Sachbericht (Auszug)

zum Verwendungsnachweis zu FuE Vorhaben

Reg.-Nr.: 49VF200067

FuE-Einrichtung: Institut für Umwelt & Energie, Technik & Analytik e.V. (IUTA)

Kurztitel: Beschleunigte Entwicklung energieeffizienter Faltenfilter

Laufzeit des Projekts vom: 01.04.2021 bis: 31.03.2024

Dr. Siegfried Opiolka, Tel. 02065 418-255
(Name und Telefon Projektleiter)

_____
(Firmenstempel)

Duisburg 11.10.2024
(Ort) (Datum)

_____
(Rechtsverbindliche Unterschrift)

1 Technisch-technologische Zielstellung des Vorhabens

Plissierte Partikelfilter, auch bezeichnet als Kassettenfilter, Panelfilter, Rahmenfilter oder Filterzellen, die durch Faltung von Flachfiltermedien hergestellt werden, sind eine etablierte Bauform. Durch die v-förmigen oder annähernd parallel verlaufenden Falten wird die Filtrationsfläche vergrößert und damit das i. d. R. limitierte Platzangebot in Luftreinigungsanlagen und Raumluftfiltern optimal ausgenutzt. Bei der Entwicklung und Auslegung plissierter Filter muss immer ein Kompromiss eingegangen werden zwischen der Realisierung eines an die Filtrationsaufgabe angepassten großen Abscheidegrads und einem möglichst niedrigen Differenzdruck, um einerseits die anvisierte Partikelkonzentration auf der Reinluftseite zu erreichen (großer Abscheidegrad) und andererseits die Betriebskosten zu minimieren (kleiner Differenzdruck).

Die Höhe der Falten ist beispielweise durch die anvisierte Anwendung und die dort üblichen Kassettenhöhen vorgegeben, wie z. B. die Höhen von 25 mm, 48 mm und 96 mm für Kompaktklimageräte in Niedrigenergiewohnhäusern bis hin zu RLT-Anlagen in Gebäudekomplexen. Die Anzahl der Falten pro Längeneinheit muss dagegen für jedes Flachfiltermedium unter Berücksichtigung der mechanischen, physikalischen und elektrostatischen Eigenschaften des Filtermediums sowie der Strömungsgeschwindigkeit vor dem Filterelement ermittelt werden. Dafür ist ein umfassendes Fachwissen über aerosoldynamische Vorgänge in Filtrationsprozessen notwendig, um die in der Literatur beschriebenen Ergebnisse entsprechend auswerten und in eine konkrete Faltenanzahl pro Längeneinheit umsetzen zu können. Dieses Fachwissen ist bei den großen Filterherstellern, die die vollständige Herstellungskette von der Medienproduktion bis zum Vertrieb des Endproduktes abbilden, i. d. R. vorhanden und wird u. a. durch numerische Modellierungen mit CFD-Programmen angewendet.

Im Gegensatz dazu greifen mittelständisch geprägte Medienherstellende und Konfektionierende auf ihr Praxiswissen zurück. Um jedoch schneller wechselnde Kundenanforderungen mit umfangreicheren Medienauswahlen bedienen zu können, ist ebenfalls eine schnellere Anpassung der Parameter zur Plissierung notwendig, insbesondere auch für neue Filtermedien, für die noch kein Praxiswissen zur optimalen Faltung vorliegt. Mittelständisch geprägte Medienhersteller und Konfektionäre stoßen dadurch an ihre Grenzen. Das vorliegende Projekt adressiert daher insbesondere die kleinen und mittelständischen Unternehmen, die Teilaufgaben innerhalb der Herstellungskette „Faltenfilter“ übernehmen, wie z. B. Plissierung, Rahmung und Vertrieb auf Basis von hinzugekauften Medien. Um die zeit- und kostenintensiven Versuche und Prüfungen zur Auslegung von plissierten Filtern zu minimieren, fehlte bisher ein wissenschaftlich basiertes und insbesondere praxisgerechtes Kompendium. Mit Hilfe des Kompendiums sollen mittelständisch geprägte Medienherstellende und Konfektionierende in die Lage versetzt werden, anhand der bekannten Eigenschaften der Flachfiltermedien und der anvisierten Anwendung die Auslegung energieeffizienter plissierter Filter auf möglichst schnelle und kostengünstige Art und Weise durchzuführen. Die erste Version des entwickelten Kompendiums ist daher als einfach handhabbare Tabellenkalkulation ausgeführt. Die Implementierung auf einer Internetseite ist ebenfalls denkbar.

Energieeffiziente Faltenfilter besitzen aufgrund des kostengünstigeren und umweltschonenderen Betriebs eindeutige Vorteile bei der Vermarktung. Auch Medienherstellende profitieren vom vorliegenden Projekt durch die Möglichkeit ihre Filtermedien bzgl. des geplanten Einsatzes als Kassettenfilter bewerten und entsprechend bewerben zu können.

2 Darstellung der erzielten Vorhabensergebnisse

AP 1 Numerisch theoretischer Teil

Die numerische Modellierung wurde mit Hilfe des CFD-Programms Geodict durchgeführt, um sowohl virtuelle Flachfiltermedien als auch virtuelle plissierte Filterelemente abzubilden. Mit Hilfe der erstellten Mikro- und Makrostruktur-Modelle wurde insbesondere der resultierende Differenzdruck als wichtigste Größe für einen energieeffizienten Betrieb berechnet. Darüber hinaus wurde auch der theoretisch zu erwartende Fraktionsabscheidegrad betrachtet. Die Validierung der erstellten numerischen Modelle erfolgte anhand von experimentellen Untersuchungen an realen Filtern, die ebenfalls in Mikro- und Makrostruktur-Modellen abgebildet wurden. Die Ableitung der entwickelten analytisch lösbaren Näherungsgleichung zur Berechnung der optimalen Faltenanzahl für einen energieeffizienten Betrieb erfolgte auf Basis von Parameter-Variationen der Medien-Eigenschaften virtueller Filtermedien und virtueller Filterelemente. Die so geschaffene Datenbasis diente zur Anwendung des Buckinghamschen Pi-Theorems zur Ähnlichkeitstheorie und Dimensionsanalyse. Die entwickelten sog. Pi-Faktoren und deren funktionaler Zusammenhang bilden die angestrebte analytisch lösbare Näherungsgleichung.

AP 1.1 Auswertung von Literaturdaten

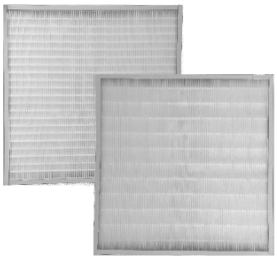
Filtermedien werden bei der Bauform „Mini-Pleat“ für Kassettenfilter je nach Anwendung und Medieneigenschaften unterschiedlich ausgeführt und gefaltet. Stabilisierung und Fixierung der Falten erfolgt durch Schmelzkleber. Je nachdem, wie die Schmelzklebeflächen im Plissee verteilt sind, z. B. über die Faltenspitzen geführt oder seitlich aufgetragen und in Abhängigkeit der Kassettenhöhe sowie der Qualität der Faltung insgesamt, entstehen eher parallel verlaufende Filtergeometrien (Bezeichnung: rechteckige Falten) oder v-förmige Filtergeometrien (Bezeichnung: dreieckige Falten). Eine weitere Stabilisierung der einzelnen Falten und des gesamten Plissees wird durch die verwendete Steifigkeit der Filtermedien aus synthetischen Fasern erreicht, sodass übliche Kassettenhöhen von rund 25 mm, 48 mm und 96 mm bis 150 mm hergestellt werden können.

Der Einsatz der Kassettenfilter erfolgt z. B. in raumlufttechnischen Anlagen in Gebäudekomplexen, für die kontrollierte Zwangsbelüftung von Niedrigenergiehäusern oder als Filter für Gasturbinen und Turbokompressoren. Die Volumenströme durch die Kassettenfilter liegen z. B. im Bereich von rund 2000 m^3/h bis 3400 m^3/h und bei Strömungsgeschwindigkeiten vor den Filterelementen von rund 1,5 m/s bis 3,0 m/s.

Tabelle AP1.1-1: Eigenschaften der im Projektverlauf beschafften Filtermedien und der nach Vorgaben von IUTA konfektionierten Filterelemente.

Minipleat-Filterelemente

bestehend aus:
- ✓ Synthetischem Filtermedium
- ✓ Hotmelt-Kleber
- ✓ Papprahmen



Filterelementhöhen:
- ✓ 25 mm
- ✓ 48 mm
- ✓ 96 mm

Faltenabstände:
3,0 mm – 10,0 mm

Filterklasse	Design	Polymer	Eigenschaften
ePM10	**Einlagig**		
	A) Faservliesstoff	PP+PP/PE	FM: 75 g/m² Dicke: 0,73 mm LDK: 1800 l/(m²s) Perm.: 1,19e-10 m²
	B) Meltblown	PP	FM: 140 g/m² Dicke: 1,19 mm LDK: 690 l/(m²s) Perm: 7,46e-11 m²
ePM2,5	**zweilagig**		
	C) Faservliesstoff Meltblown	PP+PP/PE PP	FM: 90 g/m² Dicke: 0,84 mm LDK: 400 l/(m²s) Perm.: 3,05e-11 m²
	D) Spinnvliesstoff Meltblown	PP/PE PP	FM: 95 g/m² Dicke: 0,68 mm LDK: 500 l/(m²s) Perm.: 3,08e-11 m²
ePM1	**dreilagig**		
	E) Spinnvliesstoff Nanofaser-E-Spun Spinnvliesstoff	PP … PP	FM: 104 g/m² Dicke: 0,91 mm LDK: 960 l/(m²s) Perm.: 7,90e-11 m²

In der Literatur werden Untersuchungen beschrieben, in denen der Differenzdruck in Abhängigkeit der Faltenanzahl pro Längeneinheit und auch die Partikelabscheidung in Kassettenfiltern theoretisch und experimentell behandelt wurden. Ähnlich wie die im Methodenteil des Projektantrags beschriebene Betrachtung von rechteckigen Falten, werden in unterschiedlich komplexen Ansätzen auch für dreieckige Falten Zusammenhänge zwischen der Strömung und dem Druckverlauf in den Faltenzwischenräumen dargestellt. Diese Arbeiten bilden den Ausgangspunkt für theoretisch und/oder empirisch ableitbare Zusammenhänge zwischen dem Differenzdruck am plissierten Filter und der Faltenanzahl pro Längeneinheit sowie den Eigenschaften der Filtermedien. Die Literatur-Auswertung ergab, dass vereinfachende Ansätze zur Beschreibung der Strömung und des Verlaufs des Differenzdrucks innerhalb der Faltenzwischenräume für den Fall einer laminaren Strömung existieren. Die Modellierung der Strömung erfolgt in diesem Fall z. B. mit einem Ansatz nach Stokes. Durch weitere Annahmen, z. B. eine geringe Luftdurchlässigkeit der Filtermedien, wie dies Hochleistungs-schwebstofffilter aufweisen, die in der Reinraumtechnik bei geringen Anströmgeschwindigkeiten der Elemente (< 0,5 m/s) eingesetzt werden, sind analytisch lösbare Näherungsgleichungen für den Differenzdruck am Filterelement ableitbar.

Insbesondere für Kassettenfilter, die in RLT-Anlagen eingesetzt werden, treffen diese Annahmen nicht zu. Im hier betrachteten System liegen die Anströmgeschwindigkeiten der Elemente im Bereich von rund bis zu 3,0 m/s, die Luftdurchlässigkeit der Filtermedien ist größer und die Strömung in den Faltenzwischenräumen ist nicht laminar. Unter diesen Annahmen erfolgte die Modellierung der Strömung nach einem Navier-Stokes-Ansatz. Hierfür existieren keine analytisch lösbaren Näherungs-gleichungen für den Differenzdruck am Filterelement.

Um die in diesem Forschungsvorhaben angestrebte analytisch lösbare Näherungsgleichung für den Differenzdruck in Abhängigkeit von der Faltenanzahl pro Längeneinheit im System „Kassettenfilter für RLT-Anlagen“ abzuleiten, ohne dass eine triviale Lösung für den Navier-Stokes-Ansatz der Strömung

existiert, wurde folgender Projektansatz gewählt: Durch numerische Modellierung des beschriebenen Systems mit Hilfe des CFD-Programms Geodict wurden sowohl der Strömungsverlauf, der Differenzdruck in den Faltenzwischenräumen und dem Filtermedium sowie die Partikelabscheidung berechnet. Dies erfolgte mit virtuellen Filtermedien und Filterelementen sowie mit realen Medien, die ebenfalls durch Mikrostruktur- und Makrostruktur-Modellierung in die virtuelle Ebene transformiert und über reale Untersuchungen zum Differenzdruck und Fraktionsabscheidegrad validiert wurden. Durch Variation wesentlicher Einflussparameter, wie Mediumdicke (0,2 mm bis 1,2 mm), Flächenmasse (75 g/m² bis 140 g/m²), Luftdurchlässigkeit bzw. Permeabilität (2,5E-11 m² bis 2,5E-10 m²), Faltenhöhe (12 mm bis 150 mm), Faltenanzahl pro 100 mm (4 bis 40) sowie dem Volumenstrom durch das Filterelement (2009 m³/h und 3400 m³/h) entstand ein Datensatz von über 300 Datenpunkten. Diese Datenbasis bildete die Grundlage zur Anwendung des Buckinghamschen Pi-Theorems zur Ähnlichkeitstheorie und Dimensionsanalyse. Die auf diese Weise abgeleiteten sog. Pi-Faktoren und deren funktionaler Zusammenhang bilden die angestrebte analytisch lösbare Näherungsgleichung für den Differenzdruck in einem Kassettenfilter als Funktion der Faltenanzahl pro Längeneinheit.

Die Auswahl beispielhafter Flachfiltermedien erfolgte anhand von Strukturdaten marktverfügbarer Medien und auf Basis von Informationen der Industriepartner, die auch die entsprechenden Materialien zur Verfügung stellten. Ausgewählt wurden insgesamt fünf Flachfiltermedien, die zu Minipleat-Filterelementen weiterverarbeitet wurden und den Bereich der Feinstaubfilter mit den Filter-Klassifizierungen ePM1 bis ePM10 abdeckten. Detaillierte Daten zur Charakterisierung der Medien und der Filterelemente werden in den entsprechenden Arbeitspaketen erläutert und anhand von Diagrammen dargestellt. Um Doppelungen der Abbildungen im Text zu vermeiden, werden in den Abschnitten AP 2.1 „Charakterisierung von Flachfiltermedien“ und AP 2.2 „Charakterisierung von plissierten Filtern“ die durchgeführten Arbeiten beschrieben und auf die Ergebnis-Diagramme in den zutreffenden Kapiteln verwiesen.

AP 1.2 Mikrostruktur-Modellierung von Flachfiltermedien

Die Mikrostruktur-Modellierung wurde für alle in *Tabelle AP1.1-1* aufgelisteten Filtermedien durchgeführt. Am Beispiel von Medium A werden die prinzipielle Vorgehensweise und repräsentative Ergebnisse beschrieben.

Um einen visuellen Eindruck der realen Medienstrukturen und um einen Beurteilungsstandard für die erstellten virtuellen Mikrostrukturen zu erhalten, wurden Oberflächen- und Querschnitts-Aufnahmen mit Licht- und Raster-Elektronen-Mikroskopen angefertigt. Darauf aufbauend und mit den in AP 2.1 erreichten Ergebnissen zur Medien-Charakterisierung, insbesondere bzgl. der Differenzdruck-Messungen bei unterschiedlichen Anströmgeschwindigkeiten des Filtermediums, erfolgte die Generierung der virtuellen Mikrostrukturen mit dem CFD-Programm Geodict.

