

Computersimulation der Tiefenfiltration durch Vliesstoffe

Dr. Andreas Wiegmann
Priv. Doz. Dr. Arnulf Latz
Dipl. Math. Stefan Rief
Fraunhofer Institut für
Techno- und Wirtschaftsmathematik,
Kaiserslautern

Zusammenfassung

Die Tiefenfiltration durch Vliesstoffe kann durch Computersimulationen reproduziert werden. Am Fraunhofer Institut für Techno- und Wirtschaftsmathematik (ITWM) wurden dazu mathematische Modelle und Software entwickelt, die im Computer ein virtuelles Vlies darstellen und ohne Herstellung eines Prototypen Filtereffizienzen, Fraktionsabscheidgrad, Druckabfall, Standzeit und andere wichtige Filtrationsparameter berechnen. Dies erfolgt in Abhängigkeit von der dreidimensionalen, mikroskopischen Struktur des Filtermediums und seinen Wechselwirkungen mit sowohl der Luftströmung als auch Schmutzpartikeln. Dadurch wird virtuelles Materialdesign von Filtermedien auf Vliesstoffbasis möglich.

Das Vlies lässt sich aus wenigen Modellparametern im Computer darstellen

Die mikroskopische Struktur des Filtermediums ist einer der entscheidenden Faktoren für den Abscheidgrad und die Filterstandzeit. Die Grundlage der Filtrationssimulation ist daher ein realistisches Modell der dreidimensionalen Vliesstruktur. Auf der Basis von Computertomografien und weiteren Mikroskopieverfahren wurden am ITWM Modelle entwickelt, welche die komplexe Geometrie von Vliesen in 3 Dimensionen abbilden [1,2,3]. Abb. 1 zeigt ein Beispiel eines solchen generierten Vlieses. Dabei gehen als Parameter relevante mittlere Größen wie Porosität, Flächendichte, Fasermischungen, Faserform, etc. ein. Auch Gradientenaufbauten oder Verbundwerkstoffe (z.B. im Verbund mit PU-Schaum) können virtuell im Computer generiert und auf ihre Strömungs- und Filtrationseigenschaften getestet werden. Durch den Mikrostrukturgenerator GeoDict (<http://www.geodict.com>) sind diese Modelle auch außerhalb des ITWM zugänglich.

Die Durchströmung wird simuliert

Für eine gegebene Mikrostruktur bzw. Tomographie wird zunächst die Strömung durch das Vlies berechnet. Dies erfolgt durch eine am ITWM speziell für komplexe Mikrostrukturen entwickelte Software zur Lösung der hydrodynamischen Gleichungen [4]. Neben dem Strömungsfeld wird auch die Druckverteilung berechnet. Hier geht besonders die Viskosität des Fluids (Luft, Öl, Wasser, etc.) in die Simulation ein.

Die Filtration wird simuliert

Bei der Schmutzpartikelbewegung werden derzeit schon Trägheitseffekte, Einflüsse der Brown'schen Bewegung der Flüssigkeit auf die Teilchen sowie Adhäsions- und Siebeffekte im Vlies berücksichtigt. In der Entwicklung befindet sich die Simulation der elektrostatischen Anziehungskräfte. Durch explizite Modellierung der Adhäsionskraft zwischen Vlies und Teilchen kann ein Teilchen wieder abgelöst und von der Strömung weiter transportiert werden. Auf diese Weise werden kleine Teilchen mit großer Wahrscheinlichkeit schon beim ersten Kontakt mit dem Vlies aus der Strömung gefiltert, während große Teilchen sich leichter ablösen können. In der Modellierung wird auch berücksichtigt, dass ein Teilchen gleichzeitig mehrfach Kontakt mit den Fasern haben kann. Deshalb werden vor allem große Teilchen wie in einem Sieb im Vlies zurückgehalten. Durch Mittelung mehrerer Simulationsergebnisse für verschiedene Realisierungen bei gleicher Parameterwahl erhält man Eigenschaften wie Fraktionsabscheidgrad, Druckabfall und Filterstandzeiten als Mittelwert und Standardabweichung genau wie im Versuch. Die detaillierte Beschreibung der

