

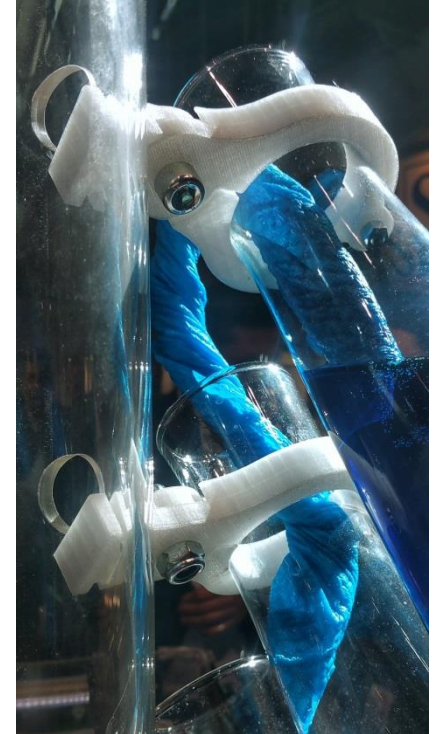
A horizontal band across the middle of the slide shows a microscopic view of a nonwoven fabric. The fabric has a complex, interconnected network of fibers, appearing as a dense, porous structure. The colors range from dark teal to bright green, highlighting the intricate details of the material's texture.

# Zur Übertragbarkeit von Aussagen aus dem vertikalen auf den horizontalen Flüssigkeitseinzug in Nonwovens

Dr.-Ing. **Tobias Maschler**, PD Dr.-Ing. Thomas Stegmaier, Prof. Dr. rer. pol., Dipl.-Ing. Meike Tilebein & Prof. Dr. Götz T. Gresser

# Übersicht

- Grundlagen
- Problemstellung
- Vorstellung des untersuchten Kapillarsystems
- Versuchsplanung und -durchführung
- Versuchsergebnisse
- Fazit



# Grundlagen

Grundlagen · Problemstellung · das untersuchte Kapillarsystem · Versuchsplanung und -durchführung · Versuchsergebnisse · Fazit

# Grundlagen: Modellierung des kapillaren Flüssigkeitseinzugs in geneigte runde Kapillaren

**Gesetz von Hagen-Poiseuille** zum laminaren Fluss in Rohren:

$$\frac{dl}{dt} = \frac{r^2}{8 \cdot \eta} \cdot \frac{1}{l_u + l} \cdot \Delta p$$

Nach kleineren Anpassungen können wir diese Beziehung auf Textilstrukturen übertragen.

mit

$$\Delta p = \frac{\Delta F}{A} = \frac{\text{Adhäsionskräfte} - \text{Gewichtskraft}}{\text{Querschnittsfläche}} = \frac{2 \cdot \gamma \cdot \cos(\theta)}{r} - \rho \cdot g \cdot h$$

erhalten wir das folgende, zusammengefasste Modell:

$$\frac{dl}{dt} = v \cdot \frac{h_{max}}{l_u + l} \cdot \left(1 - \frac{l}{l_{max}}\right) = \underbrace{v \cdot \frac{h_{max}}{l_u + l}}_{\text{horizontale Fließfront-Geschwindigkeit}} \cdot \underbrace{\left(1 - \frac{l \cdot \sin(\alpha)}{h_{max}}\right)}_{\text{Korrekturfaktor für schrägen Flüssigkeitseinzug}}$$

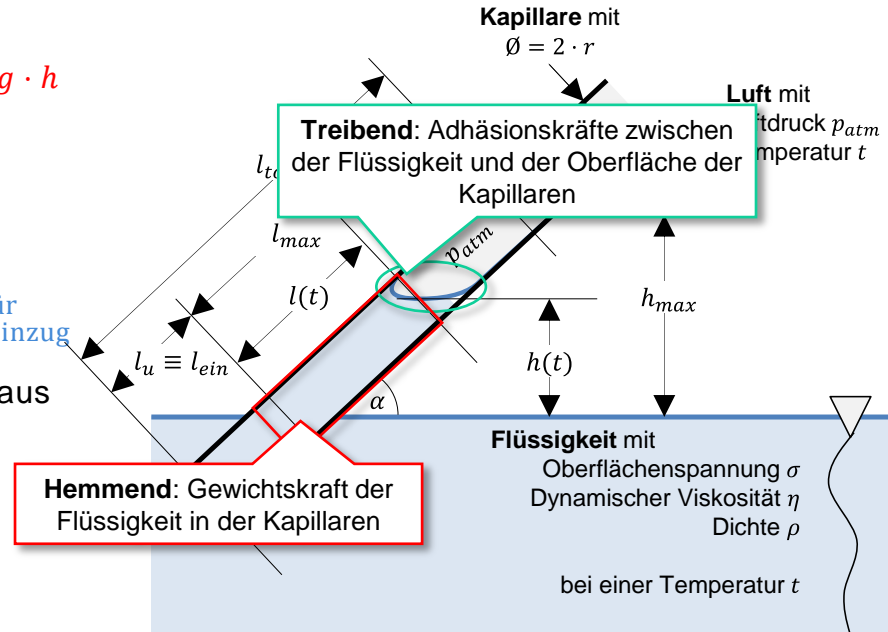
... mit der **Washburn-Kapillarkonstante**  $c = v \cdot h_{max}$ , bestehend aus

- **Kapillargeschwindigkeitskonstante**

$$v = \frac{\rho \cdot g \cdot r^2}{8 \cdot \eta}$$

- **Max. Steighöhe der Flüssigkeit**

$$h_{max} = \frac{2 \cdot \gamma \cdot \cos(\theta)}{\rho \cdot g \cdot r}$$



# Grundlagen: Was steckt hinter den beiden Parametern?

## Kapillargeschwindigkeitskonstante

$$v = \frac{\rho \cdot g \cdot r^2}{8 \cdot \eta}$$

- Der hydraulische Widerstand des laminaren Flusses in zylindrischen Rohren ist in der Hagen-Poiseuille-Gleichung

$$R = 8 \cdot \eta / r^2$$

- Für die Kapillargeschwindigkeitskonstante gilt:

$$v = \rho \cdot g \cdot \frac{1}{R}$$

→  $v/\rho \cdot g$  beschreibt damit wohl die **hydraulische Leitfähigkeit der Flüssigkeit** in der Textilstruktur.

