

Vom Prozess bis zur Multiphysik: Digitale Zwillinge für die Filtration

Ralf Kirsch, Andre Schmeißer

Die Digitalisierung („Industrie 4.0“) gewinnt auch im Bereich der Filtration und Separation an Bedeutung [1]. Die Vernetzung von Sensortechnik an Filterbauteilen mit der IT-Infrastruktur ermöglicht eine automatisierte Überwachung und Steuerung von Anlagen sowie eine digital unterstützte Planung von Wartungsintervallen, sodass Ausfallzeiten im Betrieb minimiert werden. Bei der Produktentwicklung ermöglichen modellbasierte Simulationstechniken eine rechnergestützte Vorhersage wichtiger Eigenschaften und reduzieren den Bedarf an Prototypen. In diesem Beitrag wird ein Überblick gegeben, wie modell- und simulationsbasierte Methoden von der Herstellung der Filtermedien bis hin zu ihrem Verhalten im Betrieb bei der Erstellung von digitalen Zwillingen für die Filtration eingesetzt werden.

1 Digitale Abbildung der Vliesstoffproduktion

Bei der digitalen Vliesstoffproduktion ist es Ziel, Eigenschaften des Filtermaterials wie z.B. Filtrationseffizienz simulativ vorherzusagen und so die Herstellung neuer Filtermedien oder die Optimierung vorhandener Prozesse zu unterstützen. Mit Hilfe von Simulationen auf der Porenskala ist es bereits möglich, zu gegebenen Mikrostrukturen weitreichende Vorhersagen über die Filtrationseigenschaften zu treffen. Dazu werden allerdings Messungen oder eine direkte Modellierung der Mikrostruktur benötigt. Durch Erweiterung des digitalen Zwillinges auf die Produktion des Vliesstoffes können diese Mikrostruktureigenschaften aus der Simulation vorhergesagt werden.

In [2] wurde dazu ein digitaler Zwilling für die Vliesstoffherstellung im Spunblown-Prozess vorgestellt, der den Produktionsprozess von der Luftströmung über die Filamentproduktion und Vliesbildung bis hin zu den Filtrationseigenschaften abbildet. Ausgehend von der Anlagengeometrie und den Prozessbedingungen wird zunächst eine CFD-Simulation der Luftströmung durchgeführt. Zusammen mit Materialkennwerten der Polymerschmelze bildet diese die Grundlage für eine physikalische Simulation der Filamentbildung mit der Software FIDYST. Die

Filamentbildung kann dabei in verschiedene Phasen unterteilt werden: Im oberen Teil des Bildungsprozesses ist das Filament noch viskos und daher findet dort, getrieben durch die schnelle Luftströmung, bereits ein großer Teil der Verstreckung statt. Horizontale Auslenkungen sind in diesem Bereich vernachlässigbar gering, so dass die Prozesssimulation hier mit einem deterministischen, stationären ODE-Modell beschrieben werden kann. Nachdem das Filament die Geschwindigkeit der umgebenden Luftströmung angenommen hat, dominieren Turbulenzeffekte, die zur Verwirbelung und weiteren Verstreckung führen. Dieser Teil des Prozesses wird durch eine zeitlich instationäre Simulation mittels Modellierung durch partielle Differentialgleichungen abgebildet. Dabei kommen ein visko-elastisches Materialmodell und eine Rekonstruktion der auftretenden turbulenten Luftwirbel zum Einsatz. Schließlich wird das Filament auf dem Transportband abgelegt. **Bild 1** zeigt diese Phasen der Filamentbildung im Meltblown-Prozess. Durch die enormen Verstreckungen, die im Spunblown- oder Meltblown-Prozess erzielt werden können, erweist sich die zeitlich aufgelöste Simulation eines einzelnen Filaments bereits als sehr rechenaufwändig. Um eine vollständige Vliesprobe realer Größe zu simulieren, werden allerdings viele hundert virtuelle Filamente benötigt. Daher wird in diesem Schritt auf ein mathematisches Ersatzmodell (Software SURRO) zurückgegriffen, das die Ablage einzelner Filamente stochastisch beschreibt.