Bewegung von Teilchen generiert darüber hinaus Informationen, die nicht oder nur schwer messbar sind. So kann z.B. durch die genaue Kenntnis der Verteilung der abgeschiedenen Teilchen im Filter ein räumlicher Eindruck des Einflusses der Mikrostruktur auf die Filtrationseigenschaften geschaffen werden. Die daraus gewonnenen Einsichten erlauben es, neuartige Filtermedien mit optimierter Funktionalität zu kreieren. Abb. 2 zeigt, wie sich die Filtrationseffizienz als Funktion des Partikelradius ändert wenn bei gleicher Porosität eines Vlieses erst die Anströmgeschwindigkeit und dann die bevorzugte Orientierung der Fasern geändert werden. Die berechneten Filtrationseffizienzen verhalten sich für die beschriebenen Änderungen wie erwartet [5]. Durch den Einfluss des Trägheitsmechanismus für große Teilchen und den Einfluss der Diffusionsabscheidung für kleine Teilchen gibt es bei allen 3 Kurven ein Minimum bei dem Teilchenradius mit der größten Eindringtiefe in den Filter. Dieses Minimum liegt bei einer Strömungsgeschwindigkeit von ca. 4 cm/s bei etwa 0.3 μm (unterste Kurve). Es verschiebt sich zu kleineren Radien bei Anstieg auf 60 cm/s. Die Filtrationseffizienz ist für senkrecht zur Hauptströmungsrichtung ausgerichtete Fasern am größten (oberste Kurve). Nach der Simulation können Auswertungen für das gesamte Medium wie auch über Teile durchgeführt werden. Abb. 3 zeigt prozentuale Anteile von gefilterten Partikeln einer festen Größe für ein vierschichtiges Filtermedium unter Excel.

Virtuelles Materialdesign mit GeoDict und FilterDict

Große Teile der beschriebenen Innovationen sind bereits in die kommerziell erhältliche Software GeoDict eingeflossen. Abb. 4 zeigt die Beladung eines Ausschnitts eines Filtermediums visualisiert mit GeoDict / FilterDict. Mit Hilfe dieser Software können Vliese erzeugt und Strömungen und Druckabfälle berechnet werden. Die aus solchen Simulationen gewonnenen richtungsabhängigen Permeabilitäten können auch als Eingabegrößen für das Filterauslegungswerkzeug SuFiS (Suction Filter Simulator) benutzt werden. SuFiS wurde vom ITWM für die Firma IBS Filtran entwickelt, um die Strömungseigenschaften von Filtern einschließlich Filtergehäusen zu optimieren. Außerdem sind mechanische und akustische Eigenschaften von Vliesen mit Hilfe der Ergebnisse aus GeoDict Simulationen berechenbar [6]. Statische Filtrationseigenschaften, wie z.B. die Veränderung des Druckabfalls aufgrund der homogen verteilten Einlagerung einer bekannten Schmutzmenge, kann schon in der vorliegenden Version von GeoDict berechnet werden. Die Filtrationssimulationssoftware wird zurzeit von Forschern des Fraunhofer ITWM zusammen mit Industriepartnern zum Filtermediendesign eingesetzt. Dabei ist das Ziel, durch Variation von Schichtdicken, Fasermischungen und Vorzugsrichtungen aus der Computersimulation gezielt Vorschläge für neue verbesserte Vliesmaterialien zu gewinnen. Zur Validierung der Simulationsergebnisse werden Standardversuche durchgeführt und simuliert, und die Ergebnisse von Simulation und Versuch genau verglichen, siehe Abbildung 5. Gleichzeitig wird durch GeoDict / FilterDict eine bedienerfreundliche Oberfläche geschaffen, die Entwicklungsingenieuren das gesamte Potential des virtuellen Filtermaterialdesigns zugänglich macht. Dies ist nicht auf Vliese beschränkt, sondern auch für Membrane, Schäume, Gewebe und Gelege möglich [7].

