

# Entwicklung von Geweben als Filtermedien unter Berücksichtigung der numerischen Strömungssimulation

S. Ripperger, K. Schmidt\*

Mit Programmen zur numerischen Strömungssimulation bzw. zur Computational Fluid Dynamics (CFD) können Strömungsfelder und daran gekoppelte Vorgänge innerhalb von Apparaten und Maschinen simuliert und visualisiert werden. Es bietet sich an, diese Werkzeuge auch verstärkt zur Entwicklung von Filtermedien zu nutzen. Die dabei zu berücksichtigenden Besonderheiten bei Filtermedien werden im Folgenden behandelt.

## 1. Einleitung

Im Bereich der Technik beinhaltet eine Simulation die Berechnung von komplexen Vorgängen auf Basis von mathematischen Gleichungen. Die Gleichungssysteme, welche die Vorgänge beschreiben, werden dabei meist numerisch gelöst. So wird z. B. die numerische Strömungssimulation bzw. Computational Fluid Dynamics (CFD) zunehmend zur Analyse und Entwicklung technischer Systeme angewendet. Es werden damit Strömungsfelder und daran gekoppelte Vorgänge innerhalb von Apparaten und Maschinen simuliert und visualisiert. Die CFD liefert numerische Lösungen der Erhaltungsgleichungen von Impuls, Masse und Energie unter Berücksichtigung der Eigenschaften der fluiden Phase. Meist handelt es sich dabei um ein newtonsches Fluid, das in Form einer laminaren oder turbulenten Strömung durch den Strömungskanal bzw. ein Porensystem strömt. Das Lösen der Gleichungen für sehr viele kleine Berechnungszellen, welche die Geometrie des Strömungsraums ausfüllen, ermöglicht es die Strömung und daran gekoppelte Vorgänge der Stoff- und Wärmeübertragung zu simulieren. Man nutzt dabei u. a. den Vorteil, dass damit bereits Strömungsprofile vor der Realisierung der Bauteile erfasst und die sich aus der Strömung ergebenden Druckverluste berechnet werden können. Die Strömung kann auch räumlich aufgelöst dargestellt werden. Dieser vertiefte Einblick erlaubt es, auch Filtermedien und Filtereinheiten besser an die jeweils vorliegenden Bedingungen in der Praxis anzupassen und zu optimieren.

Bevor die Simulation einer Strömung erfolgen kann, muss die geometrische Form des Strömungsraums erfasst bzw.

festgelegt werden. Im Fall eines textilen Filtermediums betrifft dies die Porenmorphologie, welche die wesentlichen funktionalen Eigenschaften eines Filtermediums bestimmt. Dazu gehören insbesondere die Abscheidewirkung gegenüber Partikeln und der Durchströmungswiderstand gegenüber Fluiden, welche das Filtermedium bei einer Druckbeaufschlagung durchströmen. Die komplexen Zusammenhänge zwischen der 3D-Porenstruktur von Geweben und ihren Permeabilitäts- und Retentionseigenschaften werden im Rahmen einer traditionellen Entwicklung meist experimentell bestimmt. Auf diese Weise wird bei Geweben mit multifilen Garnen der Einfluss der auftretenden Mikroporen (Poren im Garn) und Mesoporen (Poren zwischen den Garnen) erfasst und auch die bei der Herstellung und Weiterverarbeitung auftretenden Faden- und Faserverformungen berücksichtigt. Für die anforderungsgerechte Entwicklung von Filtermedien ist daher ein hoher experimenteller Aufwand erforderlich, da optimale Retentions- und Permeabilitätseigenschaften nach der Trial-and-Error-Methode eingestellt werden.