- $v$  in Textilstrukturen enthält aufgrund der nichtrunden Kapillargeometrien einen zusätzlichen Bremsfaktor.
- Noch nicht bewiesen.

## Max. Steighöhe

$$h_{max} = \frac{\gamma_{sa} - \gamma_{ls}}{2 \cdot \gamma_{la} \cdot \cos(\theta)} \cdot \rho \cdot g \cdot r$$

- $h_{max}$  ist eine Ausdrucksweise für den Kapillardruck: sie normalisiert die Adhäsionskräfte zwischen Kapillarwänden und Flüssigkeit auf die Querschnittsfläche.
- $r$  in  $h_{max}$  gibt hier einen Hinweis auf die mittlere Flüssigkeitsmenge auf der benetzbaren Oberfläche:

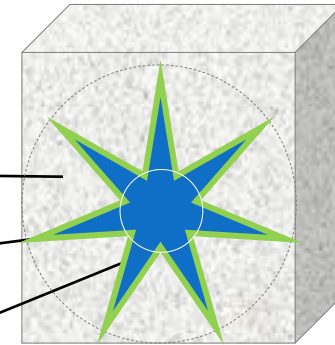
$$r = A_{wettbewerb} / o_{wettbewerb}$$

**Ersatzmodell** für einen Querschnitt durch einen porösen Körper:

Nicht benetzbare Querschnittsfläche  $A - A_{wettbewerb}$

Benetzbare Kapillarwand im Querschnitt  $o_{wettbewerb}$

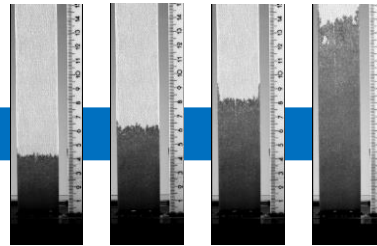
Benetzbare Querschnittsfläche  $A_{wettbewerb}$



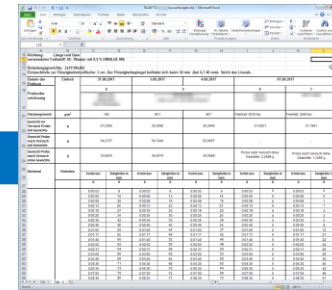
# Die wesentlichen Schritte zum mathematischen Beschreiben des kapillaren Flüssigkeitseinzugs



Flüssigkeitseinzug nach  
ISO9073-6 mit  
Kamera dokumentieren



Bilderkennung durchführen



Zeitreihe  $[t_i \quad l_i \quad m_i]$

## Parameteridentifikation aus einer Zeitreihe

Bitte geben Sie die Bezeichnung der Parameteridentifikation ein  
(z.B. Material + Flüssigkeit + Datum):

Parameteridentifikation 21.6.2017, 16:42:41

Vorgaben

Zeitreihe eingeben

### Zeitreihe

Werte können direkt aus einem Excel-Worksheet kopiert werden und nach dem Einfügen in das Eingabefeld "Zeitreihe eingeben" mit <Strg>+<A> und dann <Strg>+<V> eingefügt werden.

Sobald das Datenfeld verlassen wird, sind die Werte in die Eingabefelder der Tabelle übernommen. Es können nachträglich noch einzelne Datensätze anfügt werden, indem auf den Plus-Button in der Spalte "Flüssigkeitspegel" geklickt wird.

Einzelne Datensätze werden gelöscht, wenn auf den Löschbutton innerhalb der Tabelle geklickt wird.

Die komplette Zeitreihe kann gelöscht werden, indem auf den Button "Zeitreihe löschen" geklickt wird.

Die Werte für den Abfall des Flüssigkeitspegels sind optional.

Zeitreihe löschen

Zeitreihe aus Excel einfügen

	Zeitpunkt	Steighöhe	Flüssigkeits- pegel	
$i$	$t_i$	$l_i$	$p_i$	
1	<input type="text" value="0"/> s	<input type="text" value="0"/> mm	<input type="text"/> mm	<input type="button" value="⊖"/>
2	<input type="text" value="11"/> s	<input type="text" value="21"/> mm	<input type="text"/> mm	<input type="button" value="⊖"/>

Zu identifizierende Parameter auswählen

Methoden zur Fehlerermittlung und -gewichtung auswählen

Abbruchbedingungen festlegen

```
# Kopieren (<STRG>+<C>) Sie aus Excel Rohdaten und fügen Sie diese hier  
ein (<STRG>+<A>, dann <STRG>+<V>).  
# Sobald Sie das Feld verlassen, werden die Daten eingelesen.  
  
# Die erste Spalte enthält den Zeitpunkt (Format: dd:hh:mm:ss; die  
ersten Segmente (dd, hh, mm ...) können auch weggelassen werden),  
# die zweite die abgelesene Steighöhe in mm.  
# Die dritte Spalte ist optional, sie enthält die Höhe des  
Flüssigkeitsspiegels.  
  
# Kommentarzeilen, Leerzeilen und solche, die nicht mit Ziffern  
beginnen, werden beim Einlesen ignoriert.
```

```
Zeit Steighöhe  
0:00 0  
0:11 21  
0:12 26  
0:13 29  
0:14 31  
0:15 33  
0:16 36  
0:17 37  
0:18 38  
0:19 40  
0:20 42  
0:21 43
```



Nam parametros  
in exemplum!