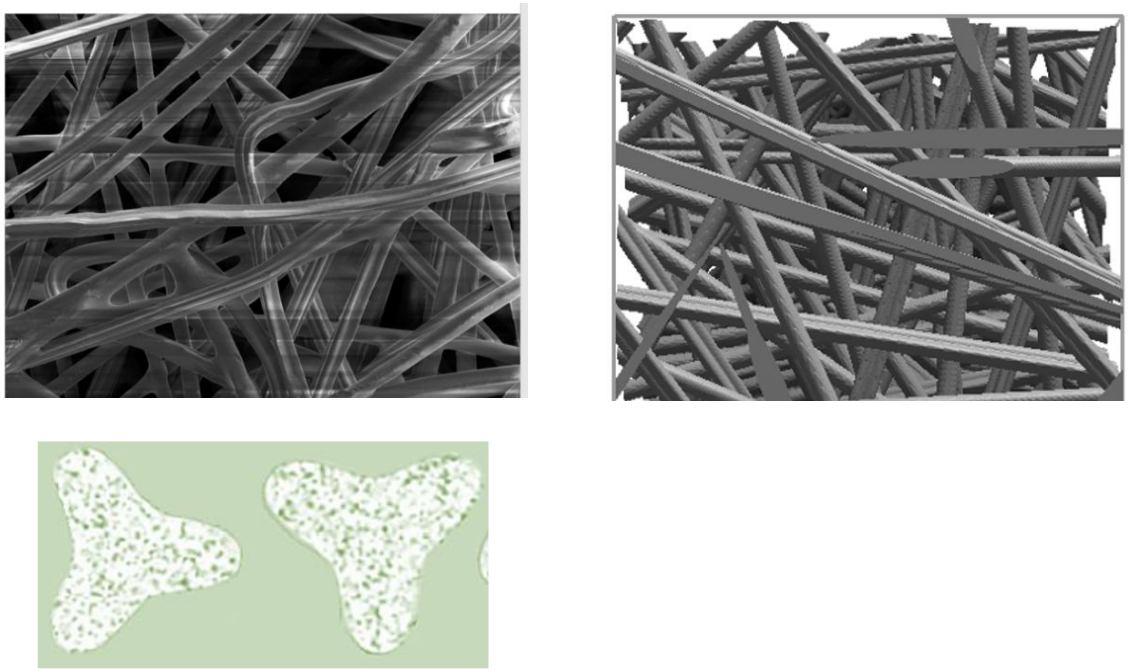


Abbildung AP1.2-1: Filtermedium A, hydrodynamisch verfestigter Faservliesstoff, REM-Aufnahme (links oben). Mikrostruktur generiert mit dem Modul FiberGeo von Geodict (rechts oben). Trilobaler Faserquerschnitt, Foto: FiberVisions (links unten).

Einen wesentlichen Aspekt stellte dabei die Faserorientierung dar. Unter Berücksichtigung der Ausgangsmaterialien und des Vliesstoff-Herstellungsverfahrens, das verschiedene Prozessstufen von der Faservorbereitung bis zur Nachbehandlung der Vliesstoffe durchläuft, sind die Fasern tendenziell quer zur Arbeitsrichtung ausgerichtet (in Geodict: x-y-Ebene). Die Orientierung der Fasern innerhalb der x-y-Ebene kann z. B. mit einer Gaußschen Winkelverteilung mit einer Standardabweichung von +/- 90° eingestellt werden. Senkrecht zum Ablageband kann die Faserorientierung zunächst vernachlässigt werden, dies entspricht in Geodict der z-Richtung und ist identisch mit der Hauptströmungsrichtung durch den Filter. Ein weiterer Parameter zur Modellierung der Mikrostruktur war der Faser-durchmesser. Der ausgewählte Vliesstoff bestand aus Fasern mit rundem Querschnitt und einem ca. 40 %-igen Anteil mit trilobaler Querschnittsform. Die Einheit der Faserfeinheit ist dtex. Ein Dezitex (dtex) entspricht dabei 1 Gramm Fasermaterial pro 10.000 Meter Faserlänge. Der Faserdurchmesser wurde aus der Faserfeinheit unter der Annahme ausschließlich runder Faserquerschnitte berechnet, als auch über Bildanalysefunktionen aus erstellten REM-Aufnahmen experimentell ermittelt. Dabei wurden die Fasern mit offensichtlich rundem Querschnitt bevorzugt. Das Maximum lag dabei im Bereich des rechnerisch ermittelten Faserdurchmessers (15,3 µm).

Tabelle AP1.2-1: Parametervariationen zur Entwicklung der Mikrostruktur-Modelle.

Voxellänge	0,5 µm	1,0 µm	2,0 µm	4,0 µm	Experiment
Differenzdruck	22,0 Pa	21,0 Pa	21,3 Pa	19,8 Pa	16 Pa
Querschnitt	190 x 190 µm²	380 x 380 µm²	780 x 780 µm²		Experiment
Differenzdruck	22,4 Pa	19,5 Pa	19,0 Pa		16 Pa
Faserform	Rund	trilobal 0,3	trilobal 0,4	trilobal 0,6	Experiment
Differenzdruck	19,5 Pa	20,3 Pa	22,0 Pa	22,8 Pa	16 Pa
Anström-geschwindigkeit	0,10 m/s	0,17 m/s	0,34 m/s		Experiment
Finale Struktur Differenzdruck	10 Pa	16 Pa	32 Pa		8 / 15 / 33 Pa

Über diese und weitere beschreibende Parameter der Flachfiltermedien hinaus, war eine der Aufgabenstellung angepasste Auflösung der virtuellen Mikrostruktur von entscheidender Bedeutung für die Genauigkeit der zu berechnenden Differenzdrücke und Fraktionsabscheidegrade. Analog zum 2-dimensionalen Bildbereich, in dem die Auflösung eines Bildes durch die Anzahl der Bildpunkte (Pixel) pro Längeneinheit beschrieben wird, erfolgt bei der 3-dimensionalen CFD-Modellierung in Geodict die Beschreibung der Strukturauflösung über Voxel. Dies sind Würfel mit konstanter Seitenlänge, aus denen die Mikrostrukturen aufgebaut werden. Für Medium A, mit einer Dicke von rund 760 µm und einem über Geodict ermittelten Modalwert des Faserdurchmessers von 17,4 µm, wurden detaillierte Untersuchungen mit unterschiedlichen Voxellängen von 0,5 µm bis 4 µm bei Abmessungen der Mikrostruktur in der Größe von 380 µm x 380 µm x 760 µm durchgeführt. Ziel der Untersuchungen war die Bestimmung der optimalen Strukturauflösung, d. h. der Voxelanzahl pro Volumeneinheit, bei der eine hohe Genauigkeit der Ergebnisse bei geringer Rechendauer erhalten wird. Beispielsweise betrugen bei einer Anströmgeschwindigkeit vor dem Filtermedium von 0,17 m/s die berechneten Differenzdrücke zwischen 19,8 Pa und 22,0 Pa bei den zugehörigen Voxellängen von 4 µm, 2 µm, 1 µm und 0,5 µm. Die Strukturauflösungen lagen dabei zwischen 0,016 Voxel pro µm³ und 8 Voxel pro µm³. Mit zunehmender Strukturauflösung näherte sich der berechnete Differenzdruck dem experimentellen Wert an.

Die Ergebnisse zeigten den signifikanten Einfluss der gewählten Strukturauflösung auf die berechneten Werte. Prinzipiell strebten die Differenzdrücke mit kleiner werdenden Voxellängen gegen einen Grenzwert. Die weitere Verkleinerung der Voxellänge lieferte keine weitere Änderung des Ergebnisses, jedoch vergrößerte sich die Rechendauer auf inakzeptabel lange Zeiten.

Neben der Voxellänge und der daraus resultierenden Strukturauflösung hatten die Abmessungen der Mikrostruktur einen Einfluss auf die Genauigkeit der Berechnungen. Dies zeigte z. B. die Halbierung bzw. Verdoppelung der Seitenlänge des durchströmten Querschnitts, sodass Querschnitte von 190 µm x 190 µm, 380 µm x 380 µm und 760 µm x 760 µm entstanden, bei einer konstanten Mediumdicke von 760 µm. Bei einer Voxellänge von 0,5 µm blieb in diesen Beispielen die Strukturauflösung konstant mit

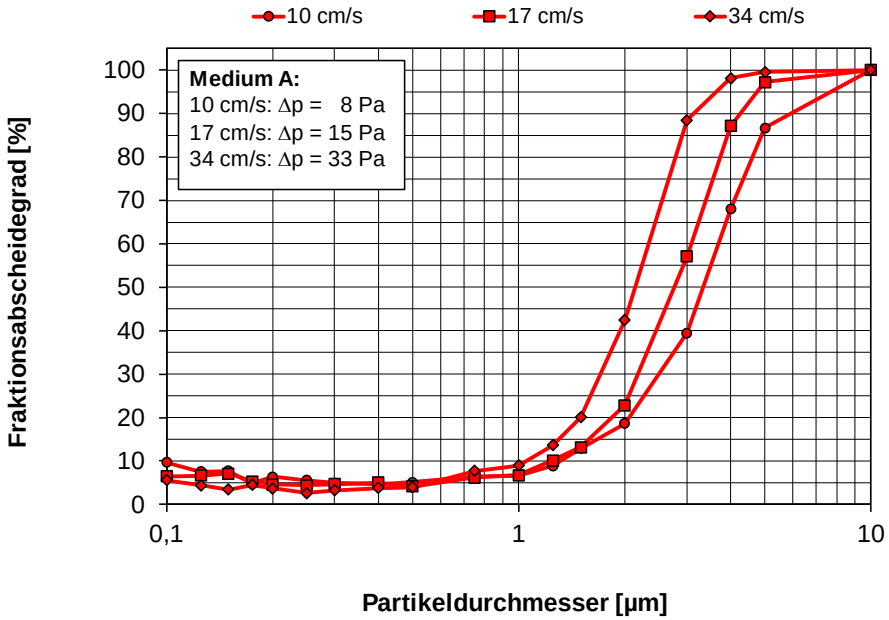


Abbildung AP1.2-2: Mit finalem Mikrostruktur-Modell berechneter Differenzdruck und Fraktionsabscheidegrad für einlagiges Filtermedium A.

8 Voxel pro µm³, die absolute Anzahl der Voxel variierte um den Faktor 16. Die Ergebnisse des Differenzdrucks lagen im Bereich von 19,0 Pa bis 22,4 Pa und bei dem größten Querschnitt näher beim experimentellen Wert (siehe *Tabelle AP1.2-1*).

Da die betrachteten Filtermedien zu einem Anteil von 40 % aus Fasern mit trilobalem Querschnitt bestanden, wurde auch deren Einfluss auf den Differenzdruck betrachtet. Variiert wurde die sog. Fraktionsamplitude im Bereich von 0,3 bis 0,6, die den Anteil der rosettenförmigen Amplitude gegenüber dem mittleren Kreisdurchmesser der Faser angibt. Die Ergebnisse zeigten bis zu einem Wert von 0,3 marginale Auswirkungen auf den Differenzdruck. Ab einem Wert von 0,4 sind die Auswirkungen der Faserform auf den Differenzdruck signifikant und nicht vernachlässigbar (siehe *Tabelle AP1.2-1*).

Weitere Detailanpassungen der beschriebenen Parameter führten zum finalen Mikrostruktur-Modell für das Filtermedium A, das eine gute Übereinstimmung von Differenzdruck und Fraktionsabscheidegrad im Vergleich zu den experimentellen Validierungsmessungen zeigte. Besonderes Augenmerk lag auf dem übereinstimmenden Differenzdruck zwischen Modell und Experiment, auch bei unterschiedlichen Anströmgeschwindigkeiten, da dieser Parameter maßgeblich für den angestrebten energieeffizienten Betrieb ist (siehe *Abbildung AP1.2-2*).

Die für das einlagige Filtermedium A beschriebene Vorgehensweise wurde prinzipiell auch für die mehrlagigen Filtermedien gewählt. Am Beispiel des zweilagigen Filtermediums C wurden die einzelnen Lagen jeweils separat betrachtet. Der typische Aufbau des Filtermediums bestand aus einer Faservliesstoff-Lage zur Abscheidung des Grobstaubs (Partikeldurchmesser > 2,5 µm). Diese Lage besaß eine hohe Luftdurchlässigkeit, eine relativ hohe Mediendicke und eine niedrige Flächenmasse. In Strömungsrichtung folgte hinter der Faservliesstoff-Lage eine Meltblown-Lage. Diese war zur Abscheidung des Feinstaubs (Partikeldurchmesser < 2,5 µm) vorgesehen. Charakterisiert war die aus

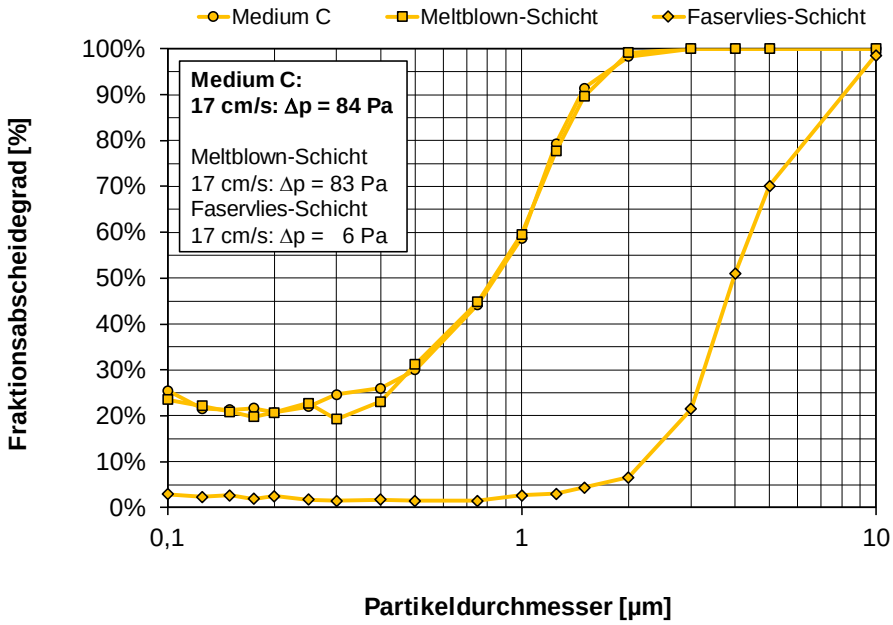


Abbildung AP1.2-3: *Mit finalem Mikrostruktur-Modell berechneter Differenzdruck und Fraktions-abscheidegrad für zweilagiges Filtermedium C.*

sehr feinen Fasern bestehende Meltblown-Lage durch niedrige Flächenmasse, Dicke und Luftdurchlässigkeit. Beide Lagen wurden bei der Herstellung in einem Arbeitsgang hydrodynamisch verfestigt und miteinander verbunden.

Die Mikrostruktur-Modellierung der einzelnen Lagen von Medium C führte bei Annahme eines entladenen Mediums für die Faservliesstoff-Lage zur Grobstaubabscheidung zu einem Differenzdruck von rund 6 Pa (@ Anströmgeschwindigkeit 0,17 m/s) und einem Abscheidegrad von < 5 % (@ Partikeldurchmesser 0,4 µm). Die Meltblown-Lage zur Feinstaubabscheidung erreichte einem Differenzdruck von rund 83 Pa (@ Anströmgeschwindigkeit 17 cm/s) und einem Abscheidegrad von 25 % (@ Partikeldurchmesser 0,4 µm). Die Mikrostruktur-Modellierung des Lagen-Verbundes aus zwei Einzellagen ergab einen Differenzdruck von 84 Pa (@ Anströmgeschwindigkeit 17 cm/s) und einen Abscheidegrad von rund 26 % (@ Partikeldurchmesser 0,4 µm), vergleichbar mit den Ergebnissen für die Meltblown-Lage. Damit bestimmt im Wesentlichen die Meltblown-Lage die Ergebnisse zum Differenzdruck und zur Partikelabscheidung im Vliesstoffverbund (siehe *Abbildung AP1.2-3*).

AP 1.3 Makrostruktur-Modellierung von plissierten Filtern

Die in AP 1.2 beschriebene Mikrostruktur-Modellierung von Flachfiltermedien diente als notwendige Vorarbeit zur Makrostruktur-Modellierung von plissierten Filterelementen. Dabei wurden die durch Betrachtung und Modellierung einzelner Fasern und Faserdurchmesser in der Größenordnung von Mikrometern erhaltenen Ergebnisse für Differenzdruck und Fraktionsabscheidegrad (Mikrostruktur-Modellierung) übernommen und als Eingangsdaten für die Betrachtung plissierter Filterelemente verwendet (Makrostruktur-Modellierung). Auf Grund der Größe des abgebildeten Rechenraums einer Falte (Größenordnung Zentimeter) und der limitierten Speicherkapazität der verwendeten

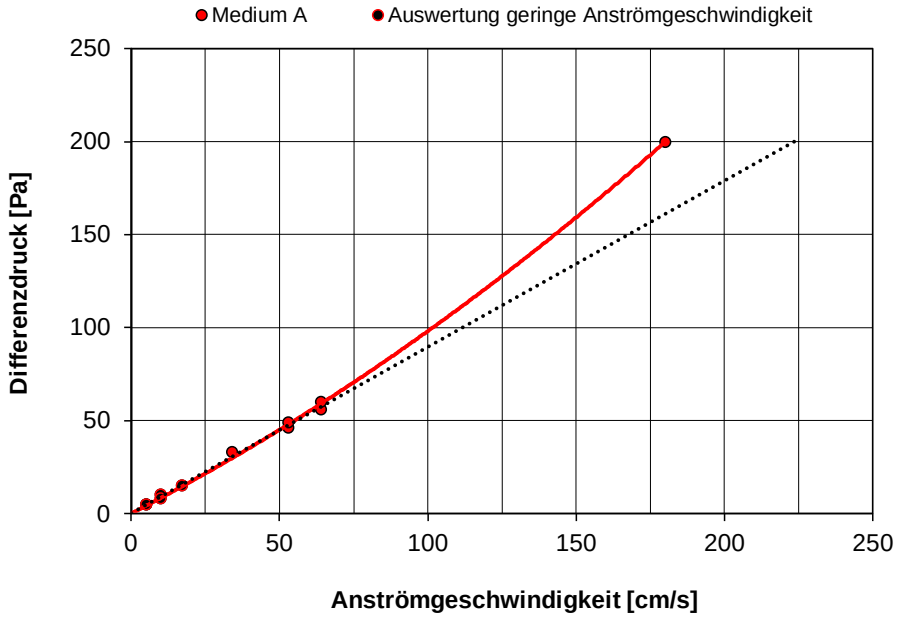


Abbildung AP1.3-1: Differenzdruck in Abhängigkeit der Anströmgeschwindigkeit des Filtermediums A.