Strukturgeneratoren, die es ermöglichen die Geometrie und Porenmorphologie von Geweben auf Basis von Gewebeparametern (z. B. Bindungsart, Fadendurchmesser bzw. Filament Durchmesser und -anzahl, Maschenweite) virtuell zu erzeugen, können in Verbindung mit der Strömungssimulation die Entwicklung eines auf eine spezifische Anwendung ausgerichteten Filtermediums wesentlich erleichtern. Dabei ist jedoch wichtig, dass die jeweilige 3D-Porenmorphologie so realitätsnah wie möglich erzeugt wird. Im Fall von Geweben werden hierbei z. B. die bei der Herstellung und Weiterverarbeitung auftretenden Abweichungen von der idealen Struktur durch stochastische Methoden der Geometrieerzeugung und den zugehörigen Kennwerten berücksichtigt. Interessant ist diese Vorgehensweise insbesondere für die Entwicklung von optimierten, mehrlagigen Gewebeverbänden oder von Verbänden zwischen Geweben und anderen Filtermedien, wie



Abb. 1: Draufsicht eines realen (oben) und generierten (unten) multifilen Gewebes

z. B. Vliesen oder Lochblechen. Über erste Erfahrungen mit der Strömungssimulation bei der Gewebeentwicklung zur Filtration wurde bereits berichtet /1, 2/.

## 2. Gewebe

Gewebe gehören zu den ältesten textilen Flächegebilden und wurden bereits sehr früh als Filtermittel eingesetzt. Bei der Kuchenfiltration kommt der Barrierewirkung des Filtergewebes in der Anfangsphase der Filtration bis zur Bildung des Filterkuchens eine ausschlaggebende Bedeutung zu. Im weiteren Filtrationsverlauf übernimmt der Filterkuchen die Trennfunktion und das Filtermedium die Stützfunktion für den sich ausbildenden Kuchen. Die Kuchenbildung wird durch eine Brückenbildung abgetrennter Partikeln an den Poren des Gewebes eingeleitet. Infolge der Kuchenbildung wird die Trenngrenze zu kleineren Partikeln verschoben. Gewebe sind keine Tiefenfiltermedien, d. h. die Partikelablagerung im Inneren der Struktur ist für die Abscheidung von untergeordneter Bedeutung. Dennoch muss bei mehrlagigen Geweben und bei Geweben aus Multifilamentgarnen auch mit einer Partikelabscheidung in der inneren Struktur gerechnet werden. Bei einer zyklischen Betriebsweise mit einer periodischen Abreinigung des Filtermediums kann sich dadurch das Filtrationsverhalten über die Zahl der Filterzyklen verändern.

\* Prof. Dr.-Ing. Siegfried Ripperger  
Dr.-Ing. Kilian Schmidt  
IT for Engineering (it4e) GmbH  
Luxstr. 1  
67655 Kaiserslautern  
Tel.: 0631-5344433  
E-Mail: www.it4e-gmbh.de



## Textiltechnische Charakterisierung von Geweben

Durch diese Art der Verflechtung von Kett- und Schussfäden entsteht die Bindung, d.h. das Gewebebild. Die kleinste Einheit der Bindung ist der Rapport. Durch verschiedene Anordnungen der Kreuzungspunkte der Kett- und Schussfäden können Gewebe mit verschiedenen Bindungsarten hergestellt werden. Am einfachsten ist die Leinwandbindung, bei der ein Schussfaden abwechselnd über und unter einen Kettfaden geführt wird.

Bei den Fäden kann es sich um Monofilament- und Multifilamentfäden handeln. Ein Multifilamentgarn besteht aus einer Vielzahl von Fasern (Filamenten), die miteinander verdreht, verwirbelt oder gekräuselt sind. Die Faserquerschnitte können rund sein oder andere Querschnittsformen aufweisen. Ein Monofilament ist ein Faden, der aus einem Filament besteht. Auf Basis der unterschiedlichen Fadenarten und der verschiedenartigen Kombinationen von Schuss- und Kettfäden kann eine große Bandbreite von Geweben hergestellt werden.

Bei Geweben mit Multifilamentfäden sind bei einer Simulation zusätzlich noch die Porenräume im Faden zwischen den einzelnen Fasern zu beachten. In diesem Fall wird die 3D-Porenstruktur des Rohgewebes von der Art der Kett- und Schussfäden (Monofilament, Multifilament), den zugehörigen Faserfeinheiten, der Kett- und Schussfadendichte und der Bindungsart bestimmt.

