

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/315575385>

Entwicklung einer selbstlernenden Methode zur Prognose der kapillaren Steigkinetik von Fluiden in textilen Fasergebilden...

Technical Report · November 2016

DOI: 10.13140/RG.2.2.17093.65762/1

CITATIONS

0

READS

411

6 authors, including:



Tobias Maschler

The German Institutes for Textile and Fiber R...

12 PUBLICATIONS 6 CITATIONS

SEE PROFILE



Albrecht Dinkelmann

ITV Denkendorf

17 PUBLICATIONS 91 CITATIONS

SEE PROFILE



Thomas Stegmaier

ITV Denkendorf

168 PUBLICATIONS 484 CITATIONS

SEE PROFILE



Meike Tilebein

Universität Stuttgart

41 PUBLICATIONS 204 CITATIONS

SEE PROFILE

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



Energieautarker Flüssigkeitsferntransport mit faserbasierten Systemen [View project](#)



Biomimetics of mechanical energy dissipation [View project](#)

DEUTSCHE INSTITUTE FÜR TEXTIL- UND
FASERFORSCHUNG DENKENDORF

Vorstand: Prof. Dr. rer. nat. habil. Michael R. Buchmeiser, Prof. Dr.-Ing. Götz T. Gresser, Peter Steiger

Körschtalstraße 26

D-73770 Denkendorf

Telefon +49 (0) 711 / 93 40 – 0

E-Mail dif@dif-denkendorf.de

Fax +49 (0) 711 / 93 40 – 297

Internet www.dif-denkendorf.de

Forschungsbericht zum Vorhaben IGF/AiF 18514 N Entwicklung einer selbstlernenden Methode zur Prognose der kapillaren Steigkinetik von Fluiden in textilen Fasergebilden

Tobias Maschler, Albrecht Dinkelmann, Thomas Stegmaier,
Hermann Finckh, Meike Tilebein, Götz T. Gresser

Projektleitung: Dr.-Ing. Tobias Maschler

Bearbeitungszeitraum: 01.12.2014-30.11.2016

Lizenzierung: Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

Finanzielle Förderung über das

Forschungskuratorium
textil 

The logo for the Textile Research Institute (textil) features the word 'textil' in a bold, sans-serif font, followed by a stylized graphic of three overlapping lines in blue, orange, and green.

Mitglied der



aus Haushaltsmitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi)

Zusammenfassung

Der vorliegende Forschungsbericht zum abgeschlossenen IGF/AiF-Projekt 18514 N erläutert die wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung, die sich aus dieser ergebenden Forschungsziele und die zugehörigen Forschungsergebnisse. Dies sind Folgende:

Forschungsergebnis	Autoren
Die „ Landkarte “ zum Kapillareffekt textiler Fasergebilde bietet ab S. 30 eine Einführung zum Kapillareffekt und erläutert – ausgehend vom Standard-Modell des Kapillareffekts in dünnen, runden Röhrchen – anhand von Ersatzmodellen die speziellen Besonderheiten des kapillaren Flüssigkeitseinzugs in poröse Körper sowie in textile Fasergebilde.	Tobias Maschler, Thomas Stegmaier
Die Entwicklung der Fließfront in einem aus einer Flüssigkeit und einem porösen Körper – wie einer Textilstruktur – bestehenden Kapillarsystem lässt sich mathematisch beschreiben. Der Abschnitt „ Methode zur Parameteridentifikation des Kapillareffekts textiler Fasergebilde “ ab S. 82 beschreibt, wie sich die Parameter des zugrunde liegenden mathematischen Modells auf einfache Art und Weise identifizieren lassen. Im Rahmen der Methodenvalidierung wurden insbesondere verschiedene Aspekte zum praktischen Einsatz der Methode untersucht.	Tobias Maschler, Thomas Stegmaier
Der Abschnitt „ Selbstlernende Methode zur Berechnung und Auslegung der Kapillarkinetik von Flüssigkeiten in textilen Fasergebildern “ erläutert ab S. 147 eine neuartige, allgemeine Vorgehensweise zum Optimieren von Produktkonstruktion und Prozesseinstellungen für die Produktentwicklung am Beispiel der Kapillarwirkung von Viscose-Biko-Vliesen.	Tobias Maschler
Untersuchungen zum Kapillareffekt im Computertomographen runden den Forschungsbericht ab. Dies sind: <ul style="list-style-type: none">• Der kapillare Flüssigkeitseinzug in Tampons, ab S. 197.• Der kapillare Flüssigkeitseinzug in Dochtstrukturen, ab S. 203.• 3D-Modelle aus Computertomographie-Aufnahmen eines Kerzendochts, ab S. 210.	Albrecht Dinkelmann, Hermann Finckh

Das Fazit mit einer ersten Bewertung der Projektergebnisse und einer Identifikation weiteren Forschungsbedarfs rundet diesen Forschungsbericht ab.

Die Lenzing Instruments GmbH & Co. KG hat sich entschlossen, aufbauend auf den Projektergebnissen eine Charakterisierungseinrichtung für den Kapillareffekt textiler Fasergebilde zu entwickeln. Die DITF Denkendorf planen eine DIN SPEC zur Methode zur Parameteridentifikation des Kapillareffekts textiler Fasergebilde Methode zur Parameteridentifikation des Kapillareffekts textiler Fasergebilde auszuarbeiten.

Lizenz zur Nutzung dieses Forschungsberichts

Dieser Forschungsbericht unterliegt den Bestimmungen des deutschen Urheberrechts.



Die Inhalte dieses Werks stehen unter der Lizenz „Creative Commons Namensnennung 4.0 International“ (CC BY 4.0) zur Verfügung:

Sie dürfen¹:

- **Teilen** — das Material in jedwedem Format oder Medium vervielfältigen und weiterverbreiten
- **Bearbeiten** — das Material remixen, verändern und darauf aufbauen

... und zwar für beliebige Zwecke, sogar kommerziell.

Unter folgenden Bedingungen:

- **Namensnennung** — Sie müssen *angemessene Urheber- und Rechteangaben* machen, einen *Link zur Lizenz beifügen* und *angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden*. Diese Angaben dürfen in jeder angemessenen Art und Weise gemacht werden, allerdings nicht so, dass der Eindruck entsteht, der Lizenzgeber unterstütze gerade Sie oder Ihre Nutzung besonders.

Der Lizenztext: <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/legalcode.de>.

Hier finden Sie eine allgemeinverständliche Zusammenfassung der Lizenz (die diese nicht ersetzt): <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>.

¹ Die folgenden Angaben ersetzen die Lizenz nicht.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	i
1. Forschungsthema	5
1.1 Projekttitel	5
1.2 Kurzfassung	5
2. Übersicht	7
3. Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung	9
3.1 Anlass für den Forschungsantrag	9
3.2 Ausgangssituation und Stand der Forschung	11
3.2.1 Mathematische Modelle zu Kapillarströmungen	11
3.2.2 Prüfverfahren mit Einfluss der Kapillarkinetik.....	12
3.2.3 Charakterisierung der Kapillarkinetik von textilen Fasergebilden	14
3.2.4 Vorarbeiten zum Thema „Energieautarker Flüssigkeitstransport“	15
3.2.5 Vorarbeiten zum Thema „Modellierung und Optimierung von Zusammenhängen zwischen der Produktkonstruktion und dessen Eigenschaften“	15
3.2.6 Fazit.....	18
4. Forschungsziele	21
4.1 Angestrebte Forschungsergebnisse	21
4.1.1 Wissenschaftlich-technische Ergebnisse	22
4.1.2 Wirtschaftliche Ergebnisse	27
4.2 Innovativer Beitrag der angestrebten Forschungsergebnisse	28

5. Forschungsergebnisse	30
5.1 „Landkarte“ zum Kapillareffekt textiler Fasergebilde	30
5.1.1 Übersicht	30
5.1.2 Einführung zum Kapillareffekt	31
5.1.3 Zur Temperaturabhängigkeit der Kapillarkinetik am Beispiel von Wasser.....	35
5.1.4 Ersatzmodelle zum Beschreiben der Kapillarkinetik textiler Fasergebilde.....	42
5.1.5 Anwendungsszenarien zur Kapillarkinetik mit textilen Halbzeugen	80
5.2 Methode zur Parameteridentifikation des Kapillareffekts textiler Fasergebilde.....	82
5.2.1 Methodenentwicklung.....	82
5.2.2 Implementierung als Demonstrator	108
5.2.3 Validierung.....	122
5.2.4 Sensitivitätsanalysen und Simulation zum Kapillareffekt	137
5.2.5 Ausblick auf mögliche Einsatzszenarien	146
5.3 Selbstlernende Methode zur Berechnung und Auslegung der Kapillarkinetik von Flüssigkeiten in textilen Fasergebilden	147
5.3.1 Übersicht	147
5.3.2 Grundlagen.....	148
5.3.3 Methodenentwurf.....	151
5.3.4 Validierung.....	175
5.3.5 Zusammenfassende Bewertung.....	192
5.4 Der kapillare Flüssigkeitseinzug im Computertomographen – Erkenntnisse und Potentiale	193
5.4.1 Einführung in die computertomographische Abbildung textiler Fasergebilde	193
5.4.2 Flüssigkeitseinzug in Tampons	197
5.4.3 Flüssigkeitseinzug in Dochtstrukturen.....	203
5.4.4 3D-Modelle aus Computertomographie-Aufnahmen eines Kerzendochts.....	210
6. Fazit.....	221
6.1 Wesentliche Projektergebnisse	221
6.2 Weiterer Forschungsbedarf	223
Danksagungen.....	225
Bibliographie	227

1. Forschungsthema

1.1 Projekttitlel

Entwicklung einer selbstlernenden Methode zur Auslegung und Prognose der kapillaren Steigkinetik von Fluiden am Beispiel von textilen Fasergebilden.

Akronym: Kapillare Steigkinetik.

1.2 Kurzfassung

Anlass für den Forschungsantrag sind bislang brach liegende methodische Potenziale für KMU bei der Auslegung der Steigkinetik von Flüssigkeiten in textilen Fasergebilden wie Rovings, Garnen, Dochten, Geweben, Gewirken und Gestricken sowie Vliesen und Woll- und Nadelfilzen. Die Kenntnis und Vorhersagbarkeit der kapillaren Steigkinetik hat eine wachsende wirtschaftliche Bedeutung für die Entwicklung und Verbesserung von Textilherstellungsprozessen und Textilprodukten, insbesondere hinsichtlich kapillarkinetischer Effekte in der Textilproduktion sowie der kapillarkinetischen Textilfunktion in der Nutzungsphase. Darüber hinaus lassen sich aus der Beobachtung kapillarer Ströme Rückschlüsse auf die Porosität, die kapillar wirksame Faseroberfläche sowie den Kontaktwinkel der einströmenden Flüssigkeit zur Faseroberfläche ziehen. Die Forschungsstellen entwickeln daher eine **einfache Methode, um die Kapillarkinetik konkreter Produkte zu identifizieren**. Um die Produktkonstruktion auf die Kundenanforderungen abstimmen zu können, sind für KMU weiter einfache Prognosemöglichkeiten und ein Optimierungsansatz für die Kapillarkinetik wichtig. Die Forschungsstellen erarbeiten hierzu eine **selbstlernende Methode zur Berechnung und Auslegung der kapillaren Steigkinetik textiler Fasergebilde**. Die Forschungsstellen erwarten insbesondere neue Erkenntnisse zu folgenden Produkten: Wipes und Absorber, Dochte, Geflechte, gewobene Bänder, Handtücher, Präparationen, Blähton sowie Liner, Woll- und Nadelfilze, Gießharze sowie Rovings und deren Schichten. Über die üblichen Transfermaßnahmen hinaus bieten die Forschungsstellen schon zur Projektlaufzeit spezielle Workshops für Unternehmen an und bringen ihre Ergebnisse in die Normung bei DIN e.V. ein. Die Forschungsstellen schätzen den direkten Nutzerkreis unter KMU auf mind. 440 Unternehmen und erwarten für diese jeweils kumulierte Einsparpotenziale von ca. 4,5 % sowie mittelfristige Potenziale zur Umsatzsteigerung von ca. 8-10 %.

2. Übersicht

Dieser Forschungsbericht ist in die folgenden wesentlichen Kapitel gegliedert:

Kapitel 3 erläutert die wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche *Problemstellung* sowie die Ausgangssituation und den Stand der Forschung.

Kapitel 4 erläutert die *zu erreichenden Forschungsziele* aus wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Sicht, ebenso wie den sich aus diesen Ergebnissen ergebenden, erwarteten innovativen Beitrag.

Kapitel 5 erläutert detailliert die *erreichten Forschungsergebnisse*. Dies sind eine „Landkarte“ des Kapillareffekts in textilen Fasergebilden, die Methode zur Parameteridentifikation zum Beschreiben des Kapillareffekts, weiter die selbstlernende Methode zum Berechnen und Auslegen der Kapillarkinetik sowie Erkenntnisse und Potenziale zum Analysieren des kapillaren Flüssigkeitseinzugs im Computertomographen und zu Untersuchungen an entsprechenden 3D-Modellen.

Kapitel 6 zieht das *Fazit*, fasst die wesentlichen Projektergebnisse zusammen und zeigt weiteren Forschungsbedarf auf.

Die Danksagungen sowie die Bibliographie runden diesen Bericht ab.

3. Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung

3.1 Anlass für den Forschungsantrag

Anlass für den Forschungsantrag sind bislang brach liegende methodische Potenziale für KMU bei der Auslegung der Steigkinetik von Flüssigkeiten in textilen Fasergebilden wie Rovings, Garnen, Dochten, Geweben, Gewirken und Gestricken sowie Vliesen und Woll- und Nadelfilzen. Die Kenntnis und Vorhersagbarkeit der kapillaren Steigkinetik hat eine wachsende wirtschaftliche Bedeutung für die Entwicklung und Verbesserung von Textilherstellungsprozessen und Textilprodukten in ihrer Weiterverarbeitung und Anwendung, insbesondere hinsichtlich der kapillarkinetischen Funktion der Textilien und kapillarkinetischer Effekte in deren Produktion.

So hat die Kenntnis kapillar bedingter Strömungen beispielsweise für folgende allgemeine textile Anwendungen eine überaus wichtige Funktion²:

² Erstellt u.a. anhand 0. Hierzu existieren teilweise Prüfverfahren.

Tabelle 1: Beispiele für kapillarkinetische Funktionen in Anwendungen textiler Halbzeuge.

Anwendungen von textilen Halbzeugen	Beispiele mit kapillarkinetische Funktionen
Absorber	<ul style="list-style-type: none"> • Aufnahme und Speicherung von Flüssigkeiten • Feuchtaufnahme, -transport und -verdunstung in Hand- und Trockentüchern • Wasser- und Wasserdampftransport durch mehrlagige Funktionsbekleidung
Dochte und dochtartige Flächen	<ul style="list-style-type: none"> • energieautarker Flüssigkeitstransport
Reinigung von Textilien	<ul style="list-style-type: none"> • Waschwirkung
Separation mittels Textilien	<ul style="list-style-type: none"> • Feuchtaufnahme, -transport und -verdunstung • Separation von Flüssigkeiten und Festkörpern in Membranfiltern
Stoffe für Funktionsbekleidung	<ul style="list-style-type: none"> • Barrierewirkung mittels Hydrophobierung • Feuchtetransport und -durchtritt entlang von Nähten
Klimaelemente	<ul style="list-style-type: none"> • Ausbreitung von Flüssigkeiten zur Kühlung durch Verdunstung • Kondensation und Abführen von Flüssigkeit beim Kühlen

Weiter sind Kenntnisse der Kapillarkinetik beispielsweise für folgende textilen bzw. textilverarbeitenden Produktionsprozesse wesentlich:

Tabelle 2: Beispiele für kapillarkinetische Effekte in Produktionsprozessen.

Produktionsprozess	Kapillarkinetische Effekte
Faserverbund-Herstellung, auch: Gießen von Betonteilen mit textiler Armierung	<ul style="list-style-type: none"> • Einzug und Verbindung von Matrix in Roving • Ausbildung und Dynamik der Fließfronten in und zwischen Rovings
Rotationsdruck	<ul style="list-style-type: none"> • Haftung der Druckpaste auf Substrat
Inkjetdruck	<ul style="list-style-type: none"> • Einzug der Tinte ins Substrat
Siebdruck	<ul style="list-style-type: none"> • Wechselwirkung der Druckfarbe mit dem Siebdruckgewebe
Färben und Ausrüsten	<ul style="list-style-type: none"> • Änderung der Oberflächenenergie durch Farbpigmente und Beschichtungen
Beschichten, Metallische Bedampfung z. B. mit Pasten bzw. mit Dosierrolle	<ul style="list-style-type: none"> • Haftung der Beschichtung auf dem Substrat
Kleben von textilen Flächen, Kaschieren	<ul style="list-style-type: none"> • Ausbreitung und Haftung des Klebers auf den Substraten • Haftung des Schaumstoffs auf dem Substrat • Barrierewirkung und Porosität der Klebenah/ -schicht

Darüber hinaus lassen sich aus der Beobachtung kapillarer Ströme Rückschlüsse auf die Porosität, die aktive, kapillar wirksame Faseroberfläche sowie den Kontaktwinkel der einströmenden Flüssigkeit zur Faseroberfläche ziehen.

Gefragt ist daher eine **einfache Methode, um die Kapillarkinetik konkreter Produkte zu identifizieren**; denn die Steighöhe der Flüssigkeit im Fasergebilde alleine reicht nicht aus, um den Kapillareffekt hinreichend zu beschreiben. Ebenso wichtig ist die Stärke des Kapillareffekts. Um ausgehend von bekannten Vorprodukteigenschaften eine Produktkonstruktion

auf die Kundenanforderungen abstimmen zu können, sind für KMU weiter **einfache Prognosemöglichkeiten und ein Optimierungsansatz für die Kapillarkinetik** wichtig. Beides steht bisher nicht zur Verfügung.

Der Ansatz dieses Forschungsantrags ist daher, diese Lücken zu schließen. Die Forschungsstellen kombinieren hierzu das etablierte Verfahren zur Bestimmung der Sauggeschwindigkeit von textilen Flächengebilden DIN 53.924 mit praxisgerecht aufbereiteten – auf der Washburn-Gleichung aufbauenden – als Differentialgleichungssystem formulierten Modellen zur kapillaren Steigkinetik³. Entsprechende Erkenntnisse im Rahmen des AiF-Projektes „Einzelfasercharakterisierung bezüglich ihrer Verarbeitbarkeit zu Vliesstoffen und der resultierenden Produkteigenschaften“⁴ sowie Vorversuche zeigen vielversprechende Potenziale auf. Die zu entwickelnde Methode ermöglicht zum einen Optimierungen in den oben aufgeführten Produktionsprozessen, zum anderen konstruktive, anwendungsbezogene Optimierungen von Produkten mit kapillarkinetischer Funktion.

3.2 Ausgangssituation und Stand der Forschung

3.2.1 Mathematische Modelle zu Kapillarströmungen

Modelle zu Kapillarströmungen in zylindrischen Rohren⁵ sind sehr gut bekannt, da sie seit etwa 100 Jahren quantitativ untersucht werden. Strömungsprozesse in Textilien lassen sich mit abgewandelten, auf diesen aufbauenden Modellen jedoch nur aufwändig und fallspezifisch modellieren: so existieren mittlerweile verschiedene abgewandelte Modelle, z. B. Rajagopalan et al (2001) für Garne sowie Mullins & Braddock (2012) für oleophobe und -phile Filtermedien, Das et al (2013) für Gewebe, Benltoufa et al (o.J.) für Gestricke, ebenso aber auch allgemeine Modelle für poröse Körper⁶. Jedoch gehen diese Modelle von in ihren konstruktiven und physikalischen Eigenschaften hinreichend bekannten Produkten aus; dies ist aber in der betrieblichen Praxis – insbesondere in KMU – kaum der Fall.

Was jedoch bislang fehlt, ist eine einfache Methode, die es ausgehend von einem konkreten Produkt erlaubt, dessen kapillarkinetische Eigenschaften vergleichbar zu charakterisieren; Abschnitt 3.2.3 beschreibt hierzu einen Ansatz.

³ Siehe z. B. Mullins & Braddock (2012), Reed & Wilson (1999), Rajagopalan et al (2001) sowie Pan & Zong (2006), weiter die Modellierung der Press-Sektion einer Papiermaschine mit dynamischen Kapillareffekten durch das Fraunhofer ITWM, Iliev et al (2011, 2012).

⁴ Maschler et al (2013), S. 46ff und 129ff.

⁵ Siehe z. B. Stange (2004), Reed & Wilson (1999), Rajagopalan et al (2001).

⁶ Siehe Bear (2013), Dullien (1991), Vafai (2010).

3.2.2 Prüfverfahren mit Einfluss der Kapillarkinetik

Insbesondere für Vliese existieren eine Reihe an Verfahren zur Beschreibung der Wechselwirkung Flüssigkeit-Textil, so der immer noch verwendete Draves Wettability Test (ASTM, 2010), der 3M-Test⁷ (3M, 1999) sowie Tauchnetzprüfungen wie z. B. die Absorptionstests nach ASTM-D-583⁸ (ASTM, 1963), die die DIN 53901 ablösende Normfamilie DIN EN 1772, bei denen die Wasseraufnahme als Maß für die Benetzbarkeit ermittelt wird. Die Normfamilie DIN EN ISO 9073 beschreibt unter anderem Methoden zur Ermittlung Flüssigkeitsabsorption durch Vliese (Teil 6), der Durchdringzeit von Flüssigkeiten (Teil 8 sowie 13), des Ablaufverhaltens (Teil 11), der Saugfähigkeit (Teil 12), der Wasserdichte (Teil 16) und -durchdringung (Teil 17). Edana (2012) gibt weiter eine Übersicht über ergänzende und vergleichbare Testmethoden der WSP und IST. Insbesondere für den Wasser- und Dampftransport durch Bekleidung sowie zum Waschverhalten bieten z. B. die Hohensteiner Institute eine Reihe an teilweise selbst entwickelten innovativen Test- und Prüfverfahren an.

Für die Kapillarkinetik insbesondere relevant ist die Erfassung der Steighöhe während des Flüssigkeitseinzugs nach DIN 53924; jedoch werden die dabei entstehenden Daten nicht zusammenfassend aufbereitet. Weiter existieren verschiedene Ansätze zur Charakterisierung der Flüssigkeitsinfiltration für Pulver und poröse Werkstoffe (beispielsweise Breitwieser, 2013a), ebenso erlauben z. B. das Tensiometer (Breitwieser, 2013b) die Bestimmung der Viskosität sowie die Tropfenkulturanalyse, die Wilhelmy-Platten- oder die Aufsichtdistanzmethode die Bestimmung des Kontaktwinkels⁹, weiter lassen sich mithilfe der Blasendruck- oder Tropfenvolumenmethode sowie mittels der Grenzflächenrheologie die dynamische Oberflächenspannung¹⁰ quantifizieren.

Auch hier besteht noch Ergänzungsbedarf durch ein den Flüssigkeitseinzug in textile Fasergebilde charakterisierendes Verfahren.

⁷ firmenspezifische Vorschrift für die Industrie

⁸ zurückgezogen

⁹ Eine Übersicht bietet Krüss (o.J., a).

¹⁰ Auch: Grenzflächenspannung. Eine Übersicht bietet Krüss (o.J., b).

Problematisch bei bisherigen Ansätzen zur Ermittlung der kapillarrelevanten Eigenschaften von Fasergebilden sind folgende Aspekte:

- Die bisherigen mathematischen Beschreibungsformen zur Kapillarkinetik eignen sich nur für absolut runde Fasern. Weiter verlaufene Fasern in Garnen nicht immer vollständig parallel bzw. wie im Modell vorgesehen.
- Die aktive, kapillar wirksame Oberfläche von Fasern wird durch deren Neigungswinkel bestimmt. Dieser ist eine Verteilungs- und lokalen Effekten unterworfenen Größe¹¹.
- Allgemein können poröse Körper mikroskopisch sehr inhomogen sein.
- Gerade bei Vliesen kann es mikroskopisch zu größeren Zwischenräumen bzw. Faserdichtungen kommen, auch ist die Faserorientierung lokal recht unterschiedlich. Ebenso kann nicht immer von einer homogenen Faserdurchmischung ausgegangen werden.
- Ein Tensiometer ist zur Kontaktwinkelmessung an textilen Fasergebilden nur sehr bedingt geeignet, da entweder nur Einzelfasern bzw. kleine Ausschnitte eines Fasergebildes untersucht werden können.
- Der Kontaktwinkel an Vliesen kann prinzipiell mittels der Tröpfchenmethode bestimmt werden. Diese Methode ist jedoch für hydrophile Fasergebilde – z. B. bei Nadelfilzen für Papiermaschinenbespannungen – nicht geeignet, da der Tropfen sofort einsinkt.
- Aufgrund der Kapillarkwirkung ist die Kontaktwinkelmessung bei Nadelfilzen mit einem Flächengewicht zwischen 500-1.000g/m² schwerlich möglich.

¹¹ Ein Beispiel hierfür gibt Abbildung 5: obwohl es sich hierbei um ein Wirrvlies handelt, liegen die Fasern dennoch vergleichsweise parallelisiert vor.

3.2.3 Charakterisierung der Kapillarkinetik von textilen Fasergebilden

Im Rahmen des AiF-Vorhabens „Einzelfasercharakterisierung bezüglich ihrer Verarbeitbarkeit zu Vliesstoffen und der resultierenden Produkteigenschaften“ (Maschler et al, 2013b) zeigte sich, dass es möglich ist, wesentliche Konstanten zur Kapillarkinetik von Flüssigkeiten in porösen Materialien mittels Parameteridentifikation für folgende Gleichung zu schätzen¹²:

$$\frac{dl}{dt} = v_{max} \cdot \left(\frac{h_{max} + l_u}{l + l_u} - 1 \right) \quad (1)$$

l	Steighöhe, zeitvariabel
v_{max}	Kapillarkonstante
h_{max}	Maximale Steighöhe
l_u	wirksame Eintauchtiefe

Dabei werden verschiedene gemessene Werte für die Steighöhe während des Flüssigkeitseinzugs nach DIN 53.924 verwendet. So lassen sich die Kapillarkonstante v , die maximale Steighöhe h_{max} und die wirksame Eintauchtiefe l_u anhand der dynamischen Viskosität der Flüssigkeit, deren Oberflächenspannung und Kontaktwinkel zur Kapillarwand¹³ sowie einem die verschiedenen Porengrößen zusammenfassenden, also makroskopisch wirksamen, Kapillarradius bestimmen. Umgekehrt können unbekannte Werte aus den oben beschriebenen, geschätzten Konstanten errechnet werden.

Die folgende Abbildung gibt ein Beispiel für eine Parameteridentifikation:

¹² Zur Herleitung siehe Maschler et al (2013b). Die beschriebene Gleichung beschreibt senkrecht Steigen, es existieren erweiterte Modelle für schräges Steigen. Siehe ebenso Zhong et al (2005), S. 956, Gleichungen 6-8.

¹³ und damit die Oberflächenenergie

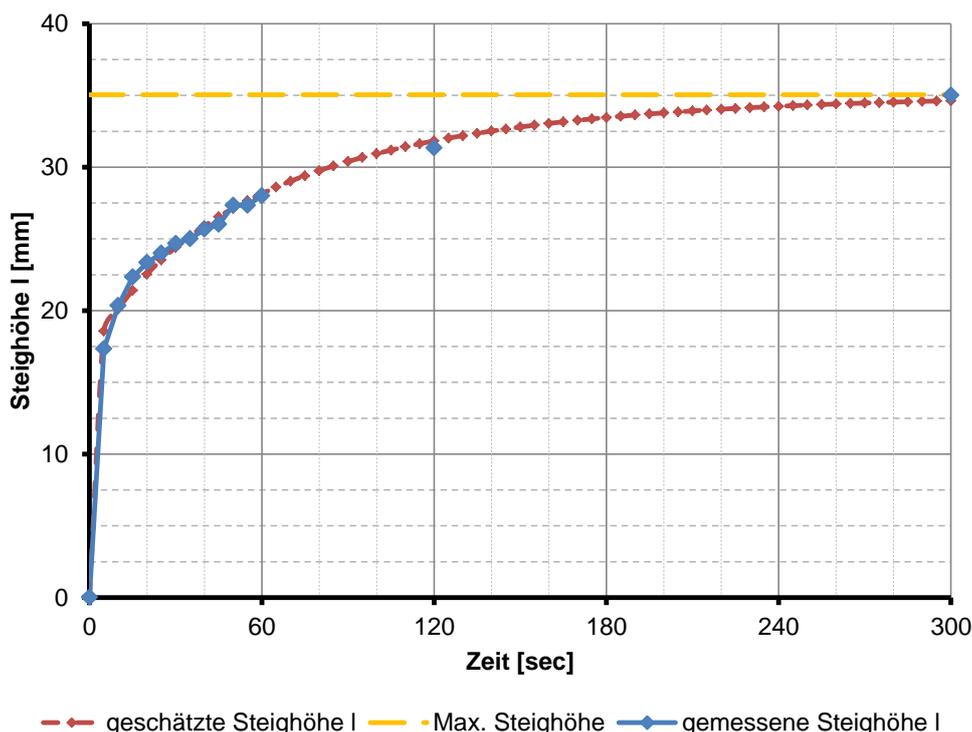


Abbildung 1: Schätzung der zeitl. Entwicklung der Steighöhe von Wasser in einem Airlaid¹⁴.

3.2.4 Vorarbeiten zum Thema „Energieautarker Flüssigkeitstransport“

Im Rahmen des BMBF-Projektes „Energieautarker Flüssigkeitsferntransport mit faserbasierten Systemen“ (Planck et al, 2011) hat sich das ITV intensiv mit der kapillaren Steigkinetik in textilen Strukturen auseinandergesetzt.

3.2.5 Vorarbeiten zum Thema „Modellierung und Optimierung von Zusammenhängen zwischen der Produktkonstruktion und dessen Eigenschaften“

Mittlerweile gibt es verschiedene Simulationsansätze für die eingangs beschriebenen kapillarkinetischen Anwendungen¹⁵ und Effekte in Produktionsprozessen¹⁶, jedoch benötigen diese umfangreiches Fachwissen zur mathematischen Modellierung. Weiter sind diese Simulationsmodelle sehr spezifisch, in ihrer Erstellung aufwändig oder liefern teilweise nur Aussagen für kleine, spezifische und lokale Raumelemente. Sie eignen sich daher insbesondere

¹⁴ Airlaid A1 aus Maschler et al (2013b), $v = 0,42 \text{ mm/s}$; $h_{max} = 35,04 \text{ mm}$; $l_u = 3,96 \text{ mm}$; $\sum \text{Fehler}^2 = 4,3 \text{ mm}^2$; Grad der Überbestimmtheit = 11. Der absolute, auf die Überbestimmtheit bezogene Fehler beträgt

$$e = \frac{\sqrt{\sum \text{Fehler}^2}}{\text{Grad der Überbestimmtheit}} = 0,18 \text{ mm}.$$

¹⁵ Siehe beispielsweise Benltoufa et al (o.J.), Zhu et al (2013), Zhang et al (2006) und Das (2013). Siehe weiter z. B. Bal et al (2011), weiter Turan & Okur (2013).

¹⁶ Insbesondere zur Simulation des Herstellprozesses von Faserverbundbauteilen existieren eine Reihe an Simulationsansätzen, z. B. Ziegmann et al (2006), Klunker et al (2006), DeValve & Pitchumani (2013), Ohne Autor (2007) und Walther et al (2012); besonders gerne zitiert wird Park et al (2011), ebenso Pan & Pillai (2010). Zu den wichtigsten Forschungszentren in diesem Themenfeld zählen die Arbeiten der Composite Materials Group (CMG) an der KU Leuven unter Leitung von Prof. Lomov. Eine Übersicht über die Arbeiten gibt Lomov (2014), Willems (2010) arbeitet die Thematik allgemein auf. Siehe weiter z. B. Bal et al (2011), weiter Turan & Okur (2013).

3. Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung

für grundlegende Fragestellungen und für Themenstellungen mit großen, standardisierten Produktionsvolumina. Für die in spezialisierten Nischenmärkten aktiven KMU kommen diese Simulationsmodelle daher kaum in Frage – die dortigen Entwickler verlassen sich weiterhin auf eine intuitiv-erfahrungsbasierte Vorgehensweise bei der Produktentwicklung.

Viscose Galaxy, 6mm, 10% BiKo, 2 m/min;

Duplizieren Umbenennen Löschen

Abhängigkeiten

... OK Abbrechen

Alle Eigenschaften

Setze «Prozesseinstellungen» als konstant
Setze «Wasseraufnahme, Dicke und Binfaseranteil» als
Setze jeden Attributwert variabel

Löse → Berechne abhängige Variablen
Löse und zeige Fehlerausgabe

Airlaid-Eigenschaften

Dicke	2,00 mm	<input checked="" type="checkbox"/> konst.	Flächenmasse	836,87	
Dichte	278,96 g/l	<input type="checkbox"/> konst.	Steighöhe	279,69 mm	<input type="checkbox"/> konst.
Wasseraufnahme	600 %	<input checked="" type="checkbox"/> konst.	Wasserrückhaltevermögen	3.913,28 %	<input type="checkbox"/> konst.

Prozesseinstellungen

Abzugsgeschwindigkeit	8,50 m/min	<input type="checkbox"/> konst.	Vliesbreite	120,0 cm	<input checked="" type="checkbox"/> konst.
			Speiserate	8,537 kg/min	<input type="checkbox"/> konst.

Eigenschaften der Vorprodukte

Funktionsfaser	Viskose Galaxy 3,3 dtex trilobal 6 mm; Kelheim Fibres (Kelheim)		Binfaser	Trevira 255 2,2 dtex 6mm Biko; Trevira (Bobingen)	
Faserlänge	11,59 mm	<input type="checkbox"/> konst.	Binfaseranteil	10 %	<input checked="" type="checkbox"/> konst.

Abbildung 2: Schätzen von abhängigen Werten im Expertensystem von DITF-MR mittels eines hinterlegten, nichtlinearen Gleichungssystems¹⁷.

Viele Zusammenhänge in Produktionsprozessen lassen sich auf einfache Art und Weise mittels bekannter physikalischer Zusammenhänge wie Energie- und Materialbilanzen modellieren (ein Beispiel gibt Abbildung 2). Für weitere, nur qualitativ bekannte, Zusammenhänge kommen verschiedene Regressionsansätze in Frage, beispielsweise Modelle zur linearen Regression, Fuzzy Logic, künstliche neuronale Netze oder auch die Parameteridentifikation in bekannten bzw. geschätzten nichtlinearen mathematischen Modellen¹⁸. Grundlage für die-

¹⁷ Aus Maschler et al (2013b), Abb. 69, S. 108. Vorgaben werden dabei konstant gesetzt, anhand des hinterlegten nichtlinearen Gleichungssystems lassen sich dann alle von diesen Vorgaben abhängigen Werte mittels des Gleichungslösers schätzen.

¹⁸ Interessant ist hierbei speziell die Kombination des Genetic Programming mit Regressionsverfahren (siehe z. B. Schmidt & Lipson, 2011).

se Modelle sind erfasste Prozesseinstellungen, Vor- und Produkteigenschaften in hinreichender Zahl.

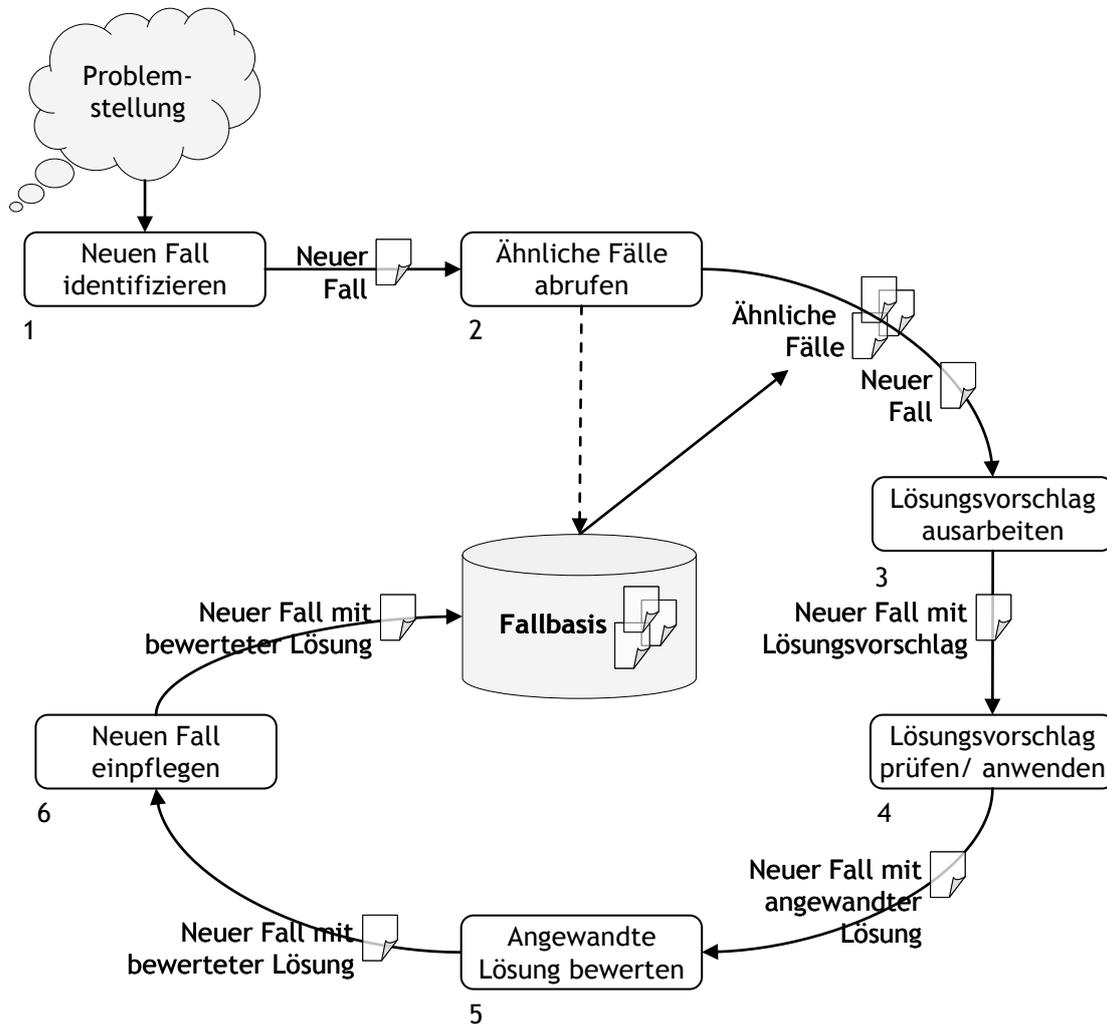


Abbildung 3: Fallbasiertes Schließen als generischer Prozess¹⁹.

