

# Verbesserung des Bubble-Point Messverfahrens an Drahtgeweben mit Hilfe numerischer Berechnungsmodelle

von Dominik Herper

## Kurzfassung

In der Qualitätskontrolle von Filtermedien ist der Bubble-Point Test ein weit verbreitetes Messverfahren. Das Messprinzip liegt darin, dass mit Flüssigkeit gefüllte Poren erst ab einem gewissen Druck für Gas permeabel werden. Dieser Druck wird gemessen und dann genutzt, um auf eine Porengröße zu schließen. Leider gilt die zu Grunde liegende Korrelation zwischen Druck und Porengröße nur für zylindrische Poren. Um anders geformte Poren zu erfassen, werden Korrekturfaktoren angesetzt. Diese wurden bisher empirisch bestimmt oder einfach geschätzt. Hier wird ein Verfahren beschrieben, das die Bestimmung eines genaueren Korrekturfaktors und damit einer präziseren Porengröße mit Hilfe von CFD-Simulationen ermöglicht.

## Einleitung

Der Bubble-Point Test ist ein Standardtest zur Qualitätskontrolle von Filtern bzw. Filtermaterialien. Es existieren zahlreiche Normen, die das Messprinzip für einzelne Anwendungsbereiche spezifizieren. So existiert beispielsweise die ISO 2942 für die Bestimmung des Bubble Points an Filterelementen oder die ASTM F316, die sich auf Membranfilter beschränkt. Die Norm BS 3321 beschreibt das Verfahren für gewobene Filtermedien bzw. Textilien. Die Idee hinter dem Messverfahren liegt darin, die größte Pore im Filtermedium zu bestimmen und dadurch eine Aussage über die Qualität des Filters zu ermöglichen. Die Bestimmung der Porengröße, so wie sie in den Normen beschrieben wird, gilt allerdings nur für zylindrische Poren. Um eine zuverlässige Aussage für die größte Pore in Drahtgeweben, welche verschiedenste Porengeometrien aufweisen, zu ermöglichen, wird ein Korrekturfaktor benötigt. Dieser Faktor wurde bisher empirisch durch Labormessungen bestimmt, geschätzt oder durch Normen vorgegeben und ist durch eine Vielzahl von Annahmen sehr ungenau. Um eine präzise Aussage über die tatsächlich vorliegende Porengröße zu ermöglichen nutzt man bei der Firma GKD - Gebr. Kufferath AG nun numerische Methoden. Diese Mehrphasen-Modelle ermöglichen es, belastbare Werte für den benötigten Korrekturfaktor zu finden.

## Theoretische Grundlagen und Messprinzip

Zur Bestimmung des Bubble-Points an einem Filtermedium wird eine Probe des zu testenden Materials geschnitten, gereinigt und anschließend in den Teststand (vgl. Abb. 1) eingespannt. Der Prüfling wird mit einer Testflüssigkeit benetzt, danach wird durch einen konstanten Luftvolumenstrom der Druck unter dem Filtermedium erhöht. Da es sich um ein poröses Medium handelt, bildet sich mit ansteigendem

Druck irgendwann eine Blase an der größten Pore des benetzten Mediums. Durch weitere Luftzufuhr wird diese Blase dann zum Platzen gebracht, danach ist der Test beendet. Der sich unter der Probe einstellende Überdruck wird während der gesamten Messung aufgenommen. Der höchste Wert, der für den Druck gemessen wird, wird anschließend ausgegeben und markiert dann den Bubble-Point des Filtermediums.