- [1] J. Ohser u. F. Mücklich, "Statistical Analysis of Microstructures in Materials Science", John Wiley & Sons (2000)
- [2] Fraunhofer Institut für Techno- und Wirtschaftsmathematik, Jahresberichte 2000 - 2003.
- [3] „Der optimale Stoff“, Fraunhofer Gesellschaft Research News No.4 (2003).
- [4] I. Ginzburg, P. Klein, C. Lojewski, D. Reinel-Bitzer, K. Steiner, „Parallele Partikelcodes für industrielle Anwendungen“, Verbundprojekt im Rahmen des HPSC, Abschlussbericht, ITWM Kaiserslautern, März 2001.
- [5] R.C. Brown, "Air Filtration, An Integrated approach to the Theory and Application of Fibrous Filters", Pergamon Press, Oxford (1993).
- [6] U. Hornfeck, "Simulation of acoustic properties of textile materials", Technical Textiles Vol. 46, August 2003.
- [7] A. Latz und A. Wiegmann, "Filtermaterialdesign per Software", Laboratory IT User Service, 1/04, 2004.

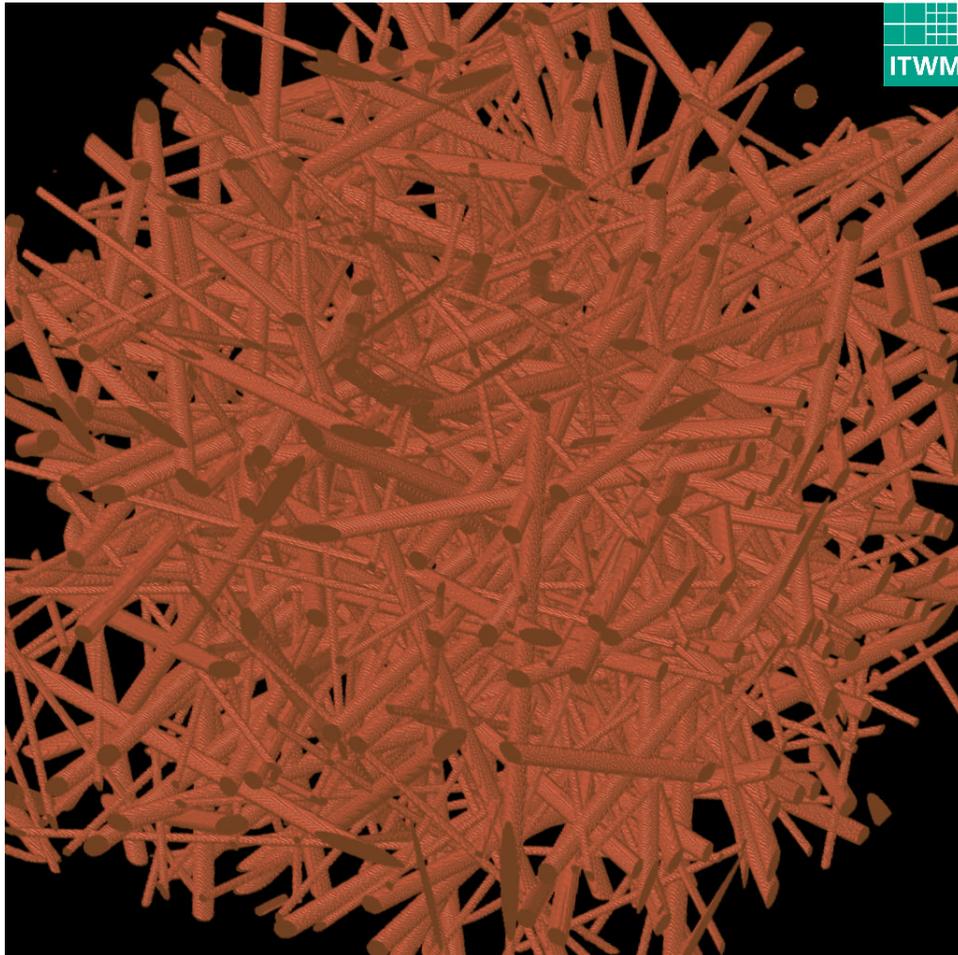


Abb. 1: Beispiel einer isotropen Vliesgeometrie aus einer bimodalen Fasermischung.