Die Parameter des Ersatzmodells werden dabei aus statistischen Eigenschaften der Filamentsimulation bestimmt, wie etwa der Verteilung der Ablagepositionen auf dem Transportband sowie der Verteilung und zeitlichen Fluktuation der Filamentdurchmesser. Damit können in weiteren Schritten virtuelle Vliesproben erzeugt und so z.B. die Homogenität („Wolkigkeit“) der 2D-Flachware analysiert werden. Die Analyse der daraus erzeugten 3D-Mikrostrukturen hinsichtlich Filtrationseffizienz und Druckabfall ist wiederum nur auf kleinerem Maßstab mit vertretbarem Aufwand umsetzbar. Daher werden aus der großen Vliesprobe (vgl. **Bild 2**) mehrere kleine Proben extrahiert, um die makroskopischen Schwankungen im Vlies abzubilden. Eine Validierung dieser Simulationskette gegenüber realen Filtermedien wird in [3] vorgestellt. Eine alternative Vorgehenswei-

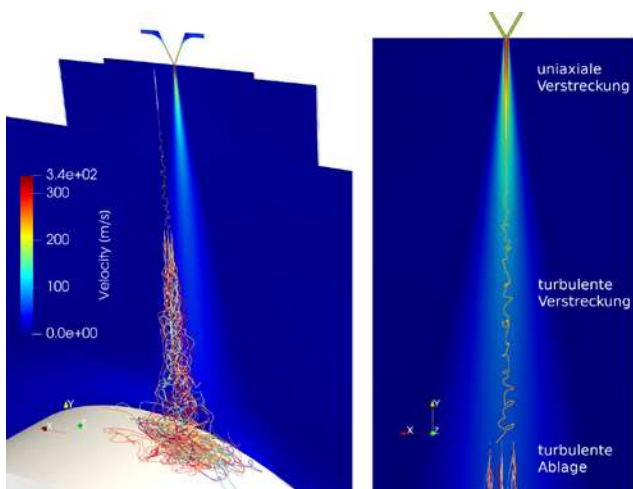


Bild 1: Luftgeschwindigkeit und die verschiedenen Phasen der Filamentbildung im Meltblown-Prozess

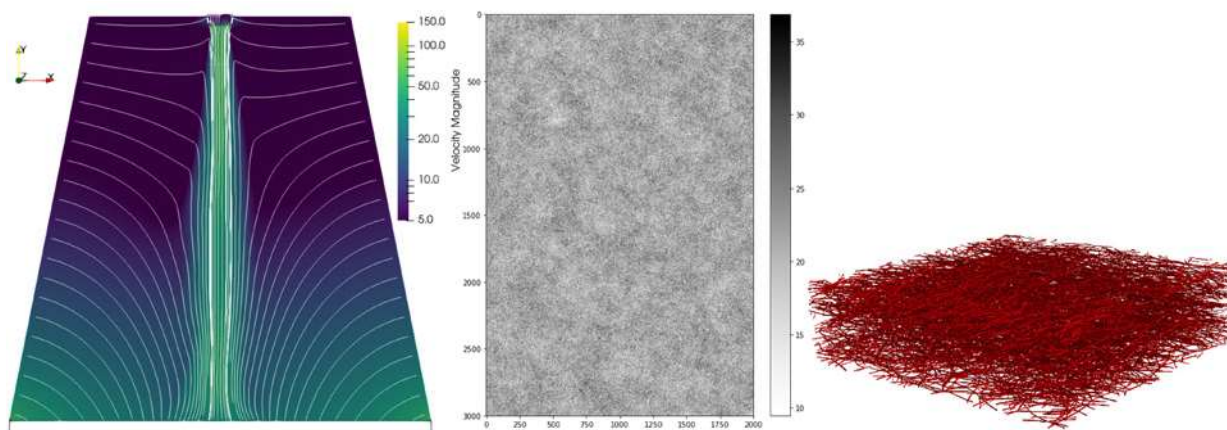


Bild 2: Simulationskette im Spunblown-Prozess. Links: Strömungsgeschwindigkeit der CFD-Simulation (Querschnitt in Produktionsrichtung). Mitte: Flächengewichtverteilung einer simulierten Vliesprobe, 20cm x 30cm. Rechts: Mikrostruktursimulation einer Vliesprobe, Grundfläche 5mm x 5mm.