In ähnlich gelagerten, vergangenen Projekten²⁰ hat MR mit einem selbst entwickelten, mit semantischen Informationsschemata²¹ – beispielsweise zu Prozesseinstellungen, Vorprodukt- und Produkteigenschaften und deren Zusammenhängen – konfigurierbaren Expertensystem gute Erfahrungen bei der Unterstützung der Produktentwicklung gemacht²². Damit steht für KMU eine einfache, aber flexibel anpassbare Umgebung zum Erfassen, Nachschlagen und Schätzen von Produkteigenschaften und Prozesseinstellungen zur Verfügung. Das

¹⁹ Maschler (2015), Abb. 12, S. 77. Maschler (2015) ergänzt dabei die Darstellung von Aamodt & Plaza (1994) um die Fallidentifikation, weiter wird der Schritt „Revise“ von Aamodt & Plaza (1994) in „Lösungsvorschlag prüfen und anwenden“ sowie „Angewandte Lösung bewerten“ untergliedert.

²⁰ Tornero (2010), Stellmach (2012), Maschler & Wolfrum (2007), Verbundprojekt Wissensmanagement (2005)

²¹ Also Ontologien (Studer, 2012) aus Sicht des Forschungsfeldes der Künstlichen Intelligenz.

²² Beispielsweise Tornero (2010) und Maschler et al (2013b)

Expertensystem von MR unterstützt die Vorgehensweise des Fallbasierten Schließens²³ zum informationssystemgestützten, auf Erfahrungswissen basierenden Problemlösen und Lernen durch Analogieschlüsse. Diese setzt darauf, neue Probleme durch Erinnern an vergangene, ähnliche Situationen und durch das erneute, kombinierende Nutzen der damals gemachten Erfahrungen zu lösen (siehe Abbildung 3). Potenziale bieten sich hierbei insbesondere beim Ermitteln und Adaptieren möglicherweise geeigneter Produktkonstruktionen für eine gegebene Spezifikation der kapillaren Steigkinetik sowie beim Abschätzen der Einflüsse einer Konstruktionsänderung auf die kapillare Steigkinetik. Da beim Fallbasierten Schließen kein explizites, in Form von Regeln²⁴ formalisiertes Wissen benötigt wird, reicht es, die dabei zugrunde liegenden Zusammenhänge nur qualitativ zu kennen. Dies ist insbesondere in Situationen, wo nur wenig Daten vorliegen, von Vorteil. Es zeigte sich, dass dabei für KMU Bilanzgleichungen, chemische und physikalische Zusammenhänge sowie einfache Regressionsmodelle ausreichen, weitergehende Ansätze wie künstliche Neuronale Netze und komplexere FEM-Simulationsmodelle werden nicht benötigt.

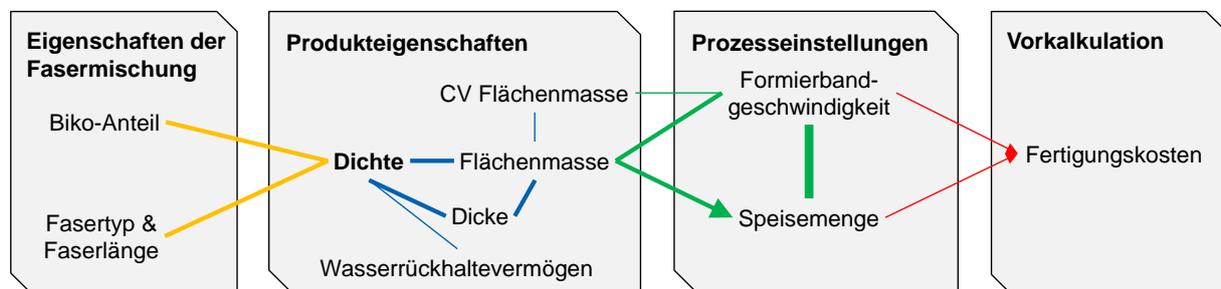


Abbildung 4: Beispielhafter Ausschnitt eines semantischen Informationsschemas für den Airlaid-Vliesbildprozess²⁵, hier für eine Fasermischung von Viskose und thermisch bindenden BiKo-Fasern.

Verschiedene KMU im europäischen Raum setzen das Expertensystem von MR zur Erfassung von Prozesseinstellungen und Produkteigenschaften ein, darunter ein Woll- und Nadel- filzhersteller, Webereien und Spinnereien. DITF-intern kommt es für das Kompetenzmanagement der Prüflaboratorien sowie als Chemikalienkataster zum Einsatz.

Damit steht für die Analyse der Zusammenhänge zwischen Kapillareffekt und Produktkonstruktion ein einfach an die individuellen Bedürfnisse eines KMU anpassbares Werkzeug zur Verfügung. Die von diesem unterstützte Methode des Fallbasierten Schließens zum Ziehen von Analogieschlüssen ermöglicht es Produktentwicklern in KMU auf einfache Art und Weise, geeignete Produktkonstruktionen für gegebene Kundenanforderungen zu ermitteln.

3.2.6 Fazit

Benötigt wird ein makroskopisch ansetzendes Verfahren, mit dem die zur Auslegung der Kapillarkinetik notwendigen Produkt- und Flüssigkeitseigenschaften auf einfache Art und

²³ siehe Aamodt & Plaza (1994), Bodendorf & Kaiser (2009)

²⁴ Zuweisungen, Gleichungssysteme, Lookup-Tabellen, Algorithmen, ...

²⁵ Aus Maschler et al (2013a), Folie 13. Sämtliche Zusammenhänge sind dabei als Gleichungssystem sowie mittels Zuweisungen im Expertensystem abgebildet.

Weise bestimmt werden können. Hierzu liegen jedoch weder wissenschaftliche Arbeiten noch praxisgängige Methoden vor. Dies ist mittels einer auf den Messwerten des Steighöhenversuchs basierenden Parameteridentifikation des in Abschnitt 3.2.3 vereinfacht dargestellten Modells möglich. Ebenso fehlt eine KMU-geeignete Methode, anhand der sich die Kapillarkinetik von textilen Fasergebilden auf einfache Art und Weise auslegen und optimieren lässt.

Die beiden Forschungsstellen MR und ITV bringen hierzu ihre Material-, Verfahrens- und Methodenkompetenz zusammen, um in einem interdisziplinären Ansatz Methoden auszuarbeiten und zusammen mit dem Projektbegleitenden Ausschuss zu validieren, die die bisherigen Prüfverfahren zur Kapillarkinetik ergänzen und KMU ein effizientes Optimieren der kapillarkinetischen Effekte in der Produktion und in ihren Produkten erleichtern. Die Ergebnisse werden direkt in KMU anwendbar sein.

4. Forschungsziele

Ziel dieses Projektes ist, die Auslegung der Saugkinetik textiler Fasergebilde für KMU zu vereinfachen: So lassen sich aus der Beobachtung kapillarer Strömungen an faserbasierten Produkten mittels des Steighöhenversuchs Rückschlüsse auf die Porosität, die kapillar wirksame Faseroberfläche sowie den Kontaktwinkel zwischen der einströmenden Flüssigkeit und der Faseroberfläche ziehen. Hierzu werden differentialgleichungsbasierte Verfahren zur Parameteridentifikation sowie eine selbstlernende Methode zur Auslegung der Kapillarkinetik textiler Fasergebilde entwickelt und erprobt. Dies ermöglicht eine effiziente Optimierung der Konstruktion und der Beschichtung saugfähiger Textilien auf die Kundenwünsche hin. Benötigt werden hierzu lediglich Zeitreihen zum Flüssigkeitseinzug in das textile Fasergebilde mittels des Steighöhenversuchs sowie die auszuarbeitenden Methoden.

Die folgenden Abschnitte beschreiben die von den Forschungsstellen angestrebten wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Ergebnisse sowie deren innovativen Beitrag.

4.1 Angestrebte Forschungsergebnisse

Das hier beantragte Forschungsvorhaben hat zum Ziel, mathematische Modelle zur kapillaren Steigkinetik in textilen Fasergebilden zur besseren Abstimmung der Prozessschritte auf die gewünschten Produkteigenschaften nutzbar zu machen. Die Forschungsstellen streben dazu folgende Forschungsergebnisse an:

1. Auf dem Steighöhenversuch aufbauende **Methode zur Parameteridentifikation des Kapillareffekts textiler Fasergebilde** und **Aufbau einer experimentellen Datenbasis** und Basiswissen zur kapillaren Steigkinetik von verschiedenen textilen Fasergebilden
2. **Selbstlernende Methode zur Berechnung und Auslegung der kapillaren Steigkinetik textiler Fasergebilde**

Die folgenden Abschnitte erläutern jeweils die Ausgangssituation und den Stand der Forschung zu den genannten Zielen.

4.1.1 Wissenschaftlich-technische Ergebnisse

4.1.1.1 Auf dem Steighöhenversuch aufbauende Methode zur Parameteridentifikation des Kapillareffekts textiler Fasergebilde und Aufbau einer experimentellen Datenbasis und Basiswissen zur kapillaren Steigkinetik von verschiedenen textilen Fasergebilden

Wie schon in Abschnitt 3.2.3 beschrieben, lässt sich mittels Parameteridentifikation die Kapillarkinetik beim Einzug einer Flüssigkeit in ein Material – wie ein textiles Fasergebilde – beschreiben. Aus den Kapillarkonstanten kann dann auf unbekannte Material- und Flüssigkeitseigenschaften rückgeschlossen werden. Bei Fasergebilden sind dies die folgenden allgemeinen Eigenschaften, die sich aus der Gebildekonstruktion²⁶ ergeben:

- Allgemeiner Formfaktor
- Makroskopisch wirksamer Kapillarradius (Verhältnis zwischen der Faseroberfläche zu einer gegebenen Querschnittsfläche)
- Kontaktwinkel bzw. polarer und disperser Anteil der Oberflächenenergie²⁷

Dabei sind die ersten beiden Eigenschaften konstruktionsbedingt, die Anteile der Oberflächenenergie lassen sich teilweise mittels eines Tensiometers bestimmen.

Folgende, in die Kapillarkonstanten eingehende, Eigenschaften von Flüssigkeiten lassen sich mit bekannten bzw. ergänzenden Messmethoden bestimmen:

- Viskosität
- Polarer und disperser Anteil der Oberflächenenergie
- Oberflächenspannung

Damit bietet der Steighöhenversuch in Kombination mit einer abgestimmten Methode zur Parameteridentifikation als ergänzendes Verfahren interessante Potenziale:

- Er erlaubt eine einfachere Bestimmung des Kontaktwinkels, insbesondere auf Materialien wie hydrophilen Vliesen, in denen Tropfen sehr schnell einsinken bzw. absorbiert werden (eine Aufnahme eines solchen Vlieses findet sich in Abbildung 5).
- Es können auch vergleichsweise große Proben untersucht werden.
- Die Kapillarkinetik konkreter Produkt-Flüssigkeitskombinationen kann einfach ermittelt werden. Die für Gleichung (1) notwendigen Parameter lassen sich mit Konstruktionseigenschaften des Produktes sowie mit Eigenschaften von Flüssigkeiten korrelieren.
- Aus Abbildung 1 ist ersichtlich, dass sich die maximale Steighöhe schon nach relativ kurzer Zeit²⁸ mittels einer Regressionsanalyse abschätzen lässt. Dies eröffnet Potenziale zur Verkürzung der Versuchsdauer. Ebenso kann geschätzt werden, wann ca. die maximale Steighöhe erreicht ist.

²⁶ Siehe beispielsweise Zhu & Takerata (2013), Zhang et al (2006), Das (2013).

²⁷ Aus den Oberflächenenergien von Flüssigkeit und Material kann der Kontaktwinkel errechnet werden, siehe z. B. Popov (2009), S. 41ff; ebenso DIN 55660.

²⁸ In Abbildung 1 sind dies 60 s.

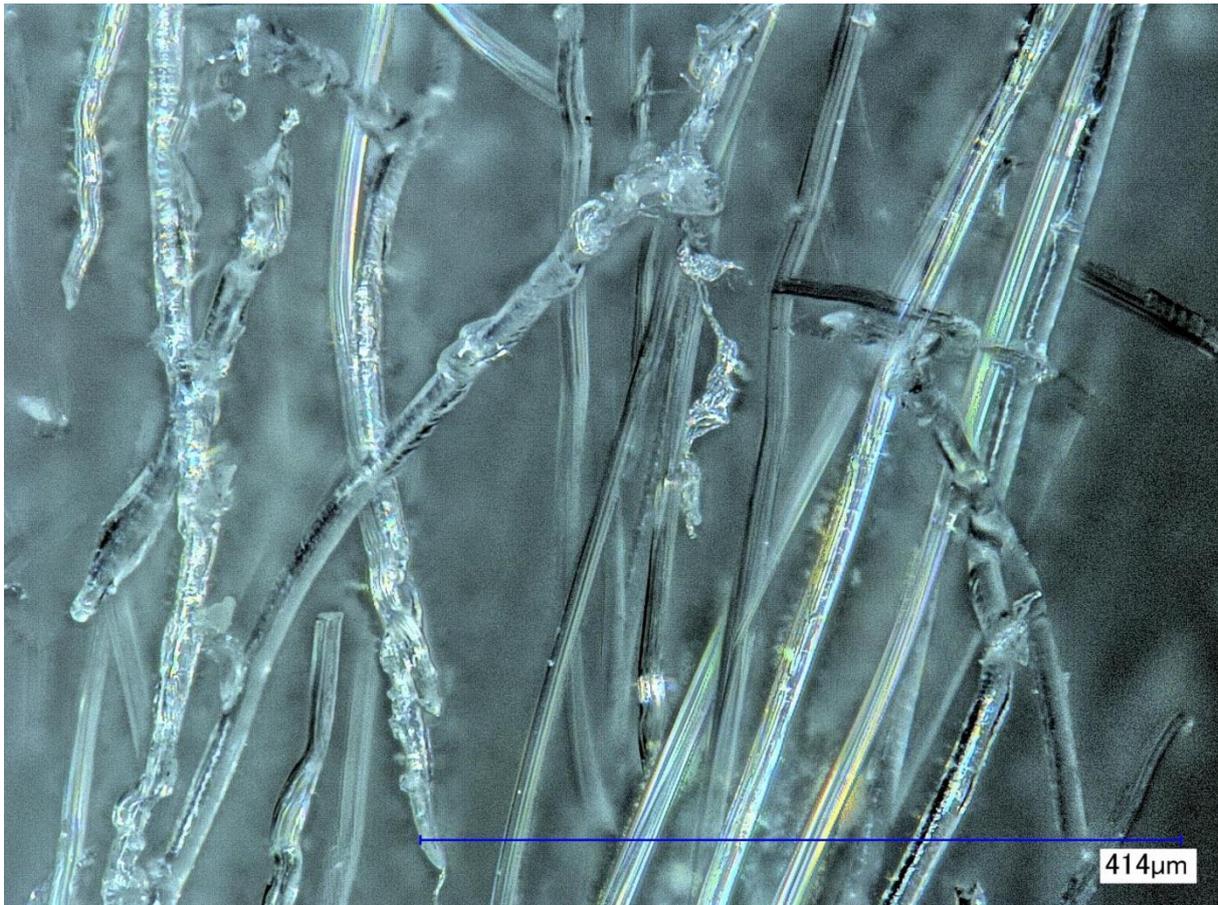


Abbildung 5: Lichtmikroskopische Aufnahme eines thermisch fixierten Airlaids aus einer Fasermischung von rechteckigen Viskosefasern mit BiKo-Fasern²⁹.

- Zusammen mit einer Bestimmung der Gewichtsänderung bietet sich die Möglichkeit zum Abschätzen des eingezogenen Volumens in Proben. So kann z. B. für dickere Vliese vergleichsweise einfach ermittelt werden, ob nach dem Einzug Luftblasen erhalten bleiben.
- Mit Kenntnis des Porenvolumens kann die Verdunstungsrate auf Fasergebilden ermittelt werden. Hierzu ist ein Vergleich des Flüssigkeitseinzugs mit und ohne Verdunstung nötig,
- Abbildung 6 gibt hierzu ein Beispiel. Die verdunstete Flüssigkeitsmenge ergibt sich dann aus Flüssigkeitseinzugsrate im stationären Zustand.
- Mit einer aufgewerteten Versuchsanordnung kann der Einfluss von Luftfeuchte, -bewegung und -temperatur auf die Verdunstung aus textilen Fasergebilden bewertet werden.

²⁹ Airlaid aus Maschler et al (2013b). Es handelt sich um eine Auflichtaufnahme.

4. Forschungsziele

- Die Beschreibung der Kapillarkinetik über die Kapillarkonstante, die maximale Steighöhe und die wirksame Eintauchtiefe ist eine zusammenfassende, makroskopische Beschreibungsform. Mikroskopische und Meso-Effekte, die bei Vliesen bei kleinen Proben immer zu abweichenden Messergebnissen mit größerer Variabilität führen, werden vernachlässigt. Dies erlaubt eine sicherere Beschreibung der Kapillarkinetik, insbesondere in Fällen, wo die Flüssigkeitsfront im Steighöhenversuch zu „mäandern“ beginnt.

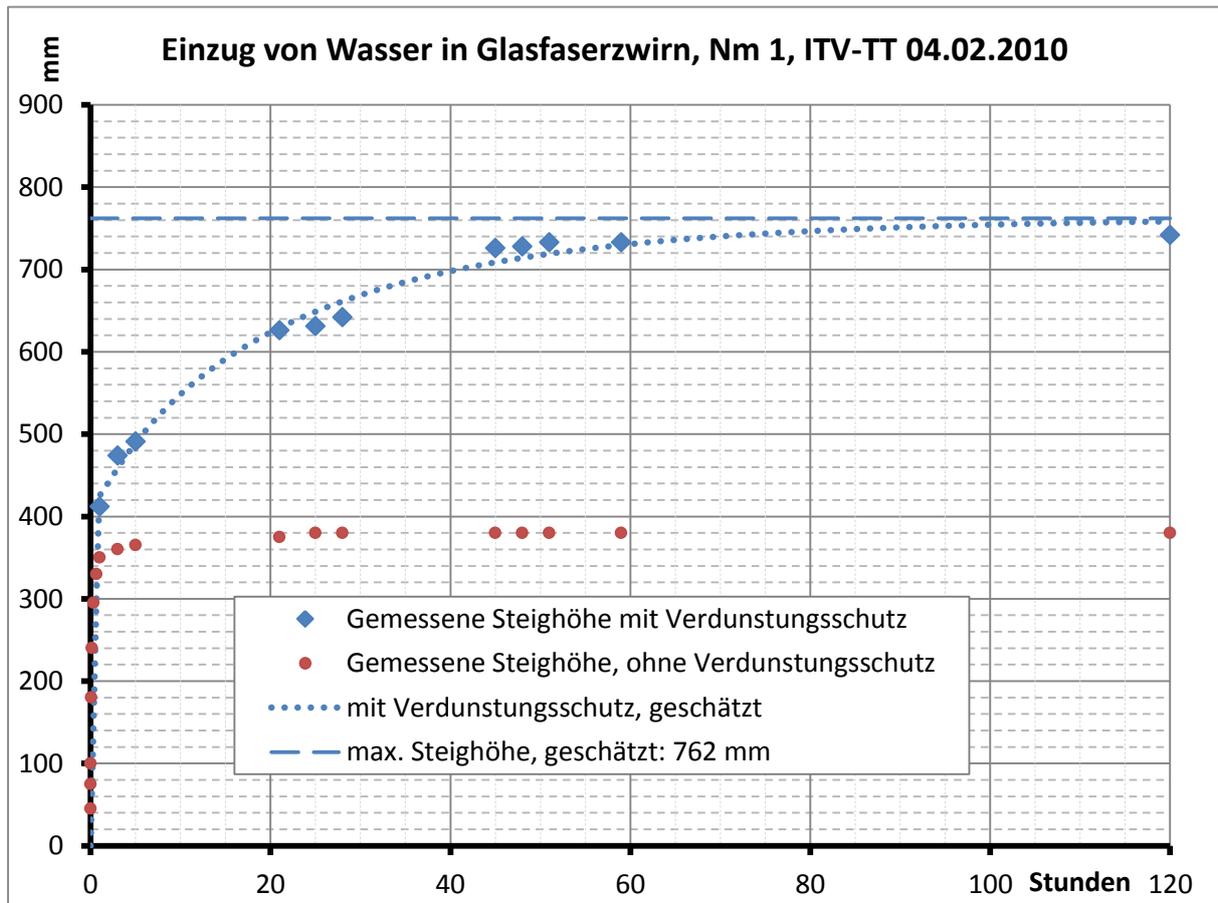


Abbildung 6: Einzug von Wasser in Glasfaserzwirn, mit und ohne Verdunstungsschutz³⁰.

Es ist ersichtlich, dass es zurzeit keine Verfahren gibt, die ähnliches leisten. Insbesondere, da für die angestrebte Methode zur Parameteridentifikation des Kapillareffekts als Gerätschaften prinzipiell nur ein Becherglas, ein Lineal, eine Einspannvorrichtung für die Probe, eine Stoppuhr, die Prüfflüssigkeit und Software zur Parameteridentifikation³¹ nötig ist.

³⁰ Aus Bagkesen & Stegmaier (2012), $v = 27 \text{ mm/s}$; $h_{max} = 762 \text{ mm}$; $l_u = 48 \text{ mm}$; $\sum \text{Fehler}^2 = 361.613 \text{ mm}^2$;

Grad der Überbestimmtheit = 15. Die maximal gemessene Steighöhe ohne Verdunstungsschutz beträgt ca. 380 mm. Da auch hierbei laufend Flüssigkeit kapillarkinetisch eingezogen wird, entspricht die Verdunstungsrate der Flüssigkeitsmenge, die zu der Änderungsrate für $l = 380 \text{ mm}$ gehört, also $\Delta l \cong 25 \text{ mm/h}$ (stationärer Zustand).

³¹ Die Forschungsstellen führen die Parameteridentifikation bislang in Microsoft Excel mittels numerischer Regression durch. Dabei kommen Differenzgleichungen zum Einsatz. Da bei der Differenzbildung die Steigung mittels des Sekantenverfah-

Besonders vielversprechend ist, dass sich so der Kapillareffekt ohne detaillierte Kenntnis des Einflusses der Produktkonstruktion auf diesen charakterisieren lässt und eine effiziente Validierung der schon in der Fachliteratur vorhandenen Modelle ermöglicht. Ebenso lässt sich so ohne aufwendige Messtechnik der Kontaktwinkel zwischen Flüssigkeit und Material auch für hydrophile Materialien bestimmen, wenn der Steighöhenversuch mit verschiedenen Flüssigkeiten wiederholt wird.

Bislang führen die Forschungsstellen die Parameteridentifikation für Gleichung (1) mittels Differenzgleichungsbasierter numerischer Regression durch. Benötigt für eine solche Methode werden jedoch Regressionsverfahren zur Parameteridentifikation in Differentialgleichungen, um eine zeitschrittweisenunabhängige Ermittlung und Vergleichbarkeit der Koeffizienten zu ermöglichen. Weiter ist Methodik für Sensitivitätsanalysen und zur Statistischen Versuchsplanung nötig. Zur Parameteridentifikation bietet sich hier insbesondere der Ansatz von Heeg & Häfner (1973) an, allgemeine Einstiegspunkte in die Thematik finden sich in Offinger (2009), ebenso Liang & Wu (2008), Motulsky (2004), Motulsky & Ransnas (1987b) und insbesondere das Review von Motulsky & Ransnas (1987a) sowie Chapra und Candale (2006). Speziell für die Parameteridentifikation in Zeitreihen haben Ye et al (2007) ein Review durchgeführt. Hinsichtlich der statistischen Versuchsplanung zeigt Körkel (2002) eine Reihe an Methoden auf³². Da sich in Vorversuchen zeigte, dass teilweise schon nach ca. 1/5 der Versuchszeit zur Bestimmung der Steighöhe eine recht genaue Prognose von deren Endwert erfolgen kann, ist weiter die Arbeit von Bates & Watts (2006) relevant. Zur Durchführung von Auslegung und Durchführung von Sensitivitätsanalysen siehe Saltelli et al (2004). Zur Statistischen Versuchsplanung bietet sich beispielsweise das Standardwerk von Siebertz et al (2010) an.

MR bringt im Bereich der Parameteridentifikation Fachwissen aus dem Projekt MODSIMTex Tornero (2010) mit ein.

1. Selbstlernende Methode zur Berechnung und Auslegung der kapillaren Steigkinetik textiler Fasergebilde

Wie schon im vorherigen Abschnitt aufgezeigt, sind die für die Produktentwicklung relevanten Zusammenhänge zur kapillaren Steigkinetik von Flüssigkeiten in textile Fasergebilde komplex, aber viel versprechend: die oben beschriebenen Konstanten zur Charakterisierung des Kapillareffekts lassen sich mit Vorprodukt- und Konstruktionseigenschaften korrelieren, beispielsweise der Porosität und der Dichte von Nonwovens, ebenso der Faseroberfläche. So können nach der Charakterisierung einiger Produktvarianten Zusammenhänge zwischen dem Kapillareffekt und variierbaren Vorprodukt- und Konstruktionseigenschaften ermittelt werden. Mit diesen Kenntnissen können die Stärke des Kapillareffekts sowie das Saugvolumen eines textilen Fasergebildes zum einen prognostiziert und zum anderen speziell auf Kundenanforderungen abgestimmt werden. Da jedoch der makroskopisch wirksame Kapillarradius quadratisch in die Kapillarkonstante, aber invers proportional in die maximale Steighöhe eingeht, erfordert eine entsprechende Optimierungsmethode zum Auslegen der kapillaren Steigkinetik in der Produktentwicklung geeignete Softwareunterstützung.

rens und nicht wie bei Differentialgleichungen mit einem (angenäherten) Tangentenverfahren abgeschätzt wird, sind die identifizierten Parameter von der Zeitschrittweite abhängig und nur bedingt vergleichbar.

³² S. 53ff, bzw. S. 71ff.

4. Forschungsziele

Die Forschungsstellen haben es sich daher zur Aufgabe gemacht, zur Unterstützung der Produktentwicklung eine praxisorientierte Methode bereit zu stellen. Diese Methode beschreibt die nötigen Abläufe als Geschäftsprozessmodelle, zum Vorhalten der nötigen Informationen, deren Zusammenhänge und ergänzende Regeln bietet sich ein ontologiebasiertes Expertensystem an. Ontologien haben sich im letzten Jahrzehnt in der Künstlichen Intelligenz als semantische Informationsschemata etabliert. Studer (2012) definiert Ontologien als „explizite formale Spezifikation der Konzeptualisierung eines abgegrenzten Diskursbereichs zu einem definierten Zweck, auf die sich eine Gruppe von Akteuren geeinigt hat“. Gronau et al (2009)³³, beschreiben den Zweck von Expertensystemen als die „Lösung von Aufgaben/ Problemen zu automatisieren oder zumindest gezielte Hilfestellung zu leisten“. Dabei „wird Wissen meist in Fakten und Regeln formalisiert“ – Ontologien stellen das Informationsschema für diese bereit.

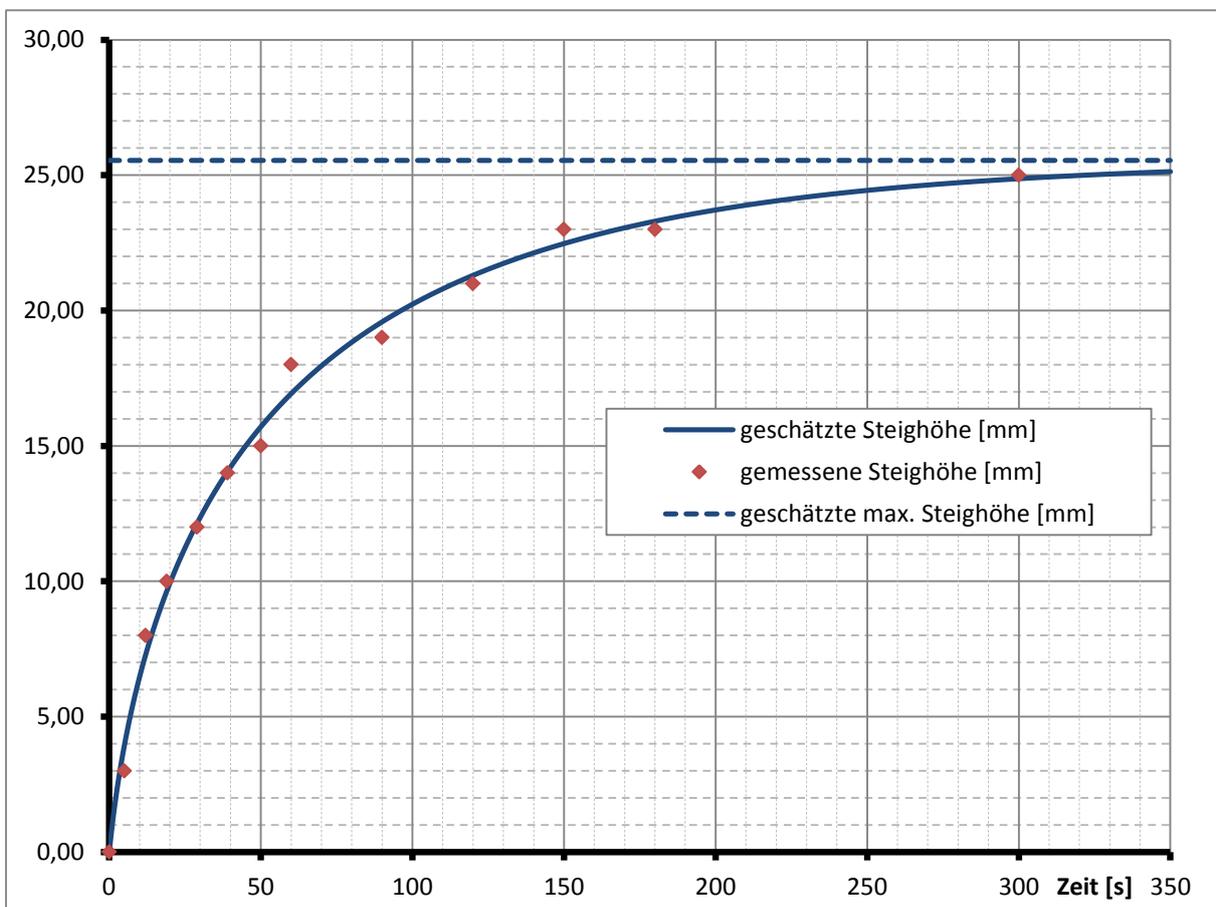


Abbildung 7: Steighöhenversuch mit Laminierharz in einen Carbon-Roving³⁴.

In ähnlich gelagerten, vergangenen Projekten³⁵ hat MR mit einem selbst entwickelten, ontologiebasierten Expertensystem gute Erfahrungen bei der Unterstützung der Produktentwick-

³³ S. 9

³⁴ Harzmischung: Laminierharz Hexion MGS LR 285 + Harz Hexion EPIKOTE Resin MGS LR 285; Mischverhältnis 100:40.

Roving: geschichteter Carbonroving Torayca T700SC 1.650 tex. $v = 0,32 \text{ mm/s}$; $h_{max} = 25,55 \text{ mm}$; $l_u = 8,17 \text{ mm}$; $\sum \text{Fehler}^2 = 4,00 \text{ mm}^2$; Grad der Überbestimmtheit = 10.

lung gemacht³⁶ und wird dieses auch im Rahmen dieses Vorhabens einsetzen. Es gilt dabei, semantische Informationsschemata für die Eigenschaften der zu dokumentierenden Fakten, also textilen Fasergebilde, die zu absorbierenden Flüssigkeiten sowie die Versuchsreihen zu entwickeln. Weiter gilt es, die für die Themenstellung relevanten Zusammenhänge und Regressionsmodelle in Form von Regeln als Gleichungssysteme und Zuweisungen in die Expertensystemkonfiguration einzubringen.

Die zur Integration der Methode in die Aufbau- und Ablauforganisation nötigen Abläufe wird MR mit Prozessmodellen beschreiben. Hierzu bieten sich beispielsweise *erweiterte ereignis-gesteuerte Prozessketten* aus der Architektur integrierter Informationssysteme (ARIS) an³⁷, weiter die grafische Spezifikationssprache *Business Process Model and Notation* (BPMN) zur Modellierung und Visualisierung von Geschäftsprozessen³⁸.

Um einfach auf vergangene Erfahrungen in der Produktentwicklung zurückgreifen zu können, bietet es sich an, die Methode zur Optimierung der kapillaren Steigkinetik ausgehend von der Vorgehensweise des Fallbasierten Schließens³⁹ zu entwickeln. Diese Vorgehensweise zum informationssystemgestützten, auf Erfahrungswissen basierenden Problemlösen und Lernen durch Analogieschlüsse setzt darauf, neue Probleme durch Erinnern an vergangene, ähnliche Situationen und durch das erneute, kombinierende Nutzen der damals gemachten Erfahrungen zu lösen. Potenziale bieten sich hierbei insbesondere beim Ermitteln und Adaptieren möglicherweise geeigneter Produktkonstruktionen für eine gegebene Spezifikation der kapillaren Steigkinetik sowie beim Abschätzen der Einflüsse einer Konstruktionsänderung auf die kapillare Steigkinetik. Da beim Fallbasierten Schließen kein explizites, in Form von Regeln⁴⁰ formalisiertes Wissen benötigt wird, reicht es, die dabei zugrunde liegenden Zusammenhänge nur qualitativ zu kennen.

4.1.2 Wirtschaftliche Ergebnisse

Es ist ersichtlich, dass die angestrebten Ergebnisse weit über die im Projekt zu bearbeitenden Themenfelder hinaus Produkt- und Prozessinnovationen erleichtern und anstoßen. Die konkreten wirtschaftlichen Ergebnisse werden sich daher an den von den Mitgliedern im Projektbegleitenden Ausschuss favorisierten Themenstellungen orientieren. So erwarten die Forschungsstellen insbesondere neue Erkenntnisse zu folgenden Produkten und deren Herstellprozessen: Wipes und Absorber, Dochte, Geflechte, gewobene Bänder, Handtücher, Präparationen, Blähton sowie Liner, Woll- und Nadelfilze, Gießharze sowie Rovings und deren Schichten.

Die folgenden Abschnitte beschreiben die erwarteten wirtschaftlichen Ergebnisse zu den oben aufgelisteten Forschungsergebnissen.

³⁵ Tornero (2010), Stellmach (2012), Maschler & Wolfrum (2007), Wissensmanagement (2005)

³⁶ Beispielsweise Tornero (2010) und Maschler et al (2013b)

³⁷ siehe Scheer & Nüttgens (2000)0, Scheer (1998)

³⁸ siehe Allweyer (2009), Freund & Rücker (2010)

³⁹ siehe Aamodt & Plaza (1994), Bodendorf & Kaiser (2009)

⁴⁰ Zuweisungen, Gleichungssysteme, Lookup-Tabellen, Algorithmen, ...

4.1.2.1 Auf dem Steighöhenversuch aufbauende Methode zur Parameteridentifikation des Kapillareffekts textiler Fasergebilde und Aufbau einer experimentellen Datenbasis und Basiswissen zur kapillaren Steigkinetik von verschiedenen textilen Fasergebilden

Die Methode zur Parameteridentifikation des Kapillareffekts textiler Fasergebilde bietet erstmals eine einfache Möglichkeit, textile Fasergebilde hinsichtlich ihres Kapillareffekts vergleichbar zu beschreiben: hierzu sind die drei Konstanten zu Gleichung (1) nötig. Zur direkten Umsetzung im Unternehmen stellen die Forschungsstellen eine Verfahrensbeschreibung sowie die benötigten Algorithmen bereit. Weiter stellt die Forschungsstelle MR einen Online-Demonstrator für die Parameteridentifikation auf dem Internet-Auftritt der DITF zusammen mit einer experimentellen Datenbasis im Sinne einer „Landkarte“ zum Kapillareffekt textiler Fasergebilde bereit. Die Forschungsstellen verfahren analog mit dem oben beschriebenen, auf der Methode aufbauenden Ansatz zur Parameteridentifikation des Kontaktwinkels für poröse hydrophile Materialien.

Diese auf dem Steighöhenversuch aufbauende Methode benötigt – abgesehen von den Algorithmen zur Parameteridentifikation – keine besonderen Gerätschaften, die Forschungsstellen gehen daher von einer kurzfristigen Adoption durch die Industrie aus.

Die Forschungsstellen streben an, die entwickelte Methode in die DIN Normausschüsse bzw. in die entsprechenden Gremien bei EDANA einzubringen.