... manchmal funktioniert Parameteridentifikation auch ohne Magie ...

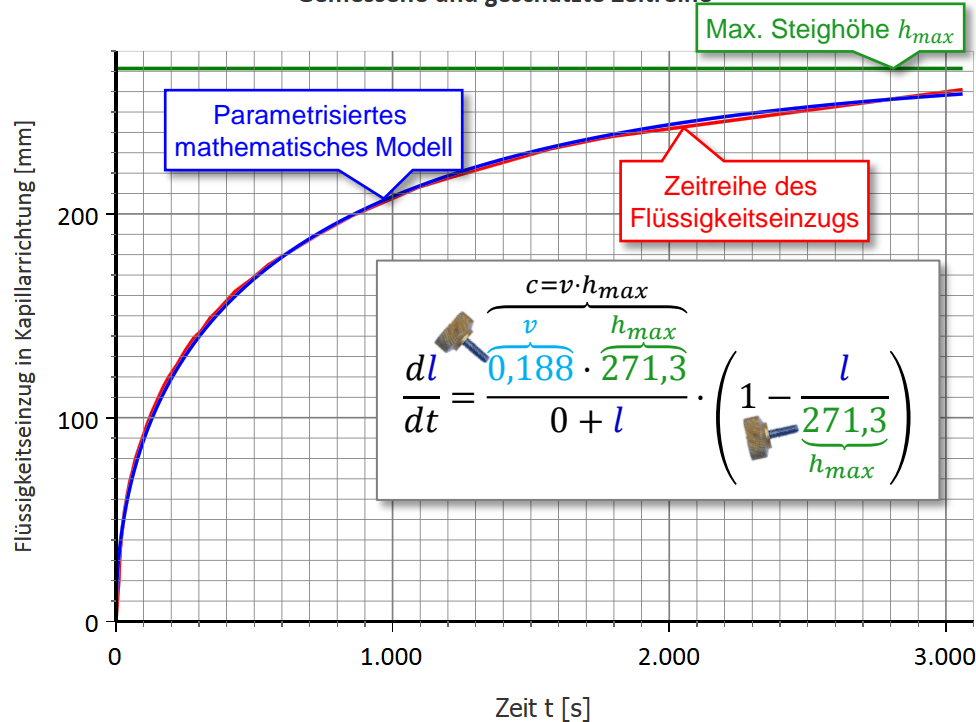
... wir passen einfach unser theoretisches Modell so an,  
dass es die Praxis möglichst gut beschreibt ...



numerierung der Differentialgleichung:

$$\frac{dl}{dt} = \frac{c}{l_u + l} \cdot \left(1 - \frac{l}{l_{max}}\right)$$

## Gemessene und geschätzte Zeitreihe



Gemessene Zeitreihe  $l_i(t_i)$  (Vorgabe)

Geschätzter Verlauf  $l(t)$

Geschätzter max. Flüssigkeitseinzug  $l_{max}$

# Was liefert uns die neue Methode zum Charakterisieren des kapillaren Flüssigkeitseinzugs?

- Statt subjektiv geschätzter Steighöhen: (automatische) Auswertung von Bildern.  
→ **objektiv**, **nachvollziehbar**, **Zeitersparnis**.

- Der Flüssigkeitseinzug lässt sich mathematisch beschreiben.

Das Modell enthält folgende, anzupassende Parameter:

- **Kapillargeschwindigkeitskonstante**  $v$  [mm/s] (wohl ~ hydraulische Leitfähigkeit) + Variabilität
- **Max. Steighöhe/ Kapillardruck**  $h_{max}$  [mm] + Variabilität
- **Flüssigkeitsaufnahme**  $h_{Fl}$  [mm=l/m<sup>2</sup>] + Variabilität
- Nun sind **Simulationsrechnungen** zum Flüssigkeitseinzug möglich.
  - „Industrie 4.0“: anwendungsorientiertes Auslegen von Nonwovens im Computer
  - **Validierung von Kundenanforderungen** wie  
„ein 15 cm breiter Streifen muss in der waagerechten 20 ml in 30 sec aufnehmen“  
durch Nachrechnen

## Was bedeutet das für die Praxis?

Einzugsversuche liefern  
direkte Antworten auf ...

- **Wie schnell** nimmt das Textil von sich aus eine bestimmte Flüssigkeitsmenge auf?
- **Wie hoch** steht die Flüssigkeit im Material?
- **Wie stark** ist der Kapillardruck des Materials?