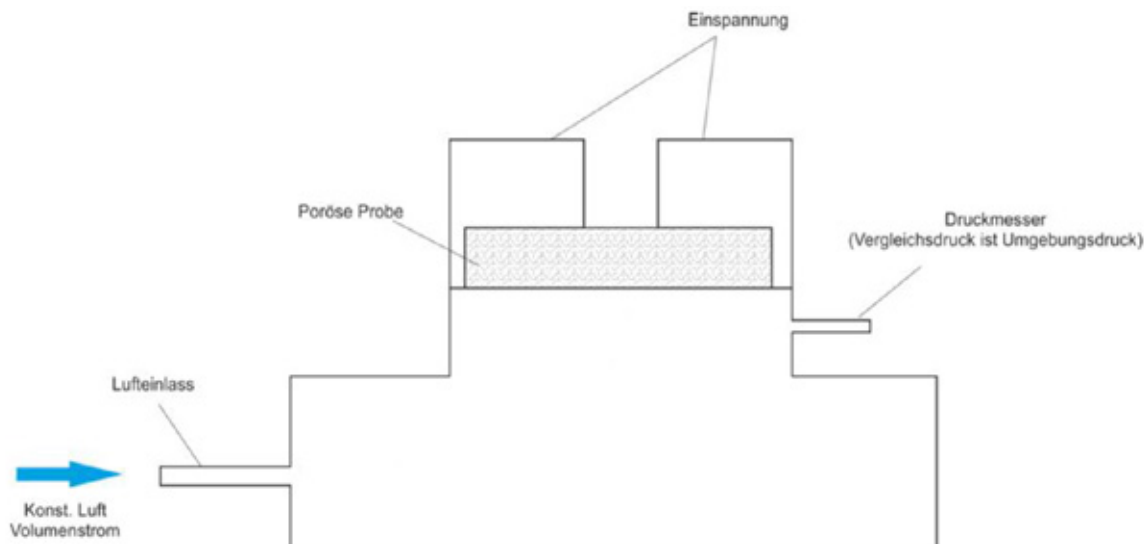


Abb.1 Prinzipskizze des Bubble-Point Test

Um auf den Durchmesser der größten, vorhandenen Pore zu schließen, muss eine Korrelation zwischen gemessenem Druckwert und dem gesuchten Durchmesser ermittelt werden. Für zylindrische Porenformen ist diese Beziehung unter dem Phänomen der Kapillarität bekannt. Eine Flüssigkeit steigt durch ihre Oberflächenspannung in einer genügend kleinen zylindrischen Pore nach oben (s. Abb. 2)

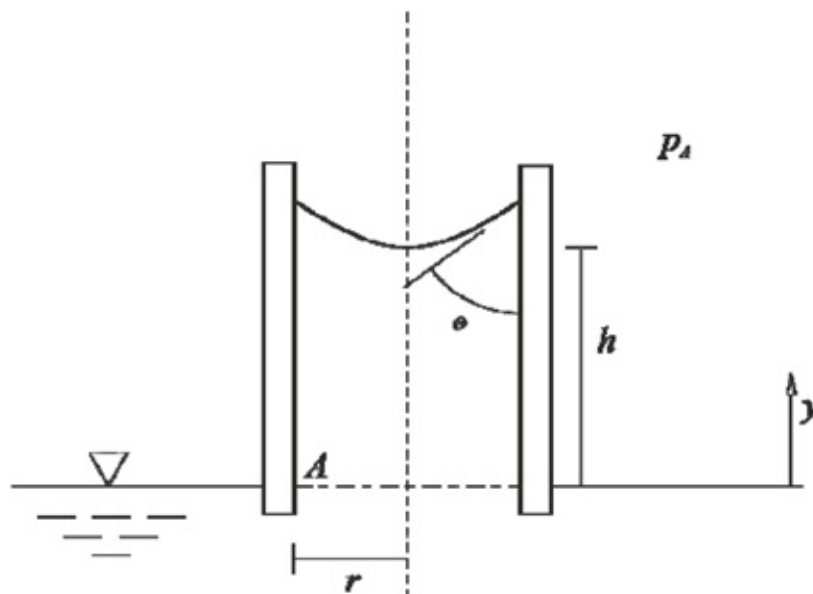


Abb. 2 Kapillarität

Setzt man für diesen Aufbau ein Kräftegleichgewicht an, so erhält man folgenden Zusammenhang:

$$\underbrace{p_A \pi r^2 - p_A \pi r^2}_{=0} + 2\pi r \sigma_s \cos(\theta) - \rho g h \pi r^2 = 0 \quad (\text{Gl. 1})$$