Hochleistungs-Rechnersysteme wurden die Falten nicht bis auf Faser-Ebene aufgelöst, sondern als sog. poröse Medien definiert. Diese erhalten die zugewiesenen bzw. berechneten Eigenschaften aus der Mikrostruktur-Modellierung. Dies ist die übliche Vorgehensweise, um Rechnerkapazitäten und Zeitbedarf für die Berechnungen optimal aufeinander abzustimmen.

Die Eingabe-Parameter in der Software Geodict zur Definition der porösen Struktur des Faltenpaketes waren die Dicke und die Permeabilität des Filtermediums. In einer ersten Näherung kann die Permeabilität aus der Luftdurchlässigkeit des Filtermediums und dem linearen Ansatz nach Darcy berechnet werden. Der nicht lineare Anteil enthält eine medienspezifische Konstante, die i.d.R. nicht bekannt ist.

$$\Delta p = \frac{\eta}{k}\, d\, v_m + \frac{1}{2}\, C_2\, \rho\, d\, v_m^2$$

Es bedeuten: Differenzdruck Δp, Viskosität der Luft η, Permeabilität k, Mediumdicke d, Anström-geschwindigkeit des Filtermediums v_m, medienspezifische Konstante C_2, Dichte der Luft ρ.

Die Luftdurchlässigkeit (LDK) des Filtermediums wurde formal von der Einheit [l/(m²s)] umgerechnet in die Einheit [m/s]. Für Filtermedium A folgte daraus LDK = 1800 l/(m²s) = 1,80 m/s. Die Prüfung der Luftdurchlässigkeit eines Filtermediums erfolgt bei einem Prüfdruck von 200 Pa, sodass eingesetzt in den linearen Anteil obiger Formel eine Permeabilität von k_{LDK} = 1,19E-10 m² folgte. Die Bedeutung des nicht linearen Anteils in obiger Formel veranschaulicht das Ergebnis, der im Arbeitspaket AP 2.1 durchgeführten Differenzdruck-Messungen bei unterschiedlichen Anströmgeschwindigkeiten. Es wurden die Differenzdrücke im Bereich der Strömungsgeschwindigkeiten von 0,05 m/s bis 0,64 m/s ermittelt und zusätzlich die aus der Messung der Luftdurchlässigkeit bei 200 Pa resultierende Strömungsgeschwindigkeit von 1,80 m/s berücksichtigt (siehe *Abbildung AP1.3-1*).

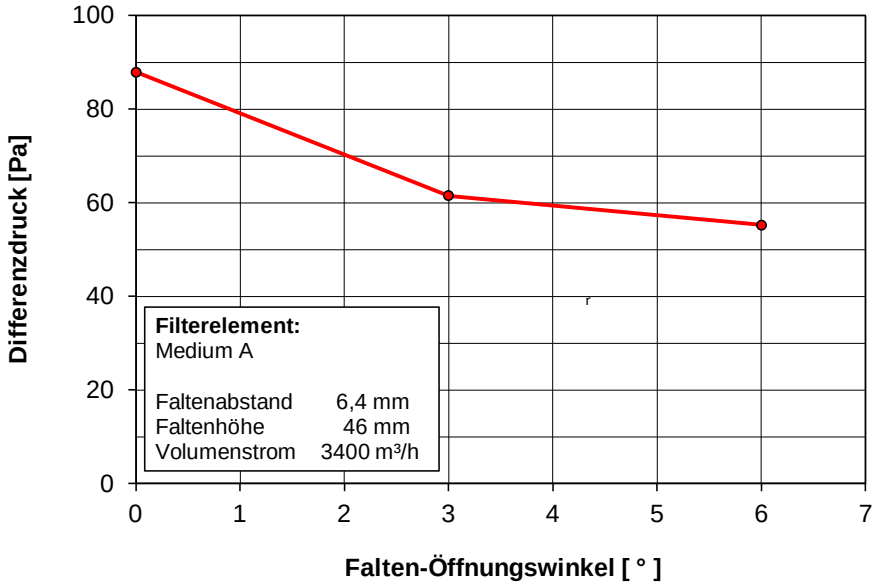


Abbildung AP1.3-2: Differenzdruck in Abhängigkeit des Öffnungswinkels der Falten für ein fiktives Filterelement mit dem Filtermedium A, einem Faltenabstand von 6,4 mm, einer Faltenhöhe von 46 mm und einem Prüfvolumenstrom von 3400 m³/h.

Die in den Farben rot und schwarz dargestellten Messpunkte zeigten einen nicht linearen Verlauf, der durch ein Polynom zweiter Ordnung beschreibbar ist (rote Linie). Der lineare Anteil obiger Gleichung ist für geringe Geschwindigkeiten in laminaren Strömungen gültig. In der Auswertung der experimentellen Differenzdruckwerte wurden dazu ausschließlich Messwerte bis zu einer Anströmgeschwindigkeit von 0,17 m/s berücksichtigt (schwarze Messpunkte), durch den Nullpunkt linearisiert und bis zu einem Differenzdruck von 200 Pa extrapoliert (schwarz punktierte Linie). Mit der neuen Geschwindigkeit von rund 2,25 m/s bei 200 Pa folgte daraus eine Permeabilität von $k_{laminar}$ = 1,49E-10 m². Dieser Wert wurde durch die numerische CFD-Modellierung der Mikrostruktur in AP 1.2 bestätigt (1,45E-10 m²). Für Filtermedien mit geringerer Luftdurchlässigkeit nähern sich die unterschiedlichen Permeabilitäten an. Die Auswirkung unterschiedlicher Werte der Permeabilität auf den Differenzdruck wird im Arbeitspaket AP 1.4 diskutiert.

Als Faltenform wurden ideale Strukturen betrachtet, d. h. dreieckige Falten sowie quasi-rechteckige Falten mit abgerundeten Kuppen. Der Vergleich mit real ausgeführten Faltenfiltern zeigte, dass dreieckige oder rechteckige Strukturen in der Praxis nur annähernd vorliegen. Reale Falten zeigten im mittleren Bereich einen annähernd parallelen Verlauf der Filtermedien (d. h. eher rechteckige Struktur), während im Bereich der Kuppen dreieckige Strukturen, ausgehend von einer abgerundeten Kuppe, vorlagen. Diese realen Strukturen wurden durch Definition eines sog. Öffnungswinkels und eines Faltenradius durch visuellen Vergleich angenähert und in der Software Geodict abgebildet (quasi-reale Faltenform).

Der Faltenradius wurde anström- und abströmseitig in gleichem Maße vergrößert und der berechnete Differenzdruck über dem sog. Öffnungswinkel aufgetragen. Ein Öffnungswinkel von 0° bedeutet, ausgehend von einer rechteckigen Falte, eine ideale rechteckige Form. Größere Gradzahlen besagen, dass die Faltenseiten stärker auseinanderstreben und in Richtung dreieckige Falten tendieren. Durch

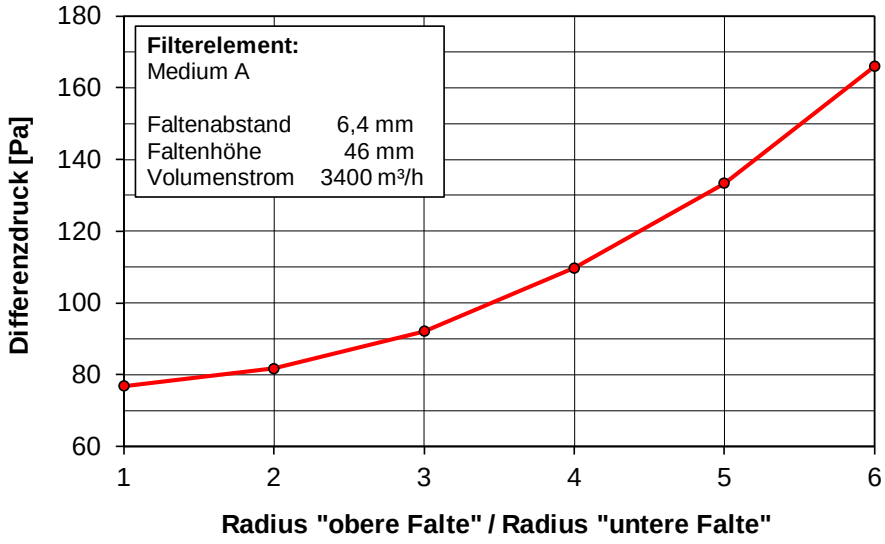


Abbildung AP1.3-3: Differenzdruck in Abhängigkeit des Verhältnisses der Öffnungsradien von Radius obere Falte zu Radius untere Falte für ein fiktives Filterelement mit dem Filtermedium A, einem Faltenabstand von 6,4 mm, einer Faltenhöhe von 46 mm und einem Prüfvolumenstrom von 3400 m³/h.

den entstehenden breiteren Faltenzwischenraum wurden die Widerstandskräfte in der Strömung kleiner. Daraus resultierte ein geringerer Differenzdruck (siehe *Abbildung AP1.3-2*).

Bei weiteren Untersuchungen wurde der Falten-Radius auf der Anström- und Abströmseite unterschiedlich stark variiert. Dadurch wurden die Faltenzwischenräume anströmseitig verengt und könnten sich im Extremfall berühren. Im Gegensatz zum zuvor gezeigten Beispiel stieg die Widerstandskraft im Faltenzwischenraum an und der Differenzdruck wurde signifikant größer. In *Abbildung AP1.3-3* ist dies beispielhaft über dem Verhältnis der Öffnungsradien gezeigt. Da die reale Faltengeometrie im Wesentlichen vom Herstellungsverfahren, d. h. der Art des Kleberauftrages, der Steifigkeit der verwendeten Medien, der eingesetzten Faltmaschinen oder den Betriebstemperaturen im Ein- und Auslauf abhängen kann, wurden für das angestrebte Kompendium als Faltenformen ideale Geometrien für rechteckige und dreieckige Falten angenommen. Wie die späteren Vergleiche mit experimentellen Daten zeigten, lagen die Messwerte überwiegend zwischen diesen Grenzkurven für den Verlauf des Differenzdrucks als Funktion der Faltenanzahl pro Längeneinheit.

Analog zu den Untersuchungen mittels Mikrostruktur-Modellierung wurde auch bei der Makrostruktur-Modellierung eine der Aufgabenstellung angepasste Auflösung der virtuellen Strukturen erarbeitet. Ausgangspunkt waren die Prüfbedingungen einer 592 mm x 592 mm x 48 mm großen Filterkassette mit 15,6 Falten pro 100 mm und einem Volumenstrom von 3.400 m³/h. Für das einlagige Filtermedium mit der Bezeichnung Medium A ergab die numerische Berechnung des Differenzdruckes für die untersuchten Voxel-Längen von 10 µm, 20 µm und 60 µm keine signifikanten Unterschiede. Der Differenzdruck variierte zwischen 54,8 Pa und 55,3 Pa. Für die weiteren Berechnungen wurde eine Voxel-Länge von 20 µm zu Grunde gelegt (ohne Abbildung).

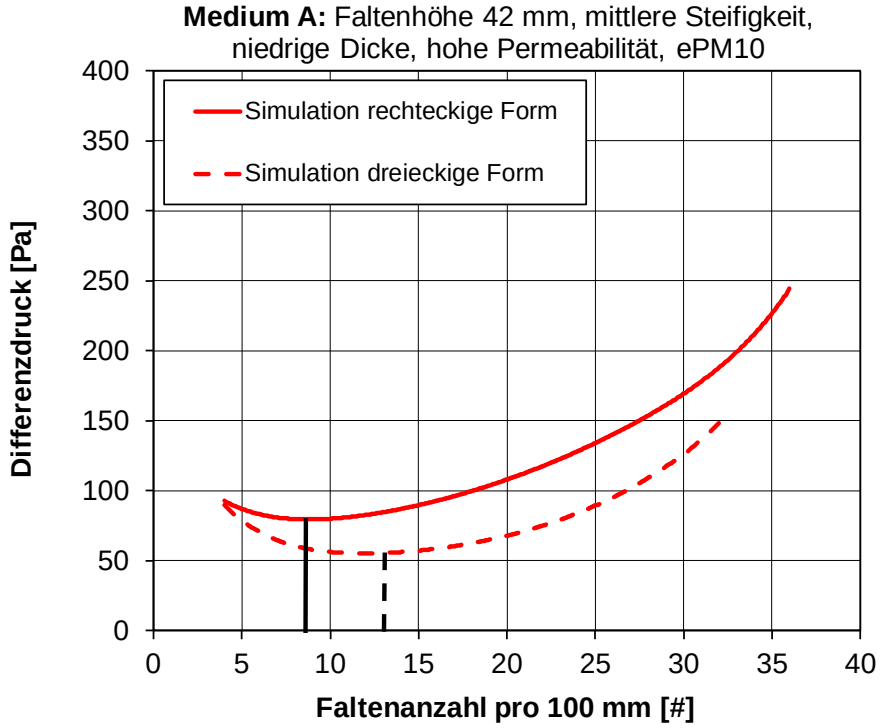


Abbildung AP1.3-4: Differenzdruck in Abhängigkeit der Faltenanzahl pro Längeneinheit bei rechteckigen und dreieckigen Falten für Medium A.

Durch Variation der Faltenanzahl von 4 bis 36 Falten pro 100 mm Länge und einer Faltenhöhe von 42 mm, wurde der zugehörige Differenzdruck berechnet und als Funktion der Faltenanzahl dargestellt. Die geringere Höhe der Falten in einem Filterelement mit der Standard-Höhe von 48 mm resultiert aus dem Faltvorgang und dem Einkleben des Plissees in den Papprahmen. Betrachtet wurden rechteckige Falten und dreieckige Falten. Die Ergebnisse für das einlagige Filtermedium A zeigten ein Minimum im Differenzdruck bei rund 80 Pa für rund 8 Falten (rechteckig) und bei rund 52 Pa für rund 13 Falten (dreieckig) pro 100 mm (siehe *Abbildung AP1.3-4*). Wie erwartet nimmt der Differenzdruck bei geringerer Faltenanzahl auf Grund geringerer Filtrationsfläche und der dadurch größeren Durchströmungsgeschwindigkeit zu. Bei größerer Faltenanzahl nimmt der Differenzdruck auf Grund des steigenden Strömungswiderstands zwischen den enger werdenden Faltenzwischenräumen ebenfalls zu. Für rechteckige Falten wird in der Simulation prinzipiell ein größerer Differenzdruck berechnet als für dreieckige Falten. Die vollständig durchgeführten Simulationen für Filterelemente mit den Filtermedien A bis E sind in Kapitel AP2.2 im Vergleich zu den experimentell ermittelten Messwerten dargestellt. Die Messwerte liegen überwiegend zwischen den beiden Grenzkurven für die Faltenformen (siehe *Abbildung AP2.2-2*).

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass die hier gewählte Faltenanzahl von 4 bis 36 Falten pro 100 mm den theoretischen u-förmigen Verlauf des Differenzdrucks in Abhängigkeit der Faltenanzahl darstellt. Der technisch mögliche und sinnvolle Arbeitsbereich der Faltmaschinen kann insbesondere auf Grund der Dicke und Steifigkeit der eingesetzten Filtermedien kleiner sein, um stabile Faltengeometrien herzustellen. Z. B. verliert bei zu geringer Steifigkeit des Materials sowie bei einer zu geringen Faltenanzahl die Faltenstruktur ihre Stabilität und durch Verformungen der Falten steigt i. d. R. der Differenzdruck.