Bei einer idealen Gewebestruktur geht man von regelmäßigen Maschen und Bindungen aus. Auf Basis der Strukturdaten kann für eine solche „ideale“ Struktur ein maximaler Partikeldurchmesser ermittelt werden, der eine Passage einer Partikel durch das Gewebe gerade noch erlaubt. Eine Abweichung von der idealen Struktur ist jedoch in der Praxis nicht zu vermeiden, so dass für die praktische Anwendung eines Gewebes auch die Abweichungen von der idealen Struktur berücksichtigt werden müssen. Hierzu gehören insbesondere die Abweichungen aufgrund der Verformung der Kett- und Schussfäden, die sowohl vom Material als auch von den Webbedingungen abhängen.

### Materialien

Gewebe werden aus unterschiedlichsten Materialien gefertigt. Filtergewebe werden überwiegend aus Kunstfasern hergestellt. Naturfaserstoffe sind nur noch selten anzutreffen. Metallfasern werden u. a. aus Stählen, Nickel und Bronze meist durch Kaltziehen hergestellt. Auch Gewebe, bei denen der Kett- und Schussfaden aus unterschiedlichen Materialien besteht, werden eingesetzt.

### Nachbehandlungsverfahren

Im Fall von Filtergeweben werden die Gewebeeigenschaften nachträglich durch sogenannte Nachbehandlungen beeinflusst. Mit einer thermischen Behandlung kann man ein Schrumpfen und Fixieren der Gewebestruktur erreichen. Beim Kalandern wird das Gewebe durch beheizte Walzen geführt. Die hohe Temperatur und/oder der erhöhte Druck bewirken ein Verengen der Gewebeporen sowie ein Glätten der Oberfläche. Das Kalandern hat außerdem ein Abplattieren der oberflächennahen Fasern und Fäden zur Folge.

### Gewebeeigenschaften

Neben den textiltechnischen Parametern werden auch die Luft- und Wasserdurchlässigkeit bzw. die daraus ermittelten Strömungswiderstände experimentell bestimmt. Die Oberflächeneigenschaften bestimmen in Verbindung mit der Porenstruktur die Benetzung bei einer Beaufschlagung mit einer Flüssigkeit. Bei bekannter Oberflächenspannung einer Testflüssigkeit und ihrem Benetzungswinkel in Bezug auf das Membranmaterial kann mit der erweiterten Blaspunktmethode, auch Flow Pore-Methode oder Porometrie genannt, auf Basis einer einfachen Modellvorstellung eine Porendurchmesserverteilung ermittelt werden [3, 4].

Die Rückhaltung von Partikeln kann auf einer räumlichen Hinderung (Siebwirkung), dem Erreichen einer stabilen Lage (z. B. Brücken oder Clusterbildung) sowie auf einer Anhaftung beruhen.

Eine hohe Durchlässigkeit bzw. Permeabilität eines Gewebes gegenüber dem verwendeten Fluid, sei es ein Gas oder eine Flüssigkeit, ist für das Erreichen hoher Filtratströme erforderlich. Die Durchlässigkeit ist wie die Partikelabscheidung eng mit der Porenstruktur verbunden. Große Poren haben in der Regel eine schlechte Partikelabscheidung, jedoch eine hohe Durchlässigkeit zur Folge, so dass die Entwicklung oder Auswahl eines Gewebes als Filtermittel einen Optimierungsprozess beinhaltet, bei dem diese gegenseitige Abhängigkeit berücksichtigt werden muss.

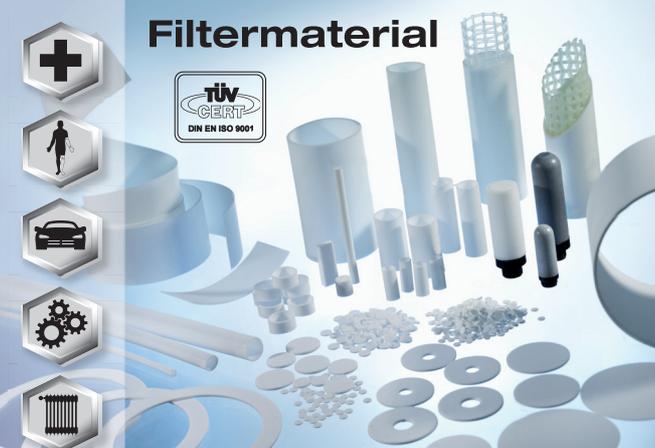
Die Abhängigkeit des Druckabfalls von der flächenspezifischen Durchströmung  $\bar{w}$  (Anströmgeschwindigkeit, Filtrationsgeschwindigkeit, spezifischer Filtratstrom), den Fluideigenschaften (Dichte  $\rho$ , dynamische Viskosität  $\eta$ ) und der Gewebestruktur kann mit der folgenden Gleichung erfasst werden:

$$\Delta p = K_1 \eta \bar{w} + K_2 \rho \bar{w}^2 \quad (1)$$

Die Konstanten  $K_1$  und  $K_2$  sind von der Gewebestruktur abhängig und werden an experimentelle Ergebnisse angepasst. Der erste Term berücksichtigt die zähe (laminare) Durchströmung und der zweite Term wird beim Auftreten von Turbulenzen von Bedeutung. Bei einer zähen Durchströmung, d. h. bei einer Strömung ohne Wirbelbildung (Turbulenzen), kann der zweite Term vernachlässigt werden, so dass sich ein Zusammenhang entsprechend der Darcy-Gleichung ergibt. Mit steigender Geschwindigkeit treten zuerst auf der Abströmseite umströmter Körper Wirbel und damit Turbulenzen auf, die einen zusätzlichen Anteil am Gesamtwiderstand verursachen. Dieser zusätzliche Anteil wird mit dem linearen Anstieg des Druckabfalls mit der



## Filtermaterial

# Vyon® / Guron®

Durchlässig für innovative Ideen.

- ▶ Porös gesinterte Niederdruck-Polyethylene
- ▶ Rollen- und Plattenware
- ▶ Streifen, Zuschnitte, Stanzteile, Formteile
- ▶ Individuelle Lösungen in der
  - Flüssigfiltration
  - Be- und Entlüftung
  - Schalldämpfung
  - Staubfiltration

**W. KÖPP GmbH & Co. KG**  
 Tel +49 (0)241 16605-0 • info@koep.de [www.koep.de](http://www.koep.de)

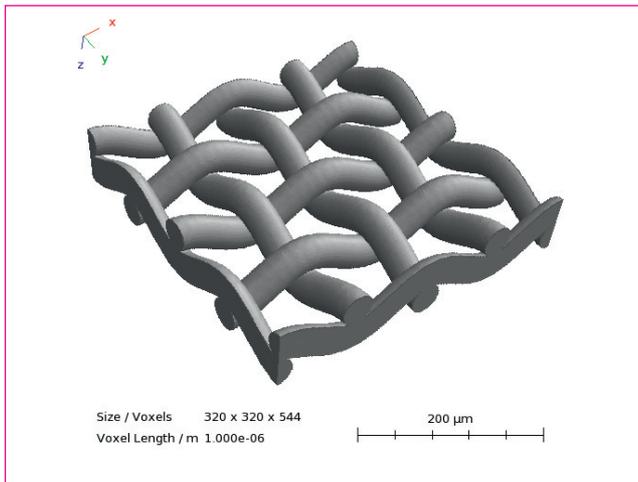


Abb. 2: Monofiles Gewebe in Leinwandbindung (Quadratmasche), Maschenweite 50µm, Drahtdicke 30 µm.

Anströmgeschwindigkeit entsprechend der DARCY-Gleichung nicht berücksichtigt. Philipp Forchheimer [5] hat vorgeschlagen, den zusätzlichen Anteil durch einen zusätzlichen Term zu berücksichtigen, wobei der Parameter  $K$ , auch wesentlich von der Porenstruktur beeinflusst wird.