Stellt man diese Gleichung nun nach dem Radius der Pore um, erhält man:

$$r = \frac{2\sigma_s \cos \theta}{\rho g h} \quad (\text{Gl. 2})$$

Man ersetzt nun den Radius durch den gesuchten Durchmesser und nimmt ein vollständig benetzendes Fluid ( $\theta = 0$ ) an. Zusätzlich erkennt man, dass es sich in Gl. 2 beim Ausdruck im Nenner um einen Druck handelt. Damit wird Gl. 2 zu:

$$d = \frac{4\sigma_s}{p_K} \quad (\text{Gl. 3})$$

Aus der Herleitung von Gl. 3 erkennt man, dass dieser Zusammenhang nur für eine zylindrische Pore gilt. Um diese einfache Verknüpfung von Druck und Porendurchmesser auf beliebige Geometrien anwenden zu können, führt man in der Praxis einen Korrekturfaktor C ein, der alle Abweichungen von der perfekten Zylinderform beinhaltet. Der Druck im Nenner entspricht dabei der gemessenen Druckdifferenz. Damit vereinfacht sich (Gl. 3) weiter zu:

$$d = C \cdot \frac{\sigma_s}{\Delta p} \quad (\text{Gl. 4})$$

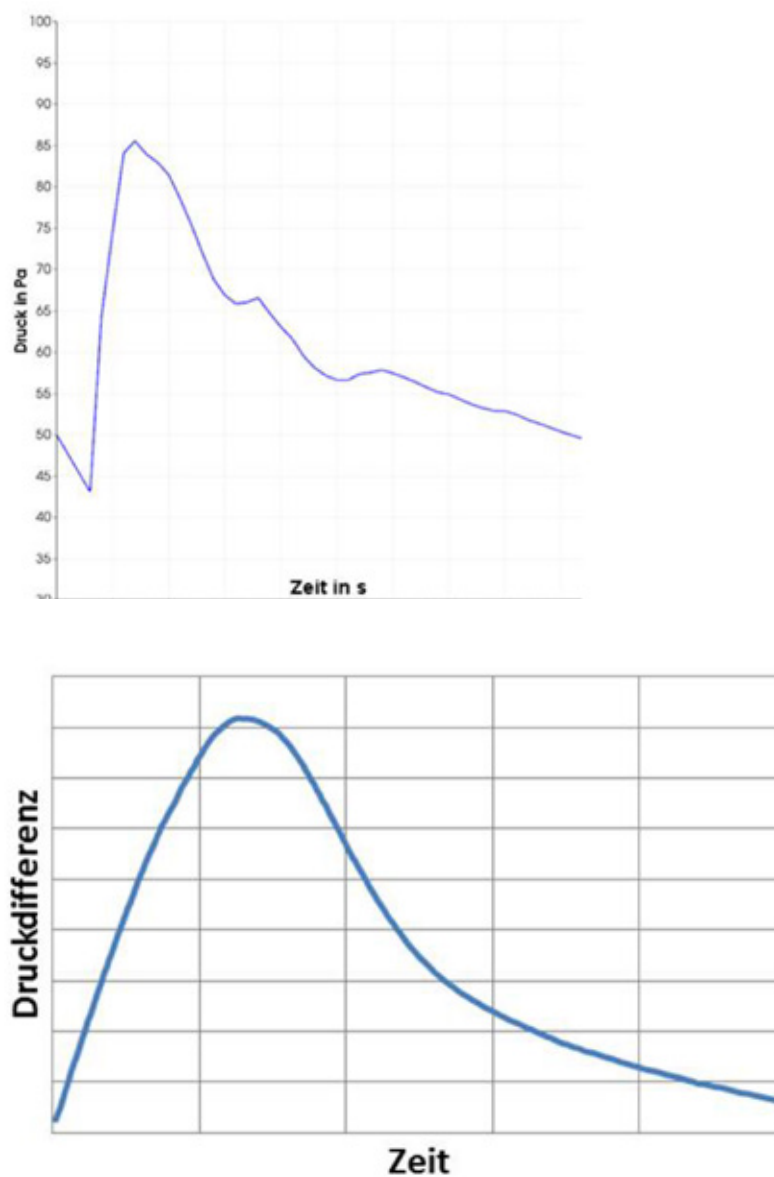
Der dimensionslose Korrekturfaktor C ist dabei in der Literatur auch als Kapillardruckkonstante bekannt. Die ASTM F316 Norm gibt ihn beispielsweise für Membranen mit 2860, für  $\Delta p$  in Pa und  $\sigma_s$  in mN/m an. Damit wurde eine Bestimmungsgleichung gefunden, um von einem gemessenen Druckwert auf eine Porengröße zu schließen. Da die Kapillardruckkonstante aber, gemäß ihrer Definition, nur für eine bestimmte Geometrie gilt, muss sie also für jede Porenform neu bestimmt werden. Dieses Vorgehen ist für den empirischen Ansatz zu zeitaufwendig. Daher werden bis dato meist gemittelte oder geschätzte Werte für den Korrekturfaktor angesetzt, die mitunter große Abweichungen der gemessenen von der realen Porengröße aufweisen.