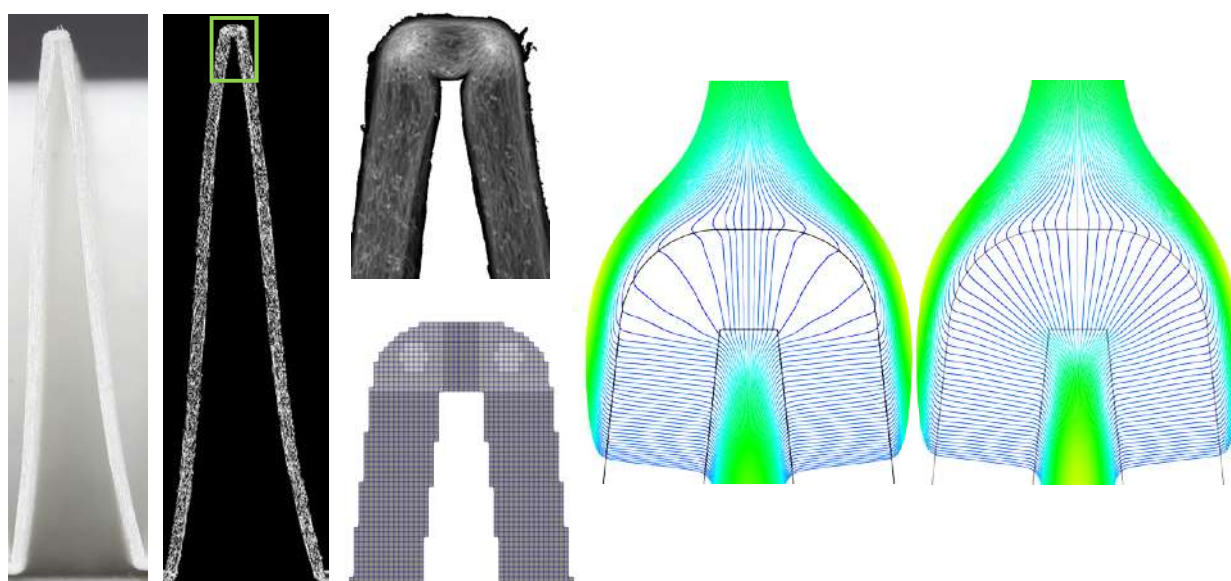


Bild 3: Digitaler Zwilling einer geprägten Filterfalte. Links: Photographie und CT-Aufnahme der realen Falte. Mitte oben: Zoom in die Falten Spitze, man erkennt den höheren Faservolumenanteil in den helleren Zonen. Mitte unten: Computermodell der Falte mit den verdichteten Zonen. Rechts: Vergleich der Stromlinien bei der geprägten Falte (links) und der Falte mit gleichmäßiger Materialverteilung (rechts). Man sieht die deutlich geringere Durchströmung durch die verdichteten Zonen.

se, die die Filtrationseffizienz mit Hilfe analytischer Modelle vorhersagt, wurde für Anwendungen im Bereich der persönlichen Schutzausrüstung in [4] vorgestellt.

2 Berücksichtigung von Verarbeitungseinflüssen

Nach der Herstellung des Filtervliesstoffs erfolgen in der Regel weitere Verarbeitungsschritte, die die Filtereigenschaften beeinflussen. Ein wichtiges Beispiel hierfür ist das Plissieren zur Vergrößerung der verfügbaren Filterfläche bei gegebenem Bau- raum. Neben der starken Biegung des Filtermaterials führt auch das häufig eingesetzte Vorprägen zu einer lokalen Kompression des Vliesstoffs in den Falten spitzen. Diese Effekte sind neben der eigentlichen Vliesherstellung weitere Ursachen für eine ungleichmäßige Materialverteilung. Da die verdichteten Zonen weniger durchströmt werden, liefern Standzeitabschätzungen, die auf Messungen von Flachproben basieren, zu optimistische Werte für flächengleiche Faltenfilter. Auch Simulationen, die eine gleichmäßige Materialverteilung in den Falten annehmen und

daher nur die Geometrie berücksichtigen, überschätzen in der Regel die Lebensdauer, da die Strömungsverhältnisse in den verdichteten Zonen gänzlich andere sind (**Bild 3**). Durch eine erweiterte Modellierung konnte gezeigt werden, dass die Berücksichtigung der Materialverdichtung in den Falten bei der Simulation zu realistischeren Standzeitprognosen führt [5].

Diese Modellierung wird auf Elektretmedien ausgeweitet, d.h. es wird untersucht, wie sich die Kompression des Filtermaterials jeweils auf die mechanischen und elektrostatischen Abscheidemechanismen auswirkt. Die Modellbildung erfolgt auf der Grundlage von experimentellen Daten, bei denen statisch geladene und entladene Elektretmedien für verschiedene Kompressionsgrade und Anströmgeschwindigkeiten im Hinblick auf die Fraktionsabscheidegrade untersucht werden (**Bild 4**).