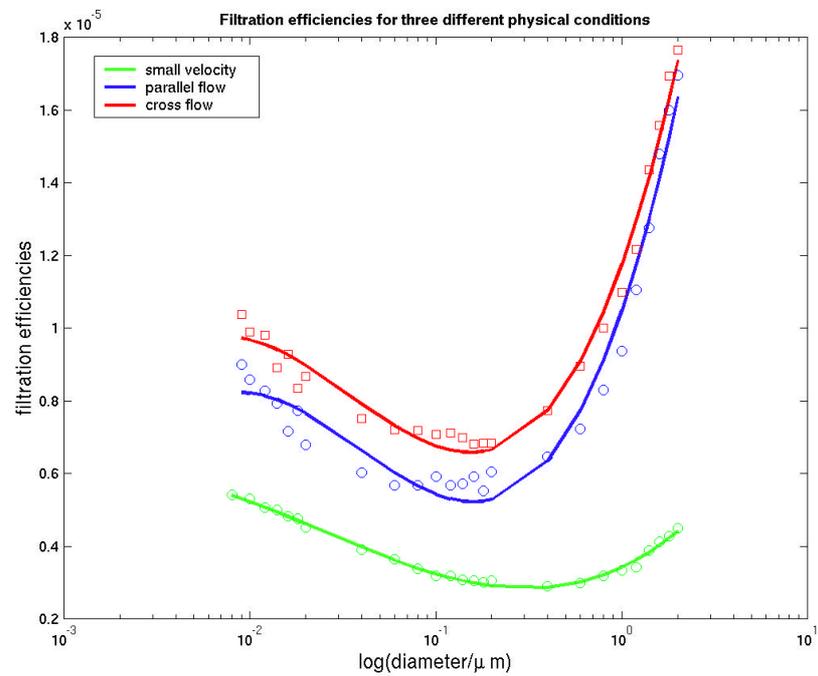


Abb. 2: Filtrationseffizienzen für drei verschiedene physikalische Bedingungen. Alle Kurven stehen für gleiche Porosität und gleiche Fasermischung. Die grüne Kurve steht für die Anströmgeschwindigkeit 4 cm / sec, die anderen beiden für 50 cm / sec. Die Fasern sind bei der blauen Kurve bevorzugt parallel und bei der roten Kurve bevorzugt senkrecht zur Filtrationsrichtung orientiert.

