

## **Dissertationsthema:**

### **Numerische und experimentelle Untersuchungen zu strömungsinduzierten Verformungen von gefalteten Luftfiltermedien**

**Alexander Traut**

Im Rahmen der Weiterentwicklung heutiger Luftfilterelemente ist die mechanische Belastbarkeit des gefalteten Filtermediums von zunehmender Bedeutung. Durch die gegenseitige Beeinflussung von Strömung und poröser Filterstruktur können bei hohen Druckkräften strömungsinduzierte Verformungen der Filterfalten auftreten. Die gezielte Optimierung der mechanischen Stabilität der Filterfalten stellt daher eine komplexe Aufgabe dar. Bisherige Maßnahmen hierzu beruhen meist auf empirischen Erfahrungswerten und sind, u.a. aufgrund der benötigten Werkzeuge zur Verarbeitung des Filtermediums, sehr kosten- und zeitintensiv.

Das Ziel dieser Arbeit ist daher die Entwicklung einer Simulationsmethode, welche es ermöglicht Fluid-Struktur-Interaktionen (FSI) bei Luftfilterelementen virtuell abzubilden. Ein Literaturüberblick zum Stand der Technik zeigt hierbei die bestehenden Defizite bezüglich der Modellierung und Validierung von strömungsinduzierten Verformungen bei Filterelementen auf. Dies betrifft insbesondere die Berücksichtigung des richtungsabhängigen und fertigungsbedingten Materialverhaltens, die Veränderung der Permeabilität des Filtermediums sowie die Art der Kopplung von Fluid und poröser Filterstruktur. Weiterhin findet sich bisher kein experimenteller Ansatz durch welchen jene strömungsinduzierten Verformungen von Filterfalten an einem vollständigen Filterelement quantifiziert und validiert werden konnten.

Im Rahmen dieser Arbeit werden hierfür Ansätze und Modelle für Filtermedien und Filterfaltenskala erarbeitet und validiert. Zur Charakterisierung des Materialverhaltens auf der Medienskala wird hierfür ein richtungsabhängiges Materialmodell entwickelt. Hierzu werden zunächst die notwendigen Materialkonstanten auf experimenteller Basis sowie durch Abschätzung aus Literaturangaben ermittelt. Die fertigungsbedingten Einflüsse auf das Materialverhalten an den Faltenspitzen werden durch ein entsprechendes Submodell berücksichtigt. Experimentelle Untersuchungen zum Materialverhalten anhand eines Biegeversuchs, bestätigen das virtuelle Materialmodell, welches anschließend in einem strukturmechanischen Modell einer Einzelfalte implementiert wird.

In einem weiteren Teil der Arbeit wird die strömungsinduzierte Verformung auf der Filterfaltenskala betrachtet. Dabei werden analytische sowie numerische Modelle entwickelt, um das strömungs- und strukturmechanischen Verhalten von Filterfalten physikalisch und mathematisch zu beschreiben. Ein erster analytischer Ansatz ermöglicht dabei die Vorhersage des Druckverlusts als

Funktion der geometrischen und physikalischen Eigenschaften des gefalteten Filtermediums.

Für eine genauere Aussage bezüglich des Strömungs- und Druckfelds innerhalb der Filterfalten ist es jedoch notwendig das Problem auf Basis numerischer Modelle zu betrachten. Hierzu wird zunächst ein symmetrisches Geometriemodell einer V-förmigen Einzelfalte erstellt. Die numerische Berechnung der Strömung erfolgt unter Anwendung der inkompressiblen Navier-Stokes-Gleichungen auf Basis der Finite-Volumen-Methode (FVM). Zur Berücksichtigung der Staubbeladung innerhalb des porösen Mediums wird ein vereinfachtes Beladungsmodell implementiert.

In Bezug auf die strukturmechanische Betrachtung der Filterfalten wird ein Ersatzmodell auf Basis der Euler-Bernoulli-Biegebalkentheorie hergeleitet. Dabei zeigt sich, dass für einfache Lastfälle die analytische und numerische Lösung gut übereinstimmen. Bei zunehmend inhomogener Lastverteilung stößt die analytische Lösung jedoch an Grenzen. Aus diesem Grund ist es notwendig das Problem gleichermaßen auf Basis numerischer Modelle weiter zu betrachten. Das strukturmechanische Modell der Einzelfalte lässt sich mathematisch durch die Grundgleichungen der Elastostatik beschreiben und basiert auf der Finite-Elemente-Methode (FEM).

Die Kopplung von numerischem Strömungs- und Strukturmodell wird aufgrund der Anforderung an die Flexibilität des Ansatzes durch einen sogenannten partitionierten Ansatz realisiert. Die gemeinsame Schnittstelle zur Übertragung von Kräften und Verschiebungen ist dabei die Oberfläche des Filtermediums. Zur Validierung des gekoppelten Fluid-Struktur-Modells werden anschließend in einem experimentellen Teil Versuche zur Quantifizierung der strömungsinduzierten Verformung der Filterfalten durchgeführt. Zur Ermittlung der Faltenverformung wird hierfür ein neuartiger Versuchsaufbau, unter Verwendung eines berührungslosen Messsystems, entwickelt. Die Messergebnisse zeigen einen deutlichen Einfluss der Faltenhöhe auf die Verformung der Falte. Weiterhin kann eine überproportionale Verformung der Falten bei steigender Anströmung ermittelt werden, welche sich auf eine Nichtlinearität aufgrund des Kontakts der Faltenflanken zurückführen lässt.

Auf Basis der Messergebnisse wird schließlich das gesamte gekoppelte Fluid-Struktur-Modell, unter Berücksichtigung aller Submodelle, validiert. Dabei wird die abströmseitige Fläche zwischen den Faltenflanken als Vergleichsgröße von Simulation und Experiment herangezogen. Ferner zeigt ein Vergleich des Profils der unverformten und verformten Falte zwischen Simulation und Experiment qualitativ sowie quantitativ eine gute Übereinstimmung.

Im Anschluss an die Validierung werden zwei Anwendungsbeispiele dargestellt. Das erste Beispiel zeigt die Veränderung des Geschwindigkeits- und Druckfelds innerhalb der Falte bei strömungsinduzierter Verformung im Neuzustand des Filterelements. Das zweite Beispiel veranschaulicht den

Einfluss der Staubbeladung auf die Faltenverformung. Der Vergleich der bisherigen Simulationsmethode, ohne Berücksichtigung der FSI, mit dem neuen Simulationsansatz stellt deutlich heraus, dass, besonders für den Fall des beladenen Filterelements, die Faltenverformung einen signifikanten Anteil zum Druckverlust beiträgt. Weiterhin werden anhand der Simulationsdaten die Druckverläufe innerhalb der Faltenkanäle visualisiert. Die Ergebnisse liefern darüber hinaus neue Erkenntnisse über die Quantität und die Qualität der strömungsinduzierten Verformung der Filterfalten.