Bei der traditionellen Filtermedienentwicklung bzw. -auswahl werden der Druckabfall und die Partikelrückhaltung in der Regel experimentell bestimmt. Aufgrund der komplexen Struktur und der kleinen Strukturabmaße haben geringe Strukturänderungen eine große Auswirkung auf die Durchströmung und die Barrierewirkung gegenüber Partikeln. Es stellt auch heute noch eine große Herausforderung dar, reale poröse Strukturen von Filtermedien, die von den idealen Strukturen abweichen, theoretisch zu generieren. Daher sind experimentelle Ergebnisse bis heute eine sichere Grundlage, um die Eigenschaften realer Strukturen zu erfassen. Die theoretischen Untersuchungen auf Basis virtueller Gewebemodelle können jedoch zu einer wesentlichen Reduzierung der experimentellen Untersuchungen beitragen. Bei der realen Filtration können auch zeitabhän-

gige Effekte auftreten, die z. B. mit einer Quellung oder Umorientierung der Fasern verbunden sind. Zunehmend werden zur Filtration Verbundgewebe, die aus mehreren unterschiedlichen Metalldrahtgeweben hergestellt und fest miteinander verbunden sind, eingesetzt. Es entstehen dadurch robuste Gewebeverbünde, die je nach Auswahl der Lagen an die Anforderungen der Filtration angepasst werden können. Man muss dabei jedoch berücksichtigen, dass im Übergangsbereich zwischen den Geweben ein „zusätzlicher“ Übergangswiderstand entsteht, so dass der Gesamtwiderstand größer als die Summe der Einzelwiderstände sein kann.

### 3. Beschreibung der Durchströmung von Geweben mittels CFD

Vor der Durchführung einer CFD-Simulation muss die geometrische Struktur der durchströmten Bereiche erstellt bzw. eingelesen und ein Gitterwerk aus sehr vielen Zellen (Computational Grid) erstellt werden. Danach werden die relevanten Erhaltungsgleichungen für jede einzelne Zelle gelöst. Eine Herausforderung stellte die Anwendung der Methode

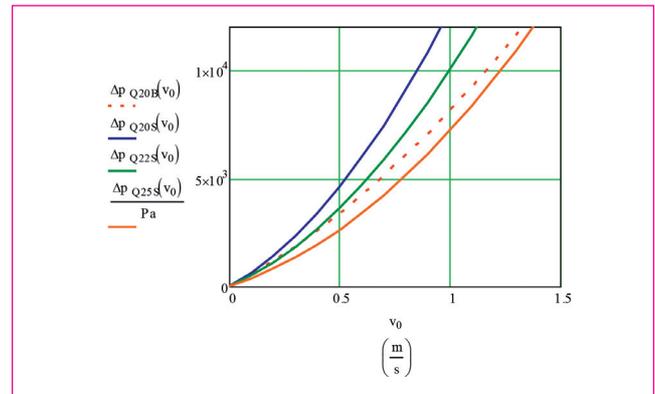


Abb. 3: Druckabfall in Abhängigkeit von der Anströmgeschwindigkeit mit Wasser für Gewebe in Leinwandbindung mit einem Drahtdurchmesser von 20 µm; durchgezogene Linie: simulierte Ergebnisse für eine Maschenweite von 20 µm (blau), 22 µm (grün) und 25 µm (orange); Punkte: Berechnung nach Gl. 1 für eine Maschenweite von 20 µm mit Konstanten aus [6]

auf sehr feine Strukturen dar, wie sie innerhalb von Filtermedien vorliegen. Die Struktur eines Gewebes bzw. eines Gewebeverbundes kann entweder mathematisch generiert, oder hochaufgelöst mit der Computertomographie dreidimensional erfasst und in das Rechenprogramm übertragen werden. Die dreidimensionale geometrische Struktur des Filtermediums ist der Ausgangspunkt der numerischen Simulation.

Im Folgenden werden Ergebnisse vorgestellt, die mit dem Programm DNSlab ermittelt wurden. Das Programm beinhaltet auch einen Strukturgenerator für mono- und multifile Gewebe, der stetig erweitert wird. Die erzeugten virtuellen Modelle werden auf Basis vorgegebener Gewebeparameter erzeugt. Abb. 1 zeigt ein reales Multifilamentgewebe und das mit DNSlab generierte zugehörige 3-D-Modell. Es können auch Strukturen auf Basis dreidimensionaler Bilddaten, wie sie die Mikro-Computertomografie (µ-CT) liefert, eingelesen und berücksichtigt werden. Damit können auch mehrlagige asymmetrisch aufgebaute Filtermedien und stark verformte kalandrierte Gewebe erfasst werden.