4.1.2.2 Selbstlernende Methode zur Berechnung und Auslegung der kapillaren Steigkinetik textiler Fasergebilde

Diese Methode stellt ein neues Verfahren für die Entwicklung textiler Produkte dar. Auch hierzu stellen die Forschungsstellen eine Verfahrensbeschreibung, allgemeine Algorithmen sowie für vom Projektbegleitenden Ausschuss ausgewählte Produkte spezifische Algorithmen zur Optimierung und Praxisbeispiele nebst einem Online-Demonstrator bereit. Diese Methode unterstützt insbesondere die Optimierung bestehender sowie die Gestaltung neuer Produkte, insbesondere in Baukastensystemen.

Da diese Methode zum einen sehr spezifisch ist und einer angepassten Wissensbasis bedarf, rechnen die Forschungsstellen mit einer mittelfristigen Übernahme dieser Methode in die betriebliche Praxis.

4.2 Innovativer Beitrag der angestrebten Forschungsergebnisse

Die zu entwickelnden Methoden stellen **Weiterentwicklungen von und neue Verfahren zur Entwicklung textiler Produkte** dar und schaffen darüber hinaus **Basiswissen für die Entwicklung neuer Produkte**. Die Forschungsstellen streben eine einfache Übertragbarkeit in die betriebliche Praxis an.

Die Forschungsstellen rechneten mit folgenden allgemeinen innovativen Beiträgen:

- Eine neue Methode zur Bestimmung der Kapillarkinetik textiler Fasergebilde
- Ein neuer Ansatz zum Bestimmen des Kontaktwinkels für textile Fasergebilde, insbesondere hydrophile Vliese

- Eine selbstlernende Methode zur konstruktiven Optimierung der Kapillarkinetik textiler Fasergebilde

Die Forschungsstellen identifizierten folgende konkreten innovativen Beiträge:

- Beim Färben und Ausrüsten lässt sich der Einfluss der Farbpigmente auf die Oberflächenenergie schneller charakterisieren, auch kann der Flottendurchgang in Garne und Gewebe durch die bessere Kenntnis des Kapillareffekts optimiert werden.
- Im Bereich Beschichtung ist eine höhere Haftung beispielsweise durch tiefere Penetration auf das Textil hin möglich, insbesondere für Spezialitäten. Weiter ist absehbar, dass zur Abstimmung von Tinte, Substrat und Schlichte keine langen Versuchsreihen mehr benötigt werden.
- Für den Siebdruck werden eine verbesserte Prozesskontrolle und optimal abgestimmte Lackformulierung und Siebdruckgewebe erwartet.
- Im Bereich Reinigung und Separation mit Textilien lässt sich mit den angestrebten Forschungsergebnissen nun speziell die Kapillarkinetik auf gute Absorption auslegen. Auch lassen sich die Erkenntnisse auf die Waschprozesse auf die Ausrüstung von Textilien übertragen, um deren Funktionalität möglichst über viele Trage-Wasch-Zyklen hinweg zu erhalten.
- Für Flüssigkeitsabsorber steht mit den angestrebten Forschungsergebnissen eine einfach anwendbare Methodik zur Optimierung von Kapillareffekt und Saugvolumen zur Verfügung.
- Große Optimierungspotenziale bei der Faserverbundbauteilherstellung ergeben sich insbesondere bzgl. der Infiltrationseigenschaften, um eine möglichst blasenfreie, schnelle und vollständige Durchtränkung von Rovings zu erreichen und somit eine schnelle, qualitativ hochwertige Fertigung (zum Beispiel mit dem Niederdruck-RTM- und Vakuumverfahren) von Faserverbundbauteilen zu gewährleisten. Hier kann die Analyse und Bewertung der Infiltrationseigenschaften von Rovings in Abhängigkeit von Schlichte, Faserfeinheit, Filamentzahl, Belastung etc. wichtige Kriterien zur optimalen, anwendungsgerechten Auswahl liefern.

5. Forschungsergebnisse

5.1 „Landkarte“ zum Kapillareffekt textiler Fasergebilde

5.1.1 Übersicht

Ziel dieses Abschnitts ist, eine generalisierende Übersicht und Erläuterung der Zusammenhänge zum kapillaren Flüssigkeitseinzug – speziell in textile Fasergebilde – zu geben. Nach einer allgemeinen Einführung wird der Einfluss der Umgebungstemperatur auf den Kapillareffekt diskutiert. Anschließend wird der kapillare Flüssigkeitseinzug anhand aufeinander aufbauender Ersatzmodelle – ausgehend vom Kapillareffekt in feinen, runden Röhrchen bis hin zum kapillaren Flüssigkeitseinzug in textile Fasergebilde – detailliert erläutert. Verschiedene Anwendungsszenarien runden diesen Abschnitt ab.

5.1.2 Einführung zum Kapillareffekt

Der Kapillareffekt ist ein Folgeeffekt der

- intermolekularen Kräfte zwischen einer Flüssigkeit an einer Materialoberfläche (Adhäsion),
- der Oberflächenspannung der Flüssigkeit sowie
- der Gewichtskraft der Flüssigkeitssäule.

Aus dynamischer Sicht lässt sich der Kapillareffekt über die Fortbewegung der Front $l(t)$ der in ein poröses Material einziehenden Flüssigkeit beschreiben. Die Fortbewegungsgeschwindigkeit $\frac{dl}{dt}$ der Flüssigkeitsfront ergibt sich dabei aus den oben genannten Kräften, dem Kapillarradius sowie der Viskosität der Flüssigkeit.

Ausführliche mathematisch-physikalische Herleitungen zum Kapillareffekt folgen im Abschnitt 5.1.4 „Ersatzmodelle“ auf S. 42ff.

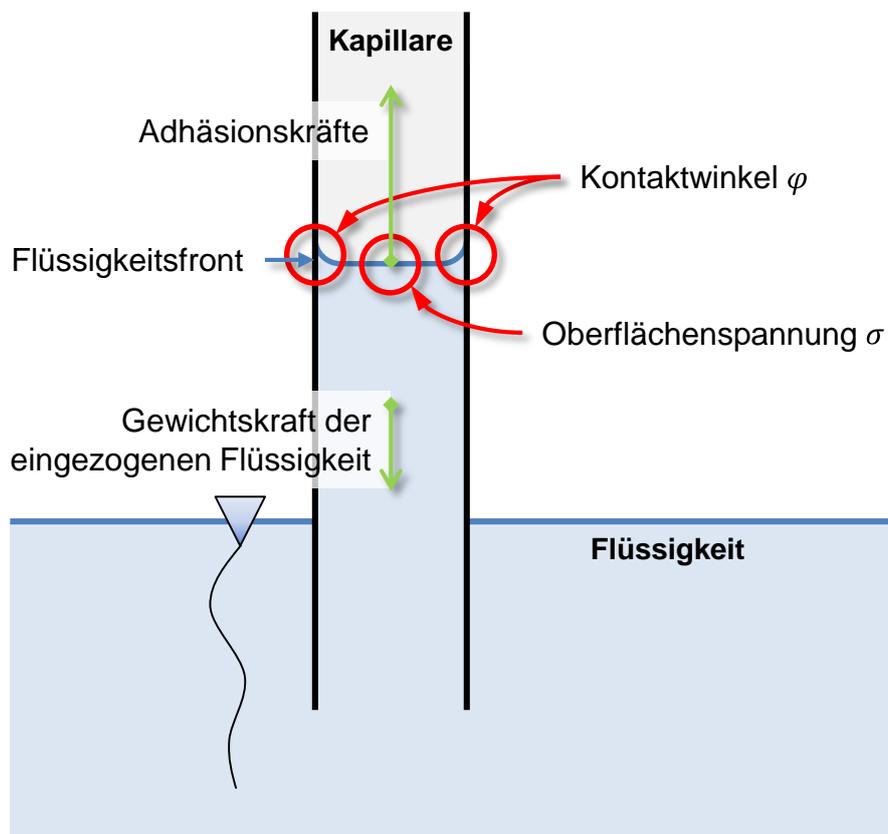


Abbildung 8: Grenzflächenspannungen und relevante Kräfte beim Aufstieg der Flüssigkeitsfront in einer Kapillaren.

So wird der Kapillareffekt von zwei Grenzflächenspannungen⁴¹ getrieben: dem Grenzflächeneffekt zwischen Flüssigkeit und Kapillarwand sowie der Oberflächenspannung.

5.1.2.1 Kontaktwinkel

Den Grenzflächeneffekt zwischen der Flüssigkeit und dem Material der Kapillarwand beschreiben wir über den Kontaktwinkel (auch: Benetzungswinkel) φ zwischen Flüssigkeit und Material. Dieser drückt die Wechselwirkung der intermolekularen Kräfte an der Dreiphasengrenze zwischen dem Material des Festkörpers, der Flüssigkeit und der umgebenden Gasphase aus:

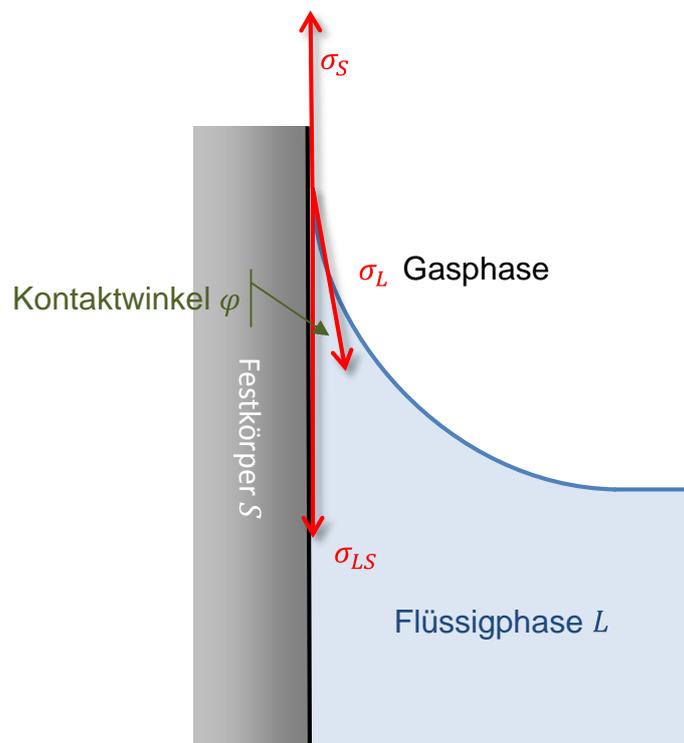


Abbildung 9: Grenzflächenspannungen zwischen einem Festkörper, einer Flüssigkeit und einem Gas.

Dabei sind:

- σ_L die Oberflächenspannung der Flüssigphase L zur Gasphase
- σ_S die Oberflächenspannung des Festkörpers S zur Gasphase
- σ_{LS} die Grenzflächenenergie zwischen Flüssigkeit und Festkörper

⁴¹ Als Grenzflächenspannung werden Kräfte bezeichnet, die zwischen zwei verschiedenen, miteinander in Kontakt stehenden Phasen auftreten: Die Phasen, die fest, flüssig oder gasförmig sein können, bilden eine gemeinsame Grenzfläche. Diese steht unter einer gewissen Spannung, die auf eine Verkleinerung der Grenzfläche hin zielt. Die Grenzflächenspannung zwischen einer Flüssigkeit und einer Gasphase wird als Oberflächenspannung bezeichnet, ihre Richtung liegt immer parallel zur Grenzfläche. So versuchen Tropfen möglichst eine kugelförmige Gestalt anzunehmen, ebenso haben Flüssigkeitsoberflächen die Bestrebung, möglichst glatt zu sein. Eine ausführliche Einführung ins Thema gibt beispielsweise DataPhysics (o.J.).

Für den Kontaktwinkel des sich dabei ausbildenden Meniskus⁴² gilt nach Young (1805) die folgende Beziehung:

$$\cos(\varphi) = \frac{\sigma_S - \sigma_{LS}}{\sigma_L} \quad (2)$$

Je nach Größe des Kontaktwinkels ergeben sich verschiedene Bezeichnungen für das Zusammenspiel zwischen Flüssigkeit und Festkörper:

Tabelle 3: Allgemeine Zusammenhänge zwischen dem Verhalten von Flüssigkeiten beim Kontakt mit einem Material und dem Kontaktwinkel.

Wertebereich des Kontaktwinkels	Verhalten von einer Flüssigkeit zu einem Material	Meniskuswölbung
0 ... 90°	...phil ⁴³	 konkav
90 ... 180°	...phob ⁴⁴	 Konvex

So ist beispielsweise der Kontaktwinkel zu Wasser bei stark hydrophilen Materialien sehr gering (< 30°), bei stark hydrophoben Materialien ist er sehr groß (> 120°).

Hier einige Kontaktwinkel⁴⁵ von Wasser mit verschiedenen Materialien⁴⁶:

Tabelle 4: Beispiele für Kontaktwinkel verschiedener Materialien mit Wasser.

CAS-Nr.	Material	Kontaktwinkel [°]
	Glas	~20
9003-20-7	Nylon 6	60,6
	Nylon 9,9	86
9011-14-7	Polymethyl-Methacrylat (PMMA, Acryl, Plexiglas)	70,9
25038-59-9	Polyethylen-Terephthalat (PET)	72,5
24937-16-4	Nylon 12	72,4
9002-86-2	Polyvinylchlorid (PVC)	85,6
9002-88-4	Polyethylen (PE)	96
	Polypropylen (PP)	102,1
8002-74-2	Paraffin	108,9
9002-84-0	Polytetrafluoroethylen (PTFE)	109,2

⁴² Von griech. Μηνίσκος für „Halbmond“. Wölbung der Flüssigkeitsoberfläche am Kontaktpunkt mit einer Materialoberfläche.

⁴³ Von griech. Φίλος für „liebend“.

⁴⁴ Von griech. Φόβος für „Furcht“.

⁴⁵ Obwohl so nicht in der Literatur erwähnt, besteht der Verdacht, dass der Kontaktwinkel temperaturabhängig sein kann: so ist die Oberflächenspannung, die ebenso eine Grenzflächenspannung darstellt, stark temperaturabhängig. Dementsprechend werden die hier aufgeführten Kontaktwinkel als Orientierungswerte betrachtet.

⁴⁶ Es handelt sich dabei um glatte Oberflächen und reines Material. U.a. Auszug aus Accu Dyne Test (o.J.).

5.1.2.2 Oberflächenspannung

Die Oberflächenspannung⁴⁷ ist ein Maß für das Bestreben einer Flüssigkeit, ihre Oberfläche zu verringern. Sie wird durch die Arbeit beschrieben, die geleistet werden muss, um die Oberfläche einer Flüssigkeit zu vergrößern. Die Oberflächenspannung resultiert aus den sich nicht mehr aufhebenden intermolekularen Kräften⁴⁸ an der Oberfläche in einer Flüssigkeit. Dies setzt voraus, dass die Flüssigkeit an ihre eigene, gesättigte Dampfphase grenzt, ansonsten handelt es sich korrekterweise um die Grenzflächenspannung zwischen der Flüssigkeit und der Gasphase⁴⁹.

Hier einige beispielhafte⁵⁰ Werte für die Oberflächenspannung von Flüssigkeiten bei 20 °C:

Tabelle 5: Beispiele für die Oberflächenspannungen verschiedener Flüssigkeiten.

Flüssigkeit	Oberflächenspannung [m N/m]
n-Hexan	18,40
Ethanol	22,55
Methanol	22,60
Ethylenglykol	48,4
Wasser	72,75
Quecksilber	476

Allgemein hat Wasser neben Quecksilber eine der höchsten Oberflächenspannungen.

5.1.2.3 Dynamische Viskosität

Die dynamische Viskosität⁵¹ beschreibt als Maß für die Zähflüssigkeit die notwendige Scherkraft im Sinne innerer Reibung, die überwunden werden muss, um Schichten einer Flüssigkeit gegeneinander zu verschieben. Der Kehrwert der dynamischen Viskosität ist die Fluidität; sie bezeichnet die Fließfähigkeit einer Flüssigkeit. Dementsprechend stehen beschreiben höhere Viskositätswerte zäh-, dickflüssigeres Fließverhalten von Flüssigkeiten, niedrigere Viskositätswerte ein schnelleres, dünnflüssigeres Fließverhalten. Auch die dynamische Viskosität ist stark temperaturabhängig: höhere Temperaturen senken im Allgemeinen die Viskosität deutlich.

⁴⁷ Siehe z.B. Chemie.de (o.J.) oder Spektrum (1998).

⁴⁸ Kohäsionskräften

⁴⁹ Siehe z.B. Reincke et al (2016). Reincke et al (2016) zitiert auch eine Berechnungsmethode für die Grenzflächenspannung zwischen einer Flüssig- und einer Gasphase.

⁵⁰ Aus Wikipedia (2017); dort sind allerdings keine Quellen aufgeführt [sic!]. Generell sind Werte für die Oberflächenspannung stark temperaturabhängig.

⁵¹ „viskos“ ist vom lateinischen Wort „viscosus“ für klebrig, zäh, „voller Vogelleim“ übernommen. Dies geht auf lat. „viscum“, „Mister; Vogelleim aus Misteln“ zurück. Aus Wissen.de (2016).

Hier einige beispielhafte Werte⁵² für die dynamische Viskosität bei 20 °C:

Tabelle 6: Beispiele für die dynamische Viskosität verschiedener Flüssigkeiten.

Flüssigkeit	Dynamische Viskosität [m Pa·s]
Luft ⁵³	0,01824
n-Hexan	0,320
Oktan	0,538
Petroleum	0,65
Wasser	1,00
Ethanol	1,19
Espresso bei 45 °C ⁵⁴	1,45
Quecksilber	1,55
Traubensaft	2-5
Kaffeesahne	~ 10
Olivenöl	~ 100
Lacke	~ 100
Glycerin, rein	1.480
Honig	~ 10.000
Paraffinöl	~ 100 ... 1.000.000
Bitumen	~ 10.000.000 ... 100.000.000.000.000

5.1.3 Zur Temperaturabhängigkeit der Kapillarkinetik am Beispiel von Wasser

Die im vorherigen Abschnitt vorgestellten Einflussgrößen Oberflächenspannung und Viskosität sind stark temperaturabhängig. Diese Abhängigkeiten werden im Folgenden für Wasser beschrieben, weiter werden passende Regressionsmodelle vorgestellt.

⁵² Aus Wikipedia (2017). Es sind nur teilweise Quellen angegeben [sic!].

⁵³ Zum Vergleich, siehe Thévenin (o.J.). Im Gegensatz zu Flüssigkeiten steigt bei Gasen und Gasgemischen die Viskosität mit der Temperatur.

⁵⁴ Kaffeewiki (2014).

5.1.3.1 Oberflächenspannung

Die Oberflächenspannung σ ergibt sich in Abhängigkeit der absoluten Temperatur T anhand folgender Interpolationsgleichung⁵⁵:

$$\sigma = B \cdot \tau^\mu \cdot (1 + b \cdot \tau) \quad (3)$$

mit $\tau = 1 - \frac{T}{T_c}$

Dabei werden folgende Parameter verwendet:

Tabelle 7: Parameter bei der Interpolationsrechnung der Oberflächenspannung.

Formelzeichen	Parameter	Wert	Einheit
σ	Oberflächenspannung	Ergebnis	$\frac{mN}{m}$
T	Absolute Temperatur	$T = t + 273,15$	K
t	Temperatur	Vorgabe	$^{\circ}C$
T_c	Kritische Temperatur von Wasser	647,096	K
B	Konstante	235,8	$\frac{mN}{m}$
b	Konstante	-0,625	-
μ	Konstante	1,256	-

Die Interpolationsgleichung ist vom Tripelpunkt von Wasser (0,01 °C) bis zur kritischen Temperatur von Wasser gültig.

Die folgende Abbildung zeigt den Einfluss der Temperatur auf die Oberflächenspannung von Wasser. Die rote Linie verbindet dabei die Werte bei 0,1°C und 100°C; dabei ist ersichtlich, dass der Verlauf der Oberflächenspannung leicht nichtlinear ist.

⁵⁵ IAPWS (2014), S. 3.

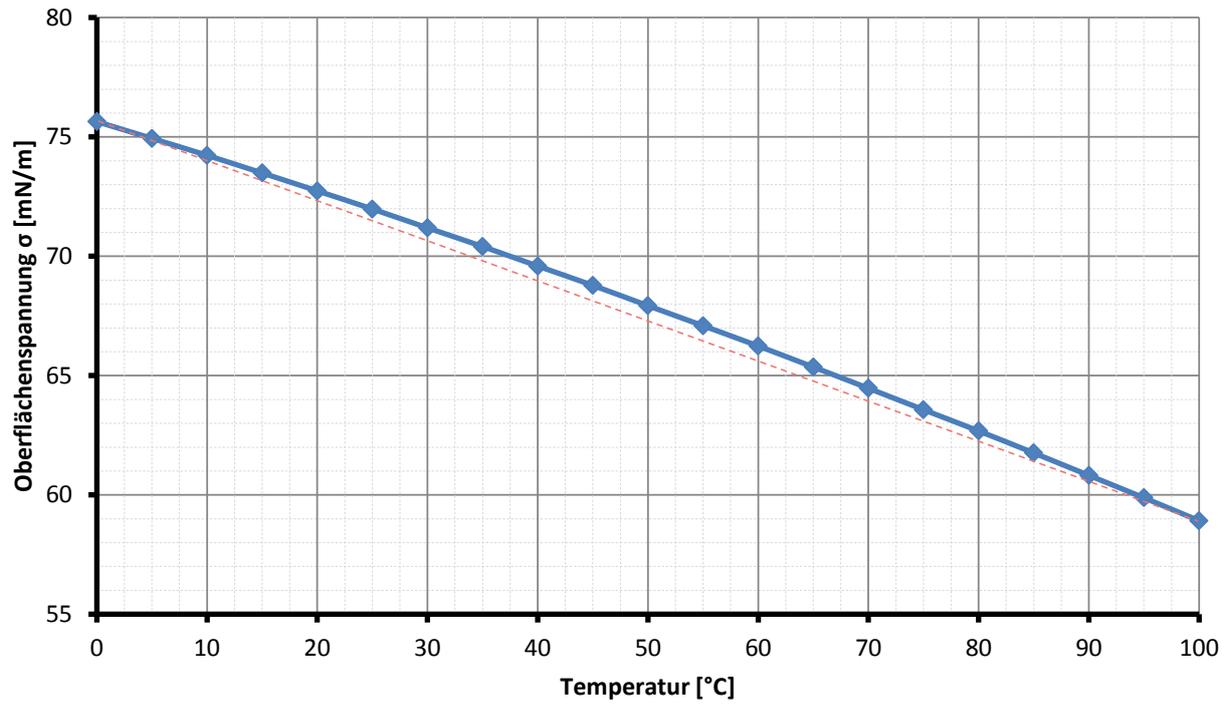


Abbildung 10: Temperaturabhängigkeit der Oberflächenspannung von Wasser bei Normaldruck.

5.1.3.2 Dynamische Viskosität

Da die Berechnung der dynamischen Viskosität von Wasser nach den Vorgaben der IAPWS sehr komplex ist, wird im Folgenden eine Schätzformel für die dynamische Viskosität entwickelt⁵⁶.

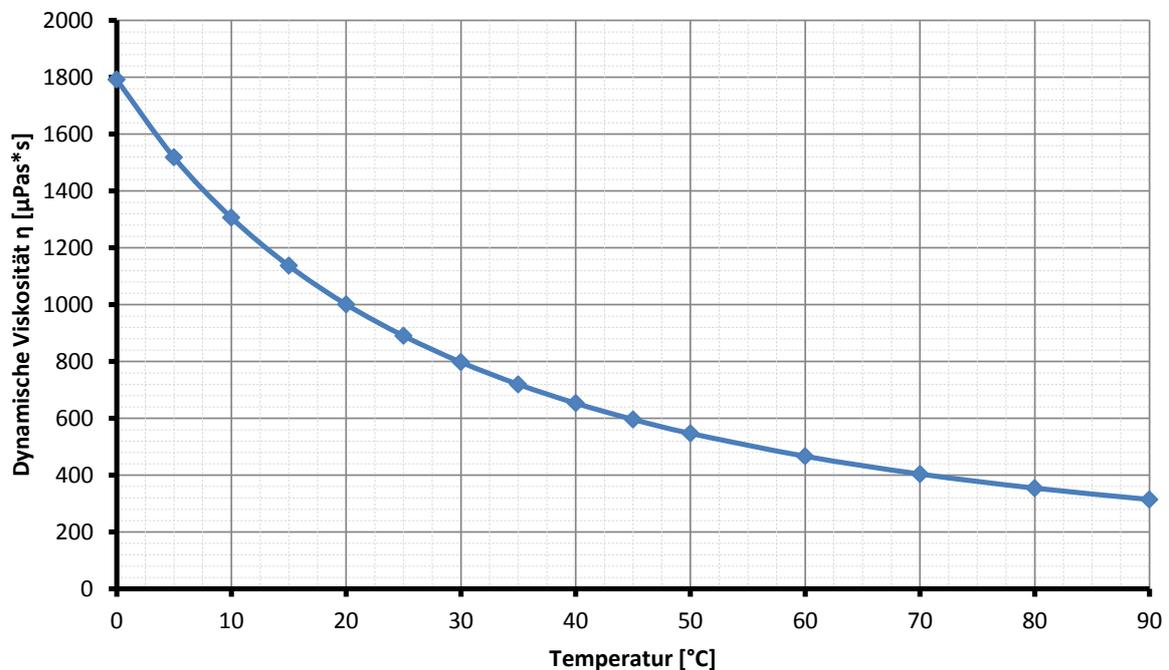


Abbildung 11: Temperatureinfluss auf die dynamische Viskosität von Wasser bei Normaldruck.

Die Dynamische Viskosität η ergibt sich dabei vereinfacht als Funktion der Temperatur t ; für die Problemstellung in diesem Projekt wird nur der Temperaturbereich von 0..90 °C betrachtet. Mithilfe der Software Eureqa⁵⁷ zur evolutionären Entwicklung von Regressionsmodellen wurden so für die dynamische Viskosität η verschiedene Schätzformeln entwickelt.

⁵⁶ Die zugehörigen Daten sind Grigull et. al. (1990) für einen Standarddruck von 0,1 MPa=1 bar entnommen.

⁵⁷ Nutonian (2015).

Die folgende Auflistung stellt die besten gefundenen Schätzformeln dar:

Size	Fit	Solution
1	1.000	$V = 720$
3	0.935	$V = 755 - t$
5	0.383	$V = 1.27e3 - 13.4t$
6	0.078	$V = \frac{-4.1e4}{-22 - t}$
8	0.013	$V = \frac{-5.9e4}{-29.5 - t} - 192$
10	0.004	$V = t + \frac{-6.93e4}{-32.3 - t} - 344$
12	0.002	$V = 1.39t + \frac{-7.42e4}{-33.6 - t} - 409$
19	0.001	$V = 1.15t + \frac{179}{-4.94 - t} + \frac{-6.97e4}{-31.9 - t} - 358$
21	0.001	$V = 1.2t + \frac{-7.07e4}{-31.9 - t} + \frac{15}{-0.272 - 0.0319t} - 367$
23	0.000	$V = 1.13t + \frac{-6.92e4}{-31.9 - t} + \frac{5.46}{-0.229 - 0.0141t^2} - 355$
27	0.000	$V = 1.13t + \frac{-6.93e4}{-31.9 - t} + \frac{5.6}{0.0231t - 0.243 - 0.0202t^2} - 355$

Abbildung 12: Identifizierte Schätzformeln für die dynamische Viskosität von Wasser.

Folgende Schätzformel wurde gewählt:

$$\eta = 1,39 \cdot t + \frac{7,42 \cdot 10^4}{33,6 + t} - 409 \quad [\mu \text{ Pa}\cdot\text{s}] \quad (4)$$

Diese – noch vergleichsweise kurze – Schätzformel hat folgende Lösungsqualität:

Tabelle 8: Lösungsqualität der Schätzformel für die dynamische Viskosität.

Bewertungskriterium	Wert
Güte der Schätzung R^2	0,99999283
Korrelationskoeffizient	0,99999692
Max. Fehler im Wertebereich 0-90 °C	3,867
Mittlerer quadrierter Fehler	1,308
Mittlerer absoluter Fehler	0,66093638

5.1.3.3 Dichte

Mit der Dichte ρ wird analog wie bei der dynamischen Viskosität verfahren⁵⁸.

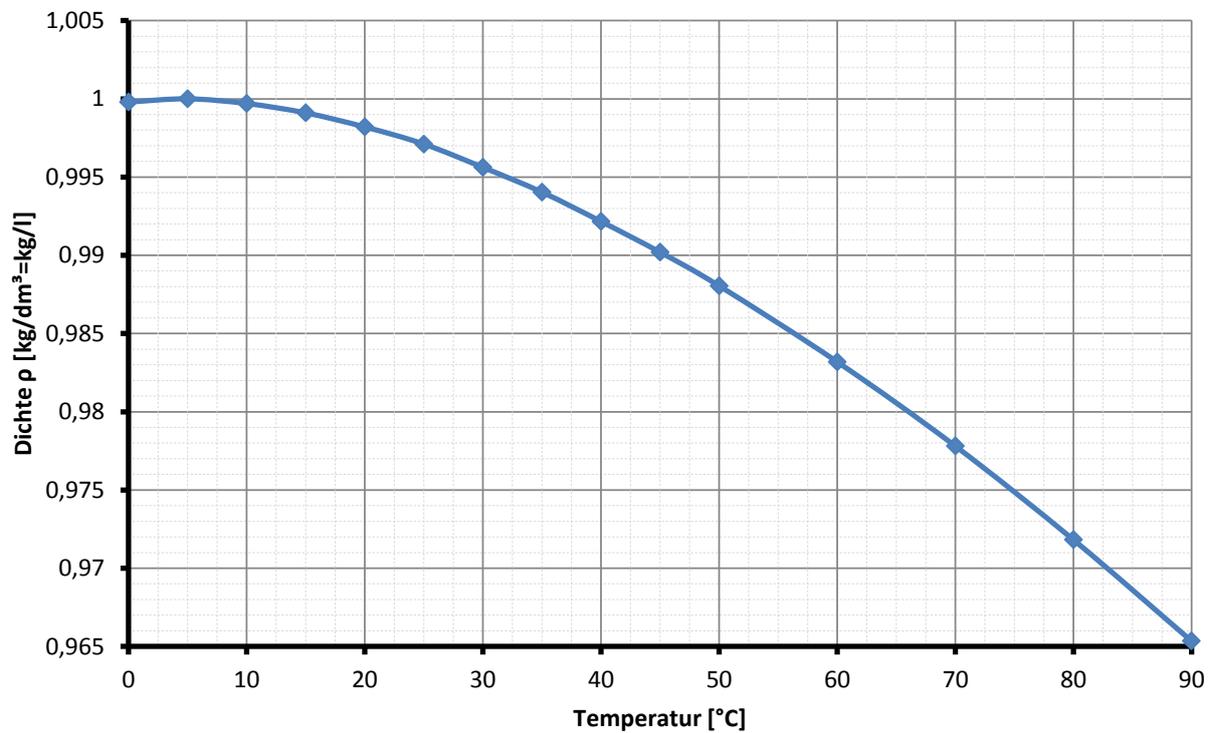


Abbildung 13: Temperaturabhängigkeit der Dichte von Wasser bei Normaldruck.

Hier eine Auflistung der besten gefundenen Schätzformeln:

Size	Fit	Solution
7	0.052	$Density = 1 - 4.49e-6 t^2$
5	0.268	$Density = 1.01 - 0.000376 t$
1	1.000	$Density = 0.994$
11	0.030	$Density = 1 - 6.89e-5 t - 3.66e-6 t^2$
14	0.005	$Density = 1.19 + \frac{6.47}{-34 - 0.212 t} - 0.00114 t$
24	0.004	$Density = 1.19 + \frac{6.47}{-34 - 0.212 t} - 1.19^{(-50.1 - t)} - 0.00114 t$
26	0.003	$Density = 1.19 + \frac{6.47}{-34 - 0.212 t} - 1.19^{(-50 - 71.4t)} - 0.00114 t$
62	0.003	$Density = 1.19 + \frac{6.47}{-34 - 0.212 t} - 1.19^{(-50.1 - t^{5.23})} - 0.00114 t$

Abbildung 14: Schätzformeln für die Dichte von Wasser.

⁵⁸ Die zugrunde liegenden Daten sind Grigull et al (1990) entnommen.

Folgende Schätzformel wurde gewählt:

$$\rho = 1,19 - \frac{6,47}{34 + 0,212 \cdot t} - 0,00114 \cdot t \quad [\text{kg/dm}^3=\text{kg/l}] \quad (5)$$

Die Schätzformel hat folgende Lösungsqualität:

Tabelle 9: Lösungsqualität der Schätzformel für die Dichte von Wasser.

Bewertungskriterium	Wert
Güte der Schätzung R^2	0,99997054
Korrelationskoeffizient	0,99998618
Max. Fehler im Wertebereich	0,0001605
Mittlerer quadrierter Fehler	$3,30013 \cdot 10^{-9}$
Mittlerer absoluter Fehler	$3,64854 \cdot 10^{-5}$

5.1.3.4 Fazit

Insbesondere die dynamische Viskosität und die Oberflächenspannung von Wasser sind stark temperaturabhängig. Auch bei geringen Abweichungen zur Referenztemperatur kann es zu deutlichen Einflüssen auf die Kapillarkinetik kommen⁵⁹.

Da wohl auch der – aus Grenzflächenspannungen errechenbare – Kontaktwinkel deutlichen Temperatureinflüssen unterliegen kann, ist es empfehlenswert, die Kapillarkinetik möglichst unter realen Temperatur- und Feuchtebedingungen zu charakterisieren.

⁵⁹ Siehe hierzu insbesondere die Formeln in Abschnitt 5.1.4.1.

5.1.4 Ersatzmodelle zum Beschreiben der Kapillarkinetik textiler Fasergebilde

5.1.4.1 Übersicht

Der kapillare Flüssigkeitseinzug in textile Fasergebilde lässt sich prinzipiell anhand der Zusammenhänge, die für den Kapillareffekt in feinen runden Rohren gelten, beschreiben. So erläutern die folgenden Modelle – ausgehend vom Kapillareffekt in runden Kapillaren – jeweils aufeinander aufbauend spezielle Besonderheiten des Kapillareffekts in textilen Fasergebilden.

Der Modellierungsschwerpunkt liegt dabei auf Textilstrukturen in Form prismatischer Körper und damit Kapillarströmungen in nur eine vorgegebene Richtung. Da die Modellierung basierend auf Differentialgleichungen erfolgt, sollten sich die Modelle jedoch recht einfach an sich ändernde Kapillarrichtungen anpassen lassen.

Tabelle 10: Ersatzmodelle zum Beschreiben der Kapillarkinetik textiler Fasergebilde.

Bezeichnung	Spezialisierungen
Runde Kapillare	<ul style="list-style-type: none"> • Allgemeine Systembeschreibung • Allgemeine Differentialgleichung
Gebündelte runde Kapillaren	<ul style="list-style-type: none"> • Grundlagen zum Schätzen von Strömungen
Homogen strukturiertes Prisma	<ul style="list-style-type: none"> • Unregelmäßig geformte Kapillaren • Verbundene Kapillaren • Eventuell: Verdunstungseinflüsse
Ausschnitt aus einem textilen Fasergebilde	<ul style="list-style-type: none"> • Leicht inhomogene Strukturierung • Eventuell: <ul style="list-style-type: none"> ○ Richtungsabhängigkeiten ○ Lagenaufbau • Komprimier- und dehnbar

Abstraktionsgrad ↑

↓ Komplexität

Die allgemeine Modellbildung zum Kapillareffekt erfolgt anhand des Ersatzmodells für runde Kapillaren. Dies umfasst zum einen eine allgemeine Systembeschreibung, zum anderen die Herleitung der allgemeinen Differentialgleichung für den Kapillareffekt und eine Erläuterung von deren Sonderformen. Die Bündelung dieser runden Kapillaren legt dann die Grundlagen zum Schätzen der Strömungen beim Flüssigkeitseinzug. Beim homogen strukturierten Prisma werden dann nicht-runde Kapillarradien zugelassen, weiter können Kapillaren dann miteinander verbunden sein. Ebenso werden Verdunstungseinflüsse eingeführt. Textile Fasergebilde bringen darüber hinaus eine leicht inhomogene Strukturierung mit sich, beispielsweise Richtungsabhängigkeiten. Lagenaufbauten sind ebenso möglich. Weiter können solche Kapillarsysteme nun komprimier- und dehnbar sein. Es ist ersichtlich, dass dabei der Abstraktionsgrad ab- und der Komplexitätsgrad zunehmen.

5.1.4.2 Runde Kapillare

Als Ersatzmodell zum Einstieg in die Zusammenhänge zum Flüssigkeitseinzug in textile Fasergebilde bietet sich der Flüssigkeitseinzug in eine runde und verdunstungsdichte Kapillare⁶⁰ an. Dabei wird ein beidseitig offenes, feines, zylindrisch geformtes rundes Röhrchen – eine Kapillare – in eine Flüssigkeit eingetaucht. Sollte die Flüssigkeit dann das Material der Kapillaren benetzen, beginnt dann eine Flüssigkeitsfront in die Kapillare einzuziehen. Den Kapillareffekt beschreiben wir damit hier über die **Fließfrontposition** in einer Kapillaren.

Da die Flüssigkeit dabei vergleichsweise langsam einströmt, kann von einem laminaren Strömungsvorgang ausgegangen werden: die Flüssigkeit strömt in sich nicht vermischenden Schichten ein, es entstehen keine Wirbel. Dabei ist die Strömungsgeschwindigkeit direkt an der Kapillarwand gleich null und nimmt zur Mitte hin parabolisch zu (siehe Abbildung 15).