Ziel ist, bei bekannter Faservolumenverteilung in der Falten spitze die entsprechenden Verteilungen für Strömungswiderstand und Filtereffizienzen adäquat zu modellieren und damit die Genauigkeit eines simulationsgestützten digitalen Zwillings zu

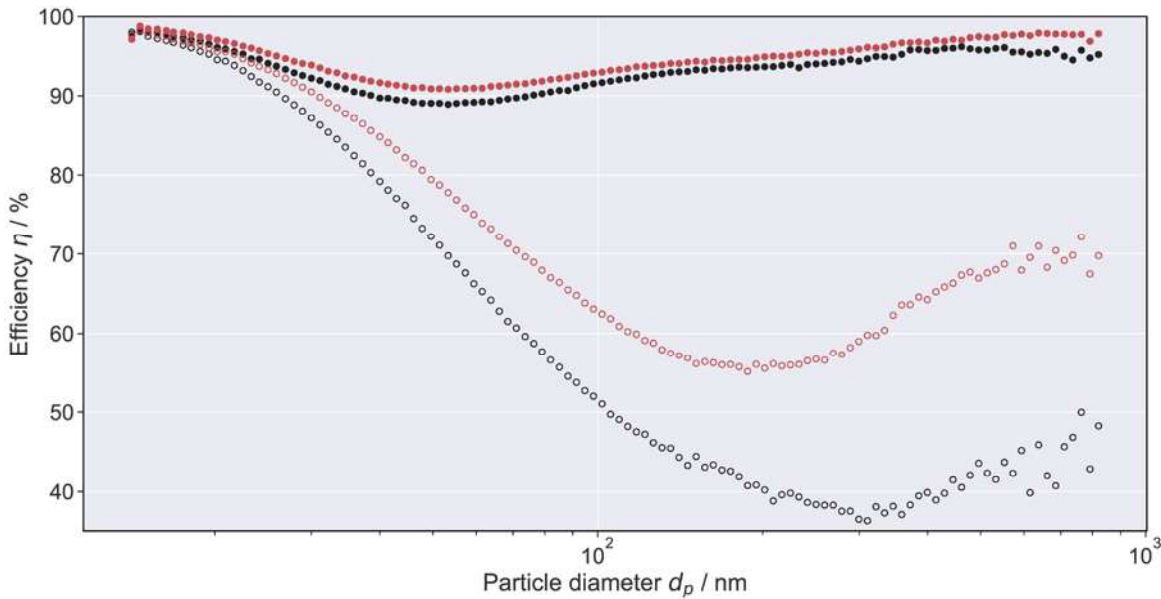


Bild 4: Experimentelle Untersuchung des Einflusses der Kompression von Elektretmedien auf die Effizienz. Fraktionsabscheidegrade für das nicht komprimierte Material (schwarz) und das komprimierte Medium (rot), wobei die Punkte jeweils für das statisch geladene und die Kreise für das vollständig entladene Medium stehen.

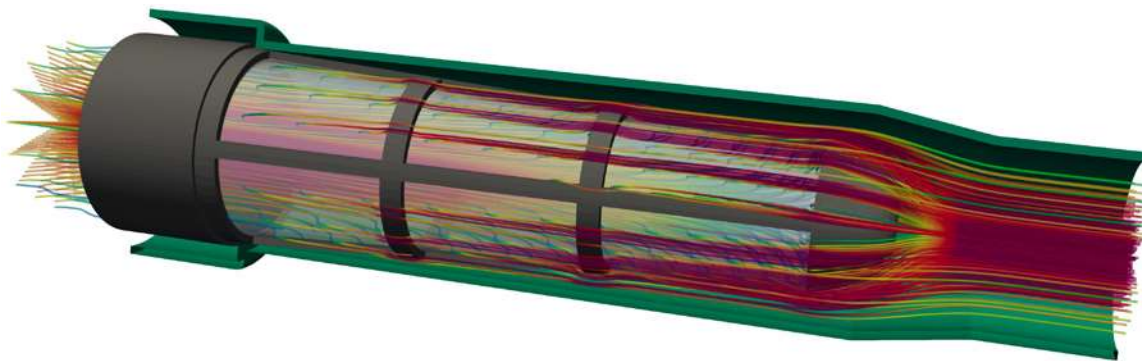


Bild 5: Digitaler Zwilling eines Kühlmittelpartikelfilters für Brennstoffzellen. In einem schmalen Gehäuse befindet sich der Filtereinsatz (schwarz) mit dem Filtergewebe (weiß). Für verschiedene Betriebsbedingungen kann das Strömungsfeld berechnet und visualisiert werden. Die Stromlinien sind eingefärbt mit der lokalen Strömungsgeschwindigkeit (rot: hoch, blau: niedrig).

erhöhen [6]. Eine Beispielanwendung hierfür sind etwa hocheffiziente Faltenfilter für die Raumlufttechnik.