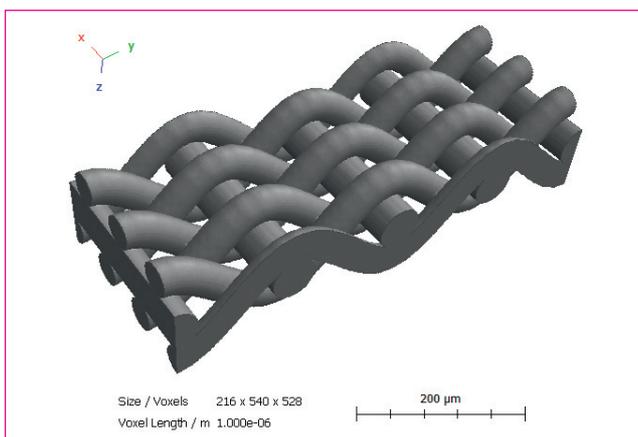


Abb. 4: Tressengewebe (glatte Tresse), Trenngrenze 20 µm, Drahtdicke: Kette 50 µm, Schuss 36 µm

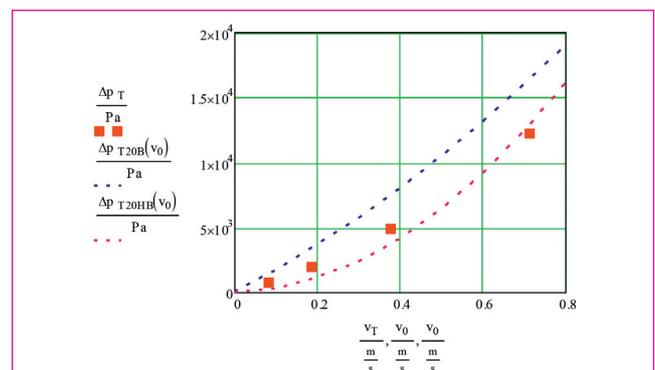


Abb. 5: Druckabfall in Abhängigkeit von der Anströmgeschwindigkeit mit Wasser für ein Tressengewebe entsprechend Abb. 4; Punkte: simulierte Ergebnisse; gestrichelte Kurve (blau); Berechnung nach Gl. 1 für eine Trenngrenze 20 µm mit Konstanten aus Unterlagern der Firma Haver und Boecker.

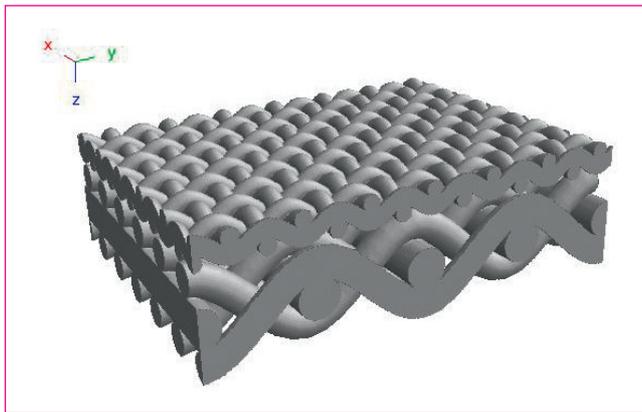


Abb. 6: Doppellagiges Gewebe (Gewebeverbund) bestehend aus dem monofilen Gewebe in Leinwandbindung (Quadratmasche) und einem Tressengewebe mit jeweils einer Trenngrenze von 20  $\mu\text{m}$ .

Die Diskretisierung zur numerischen Berechnung basiert beim Programm DNSlab auf einer Voxelstruktur, d. h. der durchströmte Raum innerhalb des Filtermittels wird durch ein gleichmäßiges Rechengitter aus kubischen Zellen (Voxeln) strukturiert. Von ihm wird der Strömungsraum im Filtermittel ausgefüllt. Die Voxelgröße orientiert sich an den Abmessungen der Poren an den Kreuzungspunkten und an den Durchmessern der Kett- und Schussfäden.