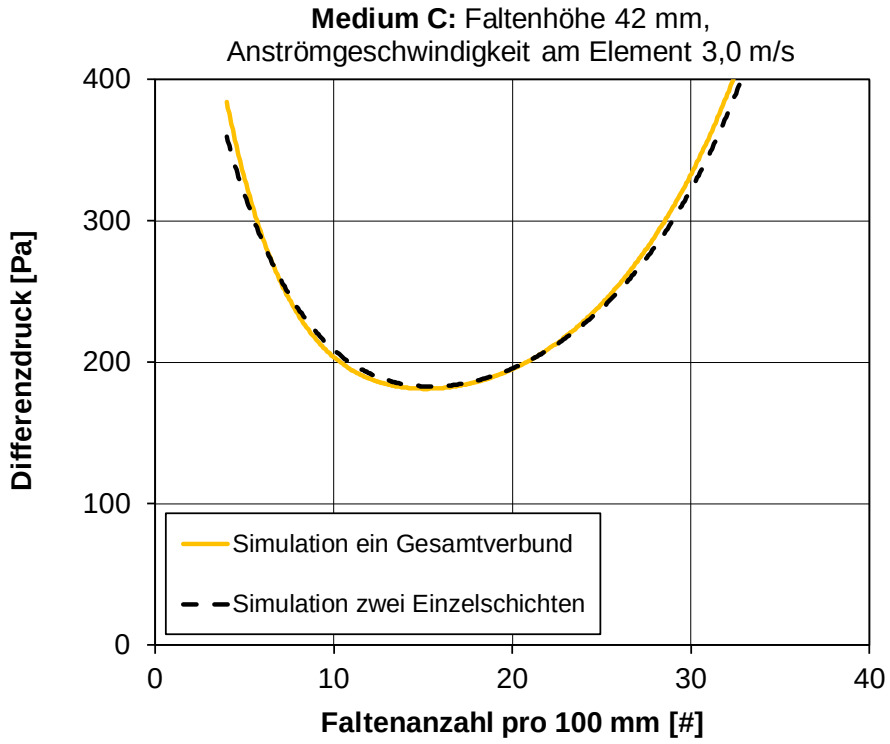


Abbildung AP1.3-5: Verläufe der Differenzdrücke des zweilagigen Filtermediums C im Vergleich der Einzelschichten und des Gesamtverbundes. Verwendete Parameter: Gesamtverbund – Dicke d = 0,84 mm, Permeabilität k_{gesamt} = 3,05 10^{-11}m²; Einzelschichten – hydrodynamisch verfestigte Vliesstoff-Schicht d = 0,62 mm, k_{Vlies} = 2,29 10^{-10} m³; Meltblown-Schicht d = 0,22 mm, k_{MB} = 9,13 10^{-12} m².

Untersuchungen von mehrlagigen Filtermedien, hier dargestellt am Beispiel des zweilagigen Filtermediums C, zeigten, dass die i.d.R. bekannten Eigenschaften der Gesamtstruktur bei der Berechnung des Differenzdruckes zu den gleichen Ergebnissen führten wie die Betrachtung der Einzelschichten und deren spezifischen Eigenschaften. Konkret wurde für diesen Nachweis das zweilagige Filtermedium C im ersten Fall durch zwei Einzelschichten mit den jeweils spezifischen Eigenschaften für Dicke und Luftdurchlässigkeit bzw. Permeabilität und im zweiten Fall als Gesamtstruktur mit den Eigenschaften der Dicke und Permeabilität der Gesamtstruktur modelliert. Das Ergebnis zeigt *Abbildung AP1.3-5*. Die Kurvenverläufe der berechneten Differenzdrücke waren annähernd deckungsgleich und deren Minima lagen jeweils bei rund 15 Falten pro 100 mm.

Dieses Ergebnis war von besonderer Bedeutung, da in der Regel den Konfektionären ausschließlich die Eigenschaften der Gesamtstruktur und keine Daten zu den einzelnen Schichten vorliegen. Die beschreibenden Parameter für mehrlagige Filtermedien sind damit die Mediendicke und die Permeabilität der Gesamtstruktur.

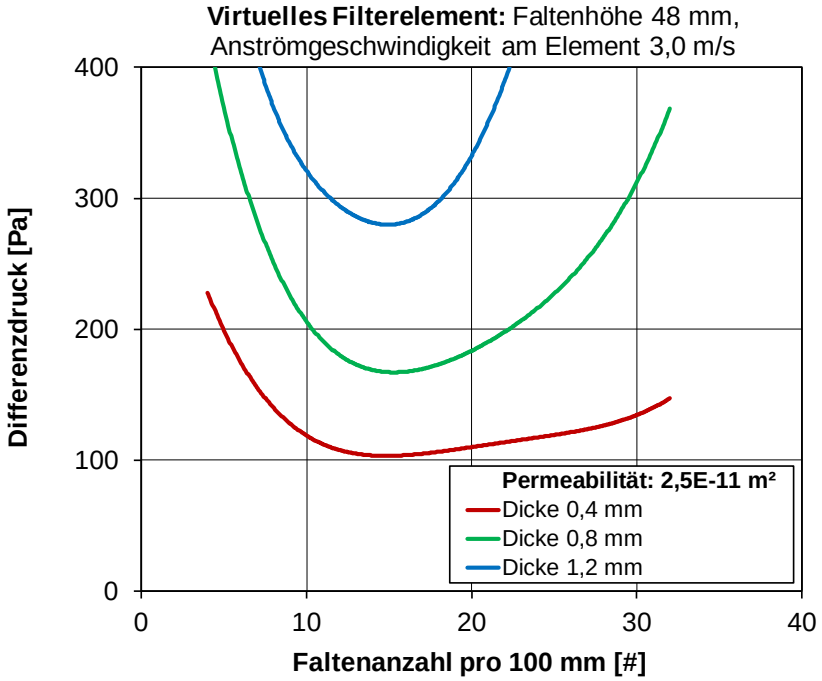


Abbildung AP1.4-1: Differenzdruck eines virtuellen Filterelementes bei Variation der Mediumdicke sowie bei konstanter Faltenhöhe und Permeabilität.

AP 1.4 Ableitung analytisch lösbarer Näherungsgleichungen

Ziel 1: Berechnung der optimalen Faltenanzahl pro Längeneinheit

In den zuvor beschriebenen Arbeitspaketen wurden Mikrostruktur-Modelle für insgesamt fünf Filtermedien sowie die darauf basierenden Makrostruktur-Modelle für entsprechend plissierte Filterelemente erarbeitet. Die Validierung der Modelle erfolgte durch Untersuchungen an Flachfiltermedien und durch Untersuchungen an speziell für das Forschungsvorhaben gefertigten Filterelementen. Die ausgewählten Filtermedien und die daraus konfektionierten Filterelemente umfassten den für die Praxis relevanten Bereich der Klassifizierung von ePM1 bis ePM10.

Auf diesen Ergebnissen aufbauend, erfolgte die Definition virtueller Medien und Filterelemente mit dem Ziel, durch Parameter-Variationen der Einflussparameter eine Datenbasis der Interdependenzen des Differenzdrucks zu schaffen. Folgende Einflussparameter und deren Wertebereich wurden jeweils für Filterelemente mit rechteckigen sowie mit dreieckigen Faltenformen bei einem freien Querschnitt der Filterelemente von 560 x 560 mm² und einer Anströmgeschwindigkeit vor dem Element von rund 3,0 m/s berücksichtigt:

Mediendicke [mm]:	0,2 bis 1,2
Permeabilität [m²]:	2,5E-11 bis 2,5E-10
Faltenhöhe [mm]:	12 bis 150
Falten pro 100 mm [Anzahl]:	4 bis 36
Volumenstrom [m³/h]:	2009 und 3400

Auf diese Weise wurden pro Faltenform mehr als 300 Datenpunkte generiert. Je nach Variation

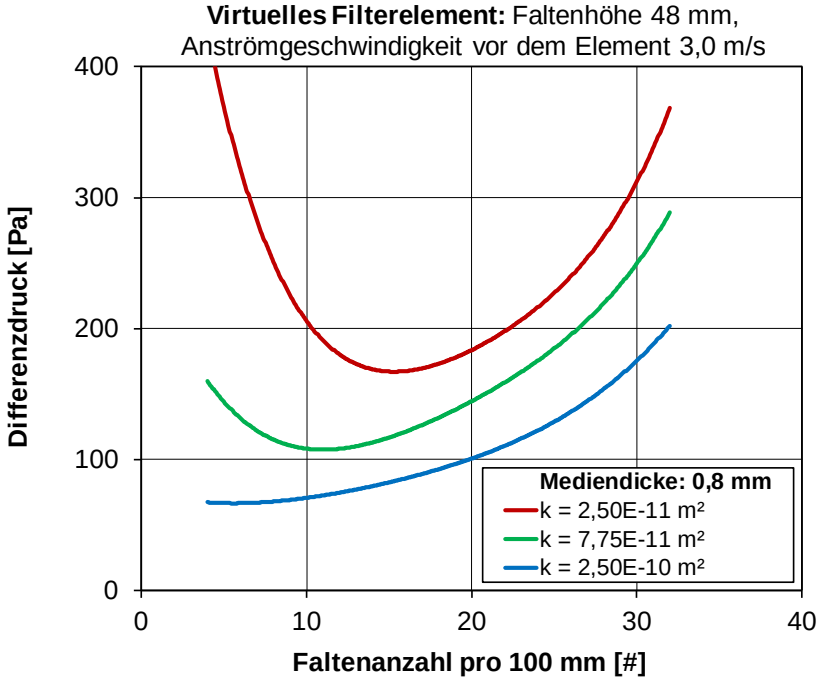


Abbildung AP1.4-2: Differenzdruck eines virtuellen Filterelements bei Variation der Permeabilität sowie bei konstanter Faltenhöhe und Mediendicke.

unterschiedlicher Einflussparameter entstanden Scharen von Differenzdruckkurven. In *Abbildung AP1.4-1* und *Abbildung AP1.4-2* sind beispielhaft Ergebnisse von der Variation der Mediumdicke bei konstanter Faltenhöhe und Permeabilität sowie Ergebnisse von der Variation der Permeabilität bei konstanter Faltenhöhe und Mediendicke dargestellt. Kennzeichnend für alle generierten Kurven war ein u-förmige Verlauf mit einem Minimum bei einer bestimmten Faltenanzahl pro Längeneinheit.

Die erstellte Datenbasis bildete die Grundlage zur Anwendung des Buckinghamschen Pi-Theorems zur Ähnlichkeitstheorie und Dimensionsanalyse. Das Ergebnis war das Zusammenführen der oben dargestellten Kurvenscharen in eine einzelne Kurve, die durch den funktionalen Zusammenhang der identifizierten Einflussparameter entstand.

Einflussparameter auf den Differenzdruck Δp waren physikalische Parameter des Filtermediums (Mediendicke d, Permeabilität k), die geometrischen Parameter der Falten (Faltenhöhe H, Breite des Faltenzwischenraums s) und Strömungsparameter (Anströmgeschwindigkeit Element v_K, Dichte Luft ρ, Dynamische Viskosität Luft η). Nach dem Pi-Theorem lagen damit n = 8 Einflussparameter vor. Weiterhin folgten aus den Einheiten der Einflussparameter die Dimensionen, z. B. bei einer Geschwindigkeit v in [m/s], die Dimensionen Länge L und Zeit T. Im obigen System lagen damit m = 3 Dimensionen aus Länge L, Zeit T und Masse M vor. Die Anzahl dimensionsloser Pi-Gruppen zur Beschreibung des Systems wurde durch n – m = 5 berechnet.

Der Differenzdruck über das gesamte Filterelement setzt sich im Wesentlichen aus dem Differenzdruck im Medium und dem Differenzdruck aufgrund des Widerstands in der Strömung im Faltenzwischenraum zusammen. Differenzdrücke durch Kontraktion und Expansion der Strömung anströmseitig und abströmseitig des Filterelements wurden aufgrund des geringen Einflusses vernachlässigt.

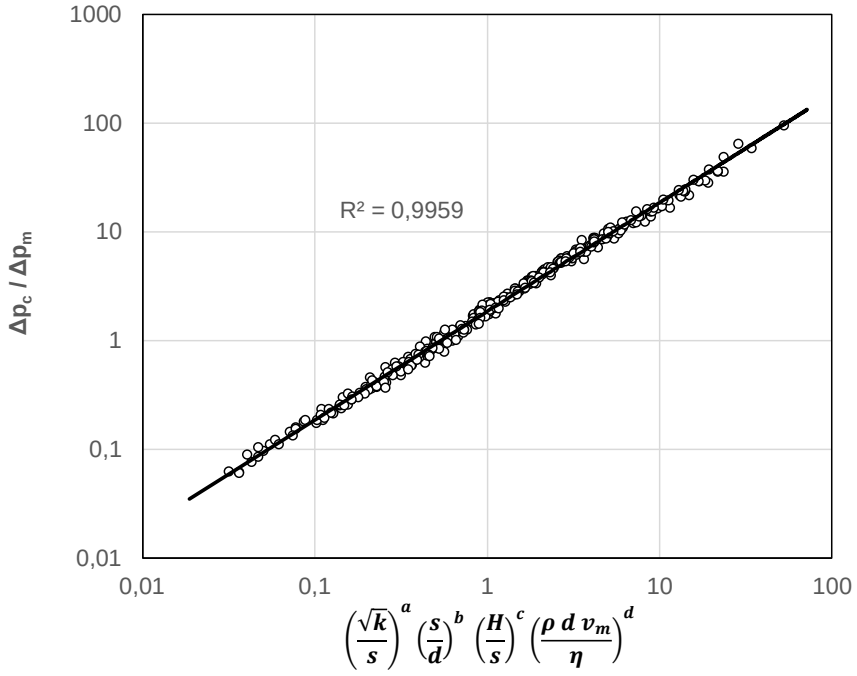


Abbildung AP1.4-3: Funktionaler Zusammenhang der gesuchten dimensionslosen Pi-Gruppen für Filterelemente mit rechteckigen Falten.

Damit galt: $\Delta p_{ges} = \Delta p_m + \Delta p_c$

bzw.: $\Delta p_{ges} / \Delta p_m = 1 + \Delta p_c / \Delta p_m$

Ohne hier auf die Details der Herleitung einzugehen, wurden für das obige System mit rechteckiger Faltenform folgende fünf dimensionslosen Pi-Gruppen hergeleitet:

$\Pi_1 = \Delta p_c / \Delta p_m$ $\Pi_2 = k^{1/2} / s$ $\Pi_3 = s / d$

$\Pi_4 = H / s$ $\Pi_5 = \rho\, d\, v_m / \eta$

Ferner galt: $\Pi_1 = \Delta p_c / \Delta p_m = f(\Pi_2, \Pi_3, \Pi_4, \Pi_5) = (\Pi_2)^a\ (\Pi_3)^b\ (\Pi_4)^c\ (\Pi_5)^d$ Const

Die Herausforderung bestand nun in der Bestimmung der Exponenten a, b, c und d. Eine Strategie bestand darin, einen Einflussparameter, z. B. die Mediumdicke, zu ändern und die Exponenten der Pi-Gruppen bis auf eine erste ausgewählte Gruppe, z.B. Π_2, auf den Wert 1 zu setzen. Der Exponent der Gruppe Π_2 wurde so lange variiert, bis die in die Funktion $\Pi_1 = f(\Pi_2, \Pi_3, \Pi_4, \Pi_5)$ eingesetzten Datenpunkte annähernd auf einer gemeinsamen Kurve lagen. Diese Vorgehensweise musste für die restlichen Einflussparameter in der gleichen Weise in einem mehrfach durchlaufenen Iterationsprozess durchgeführt werden. Die Konstante Const ergab sich aus der Steigung der Geraden im doppeltlogarithmischen Maßstab. Wenn alle Exponenten anhand der vorliegenden Datenbasis bestimmt wurden, lag letztendlich der funktionale Zusammenhang zwischen dem Differenzdruck und den Einflussparametern als analytisch lösbare Näherungsgleichung vor.

Abbildung 1.4-3 zeigt das Ergebnis für Filterelemente mit rechteckigen Falten. Die Exponenten sind in dem Diagramm nicht mit konkreten Werten versehen, um die unmittelbare Übernahme der Ergebnisse nicht zu ermöglichen. Filterelemente mit dreieckigen Falten wurden mit dem gleichen Ansatz betrachtet. Gegenüber dem zuvor beschriebenen System wurden andere Werte für die Exponenten ermittelt und die resultierende Kurve hat einen anderen Verlauf (ohne Abbildung).

Die oben hergeleiteten Pi-Gruppen können auch durch den Bezug auf andere Systemparameter, wie der Mediumdicke statt der Breite des Faltenzwischenraums, gebildet werden. Des Weiteren existieren Software-Programme die zur Bestimmung der Exponenten und zur Lösung des Gesamtsystems unterstützend einsetzbar sind. Im Rahmen einer Masterarbeit wurde dieser skizzierte Weg mit der im vorliegenden Forschungsvorhaben erstellten Datenbasis verfolgt. Damit liegen zwei verschiedene Lösungsansätze für Filterelemente mit rechteckigen Falten vor. Beide Ansätze und Lösungswege führten zu annähernd gleichen Ergebnissen (ohne Abbildung).

In *Abbildung AP1.4-4* sind die Differenzdrücke basierend auf der Simulation mit der Software Geodict (Bezeichnung Simulation) sowie berechnet mit der analytisch lösbaren Näherungsgleichung (Bezeichnung Näherungsgleichung) für fünf Filterelemente mit den Filtermedien A bis E, einer Faltenhöhe von 42 mm (rechteckige und dreieckige Form) und einer Anströmgeschwindigkeit von rund 3,0 m/s als Funktion der Faltenanzahl pro 100 mm dargestellt. Im praxisrelevanten Bereich von ca. 10 bis 25 Falten pro 100 mm sind die Abweichungen zwischen Simulation und Näherungsgleichung mit maximal 25 Pa gering. Im Bereich der Differenzdruck-Minima der fünf Filterelemente von ca. 10 bis 20 Falten pro 100 mm waren die Abweichungen deutlich kleiner und lagen überwiegend im Bereich von kleiner 15 Pa. Ebenfalls geringe Abweichungen von wenigen (ca. 0 bis 2) Falten pro 100 mm konnten für die Lagen der Differenzdruck-Minima ermittelt werden. Eine Ausnahme zeigte sich bei Filterelement D, an dem die Abweichung der Lage des Differenzdruck-Minimums bei rund 6 Falten lag. Ein Grund für diese Diskrepanz konnte bisher nicht gefunden werden. Die beschriebenen Unterschiede zwischen den Ergebnissen der Simulation und der Näherungsgleichung galten gleichermaßen für rechteckige und dreieckige Faltenformen.