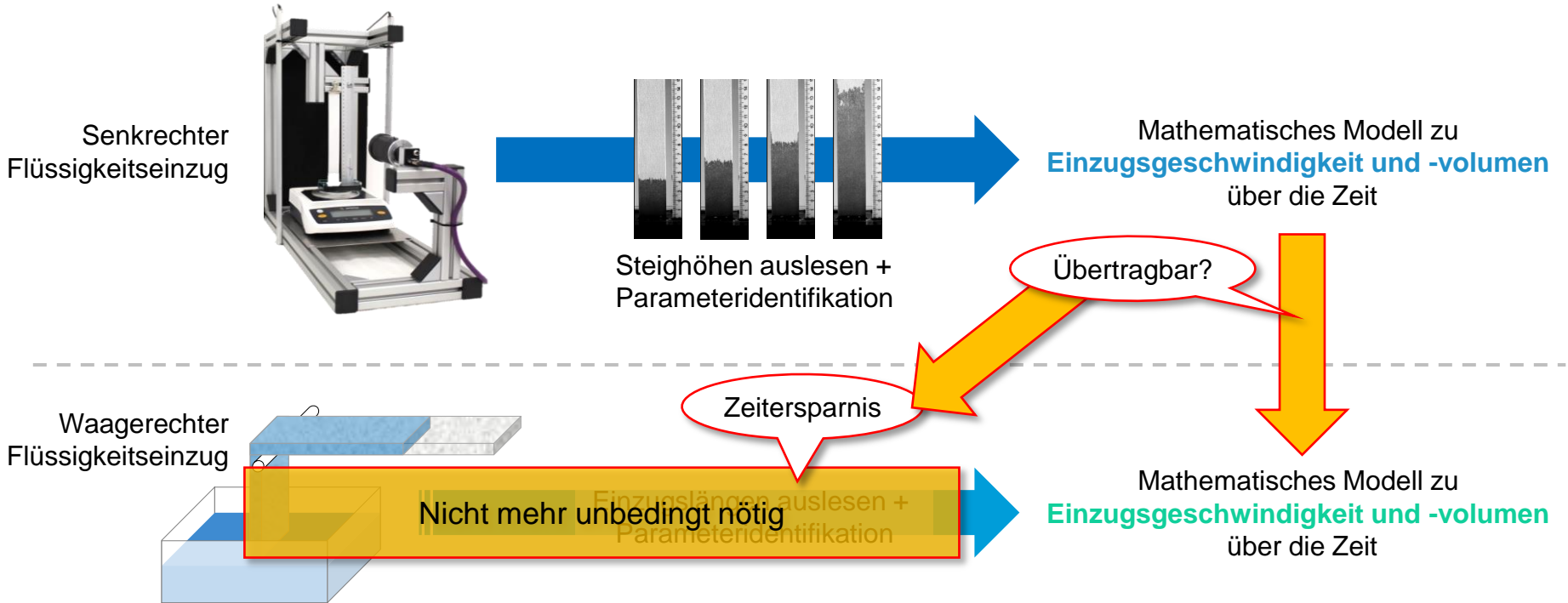
Wir erhalten auch Auskunft zu ...

- ... dem **Kontaktwinkel stark hydrophiler Materialien?**
- **Wieviel benetzbare Faseroberfläche** ist im Materialquerschnitt?
- **Wieviel verdunstet** auf der Textilstruktur?

# Problemstellung

Grundlagen · **Problemstellung** · das untersuchte Kapillarsystem · Versuchsplanung und -durchführung · Versuchsergebnisse · Fazit

# Worum geht es nun?



# Characterisation and prognosis of the capillary rise of fluids in textile structures, exemplified by wicking of sunflower oil into cotton nonwove

Tobias Maschler<sup>a\*</sup>, Hermann Finckh<sup>a</sup>, Thomas Stegmaier<sup>a</sup>, Meike Tilebein<sup>a</sup>, and Götz T. Gresser<sup>a</sup>

<sup>a</sup> German Institutes of Textile and Fiber Research, 73770 Denkendorf, Germany

## Abstract

Although there are several methods for describing the absorption behavior of textile structures, there is no standard method for identifying the material and fluid parameters that are necessary for simulating the dynamics of the capillary rise of liquids in textile structures. This contribution describes a parameter identification method for a general model for wicking in capillary systems. This contribution describes a parameter identification method for a general model for wicking in capillary systems. This contribution describes a parameter identification method for a general model for wicking in capillary systems.

© 2017 The Authors. Published by Elsevier Ltd. Peer-review under responsibility of the scientific committee of the 3rd International Conference on Natural Fibers: Advanced Materials for a Greener World.

**Keywords:** wicking; capillary rise; nonwovens; liquid absorption; cotton; hydro-entangled nonwovens; sunflower oil; time series

\* Corresponding author. Tel.: +49 711 9340-431; Fax: +49 711 9340-415; E-mail address: [tobias.maschler@dtf.de](mailto:tobias.maschler@dtf.de)

## 1. Introduction

The ongoing trend toward methods describing product development is leading to a new approach for simulating wicking of results obtained from vertical

## Nomenclature

$t$  continuous time since start of experiment in time since

defined, nor is there a mapping of the observed data to the parameters in the following differential equation

[12] still used difference equations which are still remain dependent of the time step width and the method with arbitrary time step width and

## 3. Methodology Development

The starting point for describing the kinetics forms the special model of wicking. There are some special peculiarities for porous materials. Paragraphs explain the capillary kinetics of inhomogeneous and textile structures are explained.

### 3.1. Modelling the wicking front speed and position

Figure 1 shows a model for the capillary rise  $h(t) = \sin(\alpha) \cdot l(t)$ . For the case of a vertically oriented capillary direction:  $h(t) = l(t)$

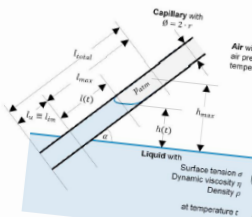


Fig. 1. Capillary rise in an inclined, cylindrical tube without evaporation.

Drivers of the wicking effect are interfacial tensions and the contact angle theta. These interfacial tensions may vary with the contact angle theta is smaller than 90 degrees, being buffered by the increasing weight force

identified Washburn capillary constant  $c$  from vertical wicking is identical to the one identified for horizontal wicking in a given textile material. This implies that the wettable fibre surface in the cross section is identical in both the vertical and the horizontal wicking case and that evaporation effects need to be either quantified or excluded.

In a first experiment, three short time series (#1..3) with a length of  $t_{95} = 58$  [min], describing the vertical wicking of sunflower oil in hydro-entangled cotton nonwovens, were acquired. All time series were taken at air conditioning indoor climate at  $22 \pm 1$  °C with  $50 \pm 5$  % air humidity. For each time series, a parameter identification for  $v$  and  $h_{max}$  was carried out. This led to the results in table 1. The remaining error in table 1 forms the cumulated absolute error of all measured values, divided by the parameter identification's degrees of freedom and by the maximum rise level  $h_{max}$ .  $t_{95}$  forms the estimated time until 95 % of  $h_{max}$  is reached, it can be calculated with the integral of (5). As  $c$  and  $t_{95}$  do depend on  $v$  and  $h_{max}$ , their mean values are provided for orientation, only.