## Modellbildung

Die durch gemittelte Kapillardruckkonstanten auftretende Abweichung ist für manche Gewebetypen nicht akzeptierbar, wurde aber aus Ermangelung von Alternativen bisher in Kauf genommen. Hieraus entstand die Idee, den Vorgang des Bubble-Point Tests virtuell nachzubilden, um im Anschluss aus dem numerischen Experiment Rückschlüsse auf die Realität und damit auf eine korrekte Kapillardruckkonstante ziehen zu können. Die Tatsache, dass es sich bei dem Test um ein Mehrphasensystem (Luft + Testflüssigkeit) handelt, macht es notwendig, auch die Simulation als Mehrphasensimulation auszuführen. Als Simulationswerkzeug wurde die Berechnungsbibliothek OpenFOAM gewählt. Sie beinhaltet bereits eine Vielzahl von Lösern für mehrphasige Strömungen. Um die Eignung der Solver für das vorliegende Problem zu testen, wurde zunächst eine Test-Simulation erstellt, die den Bubble-Point Test an einer zylindrischen Pore nachstellt. Da für dieses Problem mit Gl. 3 eine analytische Lösung vorliegt,

können Abweichungen der Simulation von dieser Lösung leicht bestimmt werden. Es wurde eine einfache Geometrie gewählt, welche aus einem Blech mit einer Bohrung von 1 mm Durchmesser besteht. Diese Konfiguration sollte dann mit Isopropylalkohol als Testflüssigkeit beaufschlagt und der Testablauf berechnet werden. Die Ergebnisse für diese Test-Simulation waren sehr vielversprechend. Der berechnete Druckwert für diesen Testaufbau lag für den gewählten Löser bei 85,54 Pa, was über Gl. 3 zu einer berechneten Öffnung von 0,996 mm führt. Damit liegt die Abweichung zwischen Simulation und analytischer Lösung bei unter 0,4 % für dieses Testbeispiel, und die Konsistenz für den gewählten Löser wurde als gewährleistet angesehen.

Abb. 3: Vergleich des Druckverlaufs für Test-Simulation (oben) und analytische Lösung (unten)



Der nächste Schritt lag nun darin, die Simulation auf die wesentlich komplexere Geometrie eines Drahtgewebes anzupassen. Man entschied sich dazu, das Modell anhand der Gewebefamilie der optimierten Tressen (OT) von GKD zu entwickeln, da hier zum einen noch relativ einfache Geometrien auftreten und weiterhin viele Messdaten in der Unternehmensdatenbank zur Verfügung stehen. Zur Generierung des 3D Gewebemodells wurde hierbei das Modul WeaveGeo des Softwarepakets GeoDict der Math2Market GmbH genutzt. Mit dem in OpenFOAM integrierten Meshing Tool snappyHexMesh wurde aus dieser Geometrie ein adäquates Rechengitter erzeugt.

### Simulation

Die Simulationsparameter und Randwerte wurden so gewählt, dass der Bubble-Point Test möglichst realitätsnah abgebildet wird. So wurde das Gewebe in der Simulation mit Isopropylalkohol benetzt und im Folgenden der Druck unterhalb des Gewebes mittels eines konstanten Luftvolumenstroms stetig erhöht. Es sollte sich zeigen, dass das Rechengitter hier eine extreme Auswirkung auf die Laufzeit und die Stabilität der Simulation hat. Somit wurde der Großteil der Modellentwicklung dem Thema Gittergenerierung gewidmet. Dadurch konnte die Berechnungszeit von anfänglich sechs Wochen auf ca. ½ bis zwei Tag gedrückt werden. Die Berechnung selbst wurde auf GKDs hauseigenen Rechencluster ausgeführt. Genutzt werden hier, je nach Komplexität des Modells, 12 oder 24 Rechenkerne. Ein prinzipieller Ablauf einer Simulation ist in Abbildung 4 zu sehen.