Auch unter Berücksichtigung der hier nicht im Detail dargestellten Ergebnisse der weiteren konfektionierten Filterelemente mit den Standard-Höhen von 24 mm und 96 mm zeigte die entwickelte Näherungsgleichung insbesondere in der Umgebung des Differenzdruck-Minimums nur geringe Abweichungen von der numerischen Simulation und den experimentell ermittelten Differenzdrücken. Damit ist die entwickelte Näherungsgleichung uneingeschränkt als die im Forschungsvorhaben angestrebte analytisch lösbare Näherungslösung einsetzbar.

Für die bisher dargestellten Vergleiche wurden sowohl in der Simulation als auch in der Näherungsgleichung die Permeabilität verwendet, die von der Software Geodict für das jeweilige Filtermedium bei laminaren Strömungsverhältnissen innerhalb des Mediums errechnet wurde bzw. wie diese auch experimentell ermittelt werden konnte (siehe *Abbildung AP1.3-1*). In der Praxis sind diese Werte den Konfektionären i. d. R. nicht zugänglich. Alternativ ist in den Datenblättern zu den Filtermedien die Luftdurchlässigkeit angegeben.

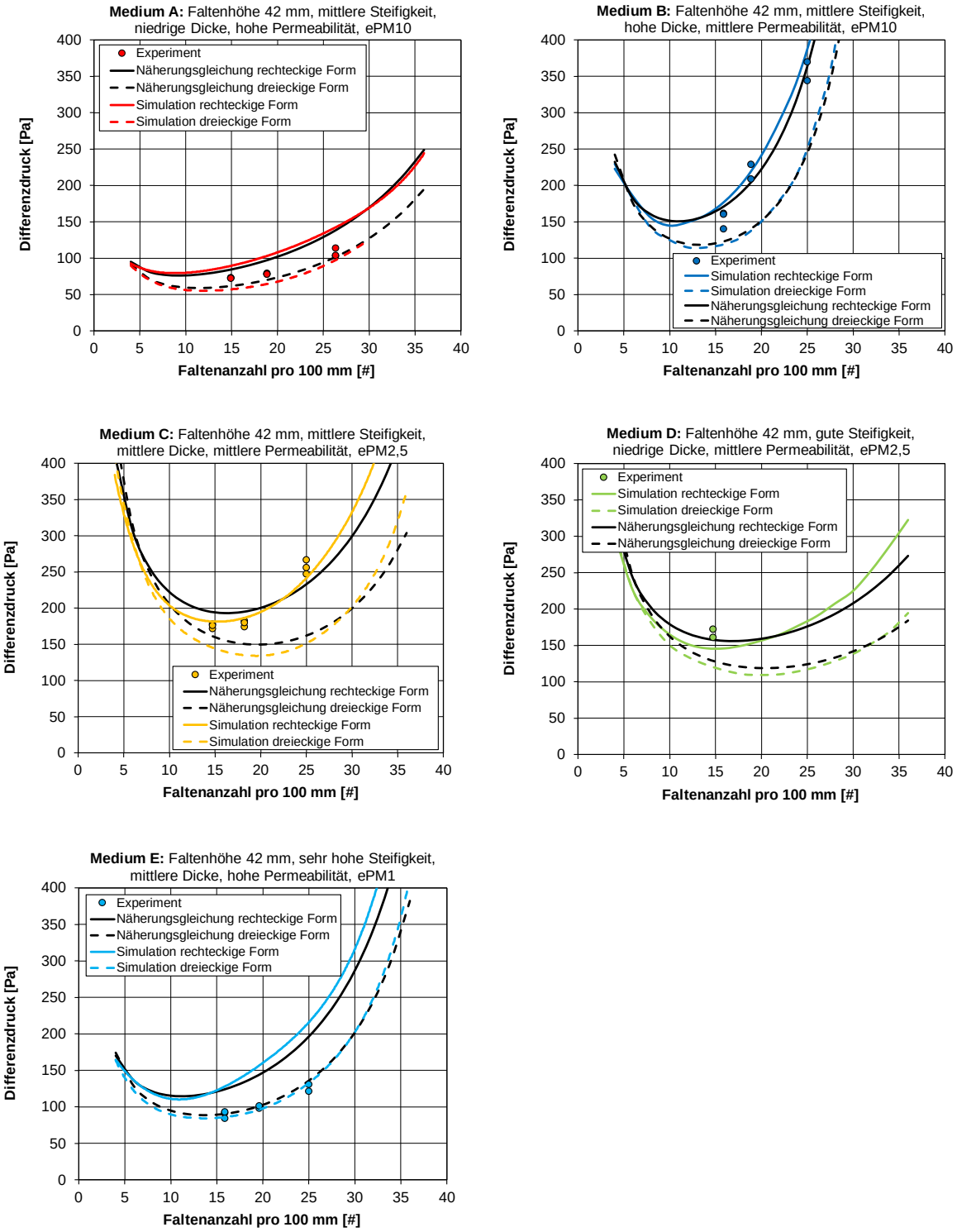


Abbildung AP1.4-4: Simulation (farbige Kurven) und Berechnung des Differenzdrucks mit analytisch lösbarer Näherungsgleichung (schwarze Kurven) für reale Filterelemente mit einer Kassettenhöhe von 48 mm und einer Anströmgeschwindigkeit von rund 3,0 m/s.

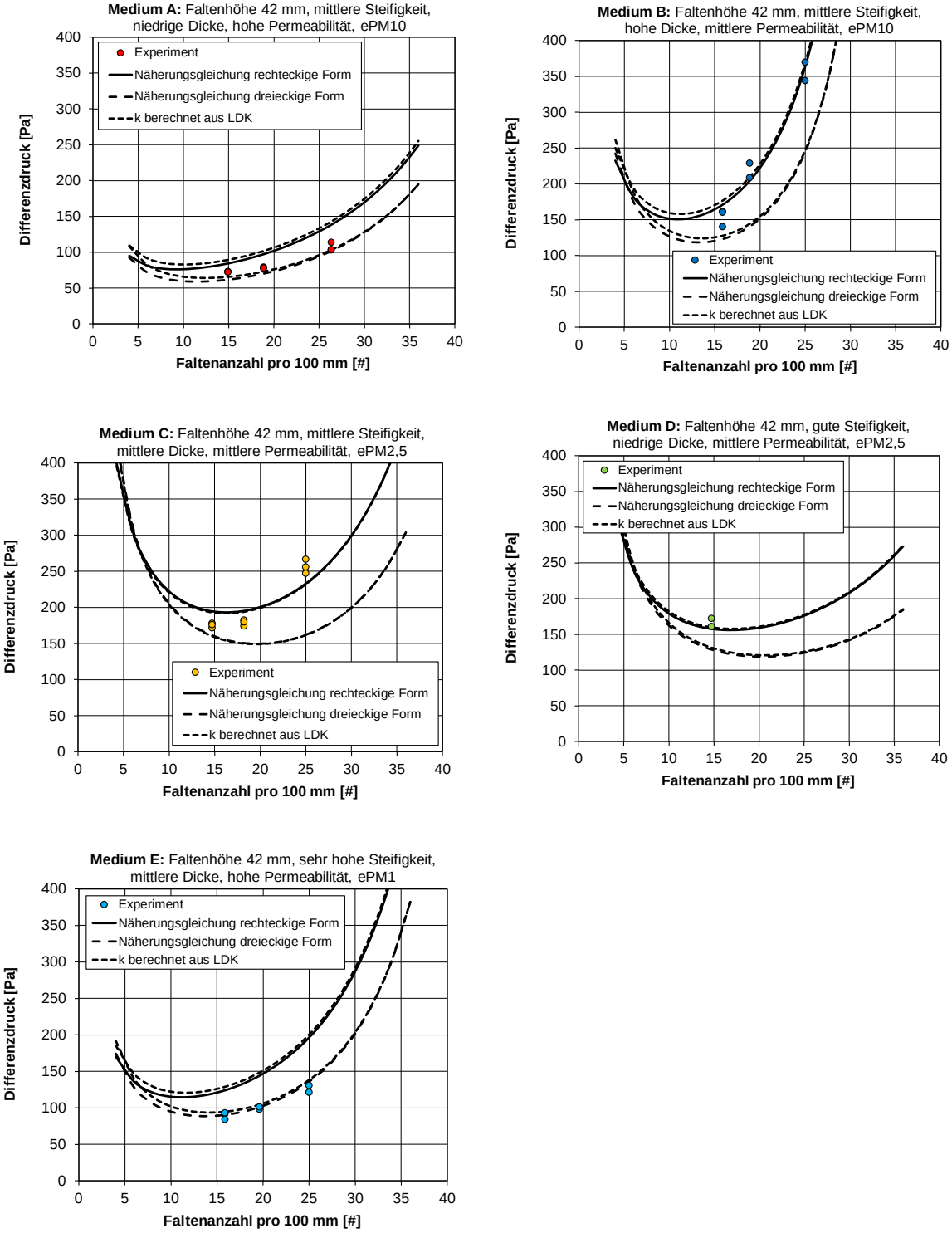


Abbildung AP1.4-5: Berechnung des Differenzdrucks mit analytisch lösbarer Näherungsgleichung für reale Filterelemente mit einer Kassettenhöhe von 48 mm und einer Anströmgeschwindigkeit von rund 3,0 m/s sowie mit der Permeabilität k resultierend aus der Luftdurchlässigkeit LDK der Filtermedien.

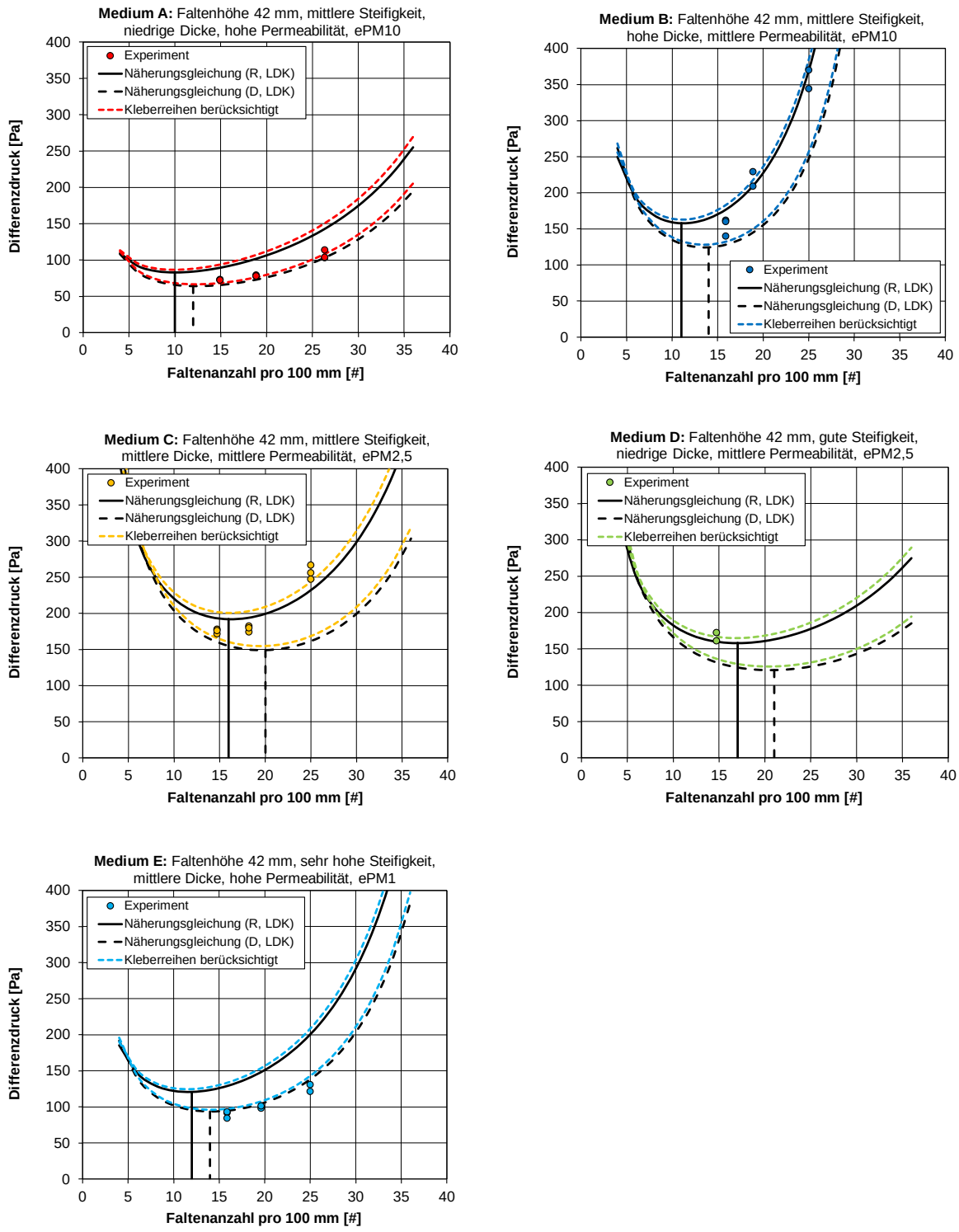


Abbildung AP1.4-6: Berechnung des Differenzdrucks mit analytisch lösbarer Näherungsgleichung für reale Filterelemente mit einer Kassettenhöhe von 48 mm sowie mit Berücksichtigung des Einflusses der Kleberreihen zur Stabilisierung der Plissees (R = rechteckige Form, D = dreieckige Form, LDK = aus Luftdurchlässigkeit berechnete Permeabilität).

Wie in Kapitel AP1.3 beschrieben kann daraus unter Vernachlässigung des nicht linearen Anteils in obiger Gleichung die Permeabilität berechnet werden. Welchen Einfluss diese Vernachlässigung hat, zeigt *Abbildung AP1.4-5*. Ausgehend von den mittels Näherungsgleichung wie zuvor berechneten Differenzdrücken wurden zusätzlich die Ergebnisse eingetragen, wenn die Permeabilität aus der Luftdurchlässigkeit berechnet wurde (fein gestrichelte Kurven). Bei allen fünf betrachteten Filterelementen mit den Filtermedien A bis E waren die Abweichungen im Differenzdruck zwischen den beiden Varianten kleiner als 5 Pa. Diese geringen Abweichungen ermöglichten es, als Eingabewert für die Näherungsgleichung, die aus der Luftdurchlässigkeit berechnete Permeabilität zu verwenden.

Filterelemente werden zur Stabilisierung des Plissees prinzipiell durch Kleberreihen in Form gehalten. Anzahl, Breite und Länge der Kleberreihen variieren ja nach Hersteller. Für die fünf nach den Vorgaben vom IUTA konfektionierten Filterelemente wurden die entsprechenden Kleberreihen ausgezählt und vermessen. In der Näherungsgleichung wurde die durch die Kleberreihen abgedeckte und nicht durchströmte Fläche repräsentiert durch die daraus folgende größere Anströmgeschwindigkeit vor dem Filtermedium. Bei Berücksichtigung der Kleberreihen stieg der Differenzdruck um maximal 5 Pa (siehe *Abbildung AP1.4-6*). Das Modul des Kompendiums zur Berechnung des Differenzdrucks plissierter Filterelemente gestattet die Eingabe der Anzahl vorgesehener Kleberreihen sowie deren Breite. Damit können die Konfektionäre bei Bedarf die Auswirkung unterschiedlicher Varianten von Ausführungen der Kleberreihen berücksichtigen und beurteilen.

In *Abbildung AP1.4-6* sind ebenfalls die Minima der Differenzdruckkurven, getrennt nach der Faltenform, eingezeichnet (senkrechte Linien). Für die fünf untersuchten Filterelemente mit den Klassifizierungen ePM1 bis ePM10 lagen die Minima im Bereich von 10 bis 17 Falten pro 100 mm für die rechteckige Faltenform und von 12 bis 21 Falten pro 100 mm für die dreieckige Faltenform. Bei den einzelnen Filterelementen betrugen die Spannen zwischen den Differenzdrücken mit rechteckiger und dreieckiger Faltenform 2 bis maximal 4 Falten pro 100 mm. Damit können die Konfektionäre die theoretisch optimale Faltenanzahl für den minimalen Differenzdruck unabhängig von der Faltenform auf mindestens 2 Falten pro 100 mm genau bestimmen.