Mittels der Strömungssimulation kann u. a. der Druckabfall im Filtermittel bzw. dessen Permeabilität bzw. Strömungswiderstand berechnet werden. Im hier dargestellten Beispiel erfolgt die Strömungsberechnung mit der Lattice-Boltzmann-Methode /7/. Die Methode ist bei einem Voxel-Gitter effizient anwendbar und berücksichtigt den Übergang einer laminaren in eine turbulente Strömung. In Kombination mit dem Programm DNSlab stellt die geometrische Erfassung der Porenstruktur und ihre Digitalisierung dabei kein Problem dar.

In Abb. 2 ist ein monofiles Gewebe in Leinwandbindung dargestellt. Abb. 3 zeigt die Abhängigkeit des Druckabfalls von der Anströmgeschwindigkeit bei einer Durchströmung mit Wasser für solche Gewebe mit einem Drahtdurchmesser von 20  $\mu\text{m}$  und einer Maschenweite von 20  $\mu\text{m}$ , 22  $\mu\text{m}$  und 25  $\mu\text{m}$ . Die punktierte Kurve gibt die Abhängigkeit nach Gl. 1 für ein Gewebe mit einer Maschenweite von 20  $\mu\text{m}$  wieder, wobei die Konstanten  $K_1$  und  $K_2$  dem Buch von Bruncher /6/ entnommen wurden. Entsprechende Berechnungen wurden auch für ein Tressengewebe durchgeführt (Abb. 4 und Abb. 5). Die simulierten Werte sind in Abb. 5 als rote Punkte eingetragen. Für dieses Gewebe wurden die Konstanten  $K_1$  und  $K_2$  dem Buch von Bruncher /6/ (blaue Kurve) und Unterlagen der Firma Haver & Boecker entnommen (rote Kurve). Die Ergebnisse zeigen, dass in den berechneten Fällen bereits kleinste geometrische Änderungen den Druckabfall beeinflussen.

Abb. 6 zeigt einen Gewebeverbund, der durch eine Schichtung eines Gewebes

in Leinwandbindung und einem Tressengewebe (beide mit einer Trenngrenze von 20  $\mu\text{m}$ ) erzeugt wurde. Die zugehörigen simulierten Werte des Druckabfalls für eine Durchströmung mit Wasser sind in Abb. 7 dargestellt. Die durchgezogene Kurve ergibt sich aus der Addition der Druckabfälle, die für die einzelnen Gewebe ermittelt wurden. Sie entspricht im vorliegenden Fall auch den simulierten Werten für den Gewebeverbund, so dass der Übergangswiderstand in diesem Fall vernachlässigbar gering ist.

Aufgrund der erstellten geometrischen Struktur kann mit dem Programm der größte Durchmesser einer Kugel bestimmt werden, die gerade noch das Porensystem passiert. Bei beiden virtuell erstellten Geweben betrug diese Partikelgröße 20  $\mu\text{m}$ . Diese Partikelgröße wird bei der Gewebeentwicklung auch experimentell mit aufwendigen Testfiltrationen und kugelförmigen Partikeln bestimmt. Eine Gewebeprobe wird hierzu in einen Filterhalter randdicht eingespannt und mit der Test-suspension beaufschlagt. Oft werden Glas- oder Hohlglaskugeln verwendet. Daher spricht man auch vom „Glasperlen-Test“. Die Partikelkonzentration wird so gewählt, dass im Testzeitraum die Gewebefläche noch nicht vollständig mit Partikeln belegt wird. Außerdem sollten sich keine Brücken an großen Poren ausbilden. Die Partikelgröße kann mittels mikroskopischen Aufnahmen, optischen Einzelpartikelzählern oder der Laserbeugungsspektroskopie erfasst werden.

Der Übergangsbereich zwischen den beiden Geweben bewirkt, dass der Durchmesser einer Kugel, die gerade noch das Porensystem passiert, bei einem Verbund beider Gewebe reduziert werden kann. Im vorliegenden Fall wurde mit dem Programm DNSlab für den Gewebeverbund keine nennenswerte Reduktion ermittelt.