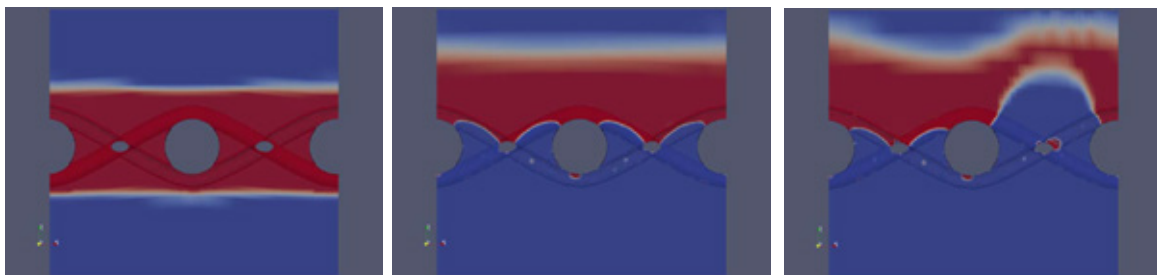


Abb. 4: Ablauf einer Bubble-Point Simulation an einer optimierten Tresse (OT 38)

Das numerische Modell liefert nach erfolgreicher Berechnung, ebenso wie das reale Messverfahren, einen Druckwert. Im Unterschied zur Labormessung kann allerdings hierbei die Porenöffnung des 3DGewebemodells im Vorhinein durch seine bekannte Geometrie bestimmt werden. Dies geschah mit dem GeoDict-Modul PoroDict. Die nun vorliegenden Daten sind zum einen der (simulierte) Bubble-Point Druckwert, die mit GeoDict ermittelte Porengröße, sowie die Oberflächenspannung von Isopropyl-Alkohol. Mit diesen Parametern kann durch Umstellen von Gl. 4 die zum simulierte Gewebe passende Kapillardruckkonstante berechnet werden. Diese, berechnete Konstante wird dann im Anschluss im realen Messverfahren zur Bestimmung der größten Pore verwendet.

### Vergleich von Messung und Berechnung

Um die Ergebnisse der Simulation zu validieren, wurden im Labor zahlreiche Tests mit unterschiedlichen Geweben, welche vorher im Modell simuliert wurden, durchgeführt. GKD setzt zur Messung des Bubble-

Points das Porometer PSM 165 der Firma Topas GmbH ein. Abbildung 5 zeigt exemplarisch drei getestete Gewebe unterschiedlicher Webart. Man erkennt, dass die Abweichung zwischen gemessenem und berechnetem Wert sehr gering ist. Im Normalfall beträgt die Diskrepanz 1% bis 2%, kann in einzelnen Fällen aber auch auf 4% ansteigen. Weiterhin fällt auf, dass die berechneten Werte stets höher sind als jene, die aus der Messung stammen. Dies ist damit zu erklären, dass Toleranzen in Drahtdurchmesser und Webprozess nicht zu 100% in der Generierung des Gewebemodells berücksichtigt werden können. Die größte Pore im realen Gewebe wird daher immer etwas größer sein als die im Modell und nach Gl. 4, die Messung kleinere Druckwerte liefern als die numerische Berechnung.