Liquid rise of sunflower oil in a cotton nonwoven.

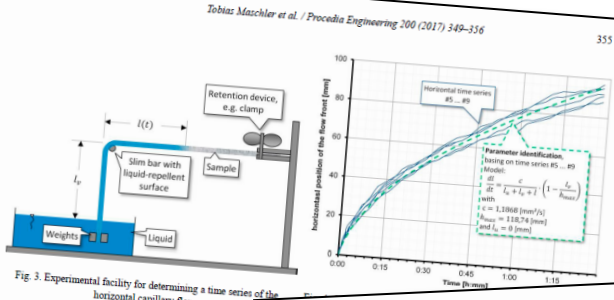


Fig. 3. Experimental facility for determining a time series of the horizontal capillary flow.

Table 2. Parameter identification results for the horizontal capillary flow.

Time series	#1	#2	#3
Horizontal time series	47	48	49
Mean value			
Upper border			
Lower border			
Coefficient of variation			

## 5. Conclusions and Outlook

The chosen method for identifying parameters in nonlinear systems is a liquid in a textile sample using the Nelder-Mead method. This method is well suited for the development of the wicking front in the vertical capillary rise. The identified parameters can be used to calculate a number of flow front has moved over a given length in capillary direction. The sample's weight difference before and after the experiment, permitting as well estimations of the volumetric flow

necessary for parameter identification do not need to cover a large part of the necessary time until the liquid reaches the maximum rise level. Depending on their quality, quite shorter time series may prove being sufficient. The method is especially interesting for products in application markets where liquid absorption and transport do matter. Possible application markets form e.g. the hygienics sector, as well as markets for functional or sportswear, bed linen or towels. The Austrian subsidiary "Leuzing Instruments GmbH & Co.KG" of the German textile material characterisation company "Textechno Herbert Stein GmbH & Co. KG Textile Mess- und Prüftechnik" has decided to develop an automated characterisation method for the capillary kinetics of textile materials. The DITF Denkendorf seek to standardise the characterisation method as a DIN SPEC, in the meantime.

## 6. Acknowledgements

The IGF project «Entwicklung einer selbstlernenden Methode zur Prognose der kapillaren Steigkinetik von Fluiden in textilen Fasergebilden» (18514 N) of Forschungsvereinigung «Forschungszentrum Textil» got funded via AiF as part of the programme to support "Industrial Collaborative Research and Development" (IGF), with funds from the Federal Ministry of Economic Affairs and Energy by decision of the German Bundestag. The applied research project was kindly supported by 20 companies and 3 industrial associations.

## References

- [1] Stange, M.: Dynamik von Kapillarsäulen in zylindrischen Röhren. Dissertation. Cuvillier Verlag, Göttingen, 2004.
- [2] Reed, C. M., & Wilson, N.: The fundamentals of absorbency of fibres, textile structures and polymers. 1. The rate of rise of a liquid in glass capillaries. Journal of Physics D: Applied Physics, 26(9), pp1378.
- [3] Rajagopalan, D., Aneja, A. P., & Marchal, J. M.: Modelling capillary flow in complex geometries. Textile Research Journal, 71(9), pp183.
- [4] Mullins B. J. & Braddock R. D.: Capillary rise in porous, fibrous media during liquid immersion. International Journal of Heat and Mass Transfer, Bd 55, Nr 21–22, S. 6222–6230, Oct. 2012.
- [5] Das, B.: Modeling and Simulation of Moisture Transmission through Fibrous Structures Part II: Liquid Water Transmission. Journal of Fiber Research, Bd 3, Nr 1, S. 1–12, S. 6222–6230, Oct. 2012.
- [6] Besthof, S. et al.: Capillary Rise in Macro and Micro Pores of Jersey Knitting Structure. Bioengineering and Informatics 6:4 (2013) 383–404 doi:10.3993/bfi1201304
- [7] Bear, J.: Dynamics of fluids in porous media. Courier Dover Publications, 2013.
- [8] Dullien, F. A.: Porous media: fluid transport and pore structure. Academic Press, 1991.
- [9] Knaack, P.: Handbook of porous media. CRC Press, 2010.

# Forschungsaufgaben auf dem Weg ...

Forschungsaufgabe	Status
Charakterisierung des kapillaren Flüssigkeitseinzugs in textile Fasergebilde durch Parameteridentifikation in mathematischen Modell	Funktioniert [1;2] ✓
Methode in die Normung einbringen	In Arbeit mit Lenzing Instruments und EDANA
Aussagen aus dem vertikalen Flüssigkeitseinzug auf den Horizontalen übertragen	
einfaches Kapillarsystem	Erste positive Erfahrungen [3]
Alltags-Kapillarsystem	Thema für heute