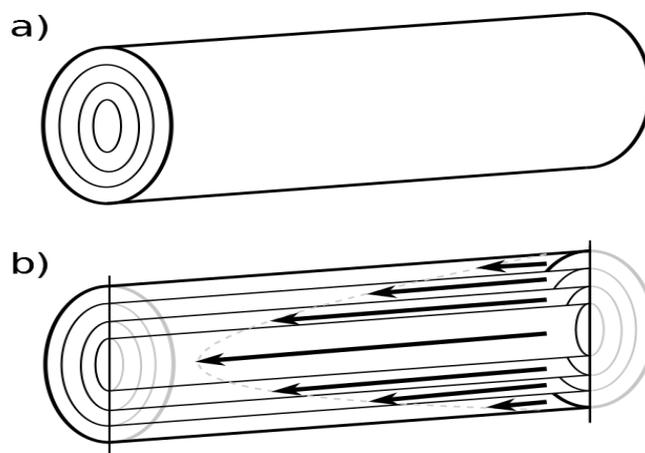


Abbildung 15: Rohr mit eingezeichneten Strömungsprofilen gleicher Geschwindigkeit⁶¹.

Beim Durchfluss der Flüssigkeit durch die Kapillare kommt es zu Reibung in der Flüssigkeit. Die zum Kompensieren dieser Reibung notwendige Kraft lässt sich über das Gesetz von Hagen-Poiseuille berechnen⁶².

Durch den Einströmvorgang in die Kapillare nimmt wiederum die sich über dem Flüssigkeitsspiegel befindende Flüssigkeitsmenge zu. Deren zunehmende Gewichtskraft bremst so den kapillaren Flüssigkeitseinzug nach und nach aus: so beginnt sich mit der Zeit ein stationärer Zustand einzustellen.

Die folgende Abbildung illustriert den Flüssigkeitseinzug in eine geneigte, runde Kapillare.

⁶⁰ Von lat. *capillaris* „in der Art eines Haares“, zu lat. *capillus* „Haar“ (aus Wissen.de, 2017).

⁶¹ Von anthonymsigma (2011).

⁶² Siehe Sutera & Skalak (1993), S. 10. Dies erfolgt unter der Voraussetzung, dass es sich um eine Newtonsche Flüssigkeit handelt. Bei diesen Flüssigkeiten ist die Viskosität alleine von der Temperatur abhängig.

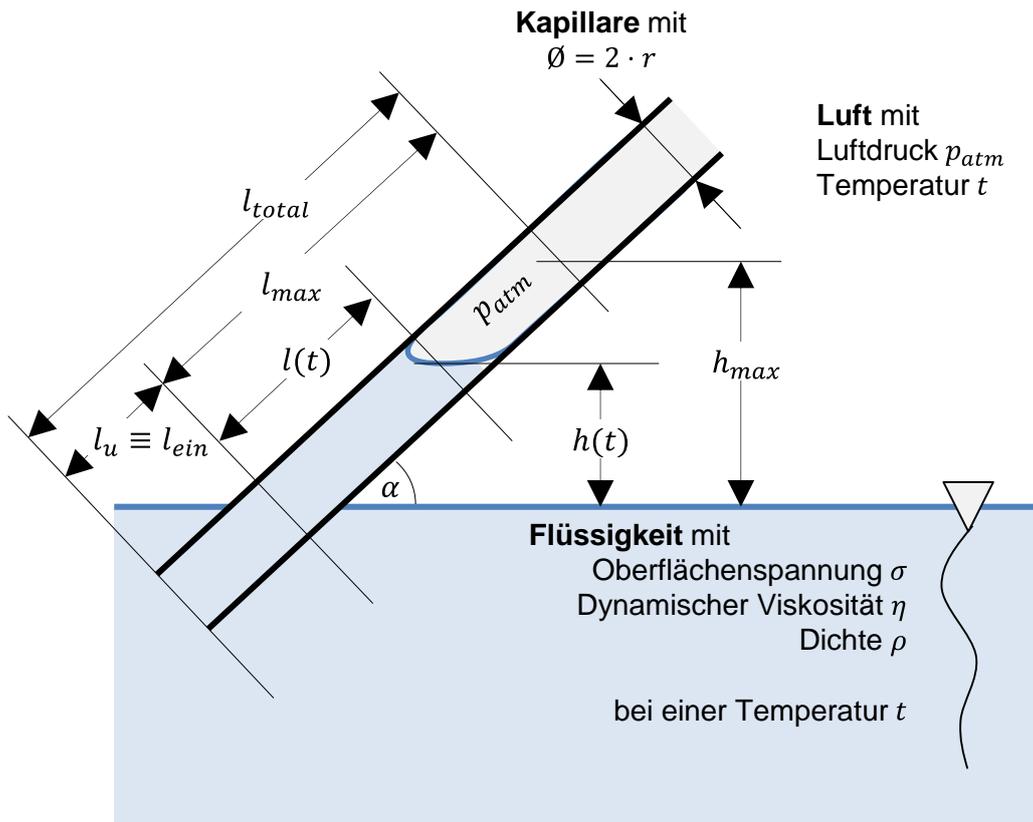


Abbildung 16: Flüssigkeitsaufstieg in einer runden Kapillaren.

$h(t)$ [m] stellt dabei den senkrechten Flüssigkeitsaufstieg dar. $l(t)$ [m] beschreibt dabei die um die Eintauchtiefe l_{ein} korrigierte **Fließfrontposition** der um den Winkel α zur Waagerechten geneigten Kapillaren. Es gilt dabei:

$$h(t) = \sin(\alpha) \cdot l(t) \quad (6)$$

Für den Fall der senkrecht stehenden Kapillaren ($\alpha = 90^\circ$) ist $h(t) = l(t)$.

Beim Flüssigkeitseinzug nimmt die Reibung mit zunehmender Fließfrontposition zu, ebenso die Flüssigkeitsmenge in der Kapillaren. Für den horizontalen Fall gilt $\alpha = 0^\circ$, die Flüssigkeitsmenge in der Kapillaren bremst dann die Fließfront nicht mehr. Damit wirken nur noch Reibungseffekte bremsend.

Differentialgleichungen

Es gelten folgende Bezeichnungen:

Tabelle 11: Variablenbezeichnungen in Abhängigkeit der Richtung des Flüssigkeitseinzugs.

Richtung des Flüssigkeitsaufstiegs	Senkrecht	In Kapillarrichtung
Maximalwert bei Kräftegleichgewicht	h_{max}	l_{max}
Zeitvariante Steighöhe des Flüssigkeitsspiegels in der Kapillaren über der Flüssigkeitsoberfläche	$h(t)$	Fließfrontposition $l(t)$
Eintauchtiefe	$h_{ein} = l_{ein} \cdot \sin(\alpha)$	$l_u \equiv l_{ein}$
Zeitvariante Länge der Flüssigkeitssäule in der Kapillaren	$l_u + h(t)$	$l_u + l(t)$

Die Kapillare sei beiderseitig offen, von rundem Querschnitt und habe den Radius r [m].

Für die Volumenänderung $\frac{dV}{dt}$ [m³/s] in der Kapillare gilt das Gesetz von Hagen-Poiseuille:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{\pi \cdot r^4}{8 \cdot \eta} \cdot \frac{\Delta p}{(l_u + l)} \quad (7)$$

Treibende Kraft ist dabei die Druckdifferenz Δp [Pa=N/m²] der strömenden Flüssigkeit zwischen Anfang und Ende der Kapillaren. Die Druckdifferenz Δp rührt dabei aus den Adhäsionskräften am Kapillarrand, der Oberflächenspannung und der Gewichtskraft der Flüssigkeitssäule in der Kapillaren. Δp wird später bestimmt.

η ist die dynamische Viskosität der strömenden Flüssigkeit [Pa s].

Unter der Voraussetzung, dass der Durchmesser der Kapillaren konstant und rund – und somit die Kapillare zylindrisch – ist, kann $\frac{dV}{dt}$ folgendermaßen ausgedrückt werden:

$$\frac{dV}{dt} = \pi \cdot r^2 \cdot \frac{dl}{dt} \quad (8)$$

Bemerkenswert ist dabei nach Gleichung (8), dass der Volumenstrom $\frac{dV}{dt}$ proportional zu r^2 ist. Eine Halbierung des Radius führt damit zu einer 16-fachen Erhöhung des Strömungswiderstandes⁶³, der Volumenstrom verringert sich auf $\frac{1}{4}$.

So ergibt sich durch Einsetzen von (8) in (7) für ein zylindrisches Rohr folgende Beziehung für die Fließfrontposition als oberen Abschluss des betrachteten Flüssigkeitszylinders mit Volumen V :

$$\frac{dl}{dt} = \frac{r^2}{8 \cdot \eta} \cdot \frac{\Delta p}{(l_u + l)} \quad (9)$$

⁶³ Vgl. Gleichung (7).

Nun gilt es, die Druckdifferenz Δp zu bestimmen. Für offene Kapillaren ergibt sie sich aus der Adhäsionskräften am Flüssigkeitsspiegel der Flüssigkeitssäule sowie deren Gewichtskraft:

$$\Delta F = \text{Adhäsionskräfte} + \text{Gewichtskraft} \quad (10)$$

Bezogen auf eine konstante Querschnittsfläche A ergibt sich mit $\Delta F = A \cdot \Delta p$ und Einsetzen der jeweiligen Beziehungen für die Adhäsionskräfte und die Gewichtskraft aus (10):

$$\Delta p = \underbrace{\frac{2 \cdot \gamma \cdot \cos \theta}{r}}_{\text{adhäsionsbedingt}} - \underbrace{\frac{\rho \cdot g \cdot h}{}}_{\text{gewichtsbedingt}} \quad (11)$$

Dabei stellt γ die Oberflächenspannung der Flüssigkeit [$\text{N/m}=\text{J/m}^2=\text{kg/s}^2$], θ den Kontaktwinkel zwischen Flüssigkeit und Kapillarwand, ρ die Dichte der Flüssigkeit [kg/m^3] sowie g die Erdbeschleunigung [m/s^2] dar.

Durch Einsetzen von Beziehung (11) und (6) in die Beziehung für $\frac{dl}{dt}$ in Kapillaren (9) ergibt sich folgende Adaption der Washburn-Gleichung für runde Kapillaren:

$$\frac{dl}{dt} = \frac{r^2}{8 \cdot \eta} \cdot \frac{\frac{2 \cdot \gamma \cdot \cos \theta}{r} - \rho \cdot g \cdot \sin(\alpha) \cdot l}{(l_u + l)} \quad (12)$$

Nun lässt sich die maximale Einzugslänge l_{max} in der Kapillaren bestimmen. Dies ist dann erreicht, wenn keine Druckdifferenz Δp und damit keine Änderung der Einzugslänge $\frac{dl}{dt}$ mehr auftritt. So ergeben sich folgende Maximalhöhen aus Gleichung (12):

$$\text{Max. Steighöhe:} \quad h_{max} = \frac{2 \cdot \gamma \cdot \cos \theta}{\rho \cdot g \cdot r} \quad (13)$$

$$\text{Max. Einzugslänge:} \quad l_{max} = \frac{1}{\sin(\alpha)} \cdot h_{max} = \frac{1}{\sin(\alpha)} \cdot \frac{2 \cdot \gamma \cdot \cos \theta}{\rho \cdot g \cdot r} \quad (14)$$

Anzumerken ist hierbei, dass Gleichung (13) auch direkt aus (11) für $\Delta p = 0$ hergeleitet werden kann. Somit errechnet sich die maximale Steighöhe komplett aus Konstanten ohne Einfluss auf die Fließfront-Geschwindigkeit.

Mithilfe von Beziehung (14) lässt sich nun Gleichung (12) durch **Erweitern** und **Isolation** ([...]) von l_{max} vereinfachen:

$$\begin{aligned} \frac{dl}{dt} &= \frac{r^2}{8 \cdot \eta} \cdot \frac{\sin(\alpha) \cdot \left[\frac{1}{\sin(\alpha)} \cdot \frac{2 \cdot \gamma \cdot \cos \theta}{r \cdot \rho \cdot g} \right] \cdot \frac{\rho \cdot g}{1} - \rho \cdot g \cdot \sin(\alpha) \cdot l}{(l_u + l)} \\ \frac{dl}{dt} &= \sin(\alpha) \cdot \frac{\rho \cdot g \cdot r^2}{8 \cdot \eta} \cdot \left(\frac{l_{max} - l}{l_u + l} + \frac{l_u + l}{l_u + l} - 1 \right) \\ \frac{dl}{dt} &= \sin(\alpha) \cdot \underbrace{\left[\frac{\rho \cdot g \cdot r^2}{8 \cdot \eta} \right]}_v \cdot \left(\frac{l_{max} + l_u}{l_u + l} - 1 \right) \\ \frac{dl}{dt} &= \sin(\alpha) \cdot v \cdot \left(\frac{l_{max} + l_u}{l_u + l} - 1 \right) \end{aligned} \quad (15)$$

Dabei ergibt sich weiter eine Geschwindigkeitskonstante v für den Flüssigkeitseinzug in die Kapillare:

$$v = \frac{\rho \cdot g \cdot r^2}{8 \cdot \eta} \quad [\text{m/s}] \quad (16)$$

Da l_{max} noch von $\sin(\alpha)$ abhängig ist, stellt folgende Gleichung die Fließfrontgeschwindigkeit durch Einsetzen von (14) in (15) ohne diese Abhängigkeit dar:

$$\frac{dl}{dt} = v \cdot \left(\frac{h_{max} + \sin(\alpha) \cdot l_u}{l_u + l} - \sin(\alpha) \right) \quad (17)$$

Für die *senkrecht stehende Kapillare* ($\alpha = 90^\circ \Rightarrow \sin(\alpha) = 1$) ergibt sich aus (17) folgende vereinfachte Beziehung für die Steiggeschwindigkeit:

$$\frac{dl}{dt} = v \cdot \left(\frac{h_{max} + l_u}{l_u + l} - 1 \right) \quad (18)$$

Für eine *waagrecht liegende Kapillare* ($\alpha = 0^\circ \Rightarrow \sin(\alpha) = 0$) ergibt sich aus (17):

$$\frac{dl}{dt} = \frac{v \cdot h_{max}}{l_u + l} \quad (19)$$

Dabei ergibt das Produkt der beiden Konstanten v und h_{max} die Konstante c für die Kapillargeschwindigkeit in der Washburn-Gleichung⁶⁴ für den gravitationsfreien, horizontalen Flüssigkeitseinzug in eine Kapillare:

$$c = v \cdot h_{max} = \frac{\rho \cdot g \cdot r^2}{8 \cdot \eta} \cdot \frac{2 \cdot \gamma \cdot \cos \theta}{\rho \cdot g \cdot r} = \frac{r \cdot \gamma \cdot \cos \theta}{4 \cdot \eta} \quad (20)$$

⁶⁴ Washburn (1921), Gl. 14a auf S. 280.

Wenn nun die Beziehung (20) $c = v \cdot h_{max}$ in Gleichung (17) eingesetzt wird, können wir die Kapillargeschwindigkeit in einen Teil, der den **gravitationsfreien kapillaren Flüssigkeitseinzug** beschreibt und einen **Korrekturterm für den Gravitationseinfluss** zerlegen:

$$\frac{dl}{dt} = v \cdot \left(\frac{h_{max} - \sin(\alpha) \cdot l}{l_u + l} \right) = \frac{c}{l_u + l} - c \cdot \underbrace{\left[\frac{\sin(\alpha)}{h_{max}} \right]}_{\frac{1}{l_{max}}} \cdot \frac{l}{l_u + l} \quad (21)$$

Es ergibt sich so folgende Formulierung für (21) in Einzugsrichtung:

$$\frac{dl}{dt} = \frac{c}{l_u + l} \cdot \left(\underbrace{1}_{\substack{\text{gravitationsfrei} \\ \downarrow}} \quad - \underbrace{\frac{l}{l_{max}}}_{\substack{\text{Korrektur des} \\ \text{Gravitationseinflusses}}} \right) \quad (22)$$

$$\frac{dl}{dt} = \frac{c}{l_u + l} \cdot \left(1 - \frac{l}{l_{max}} \right) = \frac{c}{l_u + l} \cdot \left(1 - \frac{l \cdot \sin(\alpha)}{h_{max}} \right) \quad (23)$$

Letztlich wird dabei die Kapillargeschwindigkeit durch den Gravitationseinfluss proportional zum schon erfolgten Einzug in Kapillarrichtung reduziert.

Die Korrektur des Gravitationseinflusses fällt dabei für den Fall $\alpha = 0^\circ$ weg, da in diesem Fall l_{max} gegen ∞ geht und so der Korrekturterm minimal wird. Für $\alpha = 90^\circ$ beträgt der Korrekturterm l/h_{max} . Anzumerken ist dabei weiter, dass der Korrekturterm damit nur von α und h_{max} abhängt. Somit ist es theoretisch möglich, für ein bekanntes $l_{max} = 1/\sin(\alpha) \cdot h_{max}$ die Kapillarkonstante c der Washburn-Gleichung direkt aus dem senkrechten kapillaren Flüssigkeitseinzug zu ermitteln. Dies gilt es später zu zeigen.

Gleichung (23) lässt sich weiter so umstellen, dass der sich aus der aktuellen Fließfrontposition $l(t)$ ergebende lokale horizontale Fließfrontgeschwindigkeit und der Einfluss der Gravitationskraft separat dargestellt werden:

$$\frac{dl}{dt} = \underbrace{v \cdot \frac{h_{max}}{l_u + l}}_{\substack{\text{lokale horizontale} \\ \text{Fließfrontgeschwindigkeit}}} \cdot \underbrace{\left(1 - \frac{\sin(\alpha) \cdot l}{h_{max}} \right)}_{\substack{\text{Einfluss der} \\ \text{Gravitationskraft}}} \quad (24)$$

Diese Beziehung zeigt Folgendes:

- (a) Die lokale horizontale Ausbreitungsgeschwindigkeit der Fließfront ist umgekehrt proportional zur schon durchflossenen Kapillarlänge.
- (b) Der Einfluss der Gravitationskraft korrigiert die lokale horizontale Fließfrontgeschwindigkeit proportional zur schon erreichten Steighöhe $\sin(\alpha) \cdot l$.

Zu (a): Die lokale horizontale Ausbreitungsgeschwindigkeit der Fließfront lässt sich wie in Abbildung 17 charakterisieren:

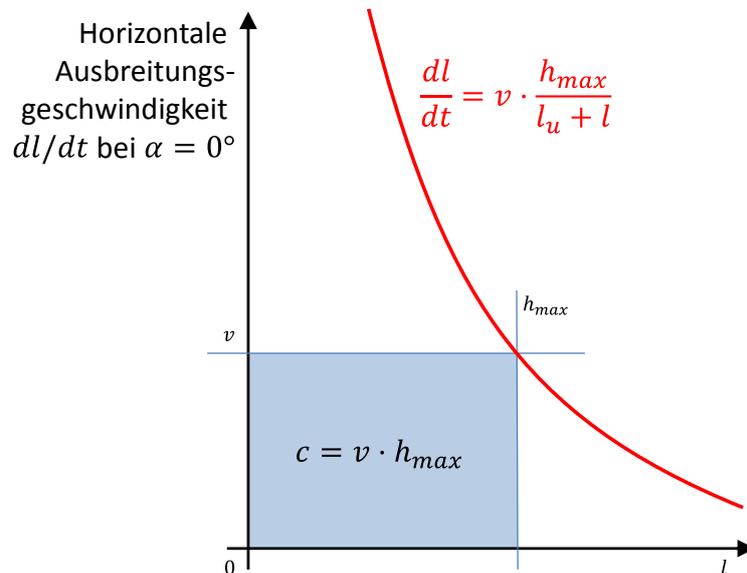


Abbildung 17: Lokale horizontale Ausbreitungsgeschwindigkeit der kapillaren Fließfront in Abhängigkeit der schon durchlaufenen Strecke l .

Gemäß dem verwendeten Modell für laminare Strömungen von Hagen-Poiseuille ist die horizontale Ausbreitungsgeschwindigkeit der Fließfront proportional zu $1/l$ sowie zu c .

Zu Aspekt (b): Der Term für den Einfluss der Graviationskraft $\left(1 - \frac{\sin(\alpha) \cdot l}{h_{max}}\right) = \left(1 - \frac{l}{l_{max}}\right)$ hat folgende Wirkung: die Geschwindigkeit der kapillaren Einzugsfront wird proportional zur schon erzielten Steighöhe bzw. zum schon durchflossenen Einzugsweg reduziert. Dies illustriert Abbildung 15.

Beim waagerechten Flüssigkeitseinzug bleibt der Term wegen $\sin(\alpha = 0^\circ) = 0$ konstant 1 und geht damit neutral in dl/dt ein. Beim senkrechten Flüssigkeitseinzug gilt $l_{max} = h_{max}$ und $\sin(\alpha = 90^\circ) \cdot l = l$.

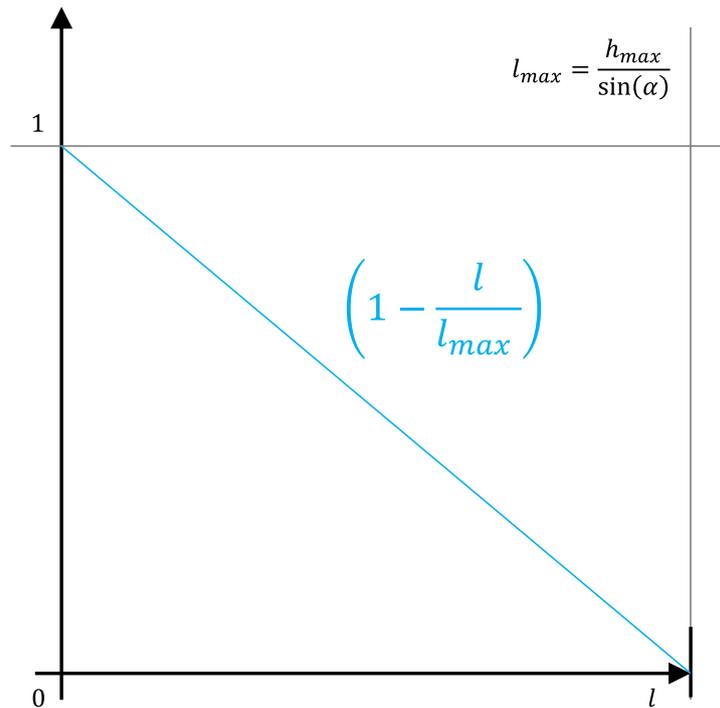


Abbildung 18: Wirkung des Terms für den Einfluss der Graviationskraft auf die lokale Ausbreitungsgeschwindigkeit der kapillaren Fließfront.

Systembeschreibung

Es ergibt sich folgende Systemdarstellung in Speicher-Fluss-Notation:

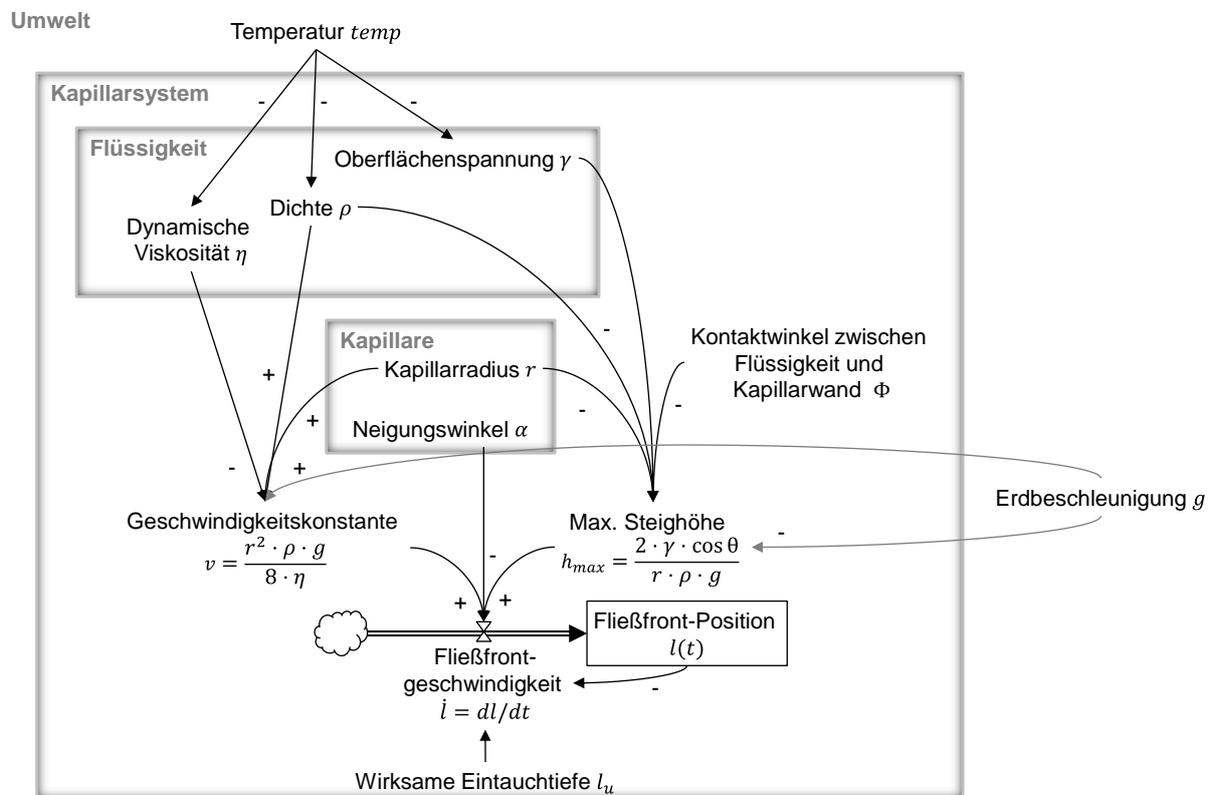


Abbildung 19: Systemdarstellung in Speicher-Fluss-Notation des Flüssigkeitseinzugs in runde Kapillaren.

Zentral für die Wechselwirkungen ist dabei die Änderungsrate der Fließfrontgeschwindigkeit. Ihr Integral stellt dann wiederum die Fließfront-Position dar. Es lassen sich folgende Teilsysteme segmentieren:

- Umwelt: Erdoberfläche (als Systemumgebung)
- Komponente Flüssigkeit
- Komponente Kapillare
- Kapillarsystem: in Komponente „Flüssigkeit“ eingebrachte Komponente „Kapillare“

So ergibt sich folgende Schachtelung der einzelnen Teilsysteme:

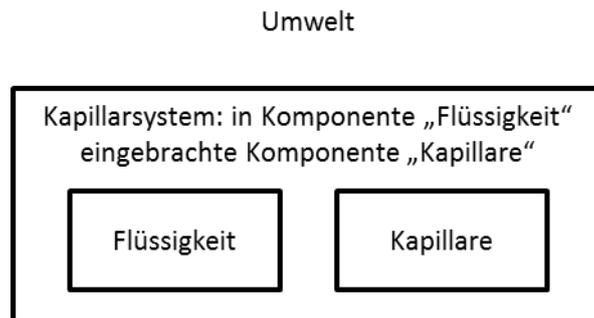


Abbildung 20: Aggregation der einzelnen Teilsysteme zum Ersatzmodell des Kapillaren Flüssigkeitseinzugs in runde Kapillaren.

Diesen Teilsystemen sind folgende *Konstanten* zugeordnet:

(a) Umwelt: Erdoberfläche

g Erdbeschleunigung [m/s²]

$temp$ Umgebungstemperatur⁶⁵ [°C]

(b) Komponente Flüssigkeit

ρ Dichte der Flüssigkeit [kg/m³]

η dynamische Viskosität der Flüssigkeit [Pa s]

γ Oberflächenspannung der Flüssigkeit [N/m=J/m²=kg/s²]

(c) Komponente Kapillare

r Radius der Kapillaren [m]

(d) Kapillarsystem: in Komponente „Flüssigkeit“ eingebrachte Komponente „Kapillare“

α Neigungswinkel zur Horizontalen⁶⁶ z.B. [°]

θ Kontaktwinkel zwischen Flüssigkeit und Kapillarwand⁶⁷ z.B. [°]

l_{ein} Eintauchtiefe der Kapillaren in die Flüssigkeit [m]

⁶⁵ Diese wird hier explizit mit aufgeführt, da sie die Flüssigkeitseigenschaften maßgeblich beeinflusst.

⁶⁶ Dieser ist bei einer senkrecht stehenden Kapillaren 90°.

⁶⁷ Streng genommen müsste der Kontaktwinkel zwischen Flüssigkeit und Kapillarwand über die Oberflächenspannungen zwischen den drei beteiligten Phasen (siehe Abschnitt 5.1.2.1) auf Flüssigkeits- und Material- und Gaseigenschaften zurückgeführt werden. Dies ist jedoch sehr komplex, weiter kann es noch Oberflächenbeschichtungen sowie in Lösung gehende Materialbestandteile geben, die den Kontaktwinkel nennenswert beeinflussen. Daher wird hier auf weitergehende Zuordnungen von Einflüssen auf den Kontaktwinkel bewusst verzichtet.

Durch die Systemzusammenstellung ergeben sich aus den Konstanten von Umwelt, System und Komponenten folgende Parameter, Hilfs- und Zustandsvariablen sowie Differentialgleichungen:

Parameter und Hilfsvariablen

(a) System: in Komponente „Flüssigkeit“ eingebrachte Komponente „Kapillare“

$$v \quad \text{Geschwindigkeitsparameter} \quad v = \frac{\rho \cdot g \cdot r^2}{8 \cdot \eta} \quad [\text{m/s}]$$

$$h_{max} \quad \text{Maximale Steighöhe der Flüssigkeit in der Kapillaren} \quad [\text{m}]$$

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

$$l_{max} \quad \text{Maximaler Flüssigkeitseinzug in die Kapillare für } \alpha > 0^\circ$$

$$l_{max} = \frac{1}{\sin(\alpha)} \cdot h_{max} = \frac{1}{\sin(\alpha)} \cdot \frac{2 \cdot \gamma \cdot \cos \theta}{\rho \cdot g \cdot r} \quad [\text{m}]$$

Zustandsvariablen mit Differentialgleichungen

(b) Kapillarsystem: in Komponente „Flüssigkeit“ eingebrachte Komponente „Kapillare“

$$l(t) \quad \text{Einzugslänge der Flüssigkeit in die Kapillare} \quad [\text{m}]$$

Startwert: $-l_u$ bzw. 0

$$\frac{dl}{dt} = v \cdot \left(\frac{h_{max} + \sin(\alpha) \cdot l_u}{l_u + l} - \sin(\alpha) \right)$$

Lösung der Differentialgleichung

Die allgemeine Differentialgleichung (17) für den schrägen Flüssigkeitseinzug in Kapillarrichtung:

$$\frac{dl}{dt} = v \cdot \left(\frac{h_{max} + \sin(\alpha) \cdot l_u}{l_u + l} - \sin(\alpha) \right) \quad (17)$$

Aus der Vorform (15) von (17) ist ersichtlich, dass sich in dieser Gleichung alle dl und l sowie dt jeweils auf eine Seite der Gleichung separieren lassen. Damit integrieren wir nach Separation der Variablen von $l(t = 0) = 0$ bis $l(t)$:

$$\int_0^l \frac{l_u + l}{h_{max} - \sin(\alpha) \cdot l} dl = v \int_0^t 1 dt$$

Wir substituieren:

$$x := h_{max} - \sin(\alpha) \cdot l$$

Daraus ergeben sich folgende Hilfsbeziehungen für die Substitution:

$$l = \frac{h_{max} - x}{\sin(\alpha)}$$

$$\frac{dl}{dx} = -\frac{1}{\sin(\alpha)}$$

$$dl = -\frac{1}{\sin(\alpha)} dx$$

Einsetzen führt zu:

$$\int_{x:=h_{max}}^{x:=h_{max}-\sin(\alpha)\cdot l} (\sin(\alpha) \cdot l_u + h_{max}) \cdot \frac{1}{x} - 1 dx = -\sin^2(\alpha) \cdot v \cdot \int_0^t 1 dt$$

Nach Integration ergeben sich folgende Stammfunktionen:

$$[(h_{max} + \sin(\alpha) \cdot l_u) \cdot \ln|x| - x]_{x:=h_{max}}^{x:=h_{max}-\sin(\alpha)\cdot l} = -\sin^2(\alpha) \cdot v \cdot [t]_0^t$$

Es folgt Beziehung für $l(t)$ in geneigten Kapillaren für $0^\circ < \alpha \leq 90^\circ$:

$$(h_{max} + \sin(\alpha) \cdot l_u) \cdot \ln \left| \frac{h_{max} - \sin(\alpha) \cdot l}{h_{max}} \right| + \sin(\alpha) \cdot l = -\sin^2(\alpha) \cdot v \cdot t \quad (25)$$

Bei dieser – transzendenten – Gleichung ist zu beachten, dass sie in expliziter Form nur Werte für $t(l)$ liefern kann, d.h. es lässt sich nur errechnen, wann die kapillare Fließfront vorgegebene Einzugsängen erreicht.

Gleichung (25) lässt sich unter Zuhilfenahme der Beziehung (6) als Funktion von $h(t)$ darstellen:

$$(h_{max} + \sin(\alpha) \cdot l_u) \cdot \ln \left| \frac{h_{max} - h(t)}{h_{max}} \right| + h(t) = -\sin^2(\alpha) \cdot v \cdot t \quad (26)$$

Mit Gleichung (6) ergibt sich durch Division mit $\sin(\alpha)$ aus (26) folgende Funktion für $l(t)$:

$$(l_{max} + l_u) \cdot \ln \left| \frac{l_{max} - l(t)}{l_{max}} \right| + l(t) = -\sin(\alpha) \cdot v \cdot t \quad (27)$$

Die folgenden Schritte zeigen die Integration der beiden Sonderfälle des senkrechten und waagerechten Flüssigkeitseinzugs in die Kapillare.

Direkt aus Gleichung (25) ergibt sich mit $\alpha = 90^\circ \rightarrow \sin(\alpha) = 1$ der Sonderfall des Flüssigkeitseinzugs in eine senkrechte Kapillare:

$$(h_{max} + l_u) \cdot \ln \left| \frac{h_{max} - l}{h_{max}} \right| + l = -v \cdot t \quad (28)$$

Wie oben lässt sich diese transzendentale Gleichung nur nach $t(l)$ auflösen.

Jedoch wird die integrierte Gleichung (25) für den Flüssigkeitseinzug in eine waagerechte Kapillare bei $\alpha = 0^\circ$ trivial. Für den Fall $\alpha = 0^\circ$ starten wir daher mit Differentialgleichung (17) und $\alpha = 0^\circ$:

$$\frac{dl}{dt} = v \cdot \left(\frac{h_{max}}{l_u + l} \right) \quad [\text{m/s}] \quad (29)$$

Nach Separation der Variablen folgen die Integrale:

$$\int_0^l l_u \cdot 1 + l \, dl = v \cdot h_{max} \int_0^t 1 \, dt \quad (30)$$

Die Stammfunktionen:

$$\begin{aligned} \left[l_u \cdot l + \frac{1}{2} l^2 \right]_0^l &= h_{max} \cdot v [t]_0^t \\ \left[\frac{l_u}{l_{max}} \cdot l + \frac{1}{2 l_{max}} l^2 \right]_0^l &= h_{max} \cdot v [t]_0^t \\ l_u \cdot l + \frac{1}{2} l^2 &= h_{max} \cdot v \cdot t \end{aligned} \quad (31)$$

Diese Beziehung lässt sich – z.B. mit der Mitternachtsformel – explizit nach $l(t)$ auflösen:

$$\begin{aligned} \underbrace{\frac{1}{2}}_a \cdot l^2 + \underbrace{2 l_u}_b \cdot l + \underbrace{(-2 h_{max} \cdot v)}_c \cdot t &= 0 \\ l_{1,2} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} &= \frac{-2l_u \pm \sqrt{4l_u^2 + 4 \cdot 2 \cdot h_{max} \cdot v \cdot t}}{2} = -l_u \pm \sqrt{l_u^2 + 2 \cdot h_{max} \cdot v \cdot t} \end{aligned}$$

Der negative Lösungsast kann dabei verworfen werden. Es ergibt sich damit für den waagerechten kapillaren Flüssigkeitseinzug:

$$l(t) = \sqrt{l_u^2 + 2 \cdot h_{max} \cdot v \cdot t} - l_u \quad (32)$$

Es ist ersichtlich, dass l_u in Gleichung (32) letztlich schon vor $t = 0$ zurückgelegten Weg der Flüssigkeitsfront in der Kapillaren und damit eine Art Reibungseinfluss beschreibt. Interessant an dieser Gleichung ist auch die Aussage, dass der waagerechte Flüssigkeitseinzug in eine Kapillare prinzipiell bis ins Unendliche stattfindet.

Umgekehrt lässt sich die Einzugszeit t als Funktion von l durch einfaches Umstellen von Gleichung (31) darstellen:

$$t = \frac{l_u \cdot l + \frac{1}{2} l^2}{h_{max} \cdot v} \quad (33)$$

Initiale Kapillargeschwindigkeit

Die initiale Kapillargeschwindigkeit $v_{l,0}$ beschreibt den Flüssigkeitseinzug in die Kapillare zum Zeitpunkt des Erstkontakts $t = 0$ [s] und $l = 0$ [m]. Sie ergibt sich aus Gleichung (17) und ist unabhängig vom Neigungswinkel α der Kapillaren:

$$v_{l,0} = \left[\frac{dl}{dt} \right]_{t=0; l=0} = v \cdot h_{max} \cdot \frac{1}{l_u} \quad [\text{m/s}] \quad (34)$$

Dieser Wert beschreibt letztlich die Affinität der Kapillaren, ihres Materials und der Flüssigkeit zueinander. Bemerkenswert ist dabei, dass die initiale Kapillargeschwindigkeit invers proportional zu l_u ist. Entsprechend nimmt also die Kapillargeschwindigkeit invers proportional zur Eindringtiefe ab. Sicherlich ist es sinnvoll⁶⁸, hierbei für l_u einen Mindestwert vorzuschreiben, z.B. $l_u \geq 1 \cdot 10^{-3}$ [m]. Die Anwendung einer solchen Bedingung bringt mit sich, entsprechend auch für $v_{l,0}$ den verwendeten Bezugswert von l_u zu nennen.