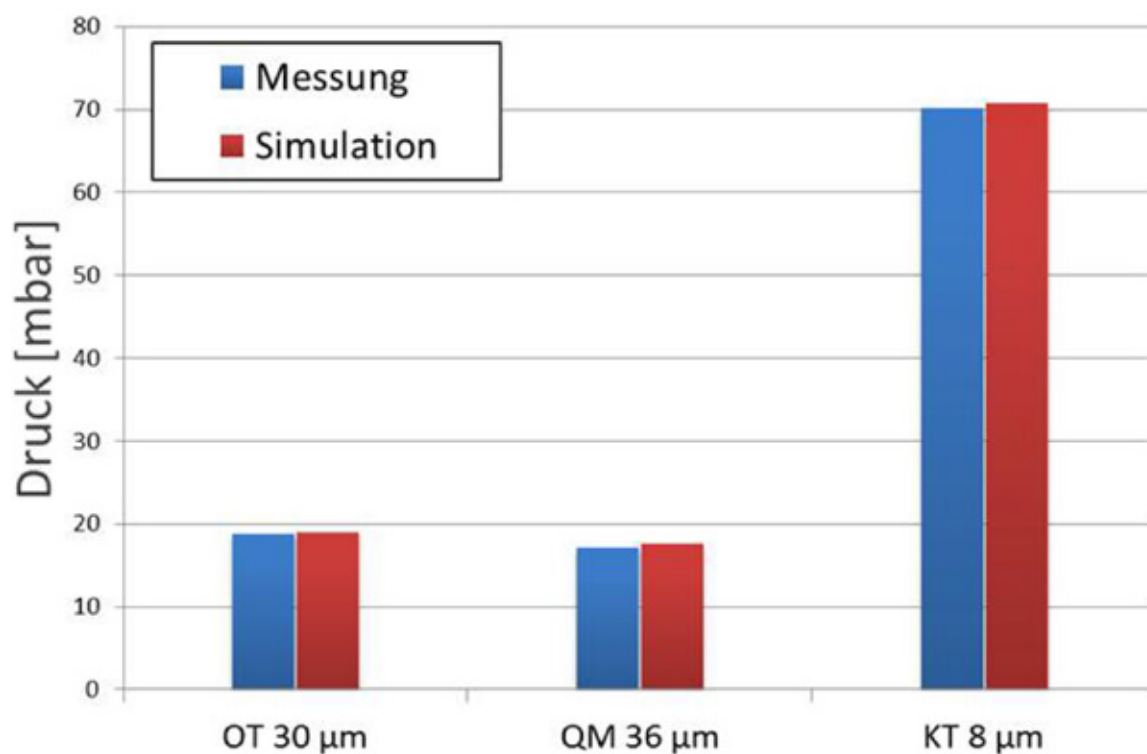


Abb. 5 :Vergleich der Simulationsergebnisse mit Messwerten für verschiedene Gewebetypen

Aus den simulierten Druckwerten und den zugehörigen Öffnungen der 3DGewebemodelle wurden nun für jedes Gewebemodell Kapillardruckkonstanten errechnet. Diese wurden dann im realen Versuch genutzt, um die größte Pore im Gewebe über den Bubble-Point Test zu bestimmen. Hier zeigen sich extrem gute Übereinstimmungen mit den in Absiebversuchen ermittelten Porengrößen. Ebenfalls der Vergleich mit einem Partikelzähler brachte ähnliche Ergebnisse (vgl. Tabelle 1).

Messverfahren	Größte Pore [ $\mu\text{m}$ ]
Bubble Point (numerisch unterstützt)	7,42
Partikelzähler	7,26
Absiebung	7,50

*Tabelle 1: Vergleich verschiedener Messverfahren mit der verbesserten Bubble-Point Methode*

Der Vorteil der Bubble-Point Methode für die Qualitätssicherung liegt hierbei vor allem im Zeitfaktor. Die Auswertung mittels Partikelzähler benötigt ca. drei bis vier Arbeitsstunden, eine Absiebung dauert etwa 30 Minuten. Die Messung des Bubble-Points und die Umrechnung des gemessenen Drucks in eine Porengröße dauert dagegen weniger als eine Minute.