- [1] Maschler, Tobias; Dinkelmann, Albrecht; Stegmaier, Thomas; Finckh, Hermann; Tilebein, Meike & Gresser, Götz T. (2016): **Entwicklung einer selbstlernenden Methode zur Prognose der kapillaren Steigkinetik von Fluiden in textilen Fasergebilden**. Forschungsbericht zum Projekt IGF/AiF 18514 N „Kapillare Steigkinetik“. DOI: 10.13140/RG.2.2.17093.65762/1 [https://www.researchgate.net/publication/315575385\\_Entwicklung\\_einer\\_selbstlernenden\\_Methode\\_zur\\_Prognose\\_der\\_kapillaren\\_Steigkinetik\\_von\\_Fluiden\\_in\\_textilen\\_Fasergebilden\\_Forschungsbericht](https://www.researchgate.net/publication/315575385_Entwicklung_einer_selbstlernenden_Methode_zur_Prognose_der_kapillaren_Steigkinetik_von_Fluiden_in_textilen_Fasergebilden_Forschungsbericht).
- [2] Maschler, Tobias; Stegmaier, Thomas; Finckh, Hermann; Tilebein, Meike; Gresser, Götz T. (2016): **Eine Methode zur Charakterisierung und Prognose der Kapillarkinetik textiler Fasergebilde**. Conference Paper · November 2016. DOI: 10.13140/RG.2.2.34508.00646 · Conference: 31. Hofer Vliesstofftage, At Hof, Bayern (Germany). [https://www.researchgate.net/publication/308969724\\_Eine\\_Methode\\_zur\\_Charakterisierung\\_und\\_Prognose\\_der\\_Kapillarkinetik\\_textiler\\_Fasergebilde](https://www.researchgate.net/publication/308969724_Eine_Methode_zur_Charakterisierung_und_Prognose_der_Kapillarkinetik_textiler_Fasergebilde).
- [3] Maschler, T.; Finckh, H.; Stegmaier, T.; Tilebein, M. & Gresser, G.T. (2017): **Characterisation and prognosis of the capillary rise of fluids in textile structures, exemplified by wicking of sunflower oil into cotton nonwovens**. Procedia Engineering, Volume 200, 2017, pp 349–356, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.07.049> .

# Vorstellung des untersuchten Kapillarsystems

Grundlagen · Problemstellung · **das untersuchte Kapillarsystem** · Versuchsplanung und -durchführung · Versuchsergebnisse · Fazit



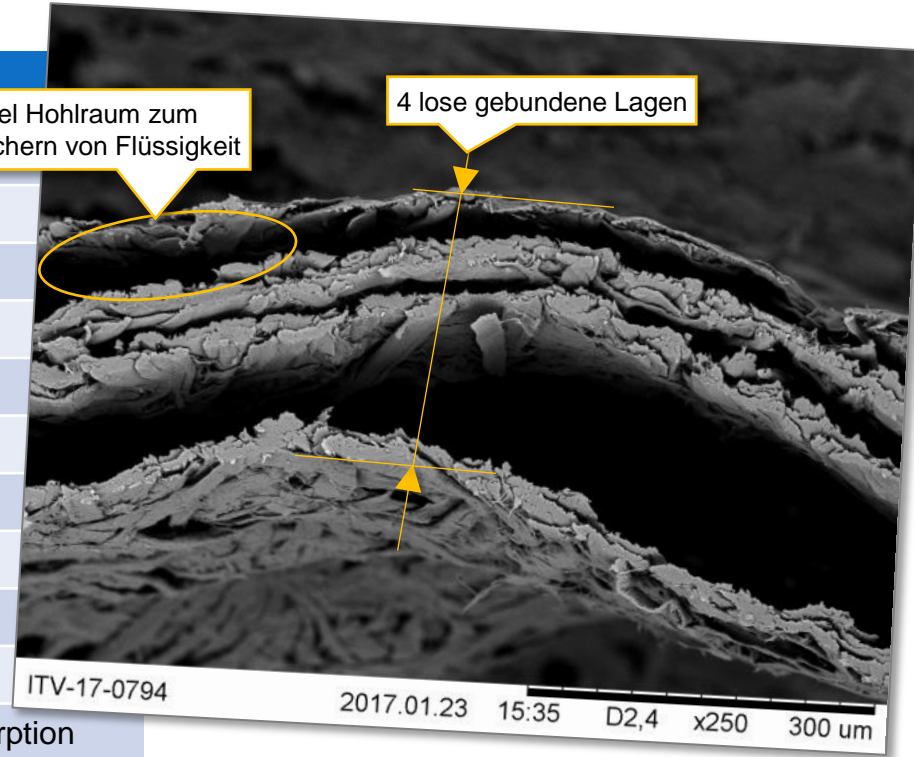
# Das untersuchte Kapillarsystem

Eigenschaft	Ausprägung
<b>Textiles Material</b>	<b>Einmalhandtuch</b>
Material	Zellstoff
Vliesbildung	– wahrscheinlich Airlaid –
Bindung	Druck und Temperatur
Flächenmasse	88,3 [g/m <sup>2</sup> ] mit CV = 0,44 [%]
Lagen	4
<b>Flüssigkeit</b>	<b>Demineralisiertes Wasser</b>
Dynamische Viskosität	~1 mPa/s @ 20 °C → Referenzwert
<b>Anwendungsbeispiel</b>	Einmalhandtuch zur Flüssigkeitsabsorption
<b>Spezielle Aspekte</b>	Schneller Einzug, Verdunstung kaum relevant, 4-lagig



Viel Hohlraum zum Speichern von Flüssigkeit

4 lose gebundene Lagen



# Versuchsplanung und -durchführung

Grundlagen · Problemstellung · das untersuchte Kapillarsystem · **Versuchsplanung und -durchführung** · Versuchsergebnisse · Fazit

# Versuchsplanung und -durchführung

## Planung

- Übliche Generalverdachtsmomente:
  - Richtungsabhängigkeit
  - Variabilität
- Jeweils 5 Proben in Längs- und Querrichtung waagrecht und senkrecht analysieren  
→  $4 \times 5 = 20$  Proben
- Probenmaße:  $5 \times 30$  cm
- Versuchsaufbau:
  - Senkrecht: Steighöhenversuch nach ISO 9073-6 + Kamera
  - Waagrecht: Kamera filmt von oben Fließfront-Fortschritt auf waagrecht fixierter, in die Flüssigkeit hängende Probe.