#### 4. Ausblick

Es wurde dargestellt, dass neben den empirisch ermittelten Methoden zur Berechnung der Durchströmung von Filter-

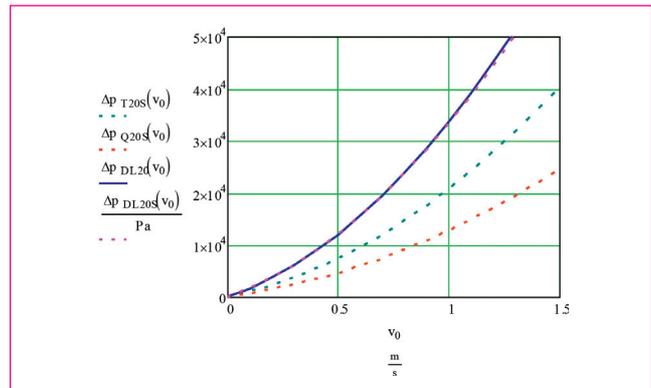


Abb. 7: Simulierter Druckabfall in Abhängigkeit von der Anströmgeschwindigkeit mit Wasser für den Gewebeverbund entsprechend Abb. 6 (blaue Kurve); gestrichelte Kurven: Druckabfall der einzelnen Gewebe.

medien auch die numerische Strömungssimulation gute Dienste leisten kann. Mit der Anwendung von Simulationen kann eine Verkürzung der Entwicklungszeit und eine Senkung der Entwicklungskosten erreicht werden. Dies ist insbesondere dann der Fall, wenn durch die Simulation die aufwendige Herstellung von Mustern und deren experimentelle Untersuchung auf ein Minimum beschränkt werden kann.

Man muss jedoch auch erwähnen, dass ein vollständiger Verzicht auf experimentelle Untersuchungen nicht empfohlen werden kann. So stellt die Berechnung von mehrphasigen Strömungsfeldern unter Einbezug der Partikel/Partikel-, Partikel/Wand- und Partikel/Fluid-Wechselwirkungen bei der Simulation noch eine Herausforderung dar. Eine erste Programmversion, bei der solche Wechselwirkungen berücksichtigt werden, wird zurzeit getestet.

Weiterhin muss berücksichtigt werden, dass sich die Porenstruktur von Filtermedien unter dem Einfluss einer Belastung verändern kann. Dadurch ergeben sich auch Veränderungen seiner Eigenschaften bei der Anwendung, die bisher nur grob abgeschätzt werden können. Hier besteht noch ein Forschungs- und Entwicklungsbedarf.

#### Literatur:

- /1/ A. Wiegmann, O. Iliev, A. Schindelin: Computergestützte Entwicklung von Filtermaterialien und gefalteten Filtern. F&S Global Guide of the Filtration and Separation Industry (2010), S. 265-272, ISBN 978-3-00-029751-9
- /2/ D. Hund, K. Schmidt, S. Ripperger: Numerische Berechnung der Strömung und Partikelabscheidung in Filtrationsgeweben. F&S Filtrieren und Separieren 28 (2014), Nr. 4, S. 221-225
- /3/ S. Ripperger, Ch. Schnitzer: Die Barrierewirkung von Geweben. Teil 1: Textiltechnische Charakterisierung und Barrieremechanismen. F&S Filtrieren und Separieren 28 (2014), Nr. 3, S. 110-117
- /4/ Ch. Schnitzer, S. Ripperger: Die Barrierewirkung von Geweben. Teil 2: Experimentelle Methoden zur Bestimmung von Gewebeeigenschaften. F&S Filtrieren und Separieren 19 (2005) Nr. 4, S. 166-173
- /5/ Ph. Forchheimer: Wasserbewegung durch Boden. Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure (VDI-Z), Vol. 45 (1901).
- /6/ B. Bruncher: Filtration and Wire Cloth. Wire Cloth Division Gantois Co. (1984)
- /7/ A. A. Mohamad: Lattice Boltzmann Method, Springer Verlag (2011)