Ziel 2: Prognose des Feinstaubabscheidegrads ePMx von plissierten Filtern

Wie im Antrag zu diesem Forschungsvorhaben beschrieben, basierte der Ansatz zur Berechnung des Fraktionsabscheidegrads von plissierten Filtern zunächst auf der Anwendung von in der Literatur beschriebenen analytischen Modellen zum Einzelfaserabscheidegrad. Die Herausforderung für die Anpassung der Modelle bestand in der Integration der zur Verfügung stehenden Parameter der Filtermedieneigenschaften, wie z. B. Flächenmasse, Luftdurchlässigkeit, Mediumdicke und Faser-durchmesser-Verteilung in die üblicherweise benutzten Modellparameter wie z. B. Packungsdichte und Einzel-Faserdurchmesser. Weiterhin wurden für die relevanten Abscheidemechanismen wie Interzeption, Impaktion, Diffusion, gekoppelte Diffusion und Interzeption sowie Gravitation analytisch lösbare Modelle zum Einzelfaserabscheidegrad aus den Jahren von ca. 1950 bis 2000 zur Berechnung des Gesamtabscheidegrads recherchiert, die unterschiedlichen Ansätze miteinander permutiert und mit den experimentellen Ergebnissen aus AP2.1 verglichen. Die beste Übereinstimmung von experimentellen und berechneten Daten wurde als Näherungsgleichung zur Berechnung des

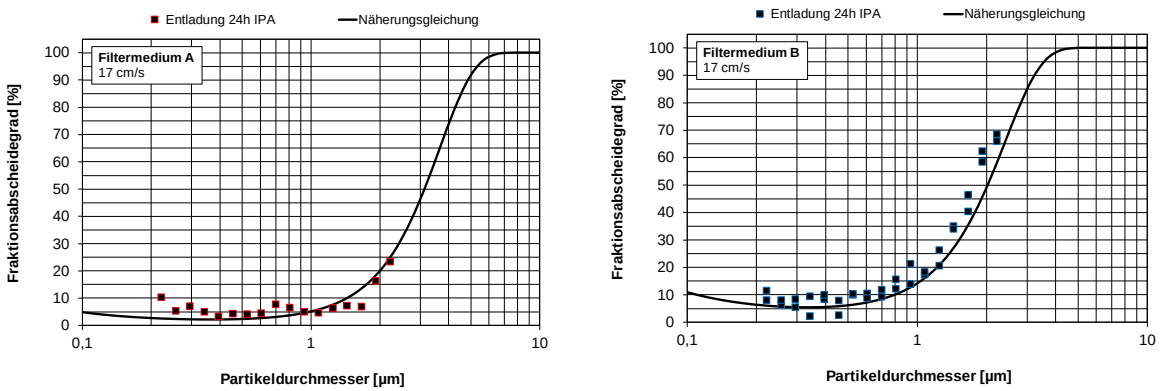


Abbildung AP1.4-7: Berechnung der Fraktionsabscheidegrade mittels Näherungsgleichung für die einlagigen Filtermedien A und B.

Fraktionsabscheidegrads von Flachfiltermedien übernommen.

In *Abbildung AP1.4-7* sind die Ergebnisse für die einlagigen Filtermedien A und B dargestellt. Der Vergleich von experimentell ermittelten und mit der Näherungsgleichung berechneter Fraktionsabscheidegrade zeigt eine sehr gute Übereinstimmung für in einer Isopropanol-Atmosphäre entladene Medien (Bezeichnung: Entladung 24h IPA). Bei der Betrachtung einlagiger entladener Filtermedien ist die erarbeitete Näherungsgleichung uneingeschränkt einsetzbar. Die Berücksichtigung von elektrostatisch geladenen Elektret-Filtermedien wurde auf Grund der Untersuchungsergebnisse aus AP2.1 nicht durchgeführt. Wie in AP2.1 erläutert, wurde keine Systematik in dem zusätzlichen Beitrag durch die Elektretausrüstung identifiziert. Gründe dafür können insbesondere der unbekannte Ladungszustand bei Anlieferung der Filtermedien sein, unterschiedliche Ladungsprinzipien während der Herstellung wie z. B. Korona-Aufladung oder Hydrocharging sowie die Alterung und damit der Ladungsabbau während der Lagerung. Damit ist es aus praktischer Sicht für die Konfektionäre nicht möglich, den Ladungszustand angelieferter Filtermedien mit Elektretausrüstung zu quantifizieren. Aus diesem Grund wurden im Projekt ausschließlich mechanisch wirkende Abscheidemechanismen betrachtet.

Prinzipiell ist die Näherungsgleichung auch für mehrlagige Filtermedien anwendbar, wenn die Eigenschaften der Filtermedien pro Einzelschicht bekannt sind. Diese Daten stehen den Konfektionären i. d. R. nicht zur Verfügung, sodass aus praktischer Sicht die Anwendung der Näherungsgleichung auf mehrlagige Filtermedien nicht möglich ist. Im Gegensatz zur Anwendung integraler Eigenschaftsparameter für den Gesamtverbund, wie dies bei der Bestimmung des Differenzdrucks der Fall war, ist dies bei der Bestimmung des Fraktionsabscheidegrads nicht möglich.

In weiteren Untersuchungen wurde die für flache Flachfiltermedien abgeleitete Näherungsgleichung auf plissierte Filterelemente angewendet. In *Abbildung AP1.4-8* sind die Ergebnisse für Filterelemente mit den einlagigen Filtermedien A und B dargestellt. Zur Berechnung des Fraktionsabscheidegrads des Filterelements bei verschiedenen Faltenabständen wurden die aus dem Modul zur Berechnung des Differenzdrucks ermittelten mittleren Anströmgeschwindigkeiten am Filtermedium eingesetzt. Die mittleren Anströmgeschwindigkeiten betrugen für beide Filtermedien rund 14 cm/s bis 24 cm/s in Abhängigkeit der Faltenabstände. Insbesondere im Bereich der Partikeldurchmesser größer als 1 µm

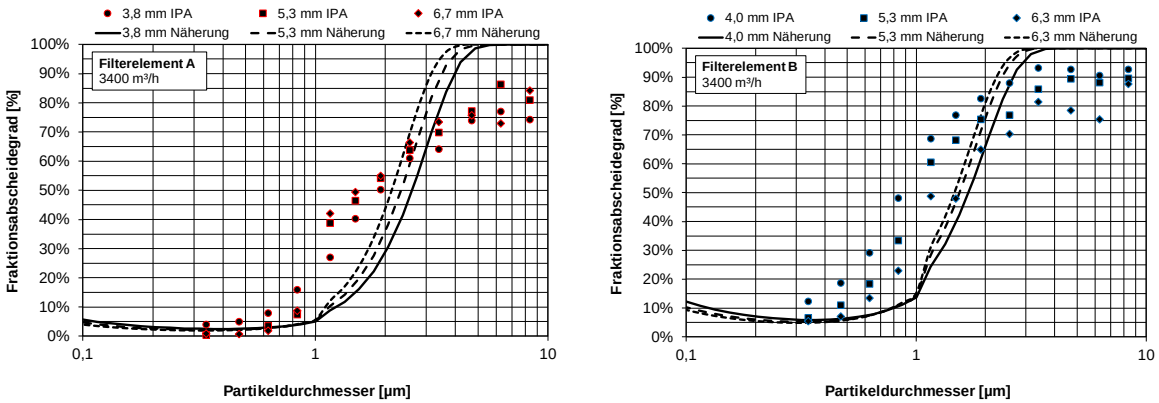


Abbildung AP1.4-8: Berechnung der Fraktionsabscheidegrade mittels Näherungsgleichung für plissierte Filterelemente bei unterschiedlichen Faltenabständen, konfektioniert mit den einlagigen Filtermedien A und B.

lag eine unbefriedigende Übereinstimmung von experimentell ermittelten und mit der Näherungsgleichung berechneten Abscheidegrade vor.

Insbesondere der in diesem Partikelgrößenbereich dominierende Abscheidemechanismus der Impaktion ist abhängig von der Anströmgeschwindigkeit. Ursächlich für die ermittelte Diskrepanz zum Experiment kann daher eine nicht repräsentative mittlere Anströmgeschwindigkeit sein. Die numerische Modellierung mittels Geodict zeigte für Medien mit großer Luftdurchlässigkeit, wie bei den Medien A und B, den Einfluss auf den Fraktionsabscheidegrad bei Variation der Anströmgeschwindigkeit (siehe *Abbildung AP1.2-3*). Durch Variation der Anströmgeschwindigkeit wurde der Fraktionsabscheidegrad entlang der Abszisse verschoben, der prinzipielle Kurvenverlauf blieb erhalten. Letztendlich konnte keine Modifikation zur Anpassung des Kurvenverlaufs an die experimentell ermittelten Werte erarbeitet werden.

AP 2 Experimenteller Teil

Der experimentelle Teil der Untersuchungen an Flachfiltermedien und Filterkassetten zur Validierung der CFD-Modellierung und der erarbeiteten Näherungsgleichungen umfasste Prüfungen in Anlehnung an DIN EN ISO 16890 zur Bestimmung von Differenzdrücken und Fraktionsabscheidegraden, bzw. Klassifizierungen nach ePMx. Weitere Parameter, wie z. B. der Faserdurchmesser und die Faserdurchmesserverteilung wurden bei Bedarf durch Untersuchungen mittels Raster-Elektronen-Mikroskopie bestimmt. Untersuchungen zur Quantifizierung des Elektreteffekts beinhalteten die IPA-Behandlung, d. h. die Entfernung der elektrostatischen Ladungen in einer Isopropanol-Atmosphäre. Durch Vergleich mit dem Elektret-Medium im Originalzustand war der Gewinn durch elektrostatische Abscheidung im Fraktionsabscheidegrad quantifizierbar.

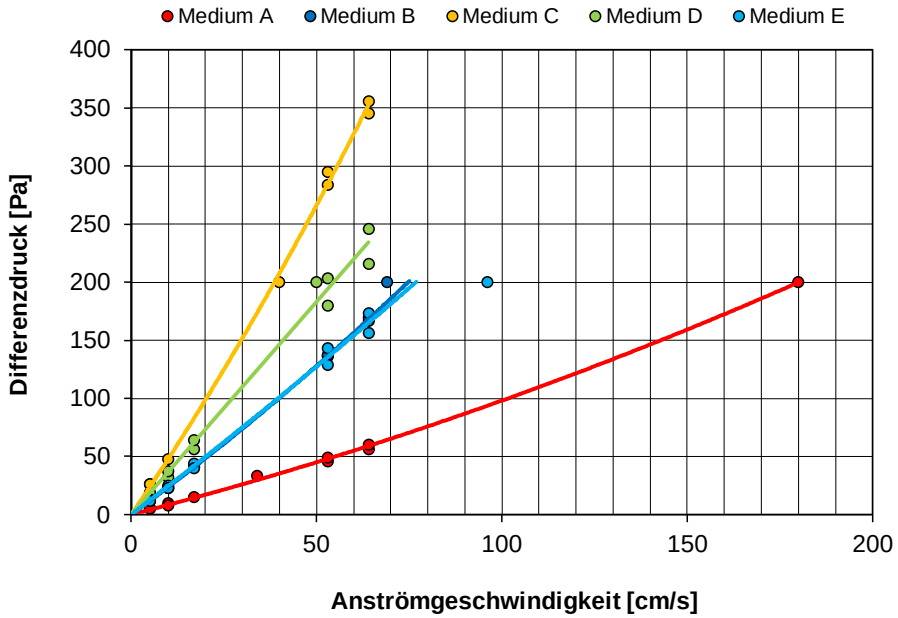


Abbildung AP2.1-1: Differenzdruck bei unterschiedlichen Anströmungsgeschwindigkeiten von 0,05 m/s bis 0,64 m/s und unter Berücksichtigung der aus der Luftdurchlässigkeit der Medien resultierenden Strömungsgeschwindigkeiten bei einem Prüfdruck von 200 Pa.

AP 2.1 Charakterisierung von Flachfiltermedien

Die Charakterisierung der Flachfiltermedien wurde für alle in *Tabelle AP1.1-1* aufgelisteten Filtermedien durchgeführt. Um einen visuellen Eindruck der realen Medienstrukturen und um einen Beurteilungsstandard für die erstellten virtuellen Mikrostrukturen zu erhalten, wurden Oberflächen- und Querschnitts-Aufnahmen mit Licht- und Raster-Elektronen-Mikroskopen angefertigt. Beispiele der Strukturen zeigt *Abbildung AP1.2-1* für das Filtermedium A.

Von besonderem Interesse waren die Untersuchungen zum Differenzdruck bei unterschiedlichen Anströmgeschwindigkeiten von 0,05 m/s bis 0,64 m/s und unter Berücksichtigung der aus der Luftdurchlässigkeit der Medien resultierenden Strömungsgeschwindigkeit bei 200 Pa. Diese Daten dienten zur Validierung der erstellten Mikrostruktur-Modelle mit der Software Geodict. Differenzdruck-Werte wurden an jeweils mindestens zwei unterschiedlichen Proben pro Medium ermittelt. *Abbildung AP2.1-1* zeigt die Ergebnisse.

Pro Filtermedium wurden alle Messwerte mit der Trendlinie eines Polynoms zweiter Anordnung angenähert. Für das Filtermedium C mit der geringsten Luftdurchlässigkeit der untersuchten Medien (400 l/(m² s)), lagen die Messwerte und der aus der Luftdurchlässigkeit bei 200 Pa bestimmte Wert der Strömungsgeschwindigkeit auf der Näherungskurve. Dies belegte die hohe Qualität der vom Hersteller (LDK-Wert) und bei IUTA durchgeführten Messungen (Differenzdruck). Die Näherungskurve für Filtermedium C zeigte einen annähernd linearen Verlauf. Damit stimmen die aus der Luftdurchlässigkeit berechnete Permeabilität k_{LDK} ebenfalls annähernd mit der Permeabilität $k_{laminar}$ für geringe Strömungsgeschwindigkeiten in laminaren Strömungen überein (siehe auch AP 1.3). Im Gegensatz dazu zeigte das Filtermedium A mit der größten Luftdurchlässigkeit (1800 l/(m² s)) einen nicht linearen Verlauf bei steigender Strömungsgeschwindigkeit (siehe auch *Abbildung AP1.3-1*). Für

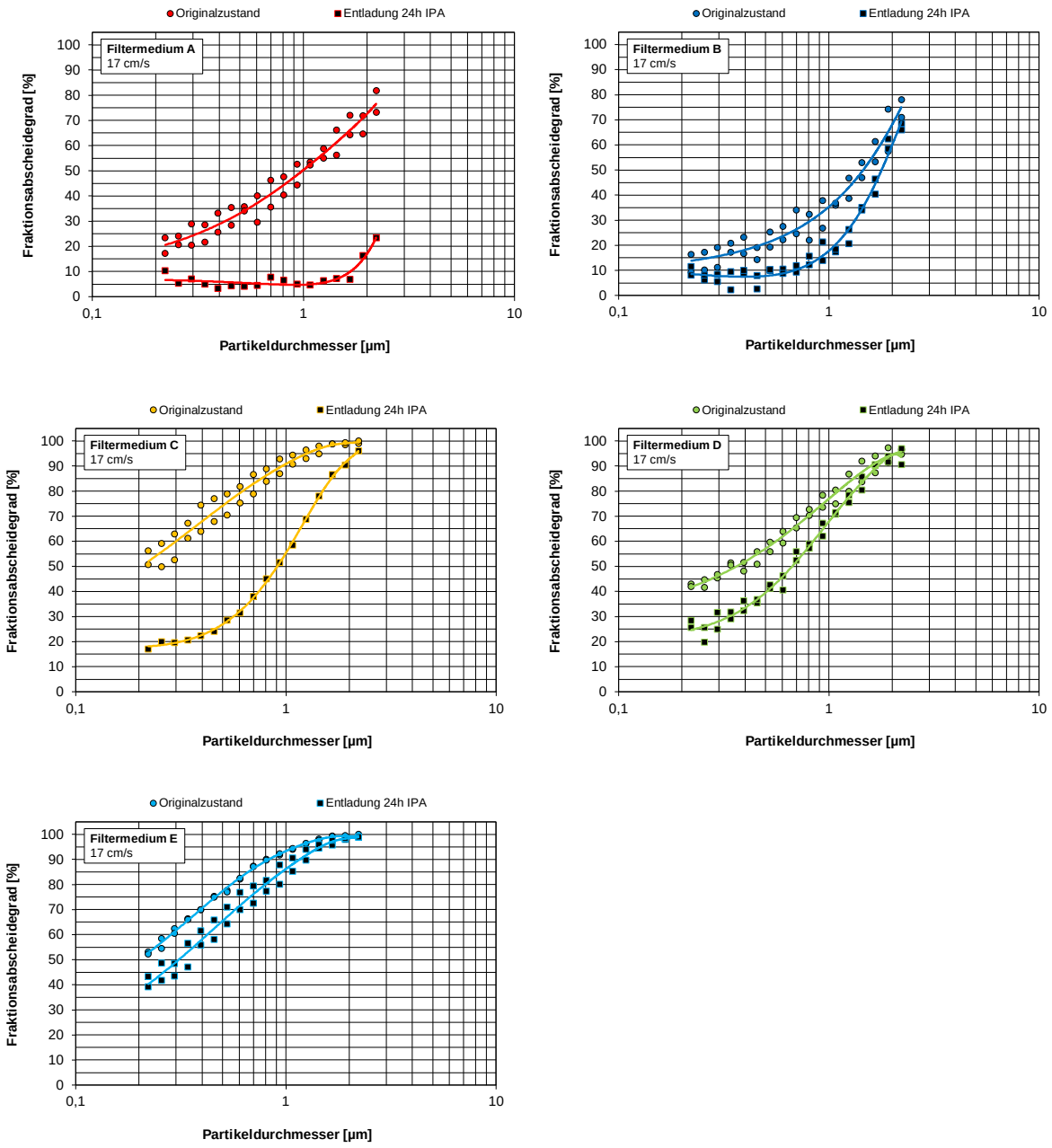


Abbildung AP2.1-2: Fraktionsabscheidegrade bei einer Anströmgeschwindigkeit von 0,17 m/s für fünf ausgewählte Filtermedien. Weitere Ergebnisse für 0,10 m/s und 0,34 m/s liegen vor (ohne Darstellung).