Der zu $v_{l,0}$ zugehörige Flüssigkeitsstrom \dot{V} in die runde Kapillare errechnet sich wie folgt:

$$\dot{V} = \frac{dV}{dt} = \pi \cdot r^2 \cdot v_{l,0} = \pi \cdot r^2 \cdot v \cdot h_{max} \cdot \frac{1}{l_u} \quad [\text{m}^3/\text{s}] \quad (35)$$

Alternativ bietet sich an, die initiale Stärke des Kapillareffekts über die Washburn-Kapillarkonstante $c = v \cdot h_{max}$ zu formulieren. Da dies Überbetonungen bei sehr kleinen Werten von l_u umgeht, ist dies sicherlich für die Praxis die bessere Methode, um die Stärke von Kapillareffekten miteinander zu vergleichen.

Zeitdauer für den Flüssigkeitseinzug abschätzen

Für eine Reihe an Themenstellungen mit Bezug zur Flüssigkeitsaufnahme ist es wichtig, Aussagen über die Zeitdauer, bis die Flüssigkeitsfront einen bestimmten Wert erreicht hat, zu liefern.

Senkrechter und schräger Flüssigkeitseinzug

Hierzu verwenden wir die Beziehung, dass nach einer bestimmten Zeitdauer t_x ein Prozentsatz $x \cdot 100$ des maximalen Flüssigkeitseinzugs l_{max} erreicht ist:

$$l(t_x) = x \cdot l_{max} \quad \text{für } x \in \mathbb{R} \text{ im Intervall } [0..1] \quad (36)$$

In dieser Arbeit wird ein Erreichungsgrad von 95 %, also $x = 0,95$ verwendet.

Zum Errechnen der benötigten Zeitdauer setzen wir Gleichung (36) in Gleichung (25) ein. Es ergibt sich:

$$(l_u \cdot \sin(\alpha) + h_{max}) \cdot \ln \frac{h_{max} - \sin(\alpha) \cdot (x \cdot l_{max})}{h_{max}} + \sin(\alpha) \cdot (x \cdot l_{max}) = -v \cdot \sin^2(\alpha) \cdot t_x$$

⁶⁸ So ergeben sich bei der Parameteridentifikation des Kapillareffekts für viele Systeme aus einer Textilstruktur und einer Flüssigkeit äußerst kleine Werte für l_u . Typische Werte liegen im Bereich von $\sim 10^{-7}$ [m].

Nach einigen Umstellungen unter Zuhilfenahme von Gleichung (6) erhalten wir für t_x :

$$t_x = \frac{-x \cdot h_{max} - (l_u \cdot \sin(\alpha) + h_{max}) \cdot \ln(1-x)}{v \cdot \sin^2(\alpha)} \quad [\text{s}] \quad (37)$$

Für den Flüssigkeitseinzug in die senkrecht stehende Kapillare ergibt sich damit:

$$t_x = \frac{-x \cdot h_{max} - (l_u + h_{max}) \cdot \ln(1-x)}{v} \quad [\text{s}] \quad (38)$$

Waagerechter Flüssigkeitseinzug

Gleichung (32) beschreibt, dass der Flüssigkeitseinzug in einer waagrecht liegende Kapillare prinzipiell bis ins Unendliche stattfindet. Die Definition eines Erreichungsgrades für die maximale Steighöhe ist dabei natürlich nicht sinnvoll. Passender ist hier sicherlich eine Obergrenze für das Zeitintervall Δt_{max} für den kleinsten messbaren Zuwachs Δl .

Wir legen nun beispielhaft und pragmatisch $\Delta t_{max} = 60 \text{ sec}$ sowie $\Delta l = 1 \text{ mm}$ fest. Gesucht wird also der Zeitpunkt t_x und der Einzug l_x , *ab dem* eine Einzugsgeschwindigkeit von $v_{min} = \frac{\Delta l}{\Delta t} = \frac{0,001}{60} = 1,667 \cdot 10^{-5} \text{ [m/s]}$ unterschritten wird. Damit folgt mithilfe Gleichung (29):

$$v_{min} = v \cdot \left(\frac{h_{max}}{l_u + l_x} \right) \quad (39)$$

Es ergibt sich damit für l_x :

$$l_x = \frac{v \cdot h_{max}}{v_{min}} - l_u \quad (40)$$

Wir können nun mithilfe von Gleichung (31) den zugehörigen Zeitpunkt t_x für die Erreichung von l_x bestimmen:

$$t_x = \frac{l_u \cdot l_x + l_x^2/2}{h_{max} \cdot v} \quad (41)$$

Zum Einfluss der wirksamen Eintauchtiefe

Senkrechter Flüssigkeitseinzug

Die folgende Abbildung stellt den simulierten Verlauf des senkrechten Flüssigkeitseinzugs für verschiedene wirksame Eintauchtiefen l_u nach Gleichung (28) dar. Zu erkennen ist, dass sich die Kurvenform von $l(t)$ mit zunehmendem l_u abflacht, weiter nimmt die Zeit bis zum Erreichen von 97,5 % der maximalen Steighöhe⁶⁹ gerade bei geringer Steighöhe deutlich zu.

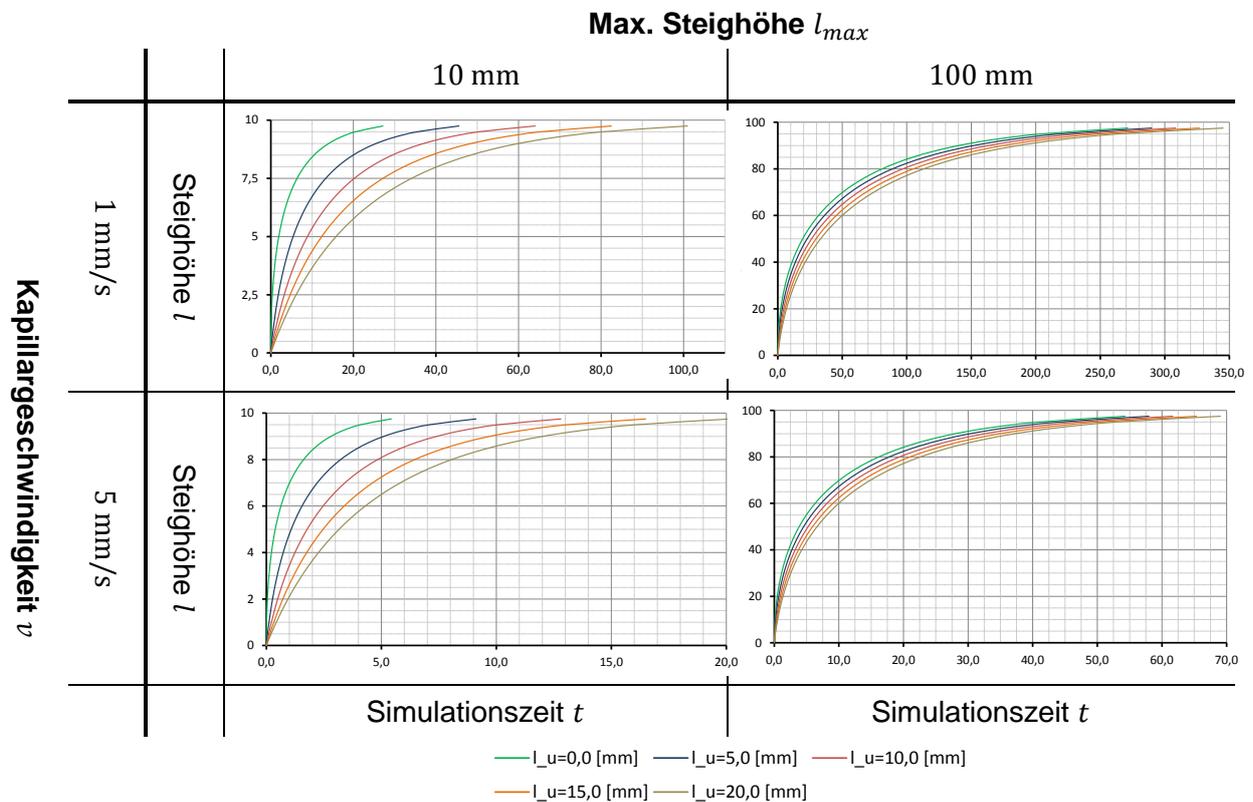


Abbildung 21: Verlauf des Flüssigkeitseinzugs $l(t)$ bis 97,5% l_{max} für verschiedene Werte von l_{max} und v sowie variierende Werte der Eintauchtiefe l_u beim senkrechten Flüssigkeitseinzug.

Somit verzögert hier l_u den Flüssigkeitseinzug.

⁶⁹ Jeweils der letzte rechte Datenpunkt der Kurven.

Waagerechter Flüssigkeitseinzug

Die folgende Abbildung stellt den simulierten waagerechten Flüssigkeitseinzug für verschiedene wirksame Eintauchtiefen l_u nach Gleichung (32) dar. Die Skalierung der Achse für die Steighöhe variiert dabei erwartungsgemäß deutlich.

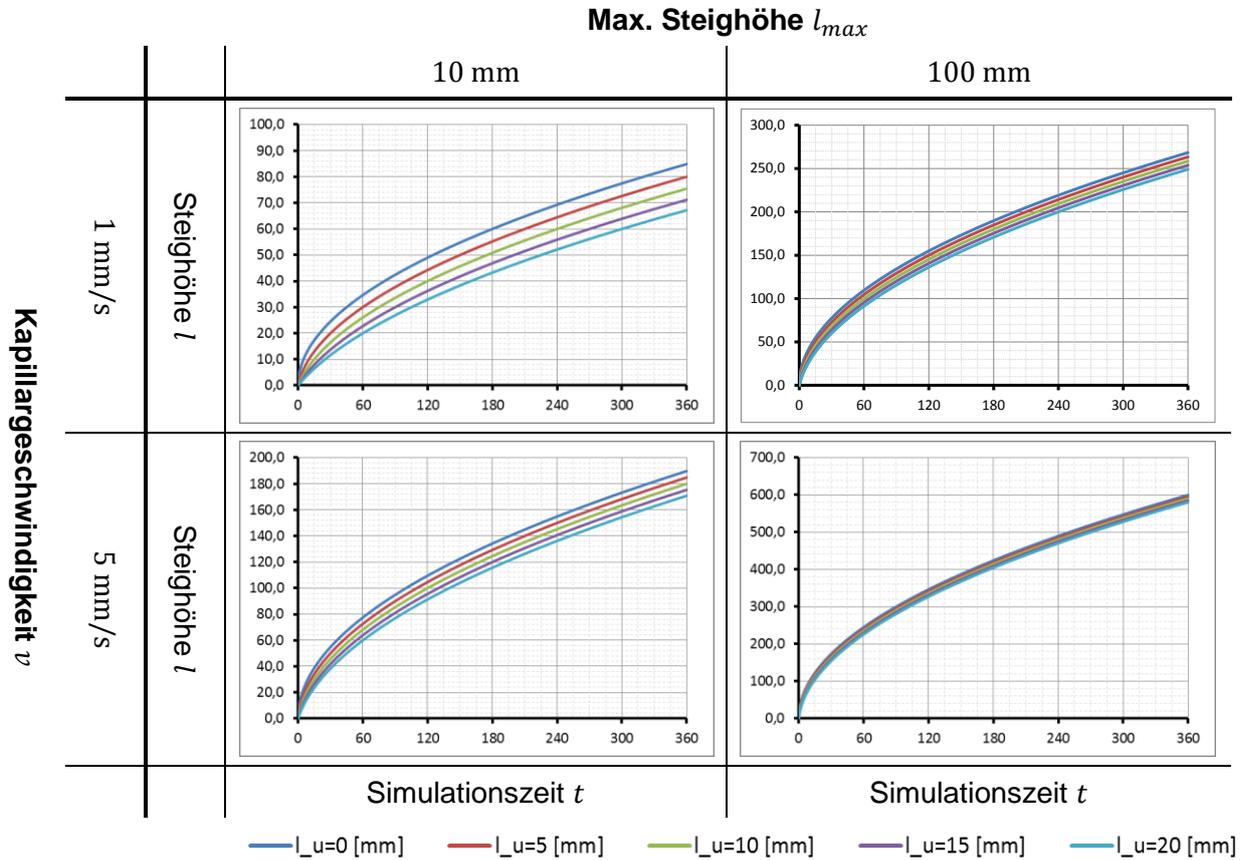


Abbildung 22: Verlauf des Flüssigkeitseinzugs $l(t)$ bis 97,5% l_{max} für verschiedene Werte von l_{max} und v sowie variierende Werte der Eintauchtiefe l_u beim waagerechten Flüssigkeitseinzug.

Dabei ist ersichtlich, dass die wirksame Eintauchtiefe letztlich zu einer Zeitverzögerung beim Flüssigkeitseinzug führt, die Steigungen der Kurven bei variierender Eintauchtiefe verlaufen im Grunde genommen sehr ähnlich.

Auch hier äußern sich größere werdende Werte von l_u letztlich als Zeitverzögerung.

Zum Einfluss der dynamischen Viskosität η

Die dynamische Viskosität η geht nach Gleichung (16) in die Geschwindigkeitskonstante v ein, jedoch nicht in die max. Steighöhe (13). Dabei ist die Geschwindigkeitskonstante v invers proportional zu η , d.h. v ist letztlich proportional zur Fluidität der Flüssigkeit:

$$v \sim \frac{1}{\eta}$$

$v \sim$ Fluidität

Zum Einfluss von Oberflächenspannung γ und Kontaktwinkel θ

Sowohl die Oberflächenspannung γ als auch der Kontaktwinkel θ gehen in die max. Steighöhe (13) h_{max} ein, jedoch nicht in die Geschwindigkeitskonstante v (16). Dabei ist h_{max} proportional zur Oberflächenspannung γ und proportional zu $\cos(\theta)$:

$$h_{max} \sim \gamma$$
$$h_{max} \sim \cos(\theta)$$

Zu beachten ist dabei, dass die direkte Wirkungspolarität von θ auf h_{max} jedoch negativ ist, d.h. niedriger Kontaktwinkel sorgen für hohe Werte von h_{max} , während größere Kontaktwinkel letztlich niedrige Werte von h_{max} bedingen:

$$\theta \xrightarrow{-} \cos(\theta) \xrightarrow{+} h_{max}$$

Zum Einfluss des Radius r der Kapillaren

Die folgenden Abhängigkeiten gelten nur für absolut runde Kapillaren. Für andere Kapillarquerschnitte ergeben sich analog zum Gesetz von Hagen-Poiseuille Korrekturfaktoren für die Geschwindigkeitskonstante v . Dies wird später beim Ersatzmodell „Kapillaren in einem homogen strukturierten und porösen geraden Prisma“ in Abschnitt 5.1.4.4 ab S. 67 erläutert.

Der Kapillarradius r geht sowohl in die Geschwindigkeitskonstante (16) v als auch in die max. Steighöhe (13) h_{max} ein: dabei ist h_{max} invers proportional zu r ; während die Geschwindigkeitskonstante v proportional zu r^2 ist:

$$h_{max} \sim \frac{1}{r}$$
$$v \sim r^2$$

Dementsprechend steigert ein Vergrößern von r die Fließfrontgeschwindigkeit, während die maximale Steighöhe dabei deutlich abnimmt. So illustriert die folgende Grafik die Zusammenhänge zwischen dem Kapillarradius r und der erreichbaren max. Steighöhe h_{max} sowie der Zeitdauer, bis 95 % der max. Steighöhe erreicht sind:

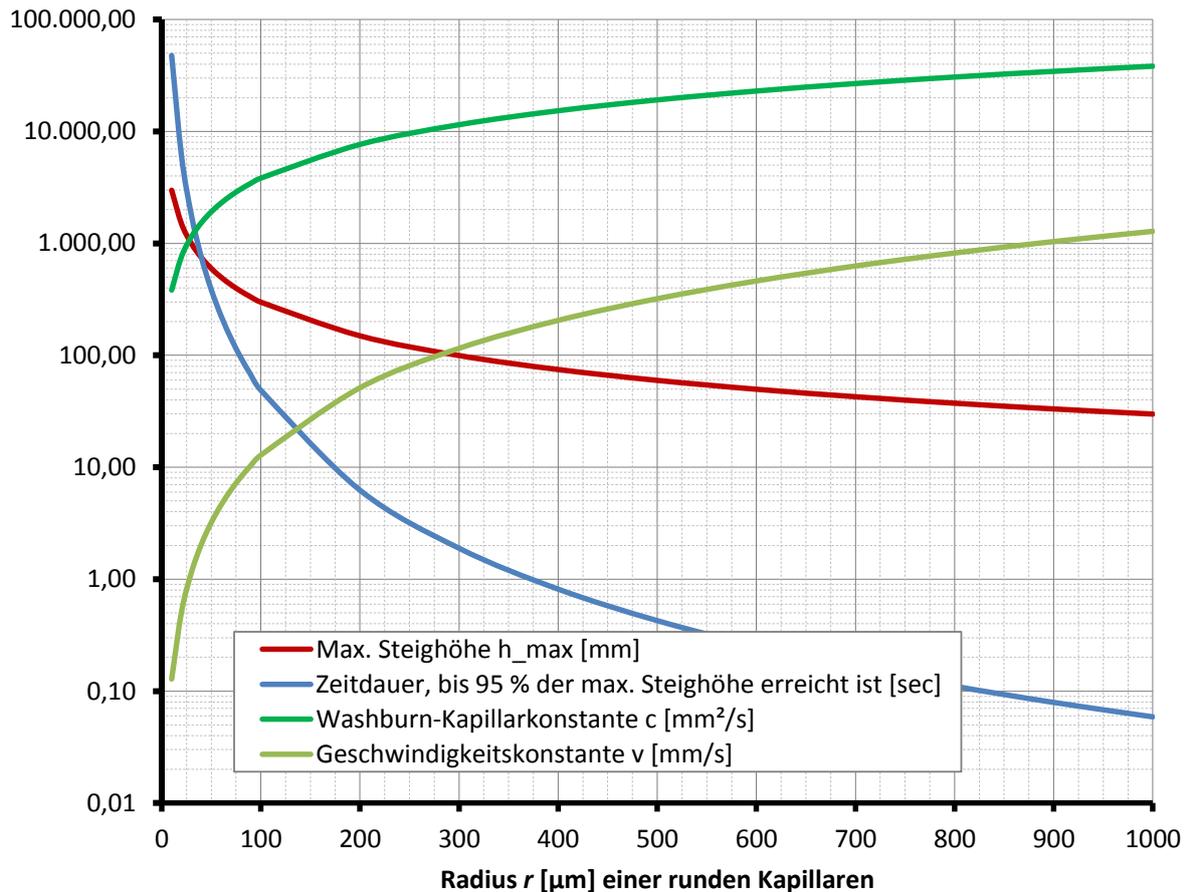


Abbildung 23: Max. Steighöhe h_{max} , Zeitdauer t_{95} bis diese zu 95% erreicht ist und Washburn-Kapillarkonstante c sowie Geschwindigkeitskonstante v als Funktion des Kapillarradius r .

Dabei zeigt sich, dass die max. Steighöhe für feinste Kapillarstrukturen mit Radien unter $r \cong 3\mu\text{m}$ auch über dem Luftdruck von $p_{\text{atmot}} \cong 1.013,25 \text{ hPa}$ liegen kann. In den Kapillaren können sich dann Vakuubläschen bilden. Bäume und Schlingpflanzen verhindern diese Bläschenbildung durch speziell konstruierte Leitsysteme.

Die Zeitdauer bis zum Erreichen von 95 % der max. Steighöhe fällt mit zunehmendem Kapillarradius deutlich stärker als die max. Steighöhe, da die Flüssigkeit in den weiter werdenden Kapillaren schneller einströmen kann.

Zum Einfluss des Neigungswinkels α der Kapillaren

Gleichung (25) bietet sich zur Simulation des Flüssigkeitseinzugs bei verschiedenen Neigungswinkeln α der Kapillaren an.

Wir verwenden dabei die komplett nach t umgestellte Form von Gleichung (25):

$$t = - \frac{(h_{max} + \sin(\alpha) \cdot l_u) \cdot \ln \left| \frac{h_{max} - \sin(\alpha) \cdot l}{h_{max}} \right| + \sin(\alpha) \cdot l}{\sin^2(\alpha) \cdot v} \quad (42)$$

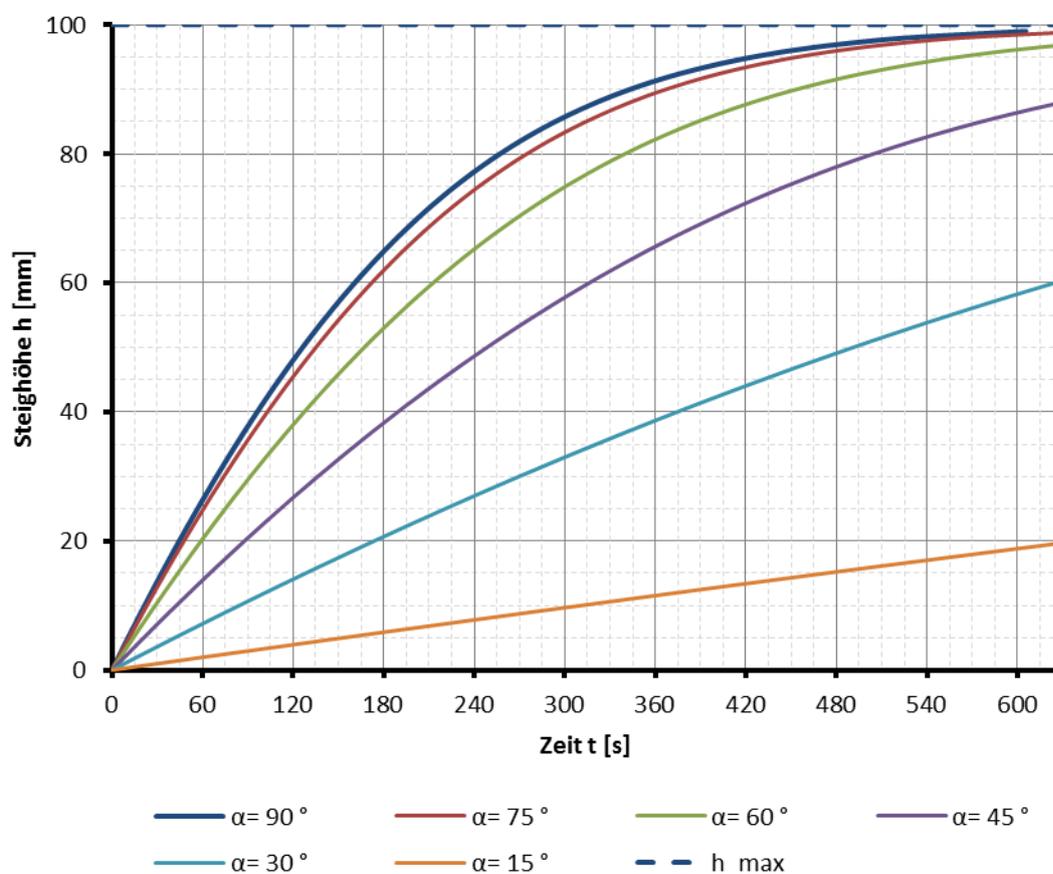
Um die sich ergebenden Steighöhen für verschiedene Neigungswinkel vergleichen zu können, ersetzen wir dabei $l(t)$ durch $h(t)$, ausgehend von Gleichung (6):

$$l(t) = \frac{h(t)}{\sin \alpha}$$

Mit dieser Beziehung ergibt sich Gleichung (42) zu:

$$t = - \frac{(h_{max} + \sin(\alpha) \cdot l_u) \cdot \ln \left| \frac{h_{max} - h}{h_{max}} \right| + h}{\sin^2(\alpha) \cdot v} \quad (43)$$

Für $l_u = 0,01$ [m]; $v = 0,001$ [m/s] und $h_{max} = 0,1$ [m] ergeben sich so folgende Kurven für die Steighöhe⁷⁰ $h(t)$:



⁷⁰ Der jeweils zugehörige Einzugsweg $l(t)$ ergibt sich nach Gleichung (6) aus der Steighöhe $h(t)$.

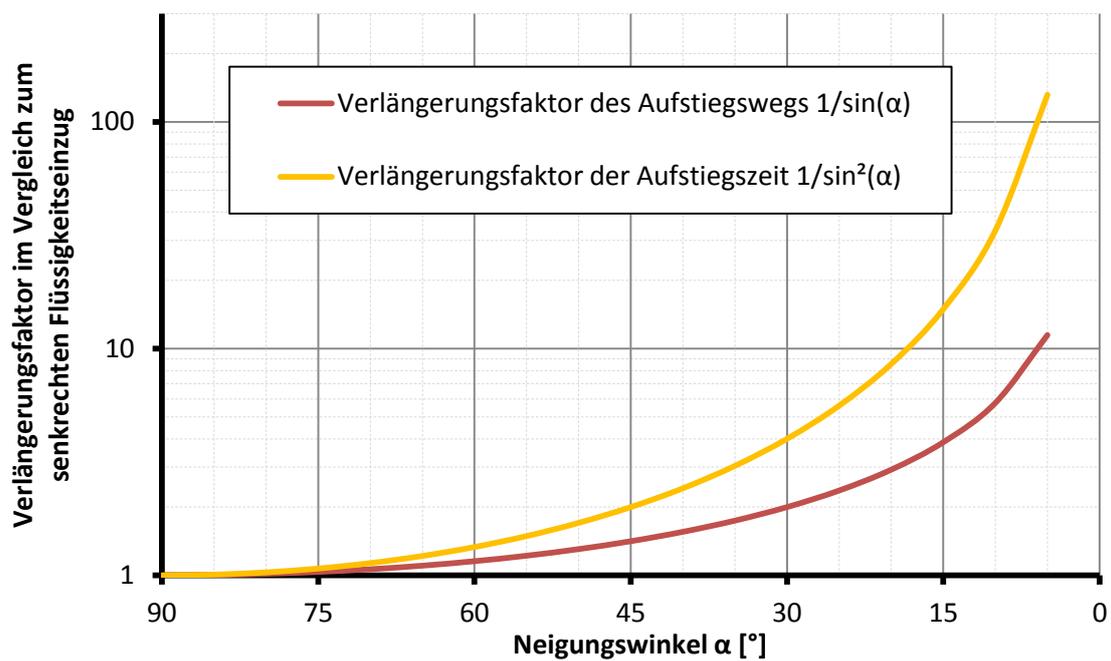
Abbildung 24: Verlauf der Steighöhe $h(t)$ für verschiedene Neigungswinkel der Kapillaren.

Bemerkenswert an Gleichung (43) ist, dass die Zeit bis zum Erreichen derselben Steighöhe invers proportional zu $\sin^2(\alpha)$ ist. Somit verlängert eine Neigung der Kapillaren aus der Senkrechten den Aufstiegsweg um $1/\sin(\alpha)$, die Zeitdauer für den Flüssigkeitsaufstieg nimmt um $1/\sin^2(\alpha)$ zu:

Tabelle 12: Einfluss des Neigungswinkel α auf Einzugszeit und -weg.

Neigungswinkel zur Waagerechten α [°]	90	75	60	45	30	15
$\sin(\alpha)$	1	0,97	0,87	0,71	0,5	0,26
Verlängerungsfaktor des Einzugswegs $1/\sin(\alpha)$	1	1,04	1,15	1,41	2	3,86
Verlängerungsfaktor der Einzugszeit $1/\sin^2(\alpha)$	1	1,07	1,33	2	4	14,93

Bei einer liegenden Kapillaren mit $\alpha = 0^\circ$ werden beide Verlängerungsfaktoren ∞ . Die folgende Abbildung illustriert den Einfluss der Verlängerungsfaktoren auf den Aufstiegsweg und die Aufstiegszeit.

Abbildung 25: Einfluss des Kapillarneigungswinkels α auf die Verlängerungsfaktoren für Aufstiegszeit und Weg.

Aufgenommene Flüssigkeitsmenge

Ein weiterer wichtiger Punkt beim Beschreiben des Kapillareffekts ist die von der in die Kapillare hineinstrebenden Fließfront eingezogene Flüssigkeitsmenge. Es bietet sich an, diese Menge entweder statisch oder dynamisch zu bestimmen.

Im statischen Fall wird das Kapillarröhrchen jeweils vor und nach der Flüssigkeitsaufnahme gewogen. Aus der Gewichts Differenz lässt sich dann die eingezogene Flüssigkeitsmasse $m_{Flüssigkeit}$ berechnen:

Gewicht der Kapillaren vor Flüssigkeitseinzug	m_{leer}	[kg]
Gewicht der Kapillaren im befüllten Zustand	$m_{\text{befüllt}}$	[kg]

$$m_{Flüssigkeit} = m_{\text{befüllt}} - m_{\text{leer}} \quad \text{[kg]} \quad (44)$$

Aus der Flüssigkeitsmasse $m_{Flüssigkeit}$ können wir dann über die Dichte ρ das zugehörige Flüssigkeitsvolumen $V_{Flüssigkeit}$ berechnen:

$$V_{Flüssigkeit} = \frac{m_{Flüssigkeit}}{\rho} \quad \text{[kg]} \quad (45)$$

Die folgende Abbildung illustriert eine in eine runde Kapillare aufgenommene Flüssigkeitsmenge:

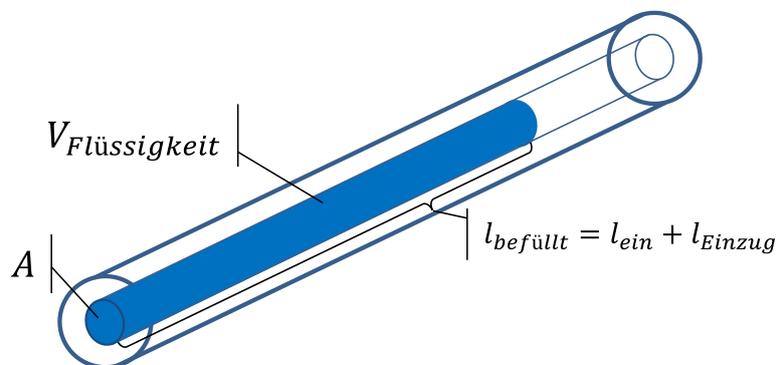


Abbildung 26: In eine runde Kapillare aufgenommene Flüssigkeitsmenge.

Zusammen mit der recht genau bestimmbaren Länge $l_{\text{befüllt}}$ des – hier – zylindrischen Flüssigkeitsvolumens lässt sich so eine mittlere Querschnittsfläche A der Kapillaren errechnen:

$$A = \frac{V_{Flüssigkeit}}{l_{\text{befüllt}}} = \frac{m_{Flüssigkeit}}{\rho \cdot l_{\text{befüllt}}} \quad \text{[kg]} \quad (46)$$

Im dynamischen Fall wird die Masse der sich befüllenden Kapillaren laufend gewogen bzw. indirekt über die abnehmende Flüssigkeitsmasse im Behälter bestimmt. Dabei entstehen diskrete Zeitreihen an Werten für die Flüssigkeitsmasse im Behälter bzw. in der Kapillaren. Aus diesen können dann mittels Differenzenbildung die in die Kapillare einziehenden Massen ermittelt werden.

Sollte die Masse der Kapillaren beim Flüssigkeitseinzug ermittelt werden, muss die Kapillarmasse noch um den Auftrieb des eintauchenden Kapillarteils korrigiert werden. Aus einer diskreten Zeitreihe der einziehenden Flüssigkeitsmasse kann dann durch Differenzenbildung der in die Kapillare einziehende Massenstrom ermittelt werden.

Gegebenenfalls auftretende Verdunstungseffekte sind mit zu charakterisieren. So kann die Verdunstung aus dem Flüssigkeitsreservoir für stationäre Umgebungsbedingungen aus einer diskreten Zeitreihe der Flüssigkeitsmasse mittels Differenzenbildung ermittelt werden.

Die folgende Tabelle vergleicht die übliche Genauigkeit verfügbarer Waagen mit der zum Schätzen der beim Flüssigkeitseinzug in eine Kapillare einziehenden Masse.

Tabelle 13: Qualitativer Vergleich der Methoden zur dynamischen Massenermittlung des Flüssigkeitseinzugs in eine Kapillare.

Methode zur Massenermittlung	Wiegen der sich befüllenden Kapillaren	Wiegen des Flüssigkeitsbehälters
Zu erfassende Masse	Kapillare	Flüssigkeit und Behälter
Schätzwert für den Anteil der dem kapillaren Flüssigkeitseinzug zuzuordnenden Masse	1 ... 5 %	0,005 ... 0,05 %
Typisches Verhältnis von Maximaleinwaage zu Minimaleinwaage		$10^4 \dots 10^5$
Typische Genauigkeit bezogen auf Maximaleinwaage		$10^{-6} \dots 10^{-5}$
Erschütterungsempfindlichkeit	höher	niedriger

Dabei ist ersichtlich, dass der „Störabstand“ beim Wiegen der sich befüllenden Kapillaren deutlich besser ist als beim Wiegen des sich dabei entleerenden Flüssigkeitsbehälters, jedoch ist diese Methode deutlich empfindlicher gegenüber Erschütterungen.

5.1.4.3 Gebündelte runde Kapillaren

Mit diesem Ersatzmodell kommen durch parallelisierende Bündelung vieler gleichartiger Kapillaren folgende Aspekte zum Ersatzmodell für runde Kapillaren hinzu:

- Der Flüssigkeitseinzug findet in vielen, identischen runden Kapillaren parallel statt.
- Die gesamte Querschnittsfläche und der gesamte Volumenstrom nehmen proportional zur Kapillarzahl im Bündel zu.

Speziell an diesem Modell ist, dass – obwohl die gesamte Querschnittsfläche zunimmt – der Volumenstrom durch eine einzelne Kapillare nach wie vor derselbe wie bei einer einzelnen Kapillaren ist. Die Einzugsgeschwindigkeit dl/dt ändert sich durch die Kapillarbündelung nicht.

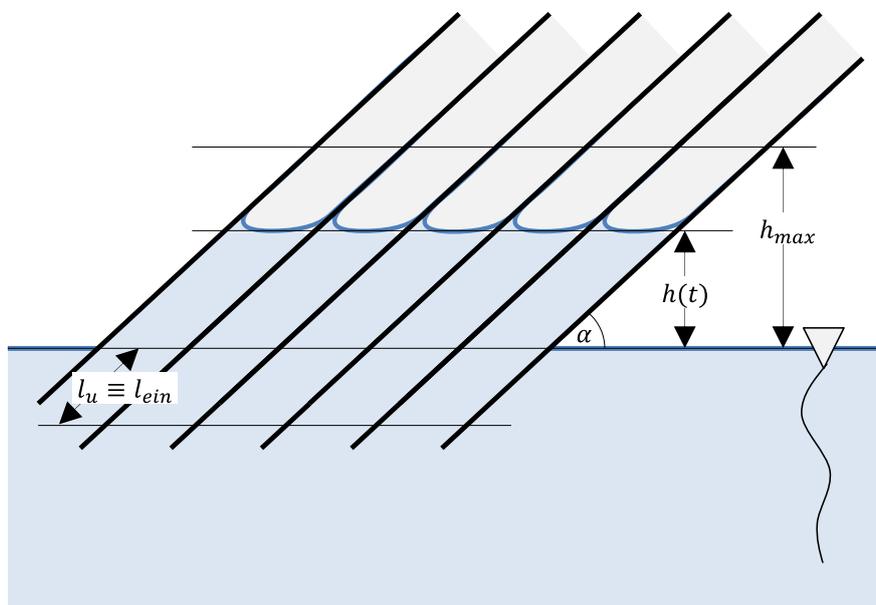


Abbildung 27: Ersatzmodell «Gebündelte runde Kapillaren».

Für die k gebündelten Kapillaren ergibt sich folgende gesamte offene Querschnittsfläche:

A_{ges} = Anzahl der Kapillaren · Querschnittsfläche einer einzelnen Kapillaren

$$A_{ges} = k \cdot A = k \cdot \pi \cdot r^2 \quad [\text{m}^2] \quad (47)$$

Dabei ist A die Querschnittsfläche in einer der Kapillaren, r stellt deren Radius dar.