Partikelradius=10.0µm

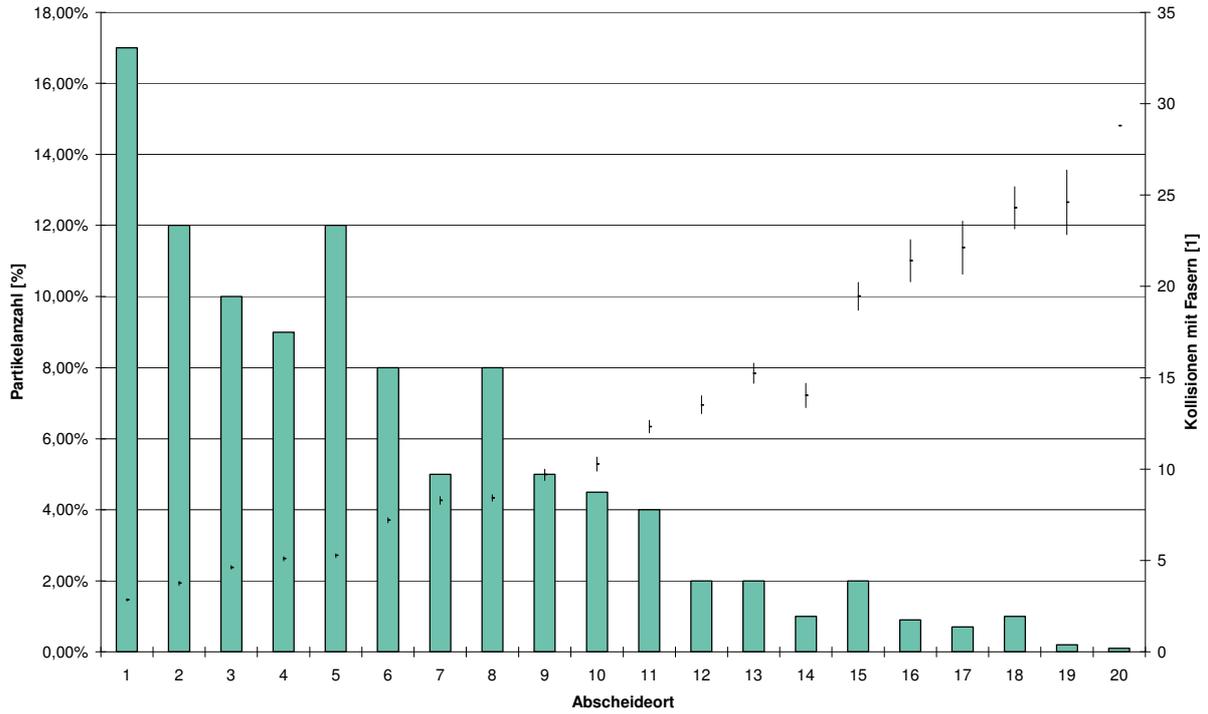


Abb. 3: Simulierte Filterwirkung nach Schichten.

