

Ein universelles Modell zur Vorhersage der Filtrationsleistung von fasrigen Gasfiltermedien

Tobias Ertl†

†Institut für Technische und Numerische Mechanik
Universität Stuttgart, Pfaffenwaldring 9, 70569 Stuttgart
Tel +49 711 68566388; E-Mail: tobi.ertl@t-online.de

Fasrige Filtermedien werden zur Abscheidung von Partikeln aus Gasströmen eingesetzt und bieten eine günstige Kombination aus Filtrationsleistung, Druckverlust, Staubspeicherkapazität und Herstellungskosten. Für die numerische Auslegung realer Filtermedien sind jedoch detaillierte Simulationen der vollständigen Faserstruktur mit erheblichem Rechenaufwand verbunden. Eine alternative Beschreibung basiert auf der Betrachtung einer einzelnen Faser und erlaubt dadurch eine deutlich effizientere Untersuchung grundlegender Zusammenhänge. Die verfügbaren analytischen und empirischen Modelle sind allerdings jeweils nur für eingeschränkte Parameterbereiche entwickelt worden. Ziel dieser Arbeit ist daher die Entwicklung eines universellen Modells zur Vorhersage der Filtrationsleistung eines fasrigen Filtermediums innerhalb eines möglichst breiten, einheitlich beschriebenen Parameterbereichs.

Ausgangspunkt ist die Betrachtung der drei für die Arbeit relevanten Abscheidemechanismen Diffusion, Interzeption und Impaktion. Diese werden getrennt untersucht und mithilfe der dimensionslosen Kennzahlen Interzeptionsparameter R , Péclet-Zahl Pe , Stokes-Zahl St und Packungsdichte α beschrieben. Der betrachtete Strömungsbereich ist auf laminare Stokes-Strömung mit $Re \leq 1$ beschränkt. Die Strömungsfelder einer periodisch angeordneten Einzelfaser werden mit GeoDict unter Verwendung des LIR-Algorithmus berechnet. Anschließend werden Partikelbahnen simuliert, wobei die einzelnen Abscheidemechanismen gezielt getrennt betrachtet werden. Für Interzeption und Impaktion kann die Effizienz über die Partikeltrajektorien bestimmt werden; die Diffusion wird mithilfe einer statistischen Auswertung einer größeren Anzahl stochastischer Partikelbahnen ermittelt.

Um den großen Parameterraum mit vertretbarem Rechenaufwand abzudecken, wird zunächst eine dimensionslose Beschreibung verwendet. Eine Kombination aus Latin-Hypercube-Sampling und anschließendem Rejection Sampling sorgt für eine annähernd gleichmäßige Verteilung der Simulationspunkte im Raum der dimensionslosen Kennzahlen. Dadurch reduziert sich der Aufwand auf insgesamt 10 710 Simulationen. Vor der eigentlichen Untersuchung werden außerdem die Voxelauflösung und die Länge der Simulationszelle anhand von Konvergenzuntersuchungen festgelegt. Die untersuchten physikalischen Größen umfassen unter anderem Packungsdichten von $10^{-3} \leq \alpha \leq 0.2$, Faserdurchmesser von $1\mu\text{m}$ bis 0.1mm und Partikeldurchmesser von $0.1\mu\text{m}$ bis $10\mu\text{m}$.

Auf Basis der Simulationsergebnisse werden bestehende Modelle aus der Literatur[1] verglichen und für die jeweiligen Abscheidemechanismen die Ansätze mit der geringsten Abweichung ausgewählt oder kombiniert. Für die Interzeption liefert das empirisch angepasste Modell von Lee und Liu [2] die geringsten Fehler. Bei der Diffusion erweist sich eine bereichsabhängige Kombination als vorteilhaft: Für $\alpha \leq 0.165$ wird das Modell von Kirsch und Chechuev [3] verwendet, für höhere Feststoffvolumenanteile das Modell von Lee und Liu [2]. Für die Impaktion stimmen die untersuchten klassischen Modelle deutlich schlechter mit den Simulationsergebnissen überein. Daher wird ein neues Sättigungsmodell mit analytischem Grenzwert und einem an die Simulationsdaten angepassten Parameter entwickelt. Dieses beschreibt die Impaktion im

relevanten Bereich deutlich besser als die betrachteten Literaturmodelle.

Die Kombination der Modelle für die drei Mechanismen beschreibt die simulierte Gesamtabscheideeffizienz über den betrachteten Parameterraum mit einem mittleren quadratischen Fehler von etwa $MSE = 0.0015$. Zur Validierung wird das entwickelte Modell anschließend auf vollständige Filtermedien angewendet und mit unabhängigen GeoDict-Simulationen verglichen. Für ein Filtermedium mit geringerer Filtrationsleistung zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung. Bei einem Medium mit höherer Leistung treten dagegen deutliche Abweichungen auf. Die Ursache wird in den Grenzen der Einzelfaserannahme gesehen: Mit steigender Packungsdichte, dünneren Fasern und größerer Schichtdicke gewinnen geometrische Effekte wie benachbarte Fasern, Überlagerungen und die Porenstruktur an Bedeutung. Die Ergebnisse zeigen damit, dass das entwickelte Modell insbesondere für eine erste Bewertung und für Parameterstudien geeignet ist, während für komplexe reale Medien weiterhin Einschränkungen bestehen.

Das entwickelte Modell ermöglicht eine wesentlich effizientere Untersuchung grundlegender Zusammenhänge als vollständige Filtermediensimulationen und erweitert bestehende Ansätze insbesondere um eine validierte Beschreibung der Diffusion sowie eine eigenständige Modellierung der Impaktion. Für weiterführende Untersuchungen sind insbesondere eine Glättung der Modellübergänge, die Berücksichtigung elektrostatischer Abscheidung und eine Sensitivitätsanalyse zur Übertragung der Einzelfasermodelle auf vollständige Filtermedien von Interesse.

Literatur

- [1] Abdolghader, P., Brochot, C., Haghighat, F., & Bahloul, A.: Airborne nanoparticles filtration performance of fibrous media: A review. *Science and Technology for the Built Environment*, 24(6), 648–772, 2018.
- [2] Lee, K. W.; Liu, B. Y. H.: Theoretical study of aerosol filtration by fibrous filters. *Aerosol Science and Technology*, 1(2), 147–161, 1982.
- [3] Kirsch, A. A.; Chechuev, P. V.: Diffusion deposition of aerosol in fibrous filters at intermediate Peclet numbers. *Aerosol Science and Technology*, 4(1), 11–16, 1985.