3 Digitaler Zwilling für Filterelemente

Bei simulationsbasierten digitalen Zwillingen für Filterelemente steht in der Regel die Vorhersage bzw. Verbesserung der Standzeit im Mittelpunkt der Betrachtungen. Hierfür werden an die Aufgabenstellung angepasste Modelle und numerische Methoden verwendet, um die zeitliche Entwicklung des Differenzdrucks sowie der fraktionellen Abscheidegrade (bzw. der gravimetrischen Effizienz) und die zu erwartende Schmutzaufnahmekapazität zu berechnen [7].

Im Bereich der Flüssigfiltration im Kraftfahrzeugsegment kamen solche Simulationen bisher vor allem für (Getriebe-) Ölfilter und Kraftstofffilter zum Einsatz. Durch die zunehmende Bedeutung von elektrischen Antrieben entstehen neue Anwendungsbereiche und Herausforderungen. Ein Beispiel hierfür sind Kühlmittelfilter für Brennstoffzellen, die Partikel aus dem Kühlmittelstrom entfernen, u.a. um die feinen Strömungskanäle im Wärmetauscher freizuhalten. Wie in vielen Anwendungen soll der Strö-

mungswiderstand durch das Filterelement möglichst gering sein (und bleiben), Effizienz und Schmutzaufnahmekapazität jedoch möglichst hoch. Hinzu kommen die Begrenzungen des verfügbaren Bauraums. Da die relevanten Partikeldurchmesser bei dieser Anwendung vergleichsweise groß sind und die Volumenströme hoch sein können, werden häufig Filtergewebe eingesetzt. Auf der Basis von Effizienz- und Standzeitmessungen an Flachproben lassen sich Effektivmodelle für Filtration und Strömungswiderstand identifizieren und kalibrieren. Alternativ können entsprechend validierte Mikrostruktursimulationen, d.h. Effizienz- und Strömungsberechnungen auf der Größenskala der Gewebemaschen bzw. Partikeln, herangezogen werden.

Ausgangspunkt der Vorhersage beim digitalen Zwilling des Kühlmittelfilterelements ist das Strömungsfeld im Gehäuse und durch das Filtergewebe (**Bild 5**). Hierauf basiert die Berechnung von Transport und Abscheidung der Partikeln. Aus der Verteilung der Abscheidung im bzw. auf der Schmutzseite des Gewebes wird eine Verteilung des Strömungswiderstands abgeleitet und durch eine erneute Simulation das Geschwindigkeitsfeld sowie