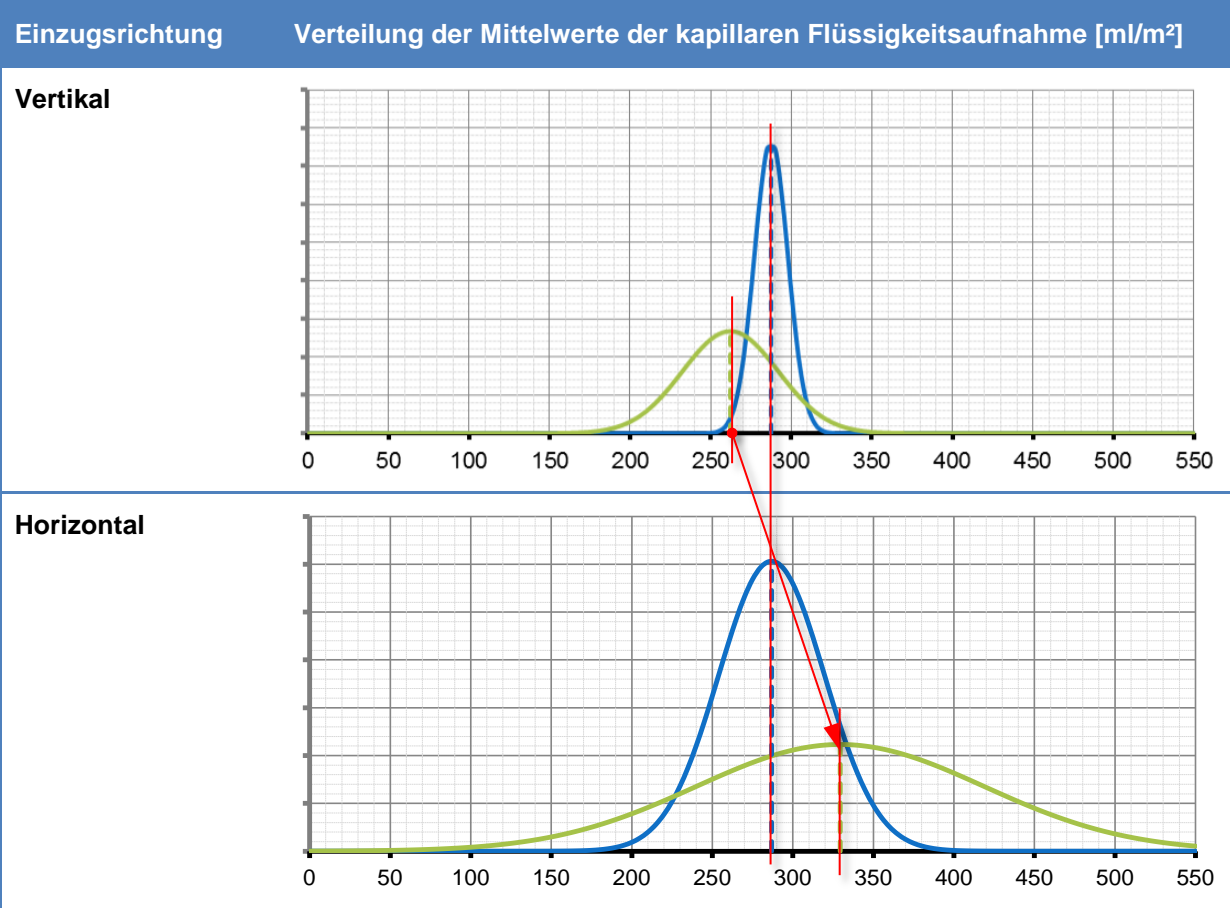
## Durchführung und Auswertung

- (1) Einzugsversuche senkrecht + waagrecht
  - Proben werden vorher und nachher gewogen
- (2) Auslesen der Steighöhen/ Einzugsängen  
→ Zeitreihen zum Flüssigkeitseinzug
- (3) Parameteridentifikation
- (4) Statistische Auswertungen  
für die einzelnen Parameter  
→ 4 Messergebnisse  $[v; h_{max}; h_{Fl}]$ 
  - Mittelwerte mit z.B. 95%-Konfidenzintervallen

# Versuchsergebnisse

Grundlagen · Problemstellung · das untersuchte Kapillarsystem · Versuchsplanung und -durchführung · **Versuchsergebnisse** · Fazit