Der Volumenstrom beim Flüssigkeitseinzug in die Kapillare ergibt sich zu:

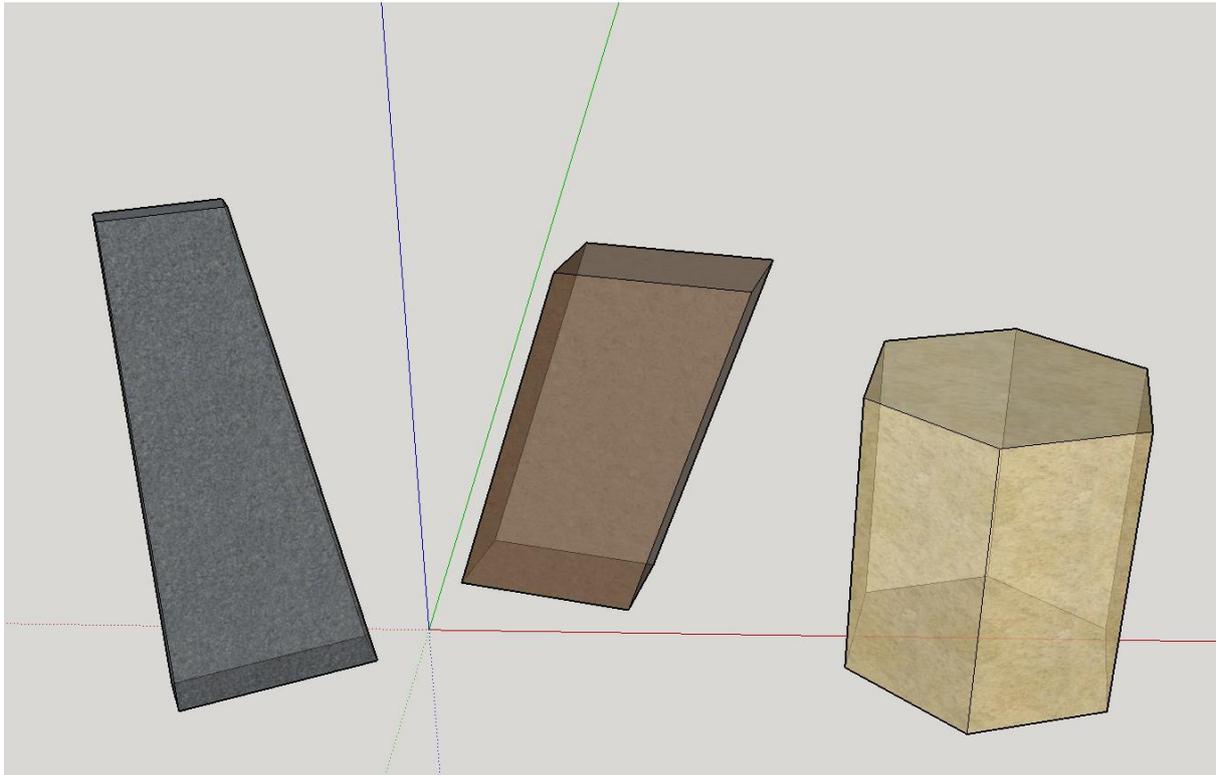
$$\dot{V} = \frac{dV}{dt} = A_{ges} \cdot \frac{dl}{dt} = k \cdot A \cdot \frac{dl}{dt} = k \cdot \pi \cdot r^2 \cdot \frac{dl}{dt} \quad [\text{m}^3/\text{s}] \quad (48)$$

Das gesamte in eine kapillare einziehende Flüssigkeitsvolumen ergibt sich zu:

$$V_{max} = A_{ges} \cdot l_{max} = k \cdot A \cdot \frac{h_{max}}{\sin(\alpha)} = k \cdot \pi \cdot r^2 \cdot \frac{h_{max}}{\sin(\alpha)} \quad [\text{m}^3] \quad (49)$$

5.1.4.4 Kapillaren in einem homogen strukturierten und porösen geraden Prisma

Rajagopalan & Aneja (2001) ersetzen die senkrechte Kapillare durch einen porösen Körper mit konstantem Querschnitt in Fläche und Form – einem Prisma⁷¹.



Links: kein Prisma: weder sind die Seiten parallel noch gleich lang, noch lässt sich die Deckfläche durch Parallelverschiebung in die Grundfläche überführen.

Mitte: schiefes Prisma: parallele Seiten sind gleich lang, die Grundfläche lässt sich durch Parallelverschiebung in die Deckfläche überführen.

Rechts: Gerades Prisma: die Deckfläche lässt sich durch senkrechte Parallelverschiebung in die Grundfläche überführen.

Abbildung 28: Verschiedene geometrische Körper.

⁷¹ Prismen sind im Sinne geometrischer Körper Verallgemeinerungen von Zylindern. Ein Prisma entsteht durch Parallelverschiebung aus eines Vielecks als Grundfläche entlang einer nicht in dieser Ebene liegenden Geraden im Raum. Bei geraden Prismen steht die Verschiebungsgerade senkrecht auf der Grundfläche. Alle Seitenkanten sind parallel und gleich lang.

Dies ändert ausgehend vom Ersatzmodell der gebündelten runden Kapillaren im vorherigen Abschnitt folgende Aspekte:

- Der Körper genügt den Anforderungen an einen geraden⁷² prismatischen geometrischen Körper. Bezogen auf seine Höhe hat dieser Körper eine konstante Querschnittsfläche.
- Es gibt im Prisma viele kleine, unregelmäßig geformte, verbundene durchströmbare Räume – das Prisma ist porös strukturiert.
- Die konstante Querschnittsfläche des Prismas ist mindestens so groß gewählt, dass die Randflächen zwischen dem porösen Material und den Hohlräumen in der Querschnittsfläche hinreichend konstant über die Höhe des Prismas ist.
- Der Körper hat eine homogene innere Struktur.
- Die Oberfläche des Prismas ist porös und flüssigkeitsdurchlässig.
- Die Oberfläche des Prismas wird durch den Flüssigkeitseinzug benetzt. Es können Verdunstungseffekte auftreten⁷³.

Folgende Aspekte bleiben bei dieser Modellerweiterung explizit erhalten:

- Das treibende Phänomen des Kapillareffekts bleibt gleich: die intermolekularen Kräfte zwischen einer Flüssigkeit und der Materialoberfläche (Adhäsion) ziehen eine Flüssigkeitssäule in den Körper ein, bis sich ein Kräftegleichgewicht zwischen der Gewichtskraft der Flüssigkeitssäule und den Adhäsionskräften einstellt.
- Der poröse Körper darf auch geneigt in die Flüssigkeit eintauchen.

⁷² Die hier getroffenen Überlegungen gelten auch für schiefe Prismen. Allerdings erschweren dann die statt als Rechteck als Parallelogramm ausgeführten Seitenflächen das Ablesen der Steighöhe bzw. der Einzugslänge.

⁷³ Diese werden hier vernachlässigt.

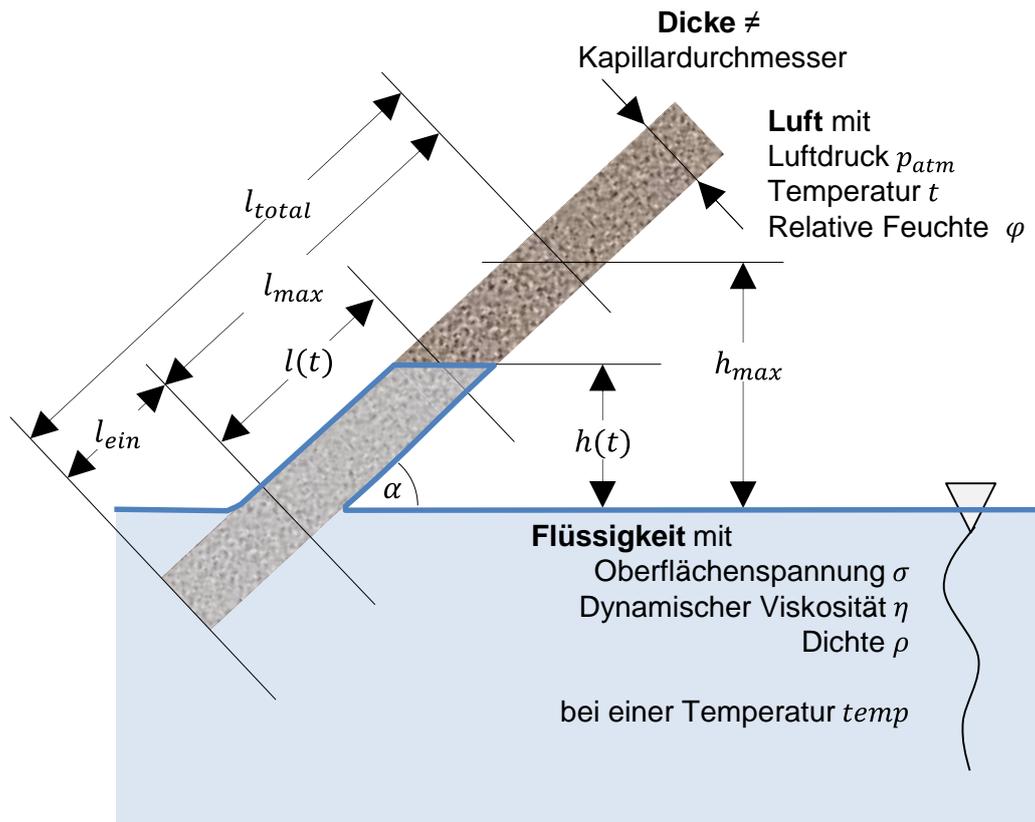


Abbildung 29: Flüssigkeitsaufstieg in einem geraden, homogen strukturierten und porösen Prisma ohne Verdunstung.

Die im ersten Ersatzmodell „runde Kapillare“ identifizierte Beziehungen für die Konstanten h_{max} und v gelten nur für kreisförmige Kapillarquerschnitte. Mit dem Übergang auf einen porösen Körper ändert sich das Verhältnis von Querschnittsfläche zur Adhäsionsfläche zwischen Flüssigkeit und Material: so ist dieses Verhältnis im Fall einer runden Kapillaren maximal, bei porösen Körpern hingegen handelt es sich um eine makroskopische Bündelung vieler einzelner kleiner, unrund geformter Kapillaren mit jeweils deutlich größerer benetzbarer Querschnittsfläche als im runden Fall. Dies zeigen die folgende Abbildung und die folgende Tabelle:

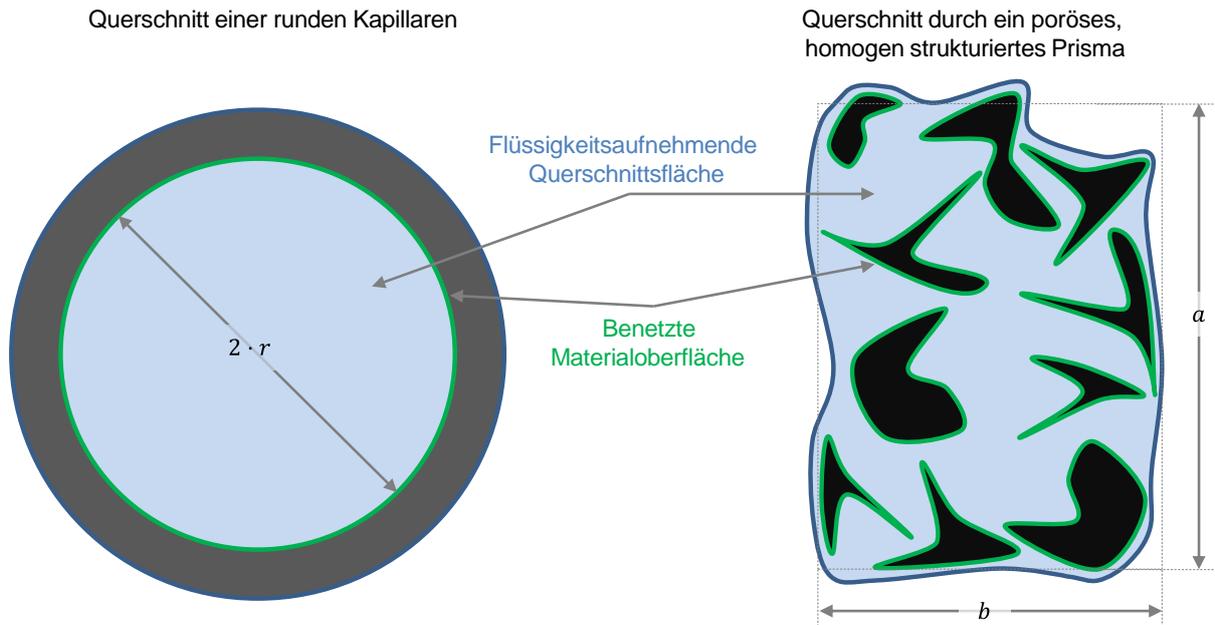


Abbildung 30: Vergleich des Querschnitts einer runden Kapillaren mit dem eines porösen, homogen strukturierten Prismas.

Tabelle 14: Vergleich der Eigenschaften runder Kapillaren mit der Kapillarstruktur eines homogen strukturierten, porösen geraden Prismas.

	Runde Kapillare	Homogen strukturiertes, poröses gerades Prisma
Zahl der Kapillaren	1	Makroskopische Betrachtung vieler, miteinander verbundener deutlich kleinerer Kapillaren
Flüssigkeitsaufnehmende Querschnittsfläche	$A = \pi \cdot r^2$	Abschätzung aus Messergebnissen möglich
Benetzbare Materialoberfläche	$u = 2 \cdot \pi \cdot r$	Abschätzung aus Messergebnissen möglich
Fließfront-Geschwindigkeit $\frac{dl}{dt}$	wie in Abschnitt „Runde Kapillare“ beschrieben	deutlich kleiner als bei einer runden Kapillaren mit derselben Querschnittsfläche
Steighöhe	wie in Abschnitt „Runde Kapillare“ beschrieben	höher als bei einer runden Kapillaren mit derselben Querschnittsfläche

Die Fließfront-Geschwindigkeit ist in porösen, homogen strukturierten Prisma deutlich geringer als bei einer vergleichbaren runden Kapillaren, da letztlich die Fließfront-Geschwindigkeit einer viel dünneren einzelnen Kapillaren als Ersatzmodell herangezogen werden muss. Weiter ist diese Ersatz-Kapillare unrund und hat viel mehr Materialoberfläche im Querschnitt, d.h. das Strömungsprofil in ihr enthält viel mehr Zonen mit geringerer Fließgeschwindigkeit. Dementsprechend ist die Fließfront-Geschwindigkeit durch ein homogen strukturiertes, porö-

ses Prisma deutlich geringer als durch eine einzelne Kapillare mit gleicher Querschnittsfläche.

Statt einer großen Kapillare werden damit in einem homogen strukturierten, porösen Prisma viele kleine Kapillaren in makroskopisch aggregierter Form betrachtet. Diese Modellerweiterung⁷⁴ führt zu folgenden Änderungen an den Gleichungen⁷⁵:

1. Der Kapillarradius wird von Rajagopalan & Aneja (2001) durch den „hydraulischen Durchmesser“ d_H ersetzt. A stellt dabei die leere Querschnittsfläche im Körper dar, C die Oberfläche des Körpers im Querschnitt.

$$d_H = \frac{4A}{C} = 2 \cdot 2 \cdot \frac{A}{C} = 2 \cdot r \quad (50)$$

$$r = \frac{2A}{C} \quad (51)$$

Typische Werte für r liegen um $r = 2 \cdot 10^{-4} \text{ m} = 200 \mu\text{m}$.

2. Aufgrund der nichtrunden Form der Kapillaren im Körper wird der Geschwindigkeitsparameter v mit einem zusätzlichen Reibungsfaktor λ korrigiert.
3. Durch die poröse Oberfläche des Körpers dringt von den Seiten Flüssigkeit in den Körper ein. Somit unterscheiden sich die reale Eintauchtiefe l_{ein} und die wirksame Eintauchtiefe l_u .

Adaptierte maximale Steighöhe

Die maximale Steighöhe ändert sich durch die Einführung der leeren Querschnittsfläche A und der benetzbaren Oberfläche C mit Einsetzen von (51) wie folgt:

Ausgangspunkt: Gleichung (13)

$$h_{max} = \frac{1}{r} \cdot \frac{2 \cdot \gamma \cdot \cos \theta}{\rho \cdot g} \quad [\text{m}]$$

mit r aus d_H :

$$h_{max} = \frac{1}{\frac{2A}{C}} \cdot \frac{2 \cdot \gamma \cdot \cos \theta}{\rho \cdot g} \quad [\text{m}]$$

Adaptierte Steighöhe:

$$h_{max} = \frac{C}{A} \cdot \frac{\gamma \cdot \cos \theta}{\rho \cdot g} \quad [\text{m}] \quad (52)$$

Da das Verhältnis C/A für den Fall eines kreisförmigen Kapillarquerschnittes letztlich minimal wird, ergibt sich im Umkehrschluss, dass h_{max} für unrunde Kapillaren immer höher ist als in einer runden Kapillaren. mit gleicher Querschnittsfläche A .

⁷⁴ Zur Herleitung siehe Rajagopalan & Aneja (2001), S. 815f. Hierbei gilt es zu beachten, dass die maximale Steighöhe in Gleichung (7) in Rajagopalan & Aneja (2001) wohl mit der in Gleichung (50) verwendeten Beziehung für den Kapillarradius $r = 2 \cdot A/C$ errechnet wird. In ebenda, Gleichung (11) ist dies jedoch nicht der Fall [sic!]. Der dadurch entstehende Fehler wirkt sich jedoch nur in Form eines proportionalen Korrekturfaktors aus: λ in Gleichung (52) beträgt 1/16 von λ in Rajagopalan & Aneja (2001).

⁷⁵ Die Differentialgleichung (15) bleibt unverändert, sie entspricht Gleichung (11) in Rajagopalan & Aneja (2001). Dabei wurde $\left(\frac{x_{\infty}-x}{x_0+x}\right)$ mit dem neutralen Glied $\frac{x_0+x}{x_0+x} - 1$ und anschließend zusammengefasst. Es bestehen folgende Entsprechungen: $x_0 = l_u$; $x_{\infty} = h_{max}$ sowie $h = x$.

Mit (2) ergibt sich so eine Möglichkeit zum vergleichenden Abschätzen der Grenzflächenenergie Material-Flüssigkeit für zwei Flüssigkeiten 1 und 2 und einem identischen porösen Material:

$h_{max,1}$ sei die Steighöhe von Flüssigkeit 1 im porösen Material, analog sei $h_{max,2}$ die Steighöhe von Flüssigkeit 2 im selben porösen Material.

Es ergeben sie aus (52) mithilfe von (2) folgende adaptierte Steighöhen⁷⁶:

$$h_{max,1} = \frac{C}{A} \cdot \frac{(\sigma_s - \sigma_{ls,1})}{\rho_1 \cdot g}$$

$$h_{max,2} = \frac{C}{A} \cdot \frac{(\sigma_s - \sigma_{ls,2})}{\rho_2 \cdot g}$$

Durch Gleichsetzen der materialspezifischen Parameter in diesen beiden Formeln ergibt sich so eine Bestimmungsmethode des Verhältnisses der Grenzflächenenergien beider Flüssigkeiten zum Material der Kapillaren:

$$\frac{\sigma_{ls,1}}{\rho_1 \cdot h_{max,1}} = \frac{\sigma_{ls,2}}{\rho_2 \cdot h_{max,2}} \quad (53)$$

Analog können zum Bestimmen eines unbekanntem Kontaktwinkels folgende Gleichungen der maximalen Steighöhe zweier Flüssigkeiten 1 und 2 in einem Material verwendet werden:

$$h_{max,1} = \frac{C}{A} \cdot \frac{\gamma_1 \cdot \cos \theta_1}{\rho_1 \cdot g}$$

$$h_{max,2} = \frac{C}{A} \cdot \frac{\gamma_2 \cdot \cos \theta_2}{\rho_2 \cdot g}$$

Durch Gleichsetzen der materialspezifischen Parameter ergibt sich hier analog zu (53):

$$\frac{\gamma_1 \cdot \cos \theta_1}{\rho_1 \cdot h_{max,1}} = \frac{\gamma_2 \cdot \cos \theta_2}{\rho_2 \cdot h_{max,2}} \quad (54)$$

So folgt für einen unbekanntem Kontaktwinkel θ_1 :

$$\cos \theta_1 = \frac{\rho_1 \cdot h_{max,1}}{\rho_2 \cdot h_{max,2}} \cdot \frac{\gamma_2}{\gamma_1} \cdot \cos \theta_2 \quad (55)$$

Somit lässt sich aus bekannten Werten der Steighöhe h_{max} , der Dichte ρ und einer bekannten Grenzflächenenergie zwischen Flüssigkeit und Festkörper σ_{LS} eine bislang unbekanntem Grenzflächenenergie zwischen einer anderen Flüssigkeit und demselben Festkörper bestimmen. Dies ist so analog für unbekanntem Kontaktwinkel möglich.

⁷⁶ Dabei sind $\cos \theta = \cos(\varphi)$ sowie $\sigma_L = \gamma$.

Adaptierte Geschwindigkeitskonstante

Auch die Geschwindigkeitskonstante v ändert sich mit der Einführung des hydraulischen Radius. Neben der leeren Querschnittsfläche A und der benetzbaren Oberfläche C im Querschnitt wird der hydraulische Radius λ eingeführt:

Ausgangspunkt: Gleichung (16)
$$v = \frac{\rho \cdot g}{8 \cdot \eta} \cdot r^2 \quad [\text{m/s}]$$

Erweiterung um λ und um r aus d_H :
$$v = \frac{\rho \cdot g}{8 \cdot \lambda \cdot \eta} \cdot \left(2 \frac{A}{C}\right)^2 \quad [\text{m/s}]$$

Adaptierte Geschwindigkeitskonstante:
$$v = \frac{\rho \cdot g}{2 \cdot \lambda \cdot \eta} \cdot \left(\frac{A}{C}\right)^2 \quad [\text{m/s}] \quad (56)$$

Auch hier ergibt sich, dass v für runde Kapillarstrukturen maximal ist und für andere Kapillar-geometrien deutlich kleiner ausfällt.

Eintauchtiefe l_u einer vergleichbaren runden Kapillaren

Bei den beiden bislang erläuterten Modellen zum kapillaren Flüssigkeitseinzug beschreibt l_{ein} die Eintauchtiefe der Kapillaren in die Flüssigkeit in Kapillarrichtung. Neuartig ist nun, dass die Kapillaren im porösen, homogen strukturierten Körper nun durch die offene Oberfläche zugänglich sind: die Flüssigkeit kann nicht nur von unten, sondern von allen Seiten in den Körper eindringen. Wir benötigen also zur vergleichenden Beschreibung die Eintauchtiefe einer geschlossenen, runden Kapillaren. Dies ist nun l_u .

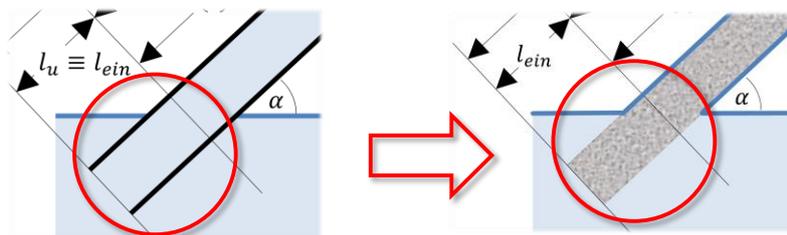


Abbildung 31: Unterscheidung von Eintauchtiefe l_{ein} und Ersatzeintauchtiefe l_u der Kapillaren.

Damit gilt für dieses Ersatzmodell nun folgende Unterscheidung:

l_{ein}	Eintauchtiefe des Körpers in die Flüssigkeit	[m]
l_u	Ersatzeintauchtiefe einer vergleichbaren runden, an den Seiten geschlossenen Kapillaren	[m]

Typische Erfahrungswerte für Textilstrukturen sind:

$l_u \leq 2 \text{ mm}$: die Textilstruktur hat eine sehr offene Oberfläche

$l_u > 2 \text{ mm}$: die Oberfläche der Textilstruktur ist eher geschlossen

Durch den nun offenen Körper gilt:

$$l_u \leq l_{ein}$$

Um eventuelle künstliche Beschränkungen des durch den Kapillareffekt getriebenen Volumenstroms in die Kapillare zu vermeiden, sollte bei Experimenten l_{ein} immer größer als l_u gewählt werden.

Erweiterung der Systembeschreibung

Anstatt des Kapillarradius r werden nun folgende weitere Parameter verwendet:

λ	Makroskopischer Reibungsfaktor	[-]
A	Unbesetzte Querschnittsfläche	[m ²]
C	Oberfläche des Körpers im Querschnitt	[m]

Zusätzlich zur tatsächlichen Eintauchtiefe l_{ein} kommt noch die wirksame Eintauchtiefe hinzu:

l_u	Eintauchtiefe einer vergleichbaren runden Kapillaren	[m]
-------	--	-----

Die hinzu kommenden Parameter λ , A , C lassen sich beispielsweise wie folgt in der gegebenen Reihenfolge bestimmen:

Tabelle 15: Bestimmung der Parameter für die erweiterte Systembeschreibung als homogen strukturiertes, poröses Prisma.

Parameter	Bestimmungsmöglichkeit
1 Leere Querschnittsfläche im Körper	A 4. Ermittlung durch Wiegen des Prüflings vor und nach der Flüssigkeitsaufnahme ⁷⁷ : $A = \frac{m_{benetzt} - m_{unbenetzt}}{(\max(h_i) + l_{ein}) \cdot \rho_{Fl}}$
2 Oberfläche des Körpers im Querschnitt	C 5. Bestimmung von r aus h_{max} mittels Variation von γ , ρ sowie $\cos \theta$ (mithilfe Gleichung (13)). Alternativ bzw. parallel: Bestimmung von r aus v mit variierendem ρ und η (mithilfe Gleichung (16)). 6. Errechnen von C : $C = \frac{2A}{r}$
3 Reibungsfaktor durch die nichtrunde Kapillarform	λ 7. Errechnen von λ : $\lambda = v_{gemessen} \cdot \frac{2 \cdot \eta}{\rho \cdot g} \cdot \left(\frac{C}{A}\right)^2$

Es ist ersichtlich, dass es sich anbietet, die Schritte 2 und 3 zusammen für verschiedene identifizierte h_{max} und v anhand eines Variationskollektivs von Flüssigkeiten mittels eines nichtlinearen Gleichungslösers oder einem anderen Verfahren zur Fehlerminimierung durch-

⁷⁷ Beim senkrecht stehenden Prüfling.

zuführen. In den entsprechenden Gleichungen sollten dabei die jeweils zu bestimmenden Parameter möglichst isoliert sein, um Fehlerabschätzungen mithilfe des verbleibenden Restfehlers durchführen zu können.

Ermittlung der benetzten Querschnittsfläche A

Die durch den kapillaren Flüssigkeitseinzug benetzte Querschnittsfläche A des Prismas lässt sich wie folgt ermitteln:

1. Das Prisma wird *vor dem Flüssigkeitseinzug* vermessen und gewogen. Es ergeben sich folgende Werte:

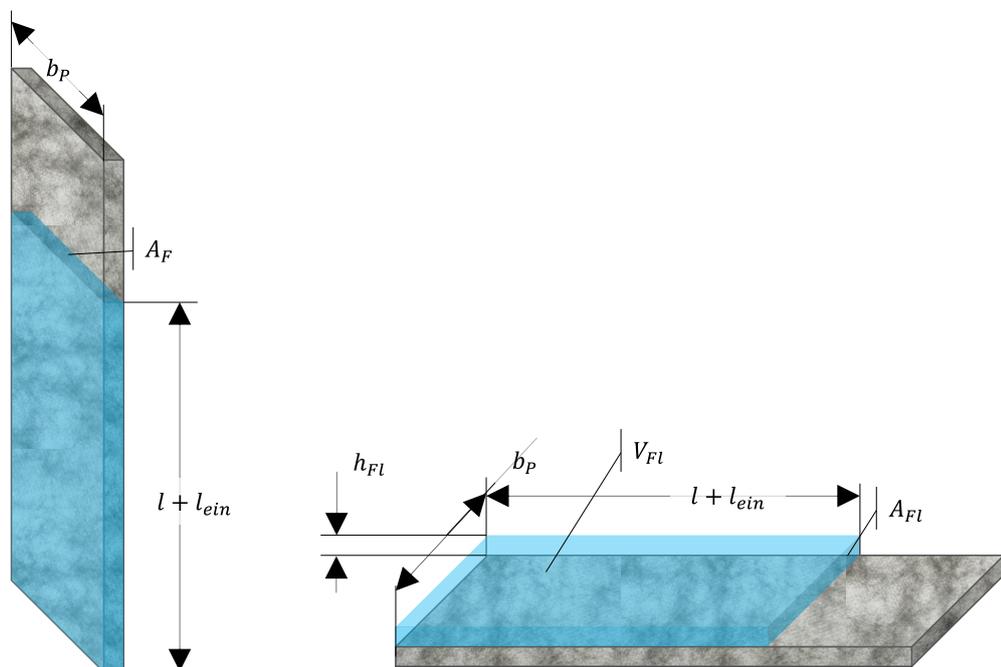
Masse, unbenetzt	$m_{unbenetzt}$	[kg]
Breite	b_P	[m]

2. Das Prisma wird *nach dem Flüssigkeitseinzug* über die Einzugslänge $l + l_{ein}$ gewogen. Es ergibt sich folgender Wert:

Masse, benetzt	$m_{benetzt}$	[kg]
----------------	---------------	------

Das eingezogene Flüssigkeitsvolumen V_{Fl} ergibt sich aus der Differenz der Massen im benetzten und unbenetzten Zustand sowie der Flüssigkeitsdichte:

Eingezogenes Flüssigkeitsvolumen
$$V_{Fl} = \frac{m_{benetzt} - m_{unbenetzt}}{\rho} \quad [m^3] \quad (57)$$



a) Stehender Prüfling mit eingezogenem Flüssigkeitsvolumen.

b) Prüfling mit gedanklich auf diesem „liegender“ Flüssigkeit.

Abbildung 32: Skizze des in einen Prüfling eingezogenen Flüssigkeitsvolumens.

Mithilfe von V_{ein} lässt sich nun die benetzte Querschnittsfläche $A_F l$ abschätzen. Diese ergibt sich aus der Masse der eingezogenen Flüssigkeit, deren Dichte ρ sowie deren Einzugslänge $l + l_{ein}$ zu:

$$\text{Benetzte Querschnittsfläche} \quad A_F = \frac{V_{Fl}}{l + l_{ein}} = \frac{m_{benetzt} - m_{unbenetzt}}{\rho \cdot (l + l_{ein})} \quad [\text{m}^2] \quad (58)$$

Da die Breite b_P der benetzten Querschnittsfläche A_{Fl} bekannt ist, können wir für den liegenden Prüfling die Höhe der Flüssigkeitsbenetzung h_{Fl} berechnen. Hierzu „legen“ wir die Flüssigkeit gedanklich auf den Prüfling (Abbildung 32 b). Wir erhalten dann mit der Prüflingsbreite b_P als Divisor die Höhe der Flüssigkeitsbenetzung h_{Fl} :

$$\text{Höhe der Flüssigkeitsbenetzung} \quad h_{Fl} = \frac{A_{Fl}}{b_P} \quad [\text{m}] \quad (59)$$

Wenn nun die Höhe der Flüssigkeitsbenetzung h_{Fl} in [mm] angegeben wird, entspricht dieser Wert dann der kapillaren Flüssigkeitsaufnahme in [l/m²]. Durch Vergleich mit der ermittelten Flächenmasse des Prüflings kann dieser Wert dann als Maß für die kapillare Absorptionsfähigkeit herangezogen werden.

Zu dieser Vorgehensweise ist anzumerken, dass auch die durch Quelleffekte direkt von den Textilfasern aufgenommene Flüssigkeitsmenge mit charakterisiert wird. Wie üblich fallen Streuungen bei größeren Prüflingen deutlich geringer aus.

Verdunstung

Das nun betrachtete – poröse – Prisma hat eine offene Oberfläche, aus der Flüssigkeit verdunsten kann. Für die Massenabnahme der Flüssigkeit im Behälter gibt es beim kapillaren Flüssigkeitseinzug folgende drei Ströme:

- Kapillarer Flüssigkeitseinzug in das poröse Prisma \dot{m}_{Einzug}
- Verdunstung auf der durch den kapillaren Flüssigkeitseinzug benetzten Fläche des porösen Prismas $\dot{m}_{Verd,P}$
- Verdunstung auf der Flüssigkeitsoberfläche $\dot{m}_{Verd,Fl}$

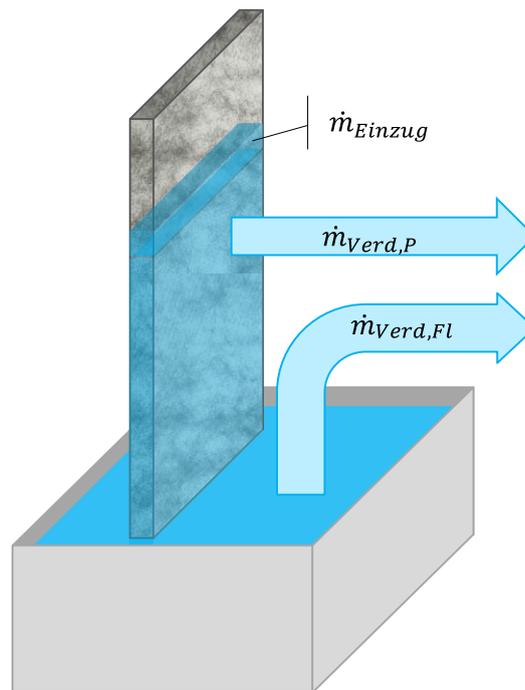


Abbildung 33: Massenströme durch Verdunstung.

Damit ergibt sich folgende Bilanzgleichung⁷⁸ für die Abnahme der Masse der Flüssigkeit im Behälter Δm_{Fl} :

$$\Delta m_{Fl} = \Delta m_{Einzug} + \Delta m_{Verd,P} + \Delta m_{Verd,Fl} \quad [\text{kg/s}] \quad (60)$$

⁷⁸ Da elektronische Waage zeitdiskrete Massenwerte liefern, werden die Massenströme nun als Differenzgleichung formuliert. Um Streuungen der Messwerte möglichst klein zu halten, ist es sinnvoll, die Messintervalle hinreichend groß zu wählen, z.B. so, dass die ersten 50 % des Flüssigkeitseinzugs in 10 Schritten aufgelöst werden.

Am Einfachsten lässt sich dabei die Verdunstung über der Flüssigkeitsoberfläche $\Delta m_{\text{Verd,Fl}}$ bestimmen: hierzu wird einfach Δm_{Fl} ohne den hinein gehängten Prüfling ermittelt. Die anderen beiden Massenströme lassen sich ausgehend von (60) unter Einbeziehung der kapillar einziehenden Flüssigkeitsfront beschreiben:

$$\Delta m_{\text{Fl}} = \Delta m_{\text{Einzug}} + \Delta m_{\text{Verd,P}} + \Delta m_{\text{Verd,Fl}} \quad [\text{kg/s}]$$

$$\Delta m_{\text{Fl}} = \Delta l_{\text{Einzug}} \cdot A_{\text{benetzt}} \cdot \rho_{\text{Fl}} + \Delta m_{\text{Verd,P,rel}} \sum_{t=t_0}^{t_n} \Delta l_{\text{Einzug}} + \Delta m_{\text{Verd,Fl}} \quad [\text{kg/s}] \quad (61)$$

Mittels Parameteridentifikation durch Minimierung der Residuen zu einer gegebenen Zeitreihe können dabei Werte für folgende Parameter bestimmt werden:

- Benetzbare Querschnittsfläche des Prismas A_{benetzt} [m²]
- Relative Verdunstung auf dem Prisma $\Delta m_{\text{Verd,P,rel}}$ [kg/s/m]
- Verdunstung auf der Flüssigkeitsoberfläche $\Delta m_{\text{Verd,Fl}}$ [kg/s]

Für jeden Zeitschritt zu variierende Vorgabewerte sind dabei:

- Der Einzugsweg im aktuellen Zeitintervall Δl_{Einzug} [m]
- Der kumulierte bisherige Einzugsweg $\sum_{t=t_0}^{t_n} \Delta l_{\text{Einzug}}$ [m]

Die Konstante ρ_{Fl} ist dabei die Dichte der Flüssigkeit.

Die folgende Abbildung zeigt beispielhaft die Flüssigkeitsverluste aus einem Behälter durch den Flüssigkeitseinzug in ein hinein hängendes Vlies sowie durch Verdunstung auf dem Vlies und auf der Flüssigkeitsoberfläche. Der Wasserverlust wurde über eine Waage unterhalb des Flüssigkeitsbehälters erfasst.