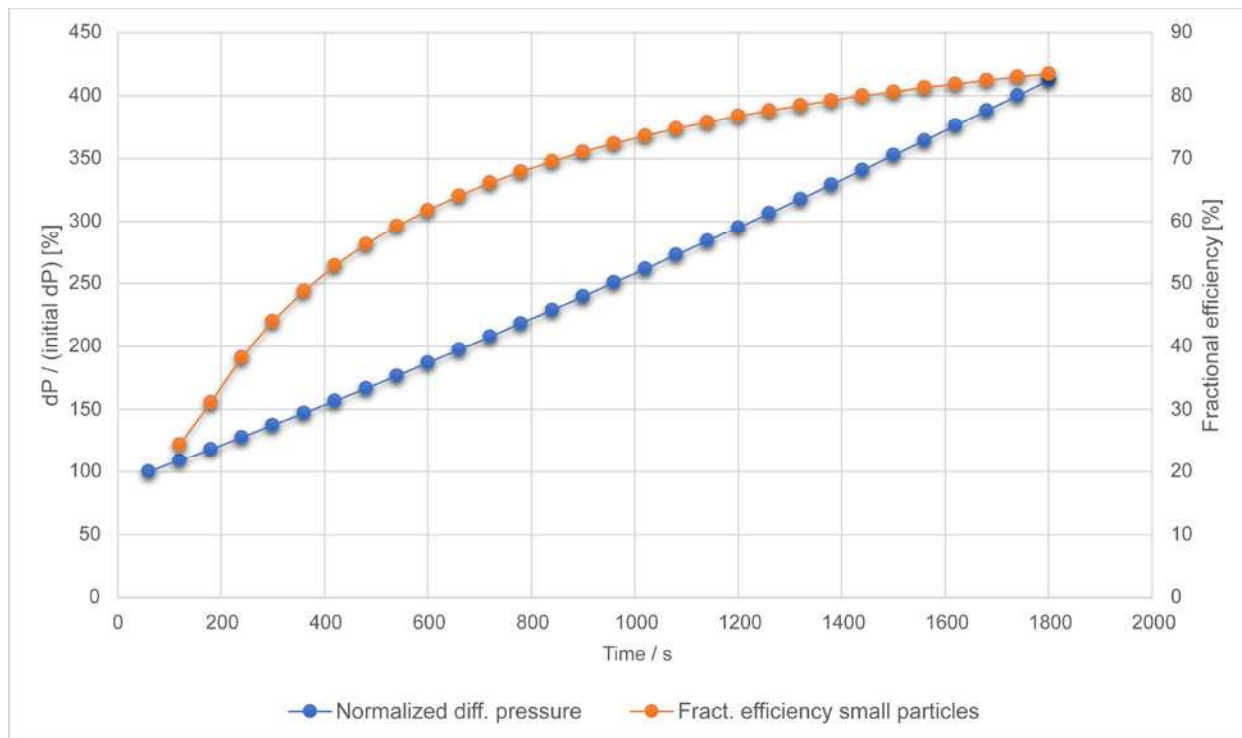


Bild 6: Exemplarische Vorhersage des digitalen Zwillings für die zeitliche Entwicklung von Differenzdruck und Abscheidegrad des Kühlmittelfilters: Die blaue Kurve visualisiert den Verlauf des Verhältnisses von aktuellem Differenzdruck zum Initialwert dar. Die orangefarbene Kurve zeigt den Verlauf des fraktionellen Abscheidegrads für das Partikelkollektiv mit Durchmesser unterhalb der Maschenweite. Man sieht, dass die Effizienz für diese Partikel zunächst durch das Zusetzen der Maschen und danach durch die dicker werdende Deckschicht mit der Zeit zunimmt.

die Druckverteilung aktualisiert. Diese Schritte werden wiederholt, bis ein Abbruchkriterium erfüllt ist (z.B. maximale Testdauer oder maximaler Differenzdruck erreicht).

Durch die Simulation lassen sich für verschiedene Einsatzbedingungen (Temperatur, Volumenstrom, Partikelsystem) Standzeitanalysen mit dem digitalen Zwilling durchführen, was entsprechend experimentellen Aufwand reduziert (**Bild 6**). Zudem kann man „in das Filterelement blicken“ und z.B. Phänomene wie die Verlagerung der Strömung in Bereiche mit niedrigem Strömungswiderstand systematisch untersuchen. Diese Einblicke liefern häufig wertvolle Hinweise zur Verbesserung der Bauteilauslegung [8].

4 Multiphysik: Strömungsinduzierte Verformung von Filtermedien

Die meisten Simulationsmodelle für Filtermedien und -elemente basiert auf der Annahme eines „starr“ Filtermaterials. In der Realität jedoch verformen sich die Filtermedien unter dem Druck des sie durchströmenden Fluids und diese Fluid-Poröse-Struktur-Interaktion (FPSI) führt u.a. zu (zusätzlichen) nichtlinearen Zusammenhängen zwischen Volumenstrom und Differenzdruck. Folglich ist eine Computersimulation mit einem starren Modell nicht in der Lage, diese Phänomene abzubilden.

Für die Simulation der Interaktion von strömenden Fluiden mit soliden Strukturen sind Modelle und Methoden zur Kopplung der Simulationen von Strömung und Strukturmechanik seit Längerem etabliert. Der Unterschied bei der porösen Struktur ist, dass die Strömung das Material durchdringt und deshalb der mechanische Lasteintrag nicht (nur) an der Grenzfläche zwi-

schen Filtermedium und Fluid erfolgt. Es ist vielmehr der Druckgradient, der als Volumenlast zur Verformung führt.

In Zusammenarbeit mit der Arbeitsgruppe Prof. Antonyuk vom Lehrstuhl für Mechanische Verfahrenstechnik an der Rheinland-Pfälzischen Technischen Universität Kaiserslautern-Landau wurde die strömungsinduzierte Verformung von Filtervliesstoffen für die Flüssigfiltration systematisch experimentell untersucht und modelliert. Im Vergleich zu früheren Arbeiten auf diesem Gebiet sollten auch größere Verformungen jenseits linear-elastischer Materialgesetze in die Modellierung einbezogen und die Simulation in 3D durchgeführt werden.