Filtermedium A bedeutete dies eine um rund 25 % größere Permeabilität $k_{laminar}$ bezogen auf den Wert von k_{LDK}. Eine Betrachtung über die Auswirkung unterschiedlicher Werte für die Permeabilität bei Anwendung der erarbeiteten Näherungsgleichungen ist in AP 1.4 zu finden.

In Anlehnung an DIN EN ISO 16890 erfolgte die Bestimmung der Fraktionsabscheidegrade bei Anströmgeschwindigkeiten von 0,10 m/s, 0,17 m/s und 0,34 m/s für alle fünf ausgewählten Filtermedien. Die Untersuchungen wurden sowohl an den Medien im Originalzustand als auch nach einer 24-stündigen Behandlung in einer Isopropanol-Atmosphäre durchgeführt. Letzteres diente zur Entfernung der elektrostatischen Ladung der Medien (Neutralisierung), um die Abscheideleistung der rein mechanischen Filtration zu bestimmen. Die Ergebnisse für eine Anströmgeschwindigkeit vor den Filtermedien von 0,17 m/s sind in Abbildung AP2.1-2 dargestellt. Beispielsweise betrug der

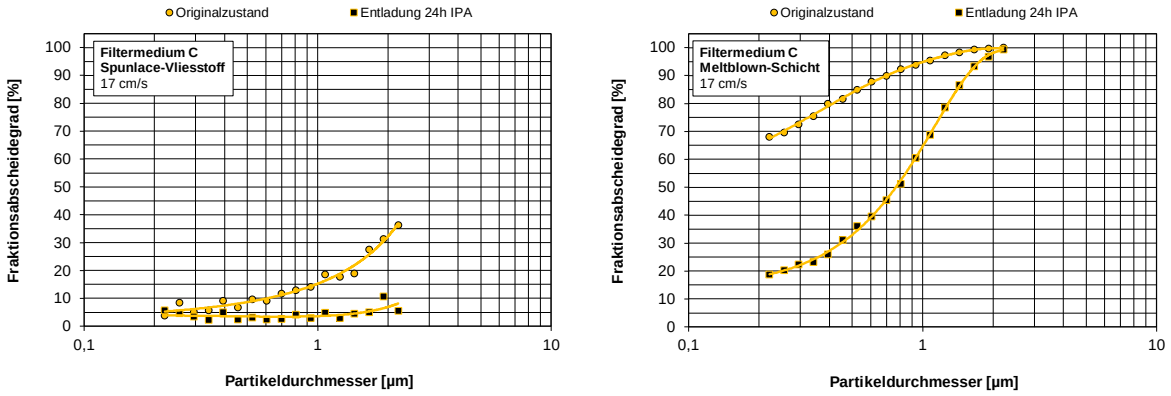


Abbildung AP2.1-3: Fraktionsabscheidegrade der hydrodynamisch verfestigten Vliesstoff- und Meltblown-Schicht aus dem zweilagigen Filtermedium C.

Fraktionsabscheidegrad von Medium A im Originalzustand rund 30 % @ 0,4 µm und nach der IPA-Behandlung rund 5 % @ 0,4 µm. Damit betrug der zusätzliche Beitrag zur Partikelabscheidung aufgrund der Elektretausrüstung rund 25 %-Punkte. Bei den weiteren untersuchten Filtermedien wurden die folgenden Beiträge durch die Elektretausrüstung ermittelt: Medium B rund 10 %-Punkte, Medium C rund 45 %-Punkte, Medium D rund 20 %-Punkte und Medium E rund 12 %-Punkte jeweils bezogen auf den Partikeldurchmesser von 0,4 µm. Eine Systematik oder ähnliche Werte der Beiträge durch die Elektretausrüstung z. B. innerhalb einer Klassifizierung ePMx konnten nicht identifiziert werden. Gründe dafür können insbesondere der unbekannte Ladungszustand bei Anlieferung der Filtermedien sein, unterschiedliche Ladungsprinzipien während der Herstellung wie z.B. Korona-Aufladung oder Hydrocharging sowie die Alterung und damit der Ladungsabbau während der Lagerung. Damit ist es aus praktischer Sicht für die Konfektionäre nicht möglich, den Ladungszustand angelieferter Filtermedien mit Elektretausrüstung zu quantifizieren.

Von besonderem Interesse war die Abscheideleistung der einzelnen Schichten von mehrlagigen Filtermedien. Dazu wurden die einzelnen Schichten des zweilagigen Filtermediums C ebenfalls im Originalzustand, d. h. mit Elektretausrüstung, und nach Neutralisation durch eine 24-stündige Behandlung in einer Isopropanol-Atmosphäre untersucht. Variiert wurde die Anströmgeschwindigkeit mit 0,10 m/s, 0,17 m/s und 0,34 m/s. Wie bei allen beschriebenen Untersuchungen wurden Öltröpfchen aus DEHS als Prüfaerosol eingesetzt. Die hydrodynamisch verfestigte Vliesstoff-Lage zur Grobstaub-Abscheidung zeigte im Originalzustand bzw. nach Entladung Abscheidegrade von weniger als 10 % bzw. weniger als 5 % (@ 0,4 µm, @ 0,17 m/s). Der zusätzliche Beitrag zur Partikelabscheidung aufgrund der Elektretausrüstung betrug weniger als 5 %-Punkte. Die Meltblown-Lage zur Feinstaub-Abscheidung zeigte größere Abscheidegrade von rund 25 % nach Entladung, im Originalzustand wurde eine Abscheidung von rund 80 % erreicht (@ 0,4 µm). In diesem Fall betrug der zusätzliche Beitrag zur Partikelabscheidung aufgrund der Elektretausrüstung rund 55 %-Punkte (siehe *Abbildung AP2.1-3*). Verglichen mit dem Abscheidegrad des zweilagigen Filtermediums C lag die Abscheidung der Meltblown-Lage rund 10 %-Punkte höher. Die experimentell ermittelten Ergebnisse bestätigten ebenso wie die numerische Simulation, dass die Abscheidecharakteristik des zweilagigen Flachfiltermediums im Wesentlichen durch die Meltblown-Lage definiert wird.

Die ermittelten Fraktionsabscheidegrade im Bereich der Partikeldurchmesser von rund 0,2 µm bis 2,0

µm wurden zur Validierung der in Abschnitt AP 1.2 durchgeführten „Mikrostruktur-Modellierung von Flachfiltermedien“ verwendet. Dies erfolgte bei Betrachtung der rein mechanischen Filtration (nach IPA-Behandlung). Um die durchgeführten experimentellen Charakterisierungen belastbar abzusichern, wurden Vergleichsmessungen vom IUTA und einem Industriepartner an gleichen Filtermedien, hier Filtermedium C, durchgeführt. Die Ergebnisse zeigten eine sehr gute Übereinstimmung der Messergebnisse (ohne Abbildung).

AP 2.2 Charakterisierung von plissierten Filtern

Nach den Vorgaben vom IUTA wurden Filterkassetten mit Papprahmen (Breite 15 mm) in den Standard-Höhen 25 mm, 48 mm und 96 mm sowie einer Größe von 592 mm x 592 mm konfektioniert. Die Faltenabstände lagen im Bereich von rund 3 mm bis 10 mm. Mit dem Ziel die Klassifizierungen ePM1 bis ePM10 zu erreichen, kamen als Filtermaterialen die Medien A bis E zum Einsatz.

Die ermittelten Differenzdrücke in Abhängigkeit des Volumenstroms (850 m³/h bis 5100 m³/h) zeigt *Abbildung AP2.2-1*. Bei steigenden Volumenströmen war der Anstieg der Differenzdrücke durch ein Polynom zweiter Ordnung beschreibbar. Der kleinste Faltenabstand von rund 4 mm generierte den größten Differenzdruck. Die beiden größeren Faltenabstände von rund 5,5 mm und 7 mm führten zu vergleichbaren Differenzdrücken bei den untersuchten Filterkassetten. Bemerkenswert bei den Ergebnissen war, dass die Verläufe der Differenzdrücke der Filterkassetten mit den Filtermedien A und E vergleichbare Werte erreichten, obwohl Filtermedium E für die Klassifizierung ePM1 vorgesehen war und damit i.d.R. höhere Differenzdrücke aufweist als ein Medium für die Klassifizierung nach ePM10, so wie dies bei den Untersuchungen der Flachfiltermedien der Fall war (siehe *Abbildung AP2.1.-1*).

Ursächlich dafür können z. B. die ähnliche Dicke und die höhere Steifigkeit von Medium E sein, welche zu vorteilhafter ausgeformten, dreieckigen Falten führen. Innerhalb der Gruppe der angestrebten Klassifizierung nach ePM10 zeigte die Filterkassette mit Filtermedium B einen signifikant größeren Differenzdruck als die Filterkassette mit Filtermedium A (> 100 % bezogen auf Medium A @ > 3400 m³/h). Bei vergleichbarer Steifigkeit der Medien (qualitative Beurteilung der Medien) waren die Dicken der Medien mit 0,73 mm (A) und 1,19 mm (B) deutlich unterschiedlich, sodass dadurch die Falten unterschiedliche Formen aufwiesen und damit unterschiedlichen Differenzdrücke verursachten.

In *Abbildung AP2.2-2* sind die Messwerte der Differenzdrücke in Abhängigkeit von der Faltenanzahl pro 100 mm Länge für fünf unterschiedliche Filterelemente mit einer Standard-Höhe von 45 mm dargestellt. Zusätzlich wurden die mit der Software Geodict erhaltenen Ergebnisse der Simulationen für rechteckige und dreieckige Faltenformen eingetragen. Die Messwerte lagen überwiegend zwischen den Grenzkurven für die beiden idealen Faltenformen. Die Werte der experimentell ermittelten Differenzdrücke differierten um rund 50 Pa bis 100 Pa im Bereich von rund 15 bis 25 Falten pro 100 mm für Filterelemente konfektioniert aus den Medien A, C und E. Beim Element konfektioniert aus Medium B, lagen bis zu 200 Pa zwischen den gemessenen Differenzdrücken in Abhängigkeit von der Faltenanzahl pro Längeneinheit.

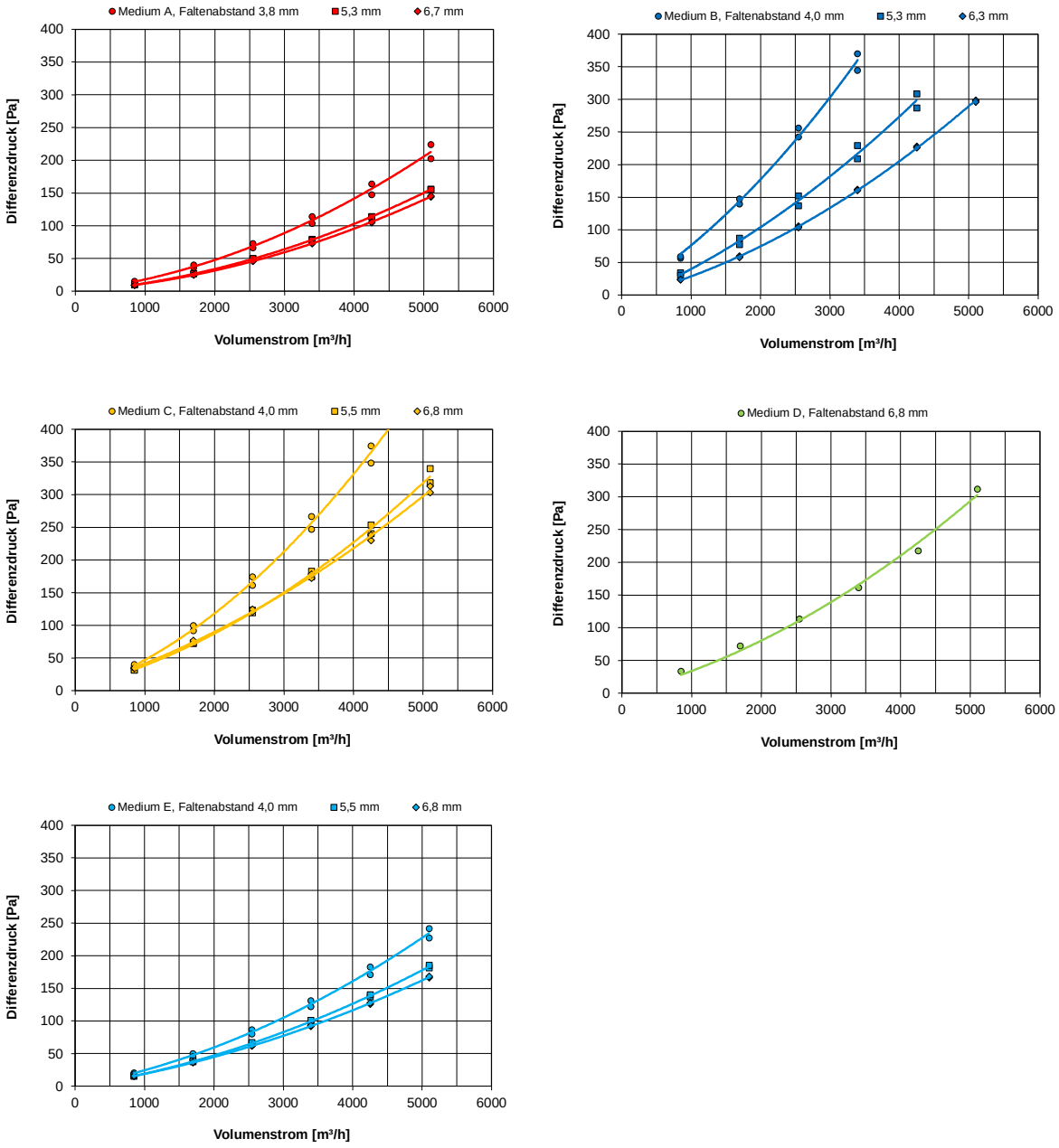


Abbildung AP2.2-1: Differenzdruck in Abhängigkeit vom Volumenstrom für Filterelemente mit einer Höhe von 48 mm, Faltenabständen von rund 3,8 mm bis 6,8 mm sowie fünf unterschiedlichen Filtermedien. Weitere Ergebnisse für die Filterelementhöhen 25 mm und 96 mm liegen vor (ohne Darstellung).