### Ergebnisse und Verwendung des Modells

Mit der numerischen Bestimmung der Kapillardruckkonstanten hat GKD ein mächtiges neues Werkzeug zur schnellen und effizienten Porengrößenbestimmung, welches im Vergleich mit konventionellen Methoden vor allem, was den Faktor Zeit anbelangt, klare Vorteile bietet. Des Weiteren ist durch die numerische Unterstützung des Messverfahrens eine bisher nicht bekannte Präzision in der Bestimmung der Porengröße über den Bubble-Point möglich. Dabei ist für jedes Gewebe nur eine einzige Berechnung nötig, um den benötigten Korrekturfaktor zu berechnen. Besonders der Vergleich mit dem bisher genutzten Verfahren der empirischen Bestimmung der Kapillardruckkonstanten ist interessant. Durch die Vielzahl an Messungen, die für einen belastbaren empirischen Wert von Nöten waren, wurde die Konstante in diesem konventionellen Verfahren für einen Bindungstyp gemittelt angegeben. Die Auswertung gleicher Webarten mit unterschiedlichen Porengrößen mit dem neuentwickelten Simulationsmodell ergab dabei, dass der Wert für die Kapillardruckkonstante innerhalb einer Bindung um bis zu 100% variieren kann. Durch die lineare Charakteristik von Gl. 4 weicht also bei dem alten, gemittelten Korrekturfaktor die ermittelte Porengröße im schlechtesten Falle auch um 100% von der tatsächlich vorliegenden Öffnung ab. Daraus ergibt sich die Schlussfolgerung, dass für jedes Gewebe eine eigene Kapillardruckkonstante errechnet werden muss, um eine korrekte Aussage über die vorliegende Porengröße treffen zu können. Auf Basis dieser Erkenntnisse sollte nun ebenfalls die mit einem Flüssigkeits-Porometer wie dem PSM 165 messbare Porengrößenverteilung (s. ASTM E1294) optimiert werden. Bei Drahtgeweben handelt es sich um hochgradig regelmäßige Strukturen mit definierten Poren. Trotzdem ergeben sich in der Realität durch Produktionstoleranzen in der Drahtherstellung sowie dem Webprozess kleinere Schwankungen in der Porengröße. Um diese Schwankungen zu detektieren, kann eine Porengrößenverteilung gemessen werden. Abbildung 6 zeigt eine mit Standardeinstellungen gemessene Porengrößenverteilung für ein Gewebe mit einer Porengröße von 20  $\mu\text{m}$ .

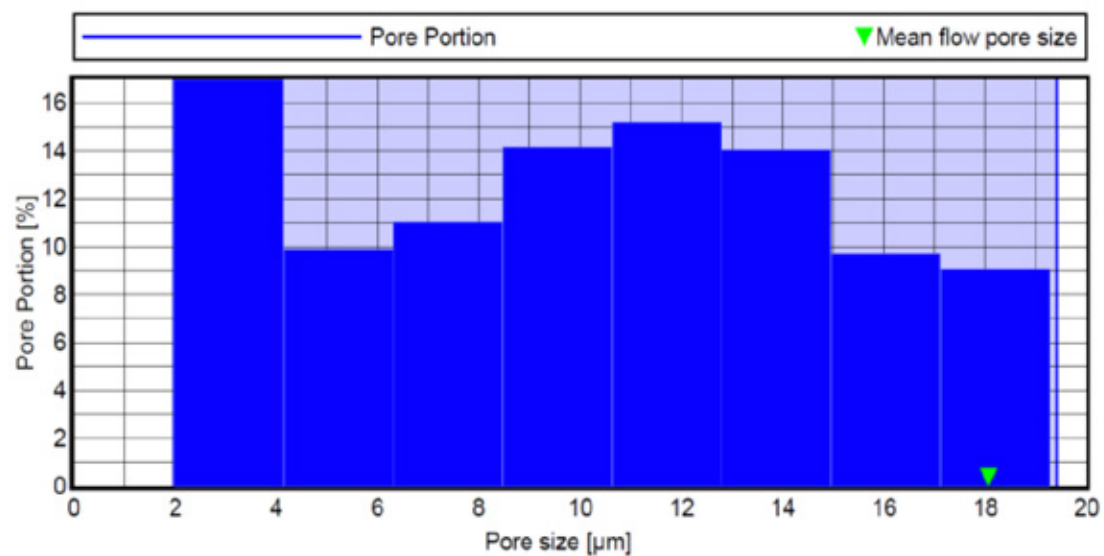


Abb. 6: Messung der Porengrößenverteilung mit Standardeinstellungen

Man erkennt, dass die Messung physikalisch unsinnig ist, da ein solches Gewebe niemals Poren der Größe 16 µm oder kleiner enthalten kann. Man würde eher eine enge Verteilung der Poren um den nominalen Porengrößenwert von 20 µm erwarten. Durch hilfreiche Telefonate mit der Fa. Topas GmbH sowie dem physikalischen Verständnis, das die Simulation des Bubble-Points einbrachte wurde dieses Messverfahren nun optimiert und mit einer Neuberechneten Kapillardruckkonstante erneut durchgeführt. Das Ergebnis dieser Messung zeigt Abbildung 7.