Die mit Hilfe einer eigens hierfür konstruierten Messzelle gewonnenen Daten für die Verformung zeigen, dass Filtermedien auf Vliesstoffbasis gerade bei höheren Volumenströmen bzw. Druckdifferenzen ein komplexes Deformationsverhalten aufweisen, das sich durch ein elastoplastisches Materialgesetz mit Verfestigung beschreiben lässt. Dies ist die Grundlage für die gekoppelte Simulation von Strömung und Verformung: Zuerst wird das Strömungsfeld für den nichtverformten Zustand berechnet und die Druckgradienten im Medium bestimmt. Diese stellen die Volumenlast für die Simulation der Verformung dar. Im Anschluss wird das Strömungsfeld für das verformte Medium aktualisiert. Diese Schritte werden so oft wiederholt, bis sich ein stationärer Zustand einstellt. Im Hinblick auf die Abbildung der verformten Konfiguration kann die Kopplung auf zwei Arten erfolgen: In der einen Variante operieren die Simulationen für Strömungs- und Strukturmechanik auf einem gemeinsamen Gitter. Die Gitterknoten in der Zone des Filtermediums werden nach der Strukturmechaniksimulation gemäß des berechneten Verschiebungsfelds bewegt und der Bereich des freien Fluids neu vernetzt. In einer

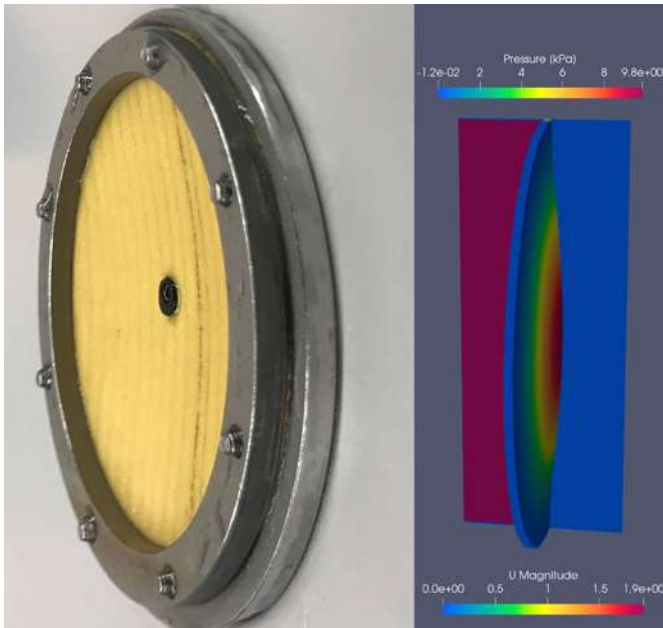


Bild 7: Strömungsinduzierte Verformung von Filtermedien. Links: Probenhalter mit Medium. Die Gummischeibe im Zentrum der Probe dient der robusten Distanzmessung mittels optischem Sensor. Man erkennt die plastische Verformung nach Entnahme der durchströmten Probe. Rechts: Ergebnis der gekoppelten Simulation mit Druckverteilung in Schnittebene entlang der Strömung (von links kommend) und Verschiebungsfeld in der porösen Zone. Die poröse Scheibe ist gemäß Verschiebungsfeld deformiert dargestellt.

zweiten Variante operieren Strömungs- und Strukturmechaniksimulation jeweils auf eigenen Rechengittern, wobei das Gitter für die Strömungsberechnung fixiert ist. In diesem Fall wird der aktuelle Verformungszustand in Form von Volumenanteilen des porösen Materials in den Gitterzellen beschrieben.

Die beschriebenen Simulationstechniken wurden durch Vergleich mit aus der Literatur bekannten Modellen verifiziert und die Materialmodelle gegen die Messungen validiert (**Bild 7**). Es hat sich gezeigt, dass die Einbeziehung der strömungsinduzierten Verformung in die Simulation zu genaueren Vorhersagen führt [9]. Ein ähnlicher Ansatz kann auch für Filtergewebe verwendet werden [10].