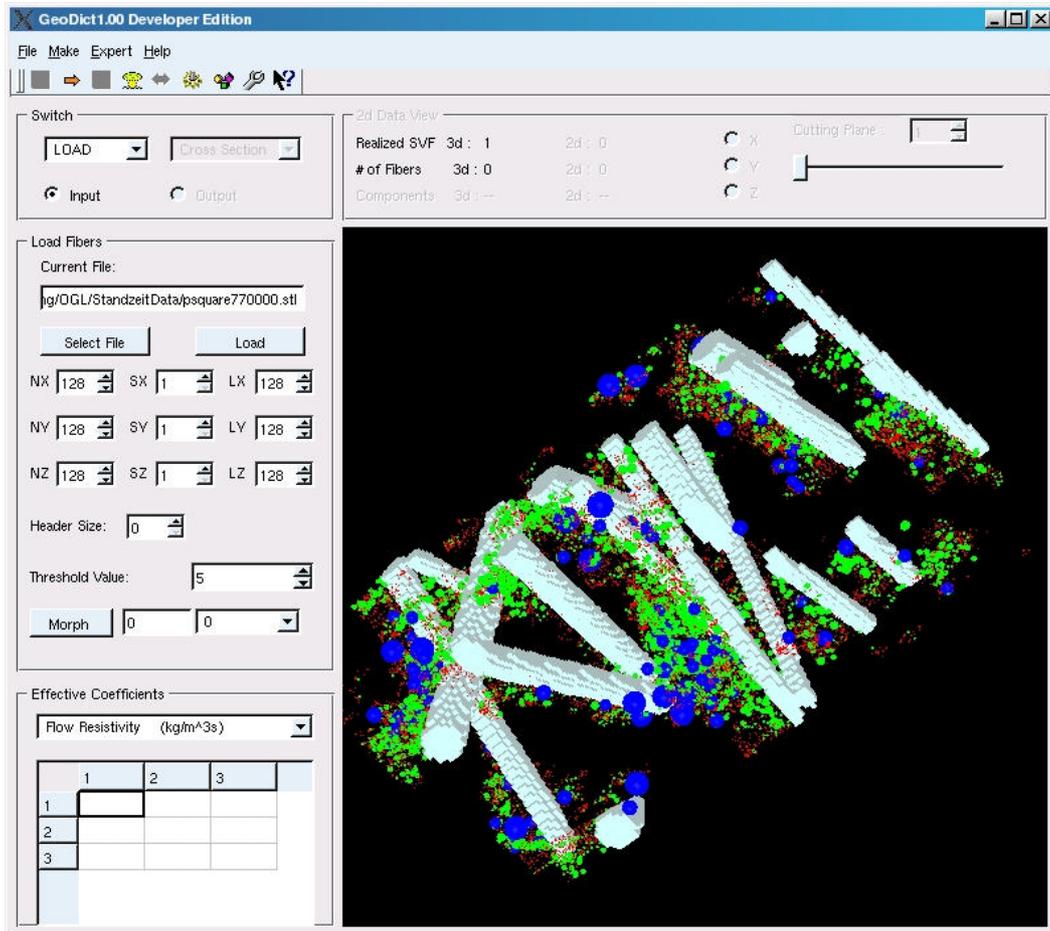


Abb. 4: Ein mit SAE fein bestaubtes Vlies am Ende der Lebensdauer des Filters.

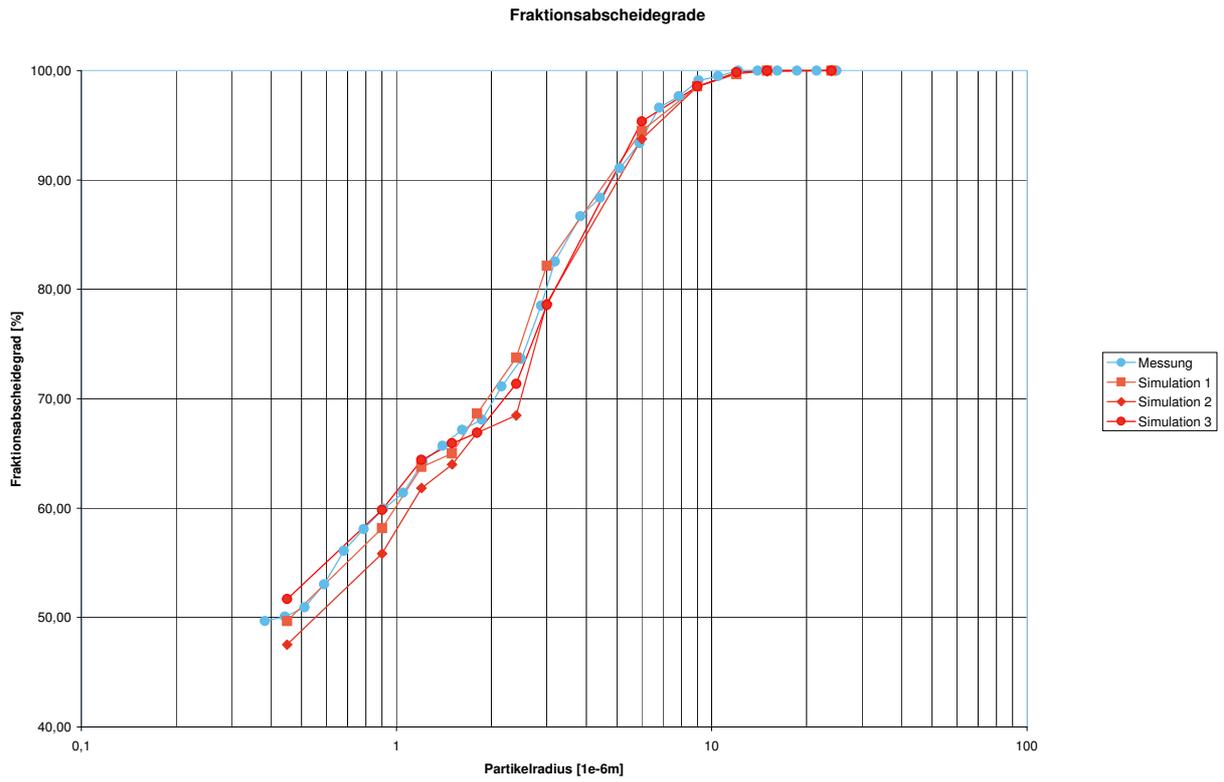


Abb. 5: Simulierte und gemessene Filtereffizienz.