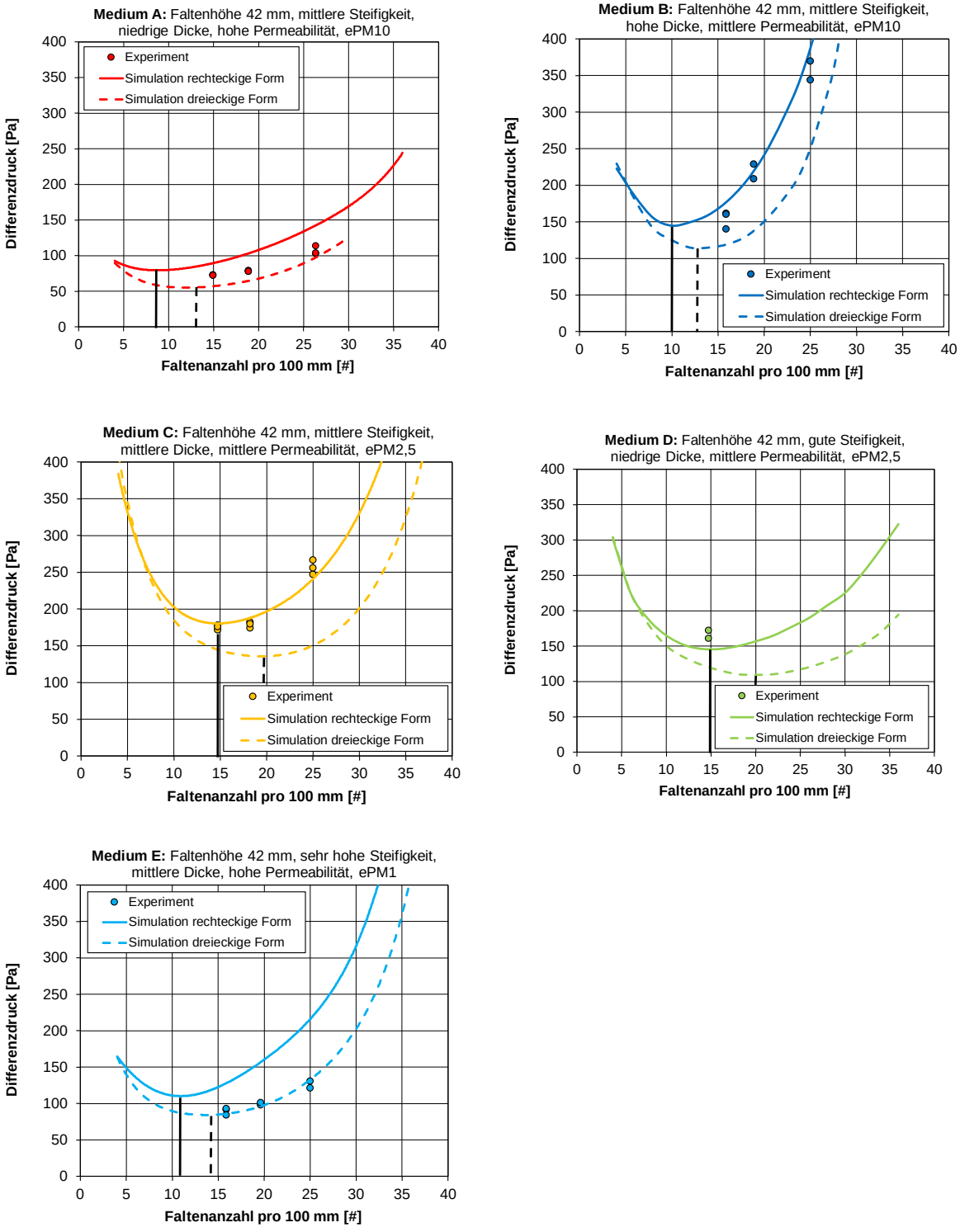


Abbildung AP2.2-2: Messwerte der Differenzdrücke in Abhängigkeit der Faltenanzahl pro 100 mm für fünf unterschiedliche Filterelemente mit den Filtermedien A bis E, einer Standard-Höhe von 48 mm und einem Volumenstrom von 3400 m³/h. Weitere Ergebnisse für Filterelemente mit den Standard-Höhen 24 mm und 96 mm liegen vor (ohne Abbildung).

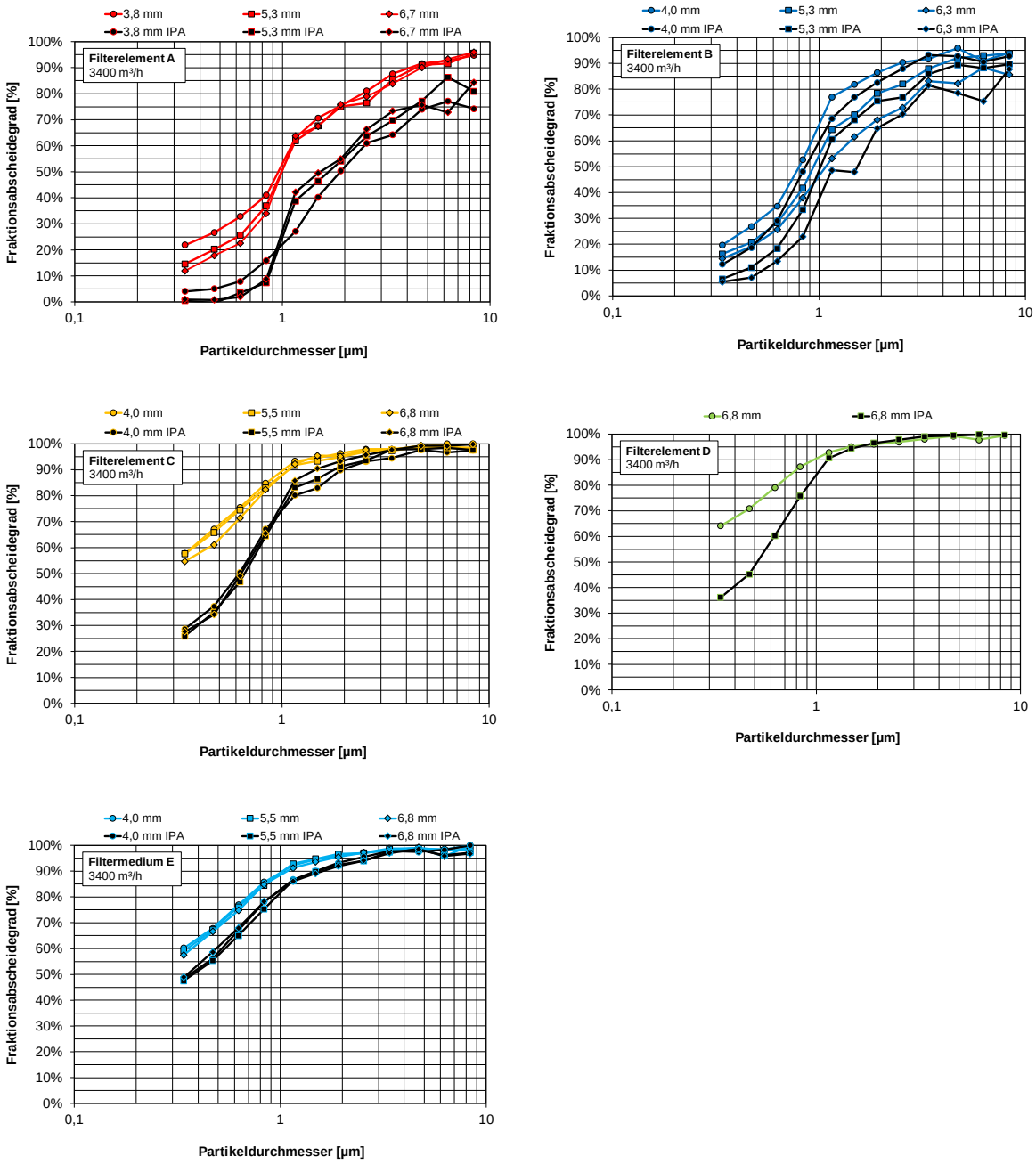


Abbildung AP2.2-3: Messwerte der Fraktionsabscheidegrade als Funktion des Partikeldurchmessers für fünf unterschiedliche Filterelemente mit den Filtermedien A bis E, einer Standard-Höhe von 48 mm und einem Volumenstrom von 3400 m³/h. Weitere Ergebnisse für Filterelemente mit den Standard-Höhen 24 mm und 96 mm liegen vor (ohne Abbildung).

Insgesamt stimmten die Messwerte und die Verläufe der zugehörigen numerischen Simulationen zufriedenstellend überein. Die ausgewählte Konfektionierung der Filterelemente traf die numerisch bestätigten Minima der Differenzdrücke bei den Elementen auf Basis der Filtermedien A, C, D und E bei rund 15 Falten pro 100 mm (rund 7 mm Faltenabstand). Beim Element mit Medium B lag das Minimum des Differenzdrucks tiefer, bei rund 10 Falten pro 100 mm bezogen auf die rechteckige Faltenform.

Abbildung AP2.2-3 zeigt die ermittelten Fraktionsabscheidegrade für fünf Filterelemente der Standardhöhe 48 mm, konfektioniert mit den Filtermedien A bis E (Bezeichnung Filterelement A bis E), unterschiedlichen Faltenabständen von rund 4 mm bis 7 mm und einem Volumenstrom von 3400 m³/h. Die unterschiedlichen Faltenabstände bei den Filterelementen A, C und E führten zu sehr ähnlichen Verläufen der Fraktionsabscheidegrade, d. h. im untersuchten Bereich der Faltenabstände in der Umgebung des Differenzdruck-Minimums war nur ein geringer Einfluss der Konfektionierung auf die Klassifizierung vorhanden. Bei Filterelement A lagen alle Werte bei ISO ePM_{10} 60%, unabhängig von dem gewählten Faltenabstand, ebenso wie bei Filterelement C mit ISO $ePM_{2,5}$ 65% und auch grenzwertig bei Filterelement E mit ISO ePM_1 60% bis 65% (basierend auf Messwerten von 65%, 64%, 65% @ 4,0 mm, 5,5 mm, 6,8 mm). Weitere Details sind in den *Tabellen AP2.2-1* zu finden. Im Gegensatz dazu resultierten aus den variierten Faltenabständen bei Filterelement B unterschiedliche Verläufe der Fraktionsabscheidegrade und damit auch unterschiedliche Klassifizierungen von ISO ePM_{10} 75% @ 4,0 mm, ISO ePM_{10} 65% @ 5,3 mm und ISO ePM_{10} 70% @ 6,3 mm.

Ein ähnliches Verhalten zeigten die Verläufe der Fraktionsabscheidegrade von Filterelementen, die in einer Isopropanol-Atmosphäre entladen wurden (Bezeichnung x mm IPA). Prinzipiell erreichte der zusätzliche Beitrag zur Partikelabscheidung aufgrund der Elektretausrüstung ähnliche Werte wie bei den untersuchten Flachfiltermedien (siehe *Abbildung AP2.1-2*). Der Verlauf der Fraktions-abscheidegrade oberhalb eines Partikeldurchmessers von 1 µm bis 10 µm lag bei den Filterelementen oberhalb der Werte der untersuchten Flachfiltermedien aufgrund des verwendeten Prüfaerosols KCl, das größere Partikelkonzentrationen bei großen Partikeldurchmessern bereitstellte. Dies war im Prüfstand für Flachfiltermedien nicht möglich.

Alle Mess-Ergebnisse und berechneten Klassifizierungen der untersuchten Filterelemente sind in den folgenden Tabellen zusammengefasst:

Tabelle AP2.2-1: Untersuchungsergebnisse nach ISO 16890 für Filterelemente der Klassifizierung ePM10.

Medium	Falten-höhe	Falten-abstand	dp	Klassifizierung	ePM10	$ePM_{2,5}/ePM_{2,5\ min}$	ePM_1/ePM_{1min}
	mm	mm	Pa		%	%	%
Medium B	48	4,0	360	ISO ePM_{10} 75%	78	44 / 41	28 / 24
		5,3	164	ISO ePM_{10} 65%	68	31 / 26	17 / 11
		6,3	237	ISO ePM_{10} 70%	74	36 / 32	20 / 15
	96	5,5	365	ISO ePM_{10} 80%	80	49 / 42	33 / 26
		8,0	212	ISO ePM_{10} 70%	73	38 / 31	21 / 15
		10,0	189	ISO ePM_{10} 65%	68	34 / 28	20 / 15
Medium A	25 2009 m³/h	3,9	39	ISO ePM_{10} 60%	60	27 /14	17 / 5
		4,5	34	ISO coarse	42	18 / 4	13 / 4
		5,0	37	ISO ePM_{10} 50%	52	24 / 9	17 / 6
	48	3,8	105	ISO ePM_{10} 60%	64	31 / 19	18 / 7
		5,3	80	ISO ePM_{10} 60%	64	27 / 17	12 / 2
		6,7	74	ISO ePM_{10} 60%	64	27 / 18	11 / 3

Tabelle AP2.2-2: Untersuchungsergebnisse nach ISO 16890 für Filterelemente der Klassifizierung ePM2,5.

Medium	Falten-höhe	Falten-abstand	dp	Klassifizierung	ePM10	$ePM_{2,5}/ePM_{2,5\ min}$	ePM_1/ePM_{1min}
	mm	mm	Pa		%	%	%
Medium C	25 2009 m³/h	3,8	124	ISO $ePM_{2,5}$ 65%	87	65 / 55	55 / 42
		4,6	129	ISO $ePM_{2,5}$ 65%	87	65 / 57	55 / 44
		5,4	144	ISO $ePM_{2,5}$ 60%	86	61 / 58	49 / 45
	48	4,0	251	ISO $ePM_{2,5}$ 65%	88	67 / 56	56 / 43
		5,5	177	ISO $ePM_{2,5}$ 65%	88	65 / 55	54 / 40
		6,8	174	ISO $ePM_{2,5}$ 65%	88	65 / 56	53 / 41
Medium D	25 2009 m³/h	5,0	128	ISO $ePM_{2,5}$ 65%	90	69 / 64	58 / 50
	48	6,8	176	ISO $ePM_{2,5}$ 70%	91	72 / 64	62 / 51
	96	8,0	122	ISO $ePM_{2,5}$ 60%	86	64 / 58	54 / 46

Tabelle AP2.2-3: Untersuchungsergebnisse nach ISO 16890 für Filterelemente der Klassifizierung ePM1.

Medium	Falten-höhe	Falten-abstand	dp	Klassifizierung	ePM10	$ePM_{2,5}/ePM_{2,5\ min}$	ePM_1/ePM_{1min}
	mm	mm	Pa		%	%	%
Medium E	48	4,0	134	ISO ePM_1 65%	91	74 / 69	65 / 60
		5,5	98	ISO ePM_1 60%	90	73 / 68	64 / 58
		6,8	90	ISO ePM_1 65%	90	73 / 70	65 / 61
	96	3,0	233	ISO ePM_1 70%	92	80 / 77	74 / 70
		5,5	146	ISO ePM_1 70%	92	78 / 74	71 / 66
		8,0	98	ISO ePM_1 65%	90	73 / 68	65 / 59
		10,0	77	ISO ePM_1 65%	90	73 / 68	65 / 60

Zusammenfassung

Plissierte Partikelfilter, auch bezeichnet als Kassettenfilter, Panelfilter, Rahmenfilter oder Filterzellen, die durch Faltung von Flachfiltermedien hergestellt werden, sind eine etablierte Bauform. Durch die v-förmigen oder annähernd parallel verlaufenden Falten wird die Filtrationsfläche vergrößert und damit das i. d. R. limitierte Platzangebot in Luftreinigungsanlagen und Raumluftfiltern optimal ausgenutzt. Bei der Entwicklung und Auslegung plissierter Filter muss immer ein Kompromiss eingegangen werden zwischen der Realisierung eines an die Filtrationsaufgabe angepassten großen Abscheidegrads und einem möglichst niedrigen Differenzdruck, um einerseits die anvisierte Partikelkonzentration auf der Reinluftseite zu erreichen (großer Abscheidegrad) und andererseits die Betriebskosten zu minimieren (niedriger Differenz-druck).

Die Anzahl der Falten pro Längeneinheit muss für jedes Flachfiltermedium unter Berücksichtigung der mechanischen, physikalischen und elektrostatischen Eigenschaften des Filtermediums sowie der Strömungsgeschwindigkeit vor dem Filterelement ermittelt werden. Dafür ist ein umfassendes Fachwissen über aerosoldynamische Vorgänge in Filtrationsprozessen notwendig, um die in der Literatur beschriebenen Ergebnisse entsprechend auswerten und in eine konkrete Faltenanzahl pro Längeneinheit umsetzen zu können. Dieses Fachwissen ist bei den großen Filterherstellern, die die vollständige Herstellungskette von der Medienproduktion bis zum Vertrieb des Endproduktes abbilden, i. d. R. vorhanden und wird u. a. durch numerische Modellierungen mit CFD-Programmen angewendet. Im Gegensatz dazu greifen mittelständisch geprägte Medienhersteller und Konfektionäre auf ihr Praxiswissen zurück. Um jedoch schneller wechselnde Kundenanforderungen mit umfangreicheren Medienauswahlen bedienen zu können, ist ebenfalls eine schnellere Anpassung der Parameter zur Plissierung notwendig, insbesondere auch für neue Filtermedien, für die noch kein Praxiswissen zur optimalen Faltung vorliegt.

Mit Hilfe des entwickelten Kompendiums auf Basis analytisch lösbarer Näherungsgleichungen für die Berechnung der optimalen Faltenanzahl pro Längeneinheit und zur Abschätzung des erreichbaren Fraktionsabscheidegrads werden mittelständisch geprägte Medienhersteller und Konfektionäre in die Lage versetzt, anhand der bekannten Eigenschaften der Flachfiltermedien und der anvisierten Anwendung die Auslegung energieeffizienter plissierter Filter auf möglichst schnelle und kostengünstige Art und Weise durchzuführen. Mit dem Lösungsansatz des Buckinghamschen Pi-Theorems zur Ähnlichkeitstheorie und Dimensionsanalyse wurde eine analytisch lösbare Näherungsgleichung für das System „RLT-Anlagen“ mit Anströmgeschwindigkeiten der Filterelemente bis zu rund 3,0 m/s, größeren Luftdurchlässigkeiten bis 1800 l/(m²s) sowie nicht-laminaren Strömungsverhältnissen in den Faltenzwischenräumen zur Berechnung der optimalen Faltenanzahl pro Längeneinheit erarbeitet. Damit können Konfektionäre schnell und einfach die energetisch günstigste Faltenanzahl auf mindestens 2 Falten pro 100 mm genau bestimmen und entsprechend vorteilhaft konfektionieren.

Die erste Version des entwickelten Kompendiums ist als einfach handhabbare Tabellenkalkulation ausgeführt. Die Implementierung auf einer Internetseite ist ebenfalls denkbar.