Folgende Parameter wurden identifiziert:

- Aus der Zeitreihe zur Steighöhe:
 - Max. Steighöhe $h_{\text{max}} = 187$ [mm]
 - Geschwindigkeitskonstante $v = 0,403$ [mm/s]
 - Washburn-Kapillarkonstante $c = h_{\text{max}} \cdot v = 75,42$ [mm²/s]
- Aus einer vorab aufgenommenen Zeitreihe zum verdunstungsbedingten Gewichtsverlust ohne Vlies:
 - Verdunstung auf Wasseroberfläche $\Delta m_{\text{Verd,Fl}} = 0,126$ [mg/s]
- Aus der der Zeitreihe zum Gewichtsverlust während des Flüssigkeitseinzugs:
 - Verdunstung auf Textil pro mm $\Delta m_{\text{Verd,P,rel}} = 2,36$ [µg/s/mm]
 - Flüssigkeitsaufnahme im Textil $A_{\text{benetzt}} \cdot \rho_{\text{Fl}} = 8,95$ [mg/mm]

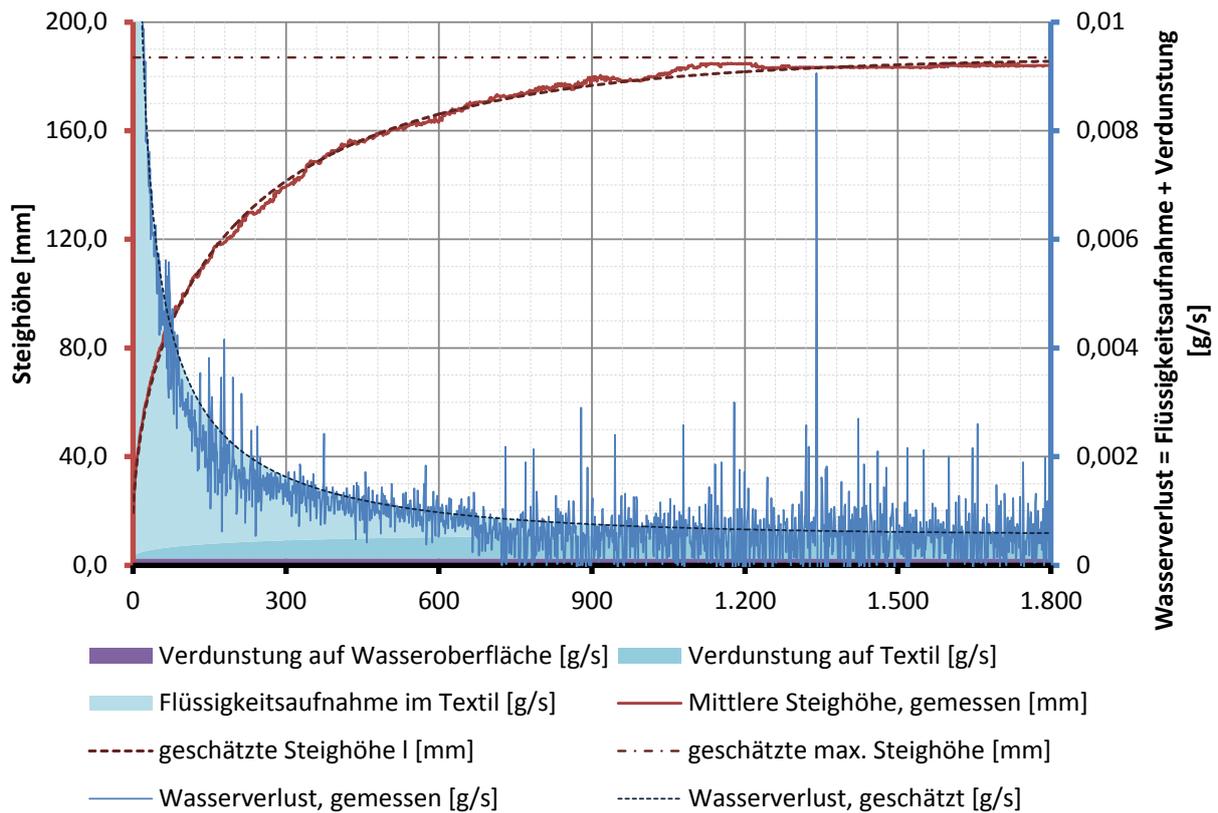


Abbildung 34: Beispiel für Wasserverluste beim Eintauchen eines Vlieses in eine Flüssigkeit⁷⁹.

Interessant sind an diesem Beispiel folgende Aspekte:

- Der Zeitreihe zum Gewichtsverlust Δm_{F1} wurde durch Differenzenbildung aus der Zeitreihe der Flüssigkeitsmasse im Behälter ermittelt. Da die Zeitschrittweite dabei 1 [s] beträgt, ist diese zeitreihe vergleichsweise „unruhig“ und streut stark. Ein vergleichsweise gutes Ergebnis der Parameteridentifikation wurde trotz der starken Streuungen erzielt. Sicherlich ist es sinnvoll, die Zeitschrittweite zum Charakterisieren der Massenströme deutlich zu verlängern.
- Die Verdunstung auf dem Textil ist um ein Vielfaches stärker als auf der Flüssigkeitsoberfläche.

Folgende Aspekte sind beim Aufnehmen von Zeitreihen des Flüssigkeitsverlusts wichtig:

- Die Klimabedingungen müssen bekannt und konstant sein. Das Charakterisierungsergebnis bezieht sich auf diese Klimabedingungen.
- Sensoren zum Bestimmen von Massen sind im zum Charakterisieren der Verdunstung nötigen Arbeitsbereich sehr erschütterungsempfindlich. Diese müssen bestmöglich ausgeschlossen werden.
- Der Sensor zum Aufnehmen einer Zeitreihe der abnehmenden Flüssigkeitsmasse im Behälter muss hinreichend fein auflösen.

⁷⁹ Die Zeitreihen wurden freundlicherweise von Lenzing Instruments zur Verfügung gestellt.

5.1.4.5 Senkrecht stehender Ausschnitt aus einem textilen Fasergebilde

Nach wie vor nicht berücksichtigt werden im Ersatzmodell des vorherigen Abschnitts folgende Aspekte:

- (a) Textile Fasergebilde können in mesoskopischer Dimension eine leicht inhomogene Strukturierung aufweisen. Dies äußert sich in einem inhomogenen Aufbau, z.B. durch lokale Dichteschwankungen, die sich z.B. in Form von Mäandereffekten äußern.
- (b) Textile Fasergebilde können in Maschinenrichtung (MD) und quer zur Maschinenrichtung (CD) unterschiedliche Dichten und Faserausrichtungen aufweisen.
- (c) Textile Fasergebilde – insbesondere Vliesstrukturen – können aus unterschiedlichen Lagen aufgebaut sein. So können beispielsweise Flüssigkeiten in dichteren Zonen deutlich höher und schneller steigen als in dünneren Zonen.
- (d) Es ist möglich, dass sich die Abmessungen des textilen Fasergebildes bei der Flüssigkeitsaufnahme ändern. Dies kann mithin auch eine geänderte Dichte bedingen und damit den Kapillareffekt beeinflussen.
- (e) Sollten Fasern in nennenswerter Menge Flüssigkeit absorbieren, quellen diese Fasern auf. Die hierdurch reduzierte benetzbare Querschnittfläche bei gleichzeitig vergrößerter benetzbarer Oberfläche verstärken den Kapillareffekt.

Damit sind für textile Fasergebilde insbesondere statistische Beschreibungen der zu erwartenden Streuungen der Merkmale wichtig. Ebenso sind gegebenenfalls getrennte Analysen in Maschinen- und Querrichtung vorzunehmen. Sollte die Flüssigkeit in verschiedenen Lagen des textilen Fasergebildes unterschiedlich stark steigen, kann dies beim laufenden Erfassen der Steighöhe mittels eines bildgebenden Verfahrens mit dokumentiert werden.

5.1.5 Anwendungsszenarien zur Kapillarkinetik mit textilen Halbzeugen

Der Kapillareffekt beschreibt den Einzug einer Flüssigkeitsfront in einen porösen Körper – wie Textilstrukturen – bzw. in ein poröses schüttbares Material. Wie in den vorherigen Abschnitten mit erläutert, lässt sich dabei auch das dabei einziehende Flüssigkeitsvolumen charakterisieren. Dabei entsteht eine über den Flüssigkeitsspiegel hinausgehende Flüssigkeitssäule, die letztlich von der Grenzflächenenergie zwischen Flüssigkeit und Festkörper und der Oberflächenspannung der Flüssigkeit getrieben wird.

So lassen sich folgende direkte Anwendungsszenarien des Kapillareffekts beinhalten so

- das flächige Aufnehmen, Binden, Verdunsten und Verteilen von Flüssigkeiten, aber auch
- die automatische Bildung von Kapillarsystemen zum Flüssigkeitsabfluss über Höhen, die kleiner als h_{max} sind

Mithilfe der beim Charakterisieren des Kapillareffekts gewonnenen Parameter h_{max} und v lassen sich durch vergleichende Messungen mit verschiedenen Flüssigkeiten auch die in den genannten Parametern beinhalteten Konstanten identifizieren. Dies ermöglicht so z.B.

- die Kontaktwinkelbestimmung an hydrophilen Fasergebilden⁸⁰,
- Aussagen über die adhäsionswirksamen Oberflächen in einem textilen Fasergebilde und
- Kenntnisse über die benetzbare Querschnittsfläche und damit das Raumvolumen in einer Textilstruktur.

⁸⁰ Da die Aufnahme von Zeitreihen im Steighöhenversuch durchaus etwas länger dauern kann, ist die Kontaktwinkelbestimmung via den Kapillareffekt nur für solche Anwendungsfälle attraktiv, wo es um Aussagen zu größeren textilen, stark hydrophilen Materialproben geht.

5.2 Methode zur Parameteridentifikation des Kapillareffekts textiler Fasergebilde

Dieser Abschnitt beschreibt die Methode zur Parameteridentifikation des Kapillareffekts. Diese liefert für gegebene Zeitreihen die charakteristischen Parameter h_{max} und v sowie l_u .

Nach der Methodenentwicklung wird der Demonstrator zum Erfassen des kapillaren Flüssigkeitseinzugs beschrieben. Die Methodvalidierung schließt diesen Abschnitt zusammen mit Szenarioanalysen und einem Ausblick auf mögliche Einsatzszenarien ab.

5.2.1 Methodenentwicklung

Ausgehend von den allgemeinen Anforderungen an die Methode wird anschließend die allgemeine Vorgehensweise beschrieben. Daraufhin werden die anhand des entwickelten Demonstrators identifizierten Anforderungen an die Messeinrichtung erläutert, gefolgt von den Anforderungen an die Erfassung der Zeitreihen zum kapillaren Flüssigkeitseinzug. Es folgt die Entwicklung des Verfahrens zur Parameteridentifikation.

5.2.1.1 Allgemeine Vorgehensweise

Die folgende Abbildung 35 zeigt die allgemeine Vorgehensweise zur Parameteridentifikation des kapillaren Flüssigkeitseinzugs in textile Fasergebilde. Die dargestellte Vorgehensweise ordnet die einzelnen Schritte bewusst nicht Computersoftware, Rollen bzw. Personen sowie der Messeinrichtung zu, da jeweils verschiedene Realisierungsverfahren möglich sind.

So bieten sich für die Methode zur Parameteridentifikation folgende Realisierungsformen an:

- (a) Händische Ausführung, z.B. in Excel oder LibreOffice Calc.
- (b) Abbildung und Ausführung in einem Computer-Algebra-System.
- (c) Programmtechnische Realisierung in einer Programmiersprache zwecks automatischer Ausführung.

Auch das Auslesen der Zeitreihe zum Flüssigkeitseinzug kann auf verschiedene Art und Weise realisiert werden:

- (a) Wie bisher durch laufende Beobachtung⁸¹ nach DIN 53924.
- (b) Händisches Auslesen der Zeitreihe aus aufgenommenen Fotos bzw. aus einem Film.
- (c) Ermittlung der Zeitreihe mittels Bilderkennung aus Fotos bzw. einem Film.

⁸¹ Da mittlerweile Kameras und Speicherkapazität zu geringen Kosten verfügbar sind, ist dies aufgrund subjektiver Einflussfaktoren und fehlender nicht mehr wirklich eine gute Option.

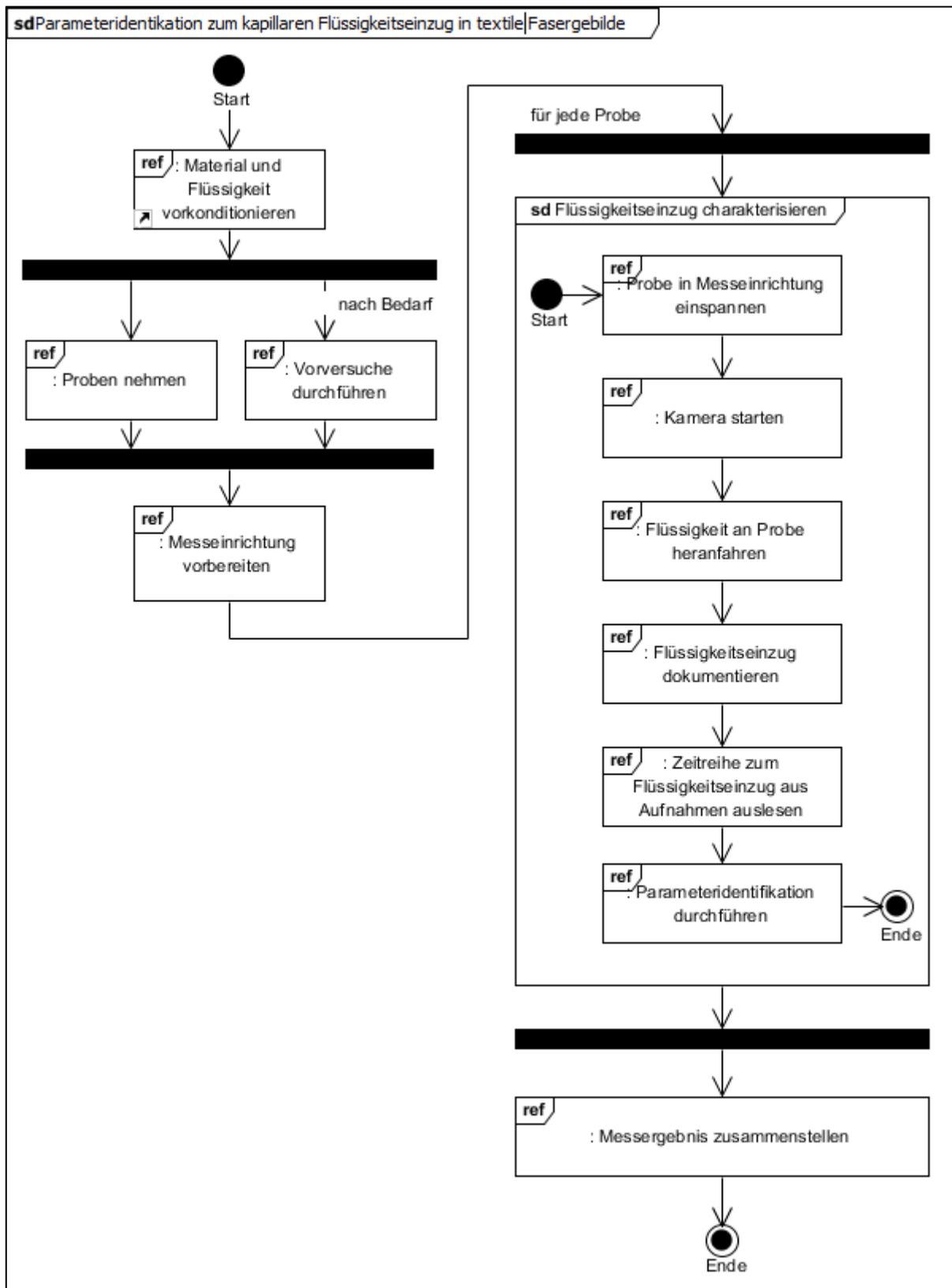


Abbildung 35: UML-Interaktionsübersicht-Diagramm des Prozesses zur Parameteridentifikation des kapillaren Flüssigkeitseinzugs in textile Fasergebilde.

Auch die Zusammenführung des Messergebnisses kann teilautomatisiert werden – dies muss aber nicht zwangsweise erfolgen.

5.2.1.2 Messeinrichtung

Entwickelter Demonstrator

Im Rahmen des Projektes wurde eine neue Messeinrichtung zur Charakterisierung des Kapillareffektes in textilen Gebilden entwickelt. Diese ist in Abbildung 36 dargestellt. Im Folgenden werden zunächst die Anforderungen an die Messeinrichtung und dann der gebaute und eingesetzte Demonstrator dargestellt.

Anforderungen zu Projektbeginn

Folgende Anforderungen an die Messeinrichtung wurden zu Projektbeginn identifiziert:

- i. Die Einzugsrichtung der Flüssigkeit wird durch Einspannen des Textils in einen Rahmen festgelegt. Das Textil sollte dabei so wenig wie möglich Kontakt zu dem Rahmen haben, da Kontaktflächen einen eigenen Kapillareffekt ausbilden und somit den Messvorgang beeinträchtigen können.
- ii. Es sollen Messungen mit verschiedenen Neigungswinkeln des Textils möglich sein. Deshalb sollte der Rahmen dreh- und arretierbar sein.
- iii. Dort wo die Textilstruktur in die Flüssigkeit hängt, sollte die Fixierung des Textils und dessen Kapillarwirkung möglichst wenig beeinflussen.
- iv. Es sollen zwei Messgrößen laufend erfasst werden können: der Verlauf der Einzugsfront im Textil und optional die vom Textil aufgenommene Flüssigkeitsmenge.
- v. Eine Kamera filmt den Flüssigkeitseinzug in Kapillarrichtung.

Entwickelter Demonstrator

Der Rahmen zur Aufnahme des Textils wurde so ausgelegt, dass eine Probe mit einer Größe von bis zu 50 × 600 mm eingespannt werden kann. Das Textil wird am oberen, d.h. am flüssigkeitsfernen Ende fest eingeklemmt. Am unteren Ende, an dem es in die Flüssigkeit eintaucht, wird das Textil über einen Zylinder mit einem Durchmesser von 15 mm geführt. Dies ist vor allem dann relevant, wenn das Textil schräg oder waagrecht gehalten werden soll. Die Rundung führt dazu, dass das Textil nicht geknickt wird. Der Zylinder kann auch durch einen Größeren ersetzt werden, falls nötig. Der Teil des Textils, der in die Flüssigkeit eintaucht, wird am untersten Punkt mit Magneten beschwert. Dies vermeidet eine Beeinträchtigung des Kapillareffektes durch Klemmen.

Der Rahmen für das Textil ist mittig und drehbar in ein größeres Ständergestell eingebracht. Der Rahmen kann frei gedreht werden; dies wird in Abbildung 37 illustriert. Über einen Bolzen und einem im Winkelabstand von 15° vorgebohrten Lochrad lassen sich verschiedene Neigungswinkel realisieren.

Die Kamera ist in einer speziellen Halterung so angebracht, dass sie senkrecht auf den Rahmen mit der Probe schaut. Die Kamerahalterung wird bei einer Drehung des Probenrahmens mit geschwenkt. Abbildung 38 zeigt die Sicht der Kamera auf die Probe.

Der Flüssigkeitsbehälter wird zu Messbeginn über einen Hubtisch von unten an die textile Probe herangefahren. Falls auch die einziehende Flüssigkeitsmenge mit erfasst werden soll, wird der Flüssigkeitsbehälter zusätzlich auf eine Waage gestellt. Der Hubtisch ist frei verschiebbar.

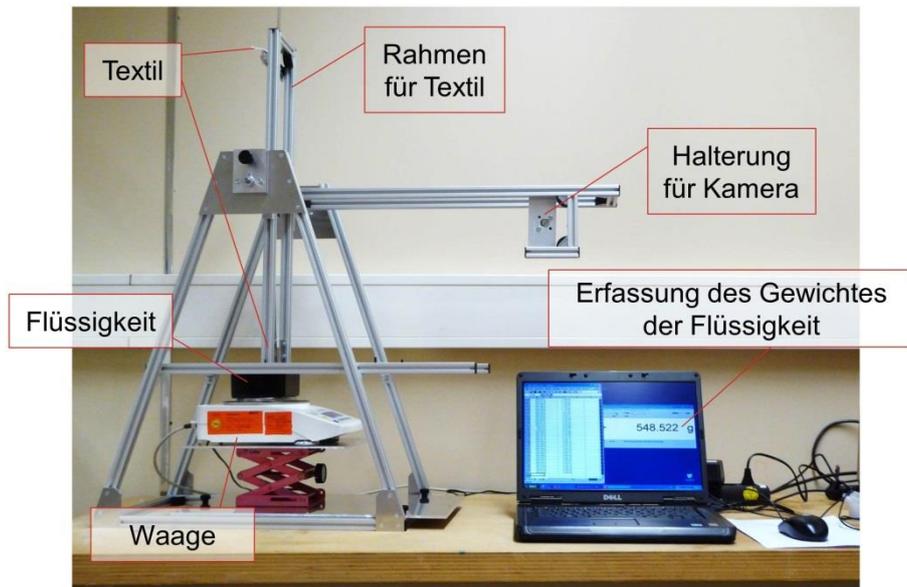


Abbildung 36: Wesentliche Bestandteile der Messeinrichtung zur Erfassung des kapillaren Flüssigkeitseinzugs.

Da die Entwicklung eines Algorithmus zur Identifikation der Einzugsfront-Position nicht Gegenstand des Projektes war, erfolgt die Ermittlung der Einzugsposition hier noch manuell. Hierzu wird zunächst der Flüssigkeitseinzug auf Video aufgenommen. Die Zeitreihe zur Einzugsfront-Position wird später per Hand ermittelt.

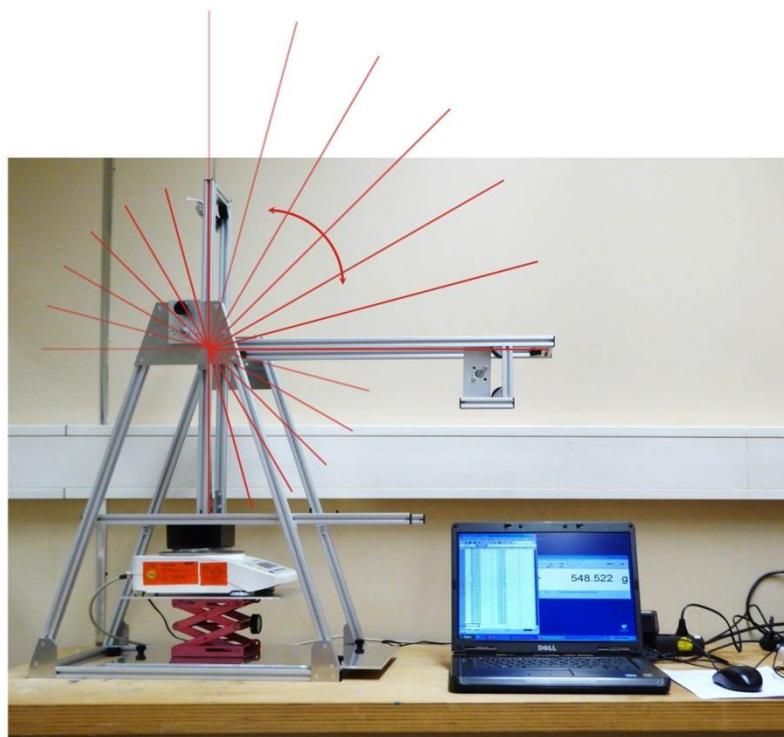


Abbildung 37: Der Neigungswinkel zum Charakterisieren des Flüssigkeitseinzugs ist frei wählbar.

Die Einzugsfront-Position kann über ein parallel zur Probe verlaufendes Lineal abgelesen werden.

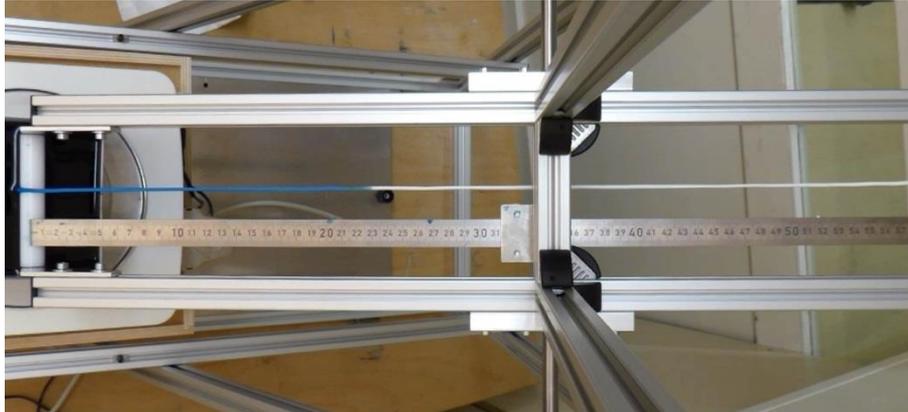


Abbildung 38: Sicht der Kamera auf die Probe.

Soll auch die aufgenommene Flüssigkeitsmenge mit dokumentiert werden, wird eine Waage unter den Flüssigkeitsbehälter auf den Hubtisch gestellt. Das Gewicht des Flüssigkeitsbehälters wird mit einem Rechner erfasst. Die aufgenommene Flüssigkeitsmenge ergibt sich aus der Abnahme des Gewichts des Flüssigkeitsbehälters. Allerdings muss dabei noch die Verdunstung aus dem Behälter und vom Textil berücksichtigt werden.

Anforderungen mit den Erfahrungen aus der Validierungsphase

Aus Erfahrungen beim Charakterisieren von verschiedenen Proben in der Validierungsphase und Diskussionen mit Vertretern von Unternehmen im projektbegleitenden Ausschuss (PA) haben sich folgende Anforderungen an die Messeinrichtung ergeben⁸²:

- a. Zum Erfassen der Fließfrontgeschwindigkeit in Kapillarrichtung wird eine Probe in eine Flüssigkeit mit einem definierten Neigungswinkel in einer Dimension⁸³ zum Flüssigkeitsspiegel eingetaucht. Anschließend wird der Flüssigkeitseinzug durch den Kapillareffekt über den Flüssigkeitsspiegel hinaus mittels Foto- oder Videotechnik über die Zeit erfasst.
- b. Es können bei Bedarf auch mehrere Proben parallel in der Messeinrichtung eingespannt und vermessen werden.
- c. Lineale stehen links und rechts der Probe⁸⁴. Diese dienen zum Ablesen des Einzugs der Flüssigkeitsfront und des –gegebenenfalls – sinkenden Flüssigkeitspegels. Die Lineale haben ca. 5-10 mm Abstand zur Probe. Die Lineale stehen parallel zueinander und zur Probe, zwischen den einzelnen Linealen besteht kein Versatz in Skalenrichtung. Die Lineale sollten kalibriert und mittels Fotos bzw. Videotechnik gut ablesbar sein⁸⁵. Da der Flüssigkeitspegel über die Versuchsdauer leicht sinken kann, soll-

⁸² Die aufgeführten Anforderungen gehen aufgrund verschiedener Erfahrungen in einigen Aspekten bewusst über das Design des beschriebenen Demonstrators hinaus.

⁸³ Der Neigungswinkel in die andere Dimension ist immer 90°, die Probe steht also rechtwinklig zu Flüssigkeit.

⁸⁴ Um Verzerrungen der Kameraoptik ausgleichen zu können, sind zwei Lineale nötig.

⁸⁵ Spiegelungen auf Metalllinealen können beispielsweise die Ablesegenauigkeit beeinträchtigen.

ten die Lineale mit ihrer Skala zu Versuchsbeginn hinreichend weit in die Flüssigkeit eintauchen, z.B. 10 mm.

- d. Die Flüssigkeit wird in einem durchsichtigen Behälter auf einem höhenverstellbaren Laborständer bzw. einem Hubtisch unter der Probe bereitgestellt. Die unteren Enden der Lineale und die (ggf. umgelenkte) Probe tauchen während des Versuchs in die Flüssigkeit ein.
- e. Die Probe wird an ihrem oberen Ende über ihre gesamte Breite fest eingespannt. An ihrem unteren Ende wird die Probe über ihre gesamte Breite mit einem Gewicht beschwert⁸⁶. Dies ist so gewählt, dass die Probe zwar straff hängt, aber nicht gestreckt wird. Beim schrägen Flüssigkeitseinzug wird die Probe vor ihrem unteren Ende durch einen Umlenkstab gestützt, das untere – gewichtsbeschwerte – Ende hängt frei. Der Umlenkstab taucht während des Versuchs in die Flüssigkeit ein, die Probe muss unter diesem frei in der Flüssigkeit hängen.
- f. Der Flüssigkeitseinzug wird mit einer Foto- oder Videokamera aufgenommen. Die Foto- oder Videokamera filmt die Probe von vorne und senkrecht zum Flüssigkeitseinzug. Der Flüssigkeitspegel an den Linealen muss in den Foto- oder Videoaufnahmen sichtbar sein. Die Lineale müssen in der Aufnahme auf ihrer gesamten Länge klar ablesbar sein. Weiter muss die Foto- oder Videokamera die maximal erwartete Einzugslänge sowie einen Sicherheitszuschlag von 10-20 % auf diese erfassen können.
- g. Während der Aufnahme der Messreihe werden die Probe und die Lineale so beleuchtet, dass der Flüssigkeitseinzug klar abzulesen ist. Die Flüssigkeit kann mit einem Farbstoff eingefärbt werden. Dieser darf weder den Kontaktwinkel zwischen Flüssigkeit und Material, noch die Oberflächenspannung und Viskosität der Flüssigkeit beeinflussen. Dies ist gegebenenfalls anhand eines vergleichenden Vorversuchs des Flüssigkeitseinzugs mit und ohne Farbstoff zu klären: die Einzugsfront muss über die Zeit gleich verlaufen.
- h. Sollten Verdunstungseffekte relevant, so sind diese in geeigneter Weise auszuschließen.
- i. Es können mehrere Proben parallel nebeneinander vermessen werden. Zwischen diesen ist jeweils ein Abstand von 5-10mm einzuhalten.
- j. Kamera und Beleuchtung dürfen die Messeinrichtung nicht erwärmen.

Für Fotokameras gelten ergänzend folgende Anforderungen:

- a. Die Kamera verfügt über eine hinreichend genaue interne Uhr.
- b. Die Kamera wird vor Beginn der Messreihe auf das aktuelle Datum und die aktuelle Uhrzeit gestellt.
- c. Die Kamera blendet in alle Aufnahmen die aktuelle Uhrzeit ein bzw. speichert diese in den Metadaten der Bilddatei.
- d. Die Kamera kann über eine Serienbild-Funktion – die z.B. alle 10 sec. Ein Bild aufnimmt – verfügen.

⁸⁶ Im Projekt wurden Magnete verwendet.

5.2.1.3 Wesentliche Schritte der Vorgehensweise

Messeinrichtung, Material und Flüssigkeit vorkonditionieren

Ziel der Vorkonditionierung ist, das Material sowie die Flüssigkeit in den für die messtechnische Charakterisierung benötigten, definierten und nachstellbaren Zustand zu bringen. Dies sind im Allgemeinen die wesentlichen Laborumgebungsbedingungen, z.B. eine Temperatur von 22 ± 2 °C und eine Luftfeuchte von z. B. 50 ± 5 %.

Da speziell die Temperatur über die Flüssigkeitseigenschaften einen starken Einfluss auf den kapillaren Flüssigkeitseinzug hat und gerade auf Naturprodukten basierende Materialien deutlich Feuchte aufnehmen können, kommt der Vorkonditionierung eine wichtige Bedeutung zu.

Proben nehmen

Bei den Proben kann es sich um textile Fasergebilde wie Gewebe, Gestricke, Vliese, etc., aber auch um Garne und ähnliche Strukturen wie Filamente, Dochte, Seile, etc. handeln⁸⁷.

Textile Fasergebilde können produktionsbedingt in Maschinenrichtung und quer zu dieser verschieden ausgeprägte Eigenschaften aufweisen. Proben müssen daher ggf. in verschiedener Richtung messtechnisch charakterisiert werden. Weiter kann es zu lokalen Dichteschwankungen kommen. Diese führen beim kapillaren Flüssigkeitseinzug zu einer mäandierend aufsteigenden Flüssigkeitsfront, ebenso ist ggf. der Einzug auf der Ober- und Unterseite des textilen Flächengebildes separat zu charakterisieren.

Bei der Probenvorbereitung ist Folgendes zu beachten:

- a. Die Probe ist mit den relevanten Eigenschaften (Maschinen- bzw. Querrichtung, Vorder- bzw., Rückseite, Ort der Probenahme, etc.) rückverfolgbar und verwechslungssicher gekennzeichnet.
- b. Die Probe wird nach einem den Materialeigenschaften gerecht werdenden Probenahmeplan entnommen.
- c. Die Probe ist vorkonditioniert. Sie hat Umgebungstemperatur.
- d. Die Probe wird rechteckig vorgeschritten. Die Probenbreite wird so gewählt, dass ggf. auftretende Mäandereffekte sichtbar werden, bei textilen Flächen also mindestens 5 cm⁸⁸. Die Probenlänge wird so gewählt, dass die Probe mindestens 20 mm in die Flüssigkeit eintaucht und die voraussichtliche maximale Steighöhe um 20-25% überschritten wird.

Für ein statistisch abgesichertes Messergebnis ist es wichtig, dass von jedem Probentyp mindestens 5 Exemplare⁸⁹ zur Verfügung stehen. Weitere Exemplare können als Reserve bzw. für Vorversuche nötig sein.

⁸⁷ Generell sind jedwede Art von porösen Materialien in Prismenform möglich.

⁸⁸ Natürlich sind hier auch geringere Probenbreiten möglich. Auftretende Mäandereffekte können dann aber beim Ablesen zu Schwierigkeiten führen, da eine Mittelung der Fließfront-Position schwerer fällt.

⁸⁹ Standardabweichungen können zwar schon mit 3 eingehenden Werten berechnet werden, allerdings können dann Ausreißer nur sehr schlecht als solche identifiziert werden. Auch ist das Konfidenzintervall des Mittelwerts dann sehr breit.

Vorversuche durchführen

Ziel der Vorversuche ist, Anhaltspunkte über den kapillaren Flüssigkeitseinzug in eine vorgegebene Material-Flüssigkeitskombination zu erhalten. Dies betrifft insbesondere folgende Punkte:

- a. Voraussichtliche Einzugslänge.
- b. Einzugsgeschwindigkeit in der Startphase.
- c. Einzugsverhalten auf der Vorder- und Rückseite bzw. in den inneren Lagen.
- d. Möglichkeit von Mäandereffekten.
- e. Gerade bei feinen Kapillaren bzw. großen Steighöhen können Verdunstungseffekte den kapillaren Flüssigkeitseinzug vorzeitig stoppen lassen. Dies ist dann auszuschließen.
- f. Das Material kann eventuell während des Flüssigkeitseinzugs seine Form ändern.
- g. Der gewählte Farbstoff für die Flüssigkeit muss über die gesamte Steighöhe hinweg hinreichend gut sichtbar sein. Weiter darf er weder die Oberflächenspannung noch den Kontaktwinkel, noch die dynamische Viskosität der Flüssigkeit beeinflussen.
- h. Eventuell muss noch ein spezieller Behälter für die Flüssigkeit ausgewählt werden.

Messeinrichtung vorbereiten

Dieser Schritt beinhaltet im Wesentlichen

- a. Das Einfüllen der gefärbten Flüssigkeit in den Behälter und
- b. die Inbetriebnahme der Kamera sowie ggf. der Waage.

Falls nötig, kann die Messeinrichtung noch passend geneigt werden.

Flüssigkeitseinzug charakterisieren

Dieser Vorgang wird für jede Probe wiederholt.

Zuerst wird Probe in Messeinrichtung eingebracht:

- a. Die Probe wird oben z.B. mittels Klebeband an der Messeinrichtung befestigt bzw. dort eingespannt. Sie muss über ihre komplette Breite gerade eingespannt sein.
- b. Die Probe wird unten z.B. mittels Magneten so beschwert, dass sie ohne verziehende Belastung straff und über die komplette Breite gerade hängt.

Folgende Punkte sind zu dokumentieren:

- a. Die Probenbezeichnung und -dimensionen des textilen Fasergebildes.
- b. Datum und Zeitpunkt des Versuchsbeginns, Versuchsort.
- c. Der Durchführende.
- d. Lufttemperatur und -feuchte sowie deren Messgenauigkeit. Gegebenenfalls besondere getroffene Maßnahmen zum Gewährleisten von Temperatur und Feuchte.
- e. Die rückverfolgbare Probenbezeichnung der Prüfflüssigkeit sowie deren Charakterisierung (Dichte, Temperatur, Dynamische Viskosität, Oberflächenspannung, Menge und Typ des beigemischten Farbstoffs) bei der vorliegenden Lufttemperatur.
- f. Der eingestellte Neigungswinkel der Probe zum Flüssigkeitsspiegel.
- g. Wie die Probe beschwert wurde: welche Gewichte zum Einsatz kamen und welche Eintauchtiefe zur Flüssigkeitsoberfläche gewählt wurde.

- h. Das Gewicht der Probe mit hinreichender Genauigkeit, sowohl mit als auch ohne Befestigung und straffende Beschwerung.

Nun wird Kamera gestartet. Sie dokumentiert den Einzugsvorgang entweder über eine Bildserie oder als Video.

Falls eine Waage mit Datenlogger eingesetzt wird, wird auch diese in Betrieb genommen.

Nun wird die Flüssigkeit vorsichtig von unten an die Probe herangefahren. Die Probe sollte 20 mm in die Flüssigkeit eintauchen, die Lineale 10 mm⁹⁰.

Der Flüssigkeitseinzug wird nun von der Kamera dokumentiert. Dies kann abgebrochen werden, wenn die Flüssigkeit hinreichend weit in das Material eingedrungen ist. Sollte es dabei zu lokalen Unsicherheiten kommen, sollte die Messung tendenziell länger laufen.

Anschließend wird die Zeitreihe zum Flüssigkeitseinzug aus den Aufnahmen ausgelesen. Dies kann entweder mittels Bilderkennung bzw. manuell erfolgen. Die Zeitreihe sollte folgende Spalten haben:

- | | |
|--|------------|
| a. Zeitpunkt seit Versuchsbeginn | [hh:mm:ss] |
| b. Abgelesene Einzugslänge in Kapillarrichtung $l_{abgelesen}$ | [mm] |
| c. Niveau des Flüssigkeitsspiegels ⁹¹ l_{fl} | [mm] |

Wenn das sinkende Niveau des Flüssigkeitsspiegels mit dokumentiert wird, kann die korrigierte Einzugslänge in Kapillarrichtung l_{korr} [mm] später wie folgt errechnet werden:

$$l_{korr} = l_{abgelesen} - l_{fl} \quad [mm] \quad (62)$$

Diese Korrektur korrigiert auch die Eintauchtiefe der Lineale in die Flüssigkeit.

Für eine gelungene Parameteridentifikation sind mindestens 20-30 abgelesene Werte nötig. Der zeitliche Abstand zwischen diesen kann – muss aber nicht – äquidistant sein⁹².

Anschließend können die Parameteridentifikationen durchgeführt werden. Da die Parameteridentifikation der Geschwindigkeit der kapillaren Einzugsfront zentrales Projektthema ist, wird diese ausführlich in Abschnitt 5.2.1.4 behandelt. Es bleibt daher hier noch, die Parameteridentifikation der Massenströme der einziehenden und verdunstenden Flüssigkeit zu erläutern. Dies erfolgt hier kompakt und anhand eines Beispiels, wobei nicht mit direkt mit Strömen⁹³, sondern mit der abnehmenden Flüssigkeitsmasse im Behälter gearbeitet wird.