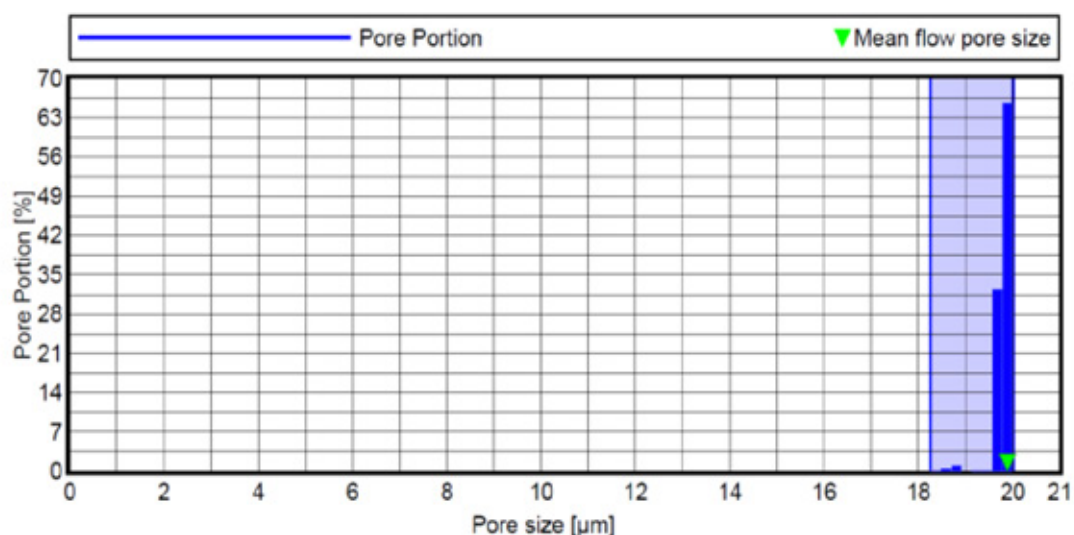


Abb. 7: Messung der Porengrößenverteilung mit verbesserten Verfahren und angepasster Kapillardruckkonstante



Die nun gemessene Verteilung entspricht dem erwarteten Ergebnis. Die Mehrzahl der Poren liegt nun um den nominalen Öffnungswert von 20 µm verteilt, die vorher gemessenen, falsch detektierten Poren tauchen nicht mehr in der Messung auf. Die getroffenen Anpassungen wurden auf andere Gewebe übertragen und man konnte zeigen, dass das optimierte Messverfahren für alle Gewebetypen anwendbar ist und zuverlässige Ergebnisse liefert.

### Ausblick und weiteres Vorgehen

Die gewonnen Erkenntnisse werden bei GKD bereits aktiv in der Entwicklung eingesetzt. So wurde der Entwicklungsprozess der neuen, optimierten Tresse OT 6 wesentlich durch die Simulation bzw. die verbesserten Messverfahren unterstützt. Damit war es möglich, schnell und zuverlässig in der Entwicklung auftretende Schwierigkeiten zu erkennen und im Folgernden sofort auszumerzen. Des Weiteren werden die verbesserten Messverfahren schon in die Qualitätskontrolle integriert, um schnellere und effizientere Prüfungen mit hohen Ansprüchen an die Qualität zu gewährleisten. Zu guter Letzt können Entwicklungen, die auf spezielle Kundenwünsche hin entworfen werden, auf ihren Bubble-Point getestet werden, noch bevor ein einziger Meter gewebt wurde. Da das Modell unabhängig von der eingelesenen Geometrie arbeitet, konnten für alle gängigen Gewebearbeiten Korrekturfaktoren bestimmt werden die eine schnelle und vor allem präzise Porengrößenbestimmung ermöglichen.

### Nomenklatur

#### Symbole

Symbol	Einheit	Definition
C	–	Kapillardruckkonstante
d	m	Durchmesser
g	m/s <sup>2</sup>	Erdbeschleunigung
h	m	kapillare Steighöhe
p	Pa	Druck
r	m	Radius
θ	rad	Benetzungswinkel
ρ	kg/m <sup>3</sup>	Dichte
σ	N/m	Oberflächenspannung

### Indizes, tiefgestellt

Index	Definition
A	Atmosphären-
K	Kapillar-
S	Oberflächen-

### Abkürzungen

Abkürzung	Bedeutung
KT	Köpertresse
OT	Optimierte Tresse
QM	Quadratmasche