5 Zusammenfassung und Ausblick

Das Verhalten und die Leistungsfähigkeit von Filterbauteilen werden durch das Zusammenspiel einer Vielzahl von Faktoren beeinflusst. Das Filtermedium selbst spielt eine fundamentale Rolle und entsprechend bedeutsam ist das Verständnis des Herstellungsprozesses und seiner Auswirkungen auf Strömungswiderstand und Filtereffizienz. Gleiches gilt für die weiteren Verarbeitungsschritte wie das Plissieren, bei dem nicht nur die Faltengeometrie, sondern auch die Verdichtung des Materials in den Faltenknicken relevant ist. Auf der Elementebene ist die Auslegung des den Filtereinsatz umgebenden Gehäuseinneren wichtig für die gleichmäßige Anströmung des Filtermediums und den Gesamtdifferenzdruck. In immer mehr Anwendungen können komplexere Phänomene wie die strömungsinduzierte Verformung des Mediums nicht länger bei der Simulation vernachlässigt werden.

Die Erstellung eines digitalen Zwillings gelingt daher umso besser, je ganzheitlicher der Modellierungsansatz ist und Aspekte von der Medienherstellung bis hin zum Verhalten im Betrieb berücksichtigt. Andererseits ist hierbei auf ein sinnvolles Maß an Modellkomplexität zu achten, damit der Aufwand bzgl. der Rechnerressourcen und der Rechenzeit in einem für die Praxis vertretbaren Rahmen bleibt.

Literaturverzeichnis

- [1] Bart, H.-J., Grünewald, M., Repke, J.-U. and Scholl, S. (2020), Separation Units 4.0 – Trenntechnik in der chemischen Industrie auf dem Weg in die digitale Zukunft. Eindrücke und erste Ergebnisse vom Tutzing-Symposium 2019. Chemie Ingenieur Technik, 92: 807-812. <https://doi.org/10.1002/cite.202000037>.
- [2] Schmeißer, A., Wegener, R., Arne, W., Hahn F. J., Gose T., Spelter, L., Riedinger K., Keller F.: Virtual production of filter media using simulation driven design, FILTECH 2022 Conference Proceedings. 2022, F06.
- [3] Hahn, F.J., Gose, T., Spelter, L., Riedinger, K., Keller, F., Schmeißer, A., Wegener, R., Arne, W.: From virtual production to real filter media samples, FILTECH 2023 Conference Proceedings. 2023, F02-02.
- [4] Kirsch, R., Hietel, D., Mercier, C., Osterroth, S., Schladitz, K., Schnebele, J., Steiner, K.: Modelle und Algorithmen für die Prozess- und Produktoptimierung von Vliesstoffen für persönliche Schutzausrüstung, Filtrieren und Separieren Global Guide 2022-2024 – Welthandbuch der Filtrations- und Separationsindustrie. 2022, Vulkan Verlag, 187 – 194.
- [5] Kabel, M., Kirsch, R., Osterroth, S., Rief, S.: A two-scale approach for the computation of flow through pleated filters based on real image data, FILTECH 2018 Conference Proceedings. 2018, F05-02.
- [6] Mercier, C., Kirsch, R., Osterroth, S., Rief, S., Kerner, M., Antonyuk, S.: Influence of material compression on the mechanical and electrostatic capturing efficiency of filter media, FILTECH 2023 Conference Proceedings. 2023, G03-01.
- [7] Iliev, O., Kirsch, R., Lakdawala, Z., Rief, S., Steiner, K.: Modellierung und Simulation von Filtrationsprozessen, in: H. Neunzert, D. Prätzel-Wolters (Hrsg.): Mathematik im Fraunhofer-Institut. 2015, Springer Berlin Heidelberg, 167 – 238.
- [8] Kirsch, R., Osterroth, S.: Multiscale modelling and simulation of coolant particle filters and ion exchangers in electric mobility, FILTECH 2023 Conference Proceedings. 2023, L13-03.
- [9] Kirsch, R., Köbler, J., Henkelmann, N., Antonyuk, S., Puderbach, V., Weirich, M.: Flow-induced deformation of nonwoven filter media: Experiments, modeling and simulation, FILTECH 2023 Conference Proceedings. 2023, F05-03.
- [10] Krier, M., Kirsch, R., Mercier, C., Orlik, J., Rief, S., Steiner, K.: Efficient simulation of flow-induced deformation of woven filter media, FILTECH 2023 Conference Proceedings. 2023, F05-02.

Autoren:

Dr. Ralf Kirsch, Dr. Andre Schmeißer

Fraunhofer-Institut für Techno- und Wirtschaftsmathematik ITWM
Fraunhofer-Platz 1, 67663 Kaiserslautern
ralf.kirsch@itwm.fraunhofer.de