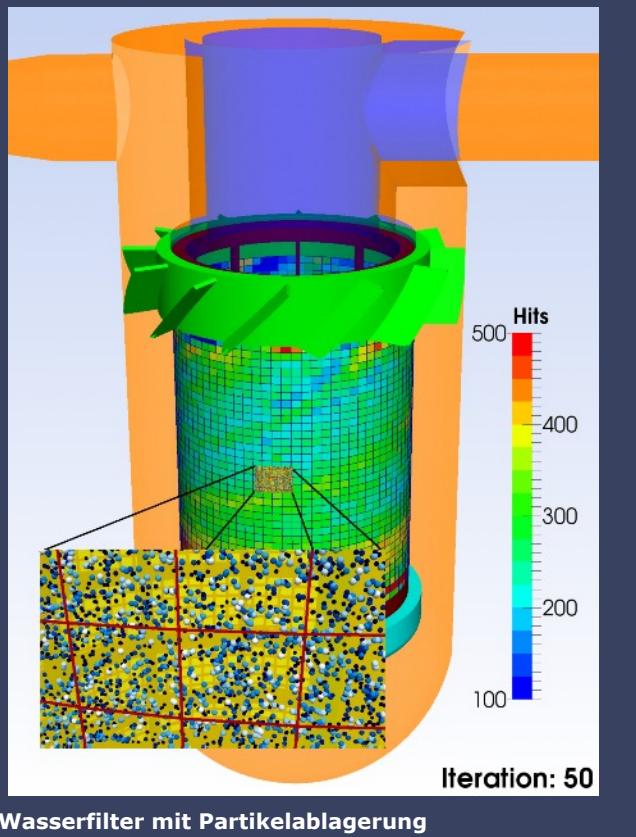
In das Paket für den Filtersolver ist immer ein Support- und Anpassungspaket eingeschlossen. Hiermit passen wir die Lösungsmöglichkeiten des Tools an Ihre speziellen Bedürfnisse an. Sollten Sie z.B. eine spezielle Form der Beladungs-Charakteristik für Ihre Filter benötigen, wird diese unmittelbar von uns umgesetzt. Auch unterstützen wir Sie in der Anwendung des Solvers.

### Training:

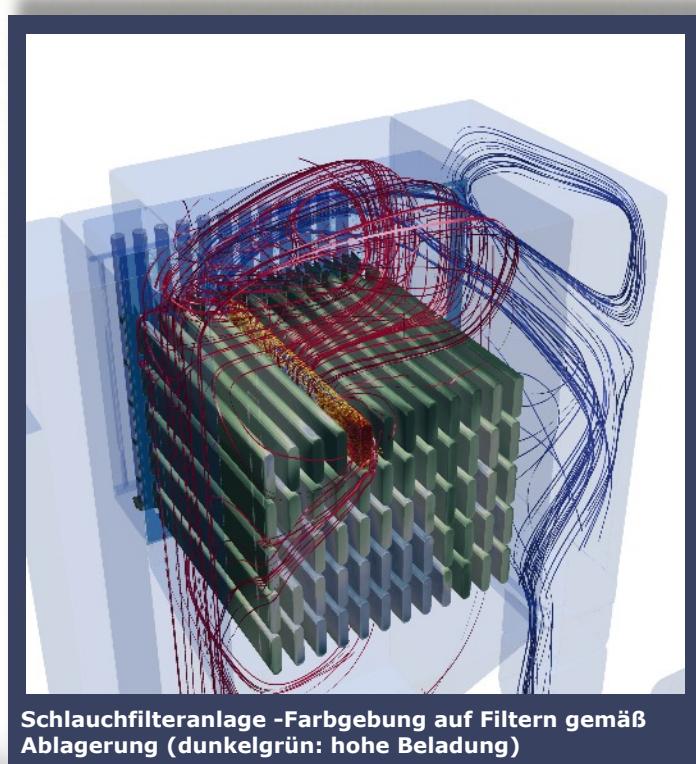
Auf Wunsch trainieren wir Sie direkt im Umgang mit dem Filtersolver oder auch für andere CFD-Anwendungen mit OpenFOAM®, die Sie selbstverständlich mit dem System ebenfalls durchführen können. Wir bieten regelmäßig Kurse in unserem Büro in Krefeld als auch vor-Ort Trainings direkt bei Ihnen mit Inhalten, speziell für Ihre Anwendungen.

### Eine Testumgebung steht für Sie bereit:

Für einen Test der Filtersimulation steht Ihnen eine komfortable Testumgebung mit Beispielen über das Internet zur Verfügung. Hier können Sie auch Ihre Filteranwendung direkt testen und abschätzen, welche Hardwareressourcen später für Sie erforderlich sein werden.



Wasserfilter mit Partikelablagerung



Schlauchfilteranlage -Farbgebung auf Filtern gemäß Ablagerung (dunkelgrün: hohe Beladung)

### Simulationsumgebung:

Auf Wunsch erhalten Sie von uns auch das Komplettsystem (inkl. OpenFOAM®-Installation). Wir empfehlen eine Linux-Workstation als Simulationsumgebung.

Alternativ steht eine Solverumsetzung in einer vollständigen Windowsumgebung auf Basis der OpenFOAM®-Portierung BlueCFD zur Verfügung.

Darüberhinaus können Sie unseren direkten Cloud-Zugang verwenden und Berechnungen auf externen Rechenzentren durchführen. Hier erhalten Sie bedarfsgerechte Rechenkapazitäten einer optimierten Simulationsumgebung ohne Ihren lokalen Rechner zu blockieren. Dieser Zugang steht sowohl von Linux als auch über die Windows-Implementierung direkt aus der grafischen Benutzeroberfläche zur Verfügung.

Im Lieferumfang sind selbstverständlich die OpenFOAM®-Quellcodes enthalten.

### Wissenschaftliches Förderprogramm

Das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie unterstützt unsere innovativen Entwicklungen zur Filtermodellierung durch eine Förderung im „ZIM-Programm“.





### DHCAE Tools GmbH

Adresse: Friedrich-Ebert-Str. 368  
Telefon: +49 2151 9490-200  
Webseite: [www.dhcae-tools.de](http://www.dhcae-tools.de)

47800 Krefeld, Deutschland  
Fax: +49 2151 9490-209  
E-Mail: [info@dhcae-tools.de](mailto:info@dhcae-tools.de)