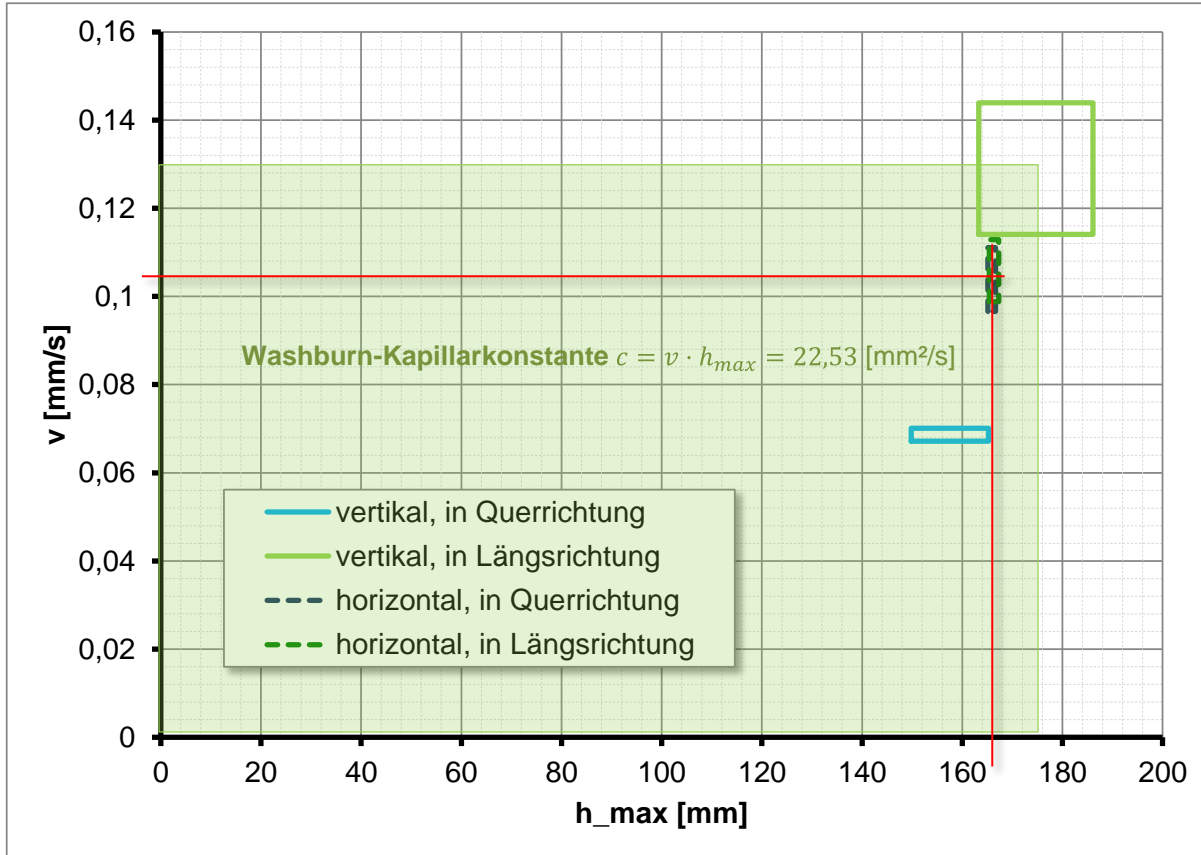
# V Versuchsergebnisse: kapillare Flüssigkeitsaufnahme $h_{FL}$



- 95%-Konfidenzintervalle sind bei der horizontalen Flüssigkeitsaufnahme deutlich breiter
- 95%-Konfidenzintervalle sind in Querrichtung deutlich enger als in Längsrichtung
- Mittelwerte in Querrichtung annähernd gleich
- Mittelwert in Längsrichtung deutlich größer im horizontalen Fall.

Grün: in Längsrichtung; Blau: in Querrichtung

# Versuchsergebnisse: Kapillargeschwindigkeit $v$ und max. Steighöhe $h_{max}$



- Horizontale Messreihen:  
 $v$  und  $h_{max}$  so gut wie identisch
- Vertikale Messreihen:
  - $v$  ist in Längs- und Querrichtung deutlich unterschiedlich
  - $h_{max}$  ist vergleichbar
- Aber: der Mittelwert  $c = 16,67 \text{ [mm}^2\text{/s]}$  für die beiden vertikalen Messreihen liegt recht nahe an  $c = 17,23$  bzw.  $16,60 \text{ [mm}^2\text{/s]}$  der horizontalen Messreihen.

# Zur Übertragbarkeit von senkrechten auf waagerechte Charakterisierungen

## Übertragbarkeit der Parameter nach Charakterisierungsrichtung

Parameter	Längsrichtung	Querrichtung
$h_{Fl}$	☹ horizontal z.T. deutlich größer	😊 vergleichbar
$v$	☹ nicht vergleichbar	☹ nicht vergleichbar
$h_{max}$	😊😊 vergleichbar	

- Weniger Spannung auf der Probe könnte die etwas bessere Flüssigkeitsaufnahme in der Horizontalen in Längsrichtung erklären.
- $v$  ist bei der vertikalen Charakterisierung in Längs- und Querrichtung deutlich unterschiedlich.
- Verdacht für  $v$  bei diesem Kapillarsystem: der Mittelwert aus den vertikalen Charakterisierungen könnte dem Wert aus den horizontalen Charakterisierungen entsprechen.

# Fazit

Grundlagen · Problemstellung · das untersuchte Kapillarsystem · Versuchsplanung und -durchführung · Versuchsergebnisse · **Fazit**



# Fazit

- Eine **Übertragbarkeit der Parameter** aus senkrecht aufgenommenen Messreihen auf Aussagen zum Flüssigkeitseinzug in der Waagerechten ist für dieses Kapillarsystem **nur teilweise gegeben**.  
Wesentliche Aspekte:
  - **Richtungsabhängigkeiten** in Längs- und Querrichtung
  - Kapillargeschwindigkeitskonstante  $v$  (z.B. möglicher Einfluss: Dimensionierung der Kanalquerschnitte)
- Die Richtungsorientierung ist bei der Anwendung dieses Materials wichtig.
- Weiterer Untersuchungsbedarf:
  - Größere Zahl an Stichproben
  - Reißkraft und -dehnung in Längs- und Querrichtung zum Bewerten der Richtungsorientierung
  - Betrachtung der einzelnen Lagen → Welche Rolle spielen die drei Zwischenräume?

The logo for DITF (Deutsche Institute für Textil- und Faserforschung) is displayed in a large, black, sans-serif font. The letters are stylized, with the 'D' and 'I' being particularly prominent.

DEUTSCHE INSTITUTE FÜR  
TEXTIL+ FASERFORSCHUNG

A horizontal band with a textured green background, featuring a pattern of interconnected, wavy lines that resemble a mesh or fabric structure. The color transitions from a darker teal on the left to a lighter green on the right.

Für Fragen und Anmerkungen stehe ich Ihnen gerne  
zur Verfügung!

Dr.-Ing. Tobias Maschler

[Tobias.Maschler@DITF.de](mailto:Tobias.Maschler@DITF.de)

T 0711 9340-431