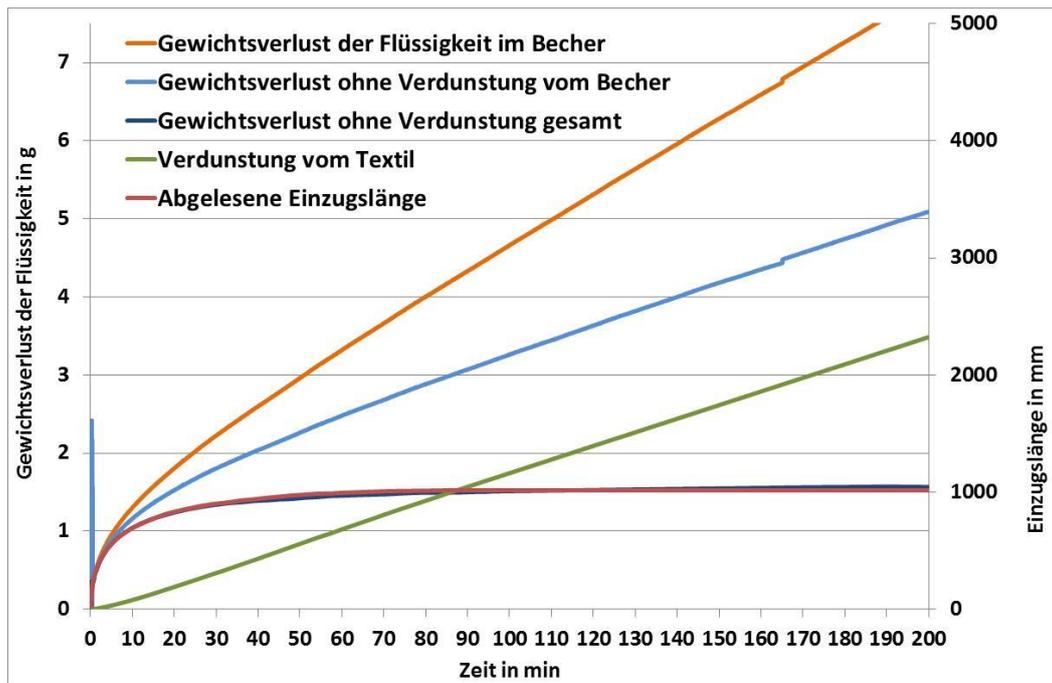
Ziel war es, die kapillar getriebene Verdunstung auf parallel eingespannten vier Textilstrukturen zu ermitteln. Im der folgenden Abbildung 39 ist die von der Kamera aufgenommene und vom Film abgelesene Einzugslänge der Flüssigkeit ins Textil in Rot dargestellt. Die einzelnen Einzugsängen der vier parallel eingespannten Textilstrukturen wurden addiert, so dass eine Gesamteinzugslänge von ca. 1.000 mm zustande kommt.

⁹⁰ Es handelt sich hierbei sicher gewählte Erfahrungswerte. Diese können natürlich entsprechend modifiziert werden.

⁹¹ Falls nötig.

⁹² Unterschiedlich lange Zeitintervalle zwischen Ablesungen könnten mittels Gewichtungsfaktoren bei der Parameteridentifikation ausgeglichen werden.

⁹³ wie in Abschnitt 5.1.4.4



Die dunkelblaue Kurve „Gewichtsverlust ohne Verdunstung gesamt“ liegt weitgehend unter der roten Kurve „Abgelesene Einzugslänge“. Klar zu erkennen ist letztlich nur die Kurve „Gewichtsverlust ohne Verdunstung vom Becher“. Deren Peak zum Zeitpunkt 0 kann ignoriert werden.

Abbildung 39: Zustandsbasierte Bilanzierung der verdunstungs- und einzugsbedingten Massenströme aus einem Becher beim kapillaren Flüssigkeitseinzug.

Die orangene Kurve gibt den mit der Waage gemessenen Gewichtsverlust des Flüssigkeitsbechers wieder. Von dieser Kurve wird zunächst die zuvor bestimmte Verdunstung aus dem Becher abgezogen, was die hellblaue Kurve ergibt. Aus der Endsteigung dieser Kurve lässt sich die Verdunstung auf den vier Textilstrukturen bestimmen, da das Textil keine weitere Flüssigkeit mehr aufnimmt. Dies ergibt dann die grüne Kurve. Die Differenz aus hellblauer und grüner Kurve ergibt dann die Flüssigkeitsmenge, die das Textil aufgenommen hat. Sie ist im Diagramm dunkelblau⁹⁴ dargestellt. Es ergibt sich eine gute Übereinstimmung mit der Einzugslänge der Flüssigkeit in das Textil.

Messergebnis zusammenstellen

Abschließend werden nun für die identifizierten Parameter, sich aus diesen ergebende Größen sowie die Modellfehler statistische Bewertungen vorgenommen. Sinnvoll sind – bei mindestens 5 Proben je Probengruppe – z. B. folgende Bewertungen:

- Mittelwert
- Median
- Spanne
- Standardabweichung
- Variationskoeffizient
- Einseitiges 95 %-Konfidenzintervall

⁹⁴ hinter der roten Kurve liegend

g. Konfidenzintervall des Mittelwerts

Ausreißer sind gegebenenfalls vorab zu identifizieren.

5.2.1.4 Methode zur Parameteridentifikation der Fließfrontgeschwindigkeit

Allgemeines Ziel der Methode zur Parameteridentifikation ist, einen Parametersatz Φ in einem vorgegebenen mathematischen Modell M so zu modifizieren, dass der Schätzfehler zwischen Vorgabewerten aus der Realität W_{real} und den vom Modell errechneten Werten W_{Modell} minimiert wird. Es gilt also, ein Minimum des Schätzfehlers einer Funktion $f(W_{Modell}\{M(\Phi)\}, W_{real})$ durch Anpassen des Parametersatzes Φ und einer anschließenden Simulation zum Ermitteln von Φ zu finden.

Das im Projekt zum Einsatz kommende mathematische Modell für die Fließfront-Geschwindigkeit (z. B. Gleichung (15)) enthält folgende zu identifizierende Parameter: die maximale Steighöhe h_{max} , die Geschwindigkeitskonstante v für den Flüssigkeitseinzug in die Kapillare und die wirksame Eintauchtiefe l_u . Damit ergibt sich der Parametersatz Φ zu:

$$\Phi = [h_{max}|v|l_u] \tag{63}$$

Das Modell $M(\Phi)$ ist das Modell für die Fließfront-Geschwindigkeit für einen vorgegebenen, konstanten Winkel α , z.B.:

$$M(\Phi): \frac{dl}{dt} = \sin(\alpha) \cdot \Phi[v] \cdot \left(\frac{\Phi[l_{max}] + \Phi[l_u]}{\Phi[l_u] + l} - 1 \right) \tag{64}$$

Die Vorgabewerte aus der Realität W_{real} sind dabei die zu bestimmten Zeitpunkten t_i abgelesenen Einzugsängen l_i :

$$W_{real} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ t_1 & l_1 \\ \vdots & \vdots \\ t_i & l_i \\ \vdots & \vdots \\ t_n & l_n \end{bmatrix} \tag{65}$$

Es ist ersichtlich, dass die Abbildung $W_{Modell}\{M(\Phi)\}$ dementsprechend durch Simulation von $M(\Phi)$ eine Matrix mit identischer Dimension von W_{real} liefern sollte, die in ihrer linken Spalte die Zeitpunkte aus W_{real} enthält und in ihrer rechten Spalte die zugehörigen simulierten Werte l_i .

Die Funktion $f(W_{Modell}\{M(\Phi)\}, W_{real})$ errechnet dann aus W_{real} und W_{Modell} einen skalaren Schätzfehler R für die Differenzen zwischen den gemessenen und simulierten Werten l_i :

$$f(W_{Modell}\{M(\Phi)\}, W_{real}) \rightarrow R \tag{66}$$

Welche Verfahren zur Fehlerminimierung nicht funktionierten

Für die Parameteridentifikation mittels **Regressionsanalyse** gilt der folgende allgemeine Ansatz:

- Zur Verfügung stehen n verschiedene Messwerte⁹⁵ y_i für vorgegebene Punkte x_i .
- Zu minimieren sind die Schätzfehler e_i der Ergebnisse \hat{y}_i der vorgegebenen Funktion $\hat{y} = f(x, \vec{p})$ für x_i , wobei \vec{p} die m zu identifizierenden Parameter darstellt.
- Der Schätzfehler e_i ergibt sich dabei aus der Differenz zwischen dem Messwert y_i und dem Schätzwert \hat{y}_i :

$$e_i = y_i - \hat{y}_i$$

Zum Ermitteln von Werten für die Parameter \vec{p} bei minimalen Schätzfehlern gibt es eine Reihe an in Frage kommenden Methoden, darunter die Methode der kleinsten Quadrate sowie die Maximum-Likelihood-Methode.

Bei der Methode der kleinsten Quadrate wird der Modellfehler R^2 als Summe der quadrierten Schätzfehler e_i berechnet und anschließend durch geeignete Bestimmung der Parameter \vec{p} als Ableitungen minimiert.

Damit ergibt sich:

$$R^2 = \sum_{i=1}^n e_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2$$

Da das Modell in (25) jedoch nicht nach $l(t)$, das im obigen Modell \hat{y}_i darstellen würde, aufgelöst werden kann, kommt ein direkter Einsatz dieses Verfahrens nicht Betracht.

Jedoch lässt sich auch eine Parameteridentifikation durchführen, wenn der Schätzfehler e_i den verbleibenden Fehler im mathematischen Modell wie in Gleichung (25) beschreibt. Wir stellen hierzu Gleichung (25) mit $\alpha = 90^\circ$ wie folgt um:

$$(h_{max} + \sin(\alpha) \cdot l_u) \cdot \ln \left| \frac{h_{max} - l}{h_{max}} \right| - l = -v \cdot t \quad (25)$$

$$(h_{max} + l_u) \ln \left(\frac{h_{max} - l}{h_{max}} \right) - l + v \cdot t = 0 \quad (67)$$

Damit ergibt sich e_i zu:

$$e_i = (h_{max} + l_u) \ln \left(\frac{h_{max} - l_i}{h_{max}} \right) - l_i + v_{max} \cdot t_i \quad (68)$$

Es folgt für den Modellfehler:

$$R^2 = \sum_{i=1}^n e_i^2 = \sum_{i=1}^n \left((h_{max} + l_u) \ln \left(\frac{h_{max} - l_i}{h_{max}} \right) - l_i + v_{max} \cdot t_i \right)^2 \quad (69)$$

⁹⁵ $i \in [1, 2, \dots, n]$

Nun führen wir partielle Ableitungen von R^2 nach den zu bestimmenden Parametern durch und setzen diese gleich Null. Wir gehen dabei von folgender leicht vereinfachter Notationsweise aus:

$$R^2 = \sum_{i=1}^n \left((a+b) \ln \left(\frac{a-l_i}{a} \right) - l_i + c \cdot t_i \right)^2 \quad (70)$$

So folgen für die einzelnen Summenteile e_i^2 und jeden zu identifizierenden Parameter (hier nur a) mithilfe der Kettenregel:

$$\frac{\partial}{\partial a} R^2 = \frac{\partial}{\partial a} \sum_{i=1}^n e_i^2 = 2 \cdot \sum_{i=1}^n e_i \cdot \frac{\partial}{\partial a} (e_i)$$

Es ist ersichtlich, dass sich in den resultierenden Summen die zu identifizierenden Parameter schwerlich isolieren lassen. Dementsprechend wird dieser Lösungsweg verworfen.

Anfängliche Versuche, den Parametersatz Φ mittels **des Gauss-Newton-Verfahrens** und der Integralgleichung (27) zu ermitteln, wurden abgebrochen, weil nicht immer Konvergenz erzielt werden konnte.

Auch die **Maximum-Likelihood-Methode** bietet hier keinen vielversprechenden Lösungsansatz, da Gleichung (25) eine mehrgliedrige Summe darstellt.

Als alternatives Verfahren zur Parameteridentifikation wurde daher das – im Folgenden beschriebene – **Downhill-Simplex-Verfahren** von Nelder & Mead (1965) herangezogen. Auswahlkriterien waren eine robuste Konvergenz ohne Schwierigkeiten an Unstetigkeitsstellen, weiter war die Bestimmung von Ableitungen der Zielfunktion zu vermeiden.

Die Schritte zur Parameteridentifikation

Die zur Parameteridentifikation benötigte Abbildung $W_{Modell}\{M(\Phi)\}$ wird wie folgt durchgeführt: mittels numerischer Integration⁹⁶ wird eine Simulation von $M(\Phi)$ durchgeführt. Aus dieser werden für die Zeitpunkte t_i in der ersten Spalte von W_{real} passende Zustandswerte l_i ausgelesen und zur Weiterverarbeitung bereitgestellt.

Die Variation von Φ zur Fehlerminimierung übernimmt dann das Downhill-Simplex-Verfahren.

⁹⁶ Gleichung (25) ist zur numerischen Parameteridentifikation (beispielsweise mit dem Excel-Gleichungslöser) problematisch, da das Argument des Logarithmus nicht ≤ 0 werden darf. Dies ist jedoch für vom Algorithmus zur Parameteridentifikation zu klein gewählte h_{max} möglich.

Die folgenden Abschnitte erläutern dabei detailliert folgende Aspekte:

- Der Abschnitt „Startwerte für die Parameteridentifikation schätzen“ beschreibt, wie aus W_{real} geeignete Startwerte für die Parameter in Φ gewonnen werden können.
- Die beiden Abschnitte „Allgemeine numerische Integration“, „Klassisches Runge-Kutta-Verfahren“ und „Integrationsschrittweite“ erläutern das Verfahren zur numerischen Integration für die Abbildung $W_{Modell}\{M(\Phi)\}$.
- Der Abschnitt „Gewichtete Ermittlung des Fehlers zwischen Modell und vorgegebener Realität“ widmet sich der Ermittlung des Schätzfehlers $R = f(W_{Modell}\{M(\Phi)\}, W_{real})$.

Schließlich beschreibt der Abschnitt „Parameteridentifikation mithilfe des Downhill-Simplex-Verfahrens“ den gewählten Algorithmus zur Fehlerminimierung.

Startwerte für die Parameteridentifikation schätzen

Zur erstmaligen Parametrierung von $M(\Phi)$ sind initiale, angenommene Werte für die Komponenten von Φ nötig. Es bietet sich an, hierzu den Vorgabe-Datensatz W_{real} heranzuziehen.

Am einfachsten ist es sicherlich, einen Startwert für die wirksame Eintauchtiefe l_u anzunehmen. Es handelt sich hierbei um einen – für textile Fasergebilde – immer noch recht groß gewählten Erfahrungswert von

$$l_{u,0} := 4 \quad [\text{mm}] \quad (71)$$

Der Startwert für h_{max} wird wie folgt aus W_{real} ermittelt:

$$h_{max,0} := 1,1 \cdot \max(l_1; \dots; l_n) \quad [\text{mm}] \quad (72)$$

Es handelt sich dabei um den beim Flüssigkeitseinzug gefundenen Maximalwert der Einzugslänge mit einem Sicherheitszuschlag von 10 %⁹⁷.

Die Geschwindigkeitskonstante v könnte theoretisch über die initiale Geschwindigkeit beim Flüssigkeitseinzug ermittelt werden. Es zeigte sich jedoch, dass insbesondere die ersten Werte l_i besonders stark streuen und somit nicht für Startwert-Schätzungen in Frage kommen. Zur Startwert-Schätzung wird daher Gleichung (17) in Differenzenform verwendet, allerdings mit geeigneten, weit auseinander liegenden Werten zur Differenzenbildung:

$$\frac{\Delta l_{start}}{\Delta t_{start}} = v \cdot \left(\frac{h_{max} + \sin(\alpha) \cdot l_u}{l_u + l} - \sin(\alpha) \right) \quad (73)$$

Zum Errechnen der Differenzen Δl_{start} und Δt_{start} werden aus W_{real} zusammengehörende Wertepaare $l_i(t_i)$ identifiziert, bei denen l_i jeweils nahe bei $\frac{1}{4}$ bzw. $\frac{3}{4}$ von $\max(l_i)$ liegt. So ergeben sich die Wertepaare $l_{3/4}(t_{3/4})$ sowie $l_{1/4}(t_{1/4})$. Aus diesen lassen sich dann die beiden Differenzen errechnen:

⁹⁷ Dieser kann auch größer gewählt werden.

$$\Delta l_{Start} = l_{3/4} - l_{1/4} \quad [\text{mm}] \quad (74)$$

$$\Delta t_{Start} = t_{3/4} - t_{1/4} \quad [\text{s}] \quad (75)$$

Mit den obigen Vorgabe-Werten für l_u und h_{max} lässt sich so folgender Startwert für v schätzen:

$$v_0 := 1,5 \cdot \frac{\Delta l_{Start}}{\Delta t_{Start}} \cdot \frac{l_u + l_{1/4}}{h_{max,0} - \sin(\alpha) \cdot l_{1/4}} \quad [\text{mm}] \quad (76)$$

Wie beim Startwert $h_{max,0}$ wird hier ein Sicherheitszuschlag mit berücksichtigt, allerdings in Höhe von 50 %.

Es zeigte sich, dass diese Startwert-Parametrierungen Verläufe der Einzugsfront generieren, die im Allgemeinen schneller ansteigen und sich oberhalb des realen Verlaufs befinden. Dies erwies sich für die anschließende Parameter-Optimierung mit dem Downhill-Simplex-Algorithmus als sehr robuster Ansatz.

Allgemeine numerische Integration

Ein Ausgangspunkt bei der allgemeinen numerischen Integration ist eine Differentialgleichung 1. Ordnung der Form

$$y' = \frac{dy}{dx} = f(x, y, \Phi) \quad (77)$$

Dabei stellt x die unabhängige Variable dar und y die Abhängige; Φ ist ein Satz an Parametern in $f(x)$, die gegebenenfalls variiert werden können.

Kurvenverläufe für y lassen sich nun für gegebene Anfangswerte x_0 und y_0 und Parameter Φ und einem gegebenen Endwert x_E über x approximieren. Dies geschieht durch eine Abschätzung von $y'_i = y_i + \Delta y_i$ an einem Punkt $\begin{pmatrix} y_i \\ x_i \end{pmatrix}$ in Form der errechneten Steigung $\Delta y_i / \Delta x_i$ für einen Schritt der Länge Δx_i ab x_i :

$$\frac{\Delta y_i}{\Delta x_i} = \text{Schätzfunktion}(x_i, y_i, \Phi) \quad (78)$$

Mithilfe der Definition für Steigungen von Geraden

$$m = \frac{\Delta y_i}{\Delta x_i} = \frac{y_{i+1} - y_i}{x_{i+1} - x_i} \quad (79)$$

lassen sich nun Folgewerte bestimmen:

$$\frac{\Delta y_i}{\Delta x_i} = \frac{y_{i+1} - y_i}{\Delta x_i} \quad (80)$$

$$y_{i+1} - y_i = \frac{\Delta y_i}{\Delta x_i} \cdot \Delta x_i \quad (81)$$

$$y_{i+1} = \text{Schätzfunktion}(x_i, y_i, \Phi) \cdot \Delta x_i + y_i \quad (82)$$

Die folgende Abbildung 40 zeigt – ausgehend von einem Punkt (x_i, y_i) eine Approximation von $y(x_{i+1})$ durch die Schätzfunktion $\text{Schätzfunktion}(x_i, y_i, \Phi)$:

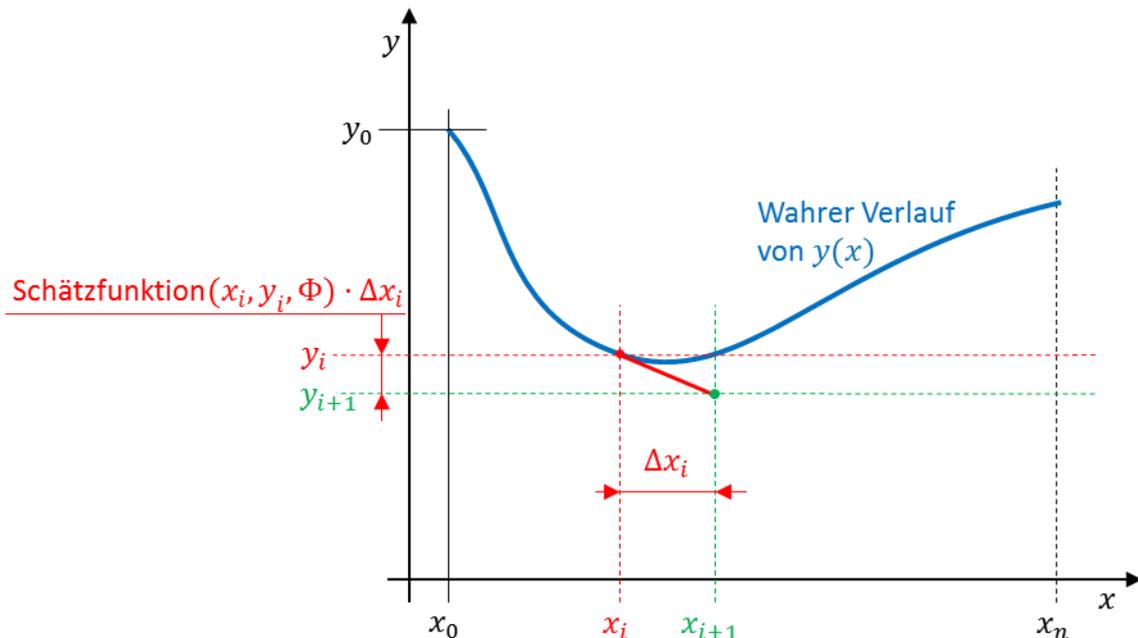


Abbildung 40: Approximation des Verlaufs von $y' = f(x, y, \Phi)$ über eine Schätzfunktion.

Der Folgewert y_{i+1} ergibt sich dabei durch Addition der Änderung Δy_i zum schon bekannten Wert y_i :

$$y_{i+1} = y_i + \Delta y_i \cdot \Delta x_i \quad (83)$$

In Abbildung 40 ist ersichtlich, dass die Schrittweite Δx_i an einem lokalen Minimum zu groß gewählt ist: der Wert des Terms $\text{Schätzfunktion}(x_i, y_i, \Phi) \cdot \Delta x_i$ fällt zu groß aus und es entsteht ein Fehler, der den weiteren Verlauf von y deutlich mit beeinflusst. Damit ist ersichtlich, dass hierbei die Distanz Δx_i zwischen den einzelnen Werten x_i wichtig ist: je kleiner diese ist, umso genauer ist die Funktionsapproximation, aber umso größer ist auch der Rechenaufwand, da mehr Schritte nötig sind. Es gilt also, die Schrittweite zwischen den einzelnen Stützpunkten so zu wählen, dass der Schätzfehler auf einem akzeptablen Minimum gehalten wird.

Für die Schätzfunktion $\text{Schätzfunktion}(x_i, y_i, \Phi)$ gibt es verschiedene Ansätze. So kann – wie hier beschrieben – mit Differenzgleichungen gearbeitet werden. Die Vorgehensweise in diesem Abschnitt ist die des expliziten Eulerschen Polygonzugverfahrens⁹⁸. Allgemein bewährt hat sich die Schätzfunktion des klassischen Runge-Kutta-Verfahrens, es existieren eine Reihe an anderen Verfahren zum Ermitteln von Schätzfunktionen.

⁹⁸ Reinhart (2012), S. 15.

Klassisches Runge-Kutta-Verfahren

Als Schätzfunktion für die numerische Integration der Differentialgleichung für die Fließfront-Geschwindigkeit wurde im Rahmen dieses Projektes das klassische Runge-Kutta-Verfahren⁹⁹ verwendet. Dieses Verfahren approximiert für eine gewöhnliche Differentialgleichung 1. Ordnung die Differenz zwischen zwei Zeitschritten. Die Differentialgleichung hat folgende Form:

$$y' = f(y, x, \Phi)$$

Dabei stellt y' die Ableitung 1. Ordnung von y nach x dar. Für Differentialgleichung (15) gibt es dabei folgende Entsprechungen: die abhängige Variable y ist dort l , die unabhängige Variable x ist die Zeit t . Dementsprechend stellt dl/dt die Entsprechung für y' dar.

So liefert das Runge-Kutta-Verfahren für ein gegebenes y_i den genäherten Wert y_{i+1} mit der Integrationsschrittweite Δx_i :

$$y_{i+1} = y_i + \frac{1}{6} \cdot \underbrace{(y'_i + 2(y'_A + y'_B) + y'_C)}_{\text{Schätzfunktion}(x_i, y_i, \Phi) \cdot \Delta x_i} \cdot \Delta x_i \quad (84)$$

Dabei errechnen sich die einzelnen Teile der Approximation in der folgenden Reihenfolge:

$$y'_i = y'(y_0, x_0, \Phi) \quad (85)$$

$$y_A = y_i + \frac{\Delta x_i}{2} \cdot y'_i \quad (86)$$

$$y'_A = y' \left(y_A, x_i + \frac{\Delta x_i}{2}, \Phi \right) \quad (87)$$

$$y_B = y_i + \frac{\Delta x_i}{2} \cdot y'_A \quad (88)$$

$$y'_B = y' \left(y_B, x_i + \frac{\Delta x_i}{2}, \Phi \right) \quad (89)$$

$$y_C = y_i + \Delta x_i \cdot y'_B \quad (90)$$

$$y'_C = y'(y_C, x_i + \Delta x_i, \Phi) \quad (91)$$

Mithilfe dieser Schätzfunktion lässt sich nun $\Delta \hat{y}_i$ für die Differenz $\Delta y_i = y_{i+1} - y_i$ zwischen zwei Messwerten berechnen. Dieser ist:

$$\Delta \hat{y}_i = \text{Schätzfunktion}(x_i, y_i, \Phi) \cdot \Delta x_i = \frac{1}{6} \cdot (y'_i + 2(y'_A + y'_B) + y'_C) \cdot \Delta x_i \quad (92)$$

Zur Integration wird – wie im obigen Abschnitt „Allgemeine numerische Integration“ aufgezeigt – noch eine sinnvoll gewählte Integrations-schrittweite benötigt.

⁹⁹ Reinhardt (2012, S. 27).

Integrations-schrittweite

Wie schon oben beschrieben, ist die Integrations-schrittweite allgemein ein Kompromiss zwischen Effizienz sowie Exaktheit, wobei es eine Reihe an Ansätzen gibt, den Integrationsfehler minimal zu halten. Hier wird daher problemspezifisch¹⁰⁰ folgendermaßen vorgegangen:

Die maximale lokale Integrations-schrittweite Δx_i ergibt sich aus der maximalen Schrittweite in y-Richtung $\Delta y_{i,max}$ sowie der lokalen Steigung $\left. \frac{dy}{dx} \right|_i = f(x_i, y_i, \Phi)$ wie folgt:

$$\Delta x_i = \frac{\Delta y_{i,max}}{\left. \frac{dy}{dx} \right|_i} \quad (93)$$

Die maximale lokale Integrations-schrittweite unterliegt sicherheitshalber weiter einer fest eingestellten Obergrenze Δx_{max} . So ergibt sich:

$$\Delta x_i := \min \left(\Delta x_{max}; \frac{\Delta y_{i,max}}{\left. \frac{dy}{dx} \right|_i} \right) \quad (94)$$

Bedingt durch den später durchzuführenden Vergleich von Messwerten mit Schätzwerten wird die Integrations-schrittweite weiter durch die Distanz zum nächstgelegenen folgenden Messpunkt t_j begrenzt:

Falls $x_i + \Delta x_i > t_j$ ist, setze $\Delta x_i = t_j - x_i$. (95)

Dies gewährleistet, dass zu allen Messpunkten $[t_j; l_j]$ auch ein Schätzwert $[x_i = t_i; y_j]$ zur späteren Fehlerermittlung vorliegt.

So ergibt sich folgende Zuweisung zum Bestimmen von Δx_i :

$$\Delta x_i := \min \left(\Delta x_{max}; \frac{\Delta y_{i,max}}{\left. \frac{dy}{dx} \right|_i}; t_j - x_i \right) \quad (96)$$

Diese Zuweisung zum Bestimmen von Δx_i ist vor Errechnen von $\Delta \hat{y}_i$ auszuführen.

Gewichtete Ermittlung des Fehlers zwischen Modell und vorgegebener Realität

Für alle vorliegenden n Schätzwerte $[t_j; y_j]$ ergibt sich der zugehörige lokale absolute Schätzfehler e_j als Differenz des gemessenen Wertes l_j und des zugehörigen Schätzwertes y_j :

$$e_j = l_j - y_i \quad (97)$$

y_i liegt dabei bei $x_i = t_j$.

¹⁰⁰ Es liegen keine Extremstellen im Integrationsbereich vor

Der globale Schätzfehler R wird aus den lokalen absoluten Schätzfehlern mittels einer zu wählenden Methode $r(e_j)$ zur Fehlerermittlung und einer Fehlergewichtung w_j ermittelt:

$$R = \sum_{j=1}^m w_j \cdot r(e_j) \quad (98)$$

Zur Fehlergewichtung wurden folgende Methoden implementiert:

- Triviale Fehlergewichtung:

$$w_j = 1 \text{ für } j = 1 \dots m \quad (99)$$

- Fehlergewichtung nach Breite des zum Messpunkt j gehörenden Zeitintervalls:

Beginn des Zeitintervalls:

$$t_{u,j} = \frac{t_{j-1} + t_j}{2} \text{ für } j = [2 \dots m]$$

sonst ($j = 1$): $t_{u,j} = t_j$

Ende des Zeitintervalls:

$$t_{o,j} = \frac{t_j + t_{j+1}}{2} \text{ für } j = [1 \dots m - 1]$$

sonst ($j = m$): $t_{o,j} = t_j$

Damit folgt für die Fehlergewichtung nach Breite des zugehörigen Zeitintervalls:

$$w_j = \frac{1}{t_m} \cdot (t_{o,j} - t_{u,j}) \quad (100)$$

Die Normalisierung mittels Division durch die gesamte Zeitspanne – also hier unter der Annahme, dass $t_0 = 0$ ist, der letzte Zeitwert t_m – sollte aus Effizienzgründen erst nach der Summenbildung für den globalen Schätzfehler erfolgen.

Zur Fehlerermittlung wurden folgende Methoden ausgewählt:

- Ermittlung des Betrags des lokalen absoluten Fehlers:

$$r(e_j) = |e_j| \quad (101)$$

- Quadrierter lokaler absoluter Fehler:

$$r(e_j) = e_j^2 \quad (102)$$

Folgende weitere Methoden zur Fehlerermittlung bieten sich an:

- Verwendung des relativen Fehlers: Bezug des lokalen absoluten Fehlers auf den jeweiligen Messwert, also:

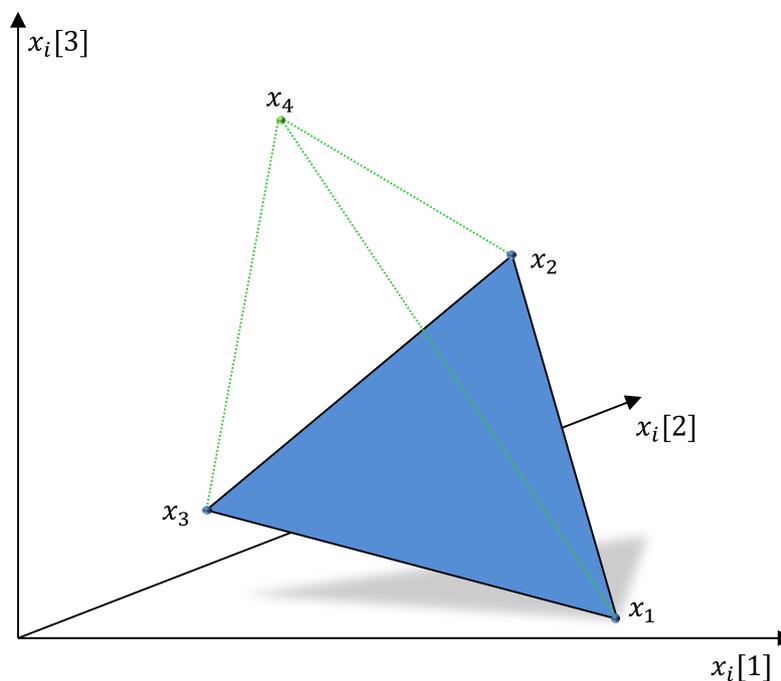
$$e_j = \frac{l_j - y_i}{l_j}$$

Parameteridentifikation mithilfe des Downhill-Simplex-Verfahrens

Aufgrund seiner einfachen, nachvollziehbaren Vorgehensweise wurde hier das Downhill-Simplex-Verfahren von Nelder-Mead¹⁰¹ zur Fehlerminimierung gewählt.

Der Downhill-Simplex-Algorithmus arbeitet für die n zu optimierenden Parameter in Φ mit $n + 1$ Arbeitspunkten. Diese stellen jeweils Ortsvektoren der Dimension n aus Parameterwerten dar. Die komplette Zusammenstellung aller Arbeitspunkte stellt dabei einen Simplex¹⁰² dar, üblicherweise als $\Delta = \langle x_1; x_2; \dots; x_n; x_{n+1} \rangle$ bezeichnet. Da die einzelnen Arbeitspunkte Eckpunkte von Polygonen darstellen, werden sie im Folgenden als „Vertices“ bezeichnet¹⁰³.

Die folgende Abbildung zeigt dreidimensionalen Simplex: das Dreieck $\langle x_1; x_2; x_3 \rangle$ im dreidimensionalen Raum wird durch Hinzunahme von Vertex x_4 zu einem Tetraeder, dem im dreidimensionalen Raum einfachst-möglichen Volumenkörper bzw. Simplex.



Der kleinstmögliche Polygonzug im dreidimensionalen Raum – das von x_1, \dots, x_3 gebildete Dreieck – wird durch Hinzunahme des weiteren Vertex x_4 zum Simplex.

Abbildung 41: Ein dreidimensionaler Simplex.

Die Benennung der Vertices im Simplex erfolgt beim Downhill-Simplex-Algorithmus sortiert nach dem Wert von der Zielfunktion der Vertices: der beste Vertex bekommt den Index 1; der Schlechteste den letzten Index $n + 1$:

¹⁰¹ Nelder & Mead (1965), ebenso: Gao & Han (2012).

¹⁰² Also ein n -dimensionales Polytop, auch Hypertetraeder genannt. Dabei wird zu einer mit n Punkten im n -Dimensionalen Raum aufgespannten Ebene ein weiterer (affin unabhängiger) Punkt hinzugenommen, der nicht auf dieser Ebene liegt. So entsteht jeweils der einfachst beschreibbare Volumenkörper in Dimension n aus $n + 1$ Punkten. So ergeben sich in Dimension 1 aus einem Punkt eine Strecke, in Dimension 2 aus einer Strecke ein Dreieck, in Dimension 3 aus einem Dreieck ein Tetraeder, in Dimension 4 ein Pentachoron, etc.

¹⁰³ „Vertex“, plural „Vertices“ von lat. *vertere*: drehen, wenden.

$$\text{Bedingung: } f(x_1) \leq f(x_2) \leq \dots \leq f(x_n) \leq f(x_{n+1}) \quad (103)$$

Dabei stellt x_1 den besten Vertex dar, x_{n+1} den Schlechtesten.

Basis des Downhill-Simplex-Algorithmus ist nun, dass sich mithilfe der Funktionswerte der Vertices ein Gradient¹⁰⁴ in Richtung des Minimums errechnen lässt. Grundidee des Verfahrens ist nun, den jeweils schlechtesten Vertex im Simplex durch einen neuen, besseren – nach vorgegebenen Kriterien – auszutauschen. Die Schrittweite in jede der n Dimensionen ist dabei variabel, sollte aber sinnvollerweise begrenzt auf einen vorgegebenen Wertebereich sein. Der Vertex-Austausch wird solange betrieben, bis z.B. eine maximale Zahl an Iterationen erreicht ist oder die verbleibende Differenz zwischen den Zielfunktionswerten eine vorgegebene Grenze unterschreitet.

Die Startvertices für das Downhill-Simplex-Verfahren können entweder vorgegeben durch Variation der Koordinaten eines vorgegebenen Ausgangspunktes x_0 generiert werden.

Ein **Schleifendurchlauf** des Downhill-Simplex-Algorithmus umfasst folgende Schritte¹⁰⁵:

1. **Sortiere** alle $n + 1$ Vertices x_i im Simplex Δ aufsteigend nach dem Wert der Zielfunktion $f(x_i)$ um.
2. Beende die Schleifendurchläufe, falls eine der **Abbruchbedingungen** erfüllt ist.
3. Berechne den geometrischen **Flächenschwerpunkt** x_z der n besten Vertices¹⁰⁶:

$$x_z = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

4. Prüfe, ob eine **Reflektion**¹⁰⁷ des schlechtesten Punktes x_{n+1} am Zentralpunkt x_z bzw. eine **Expansion**¹⁰⁸ sinnvoll ist.
 - a. Berechne den Reflektionspunkt x_r :

$$x_r = x_z + \alpha \cdot (x_z - x_{n+1}) = (1 + \alpha) \cdot x_z - \alpha \cdot x_{n+1}$$
 mit dem Reflektionsfaktor $\alpha = 1$.
 - b. Falls $f(x_r) \leq f(x_1)$ ist:
 - i. Berechne den Expansionspunkt x_e :

$$x_e = x_z + \beta \cdot (x_r - x_z) = (1 - \beta) \cdot x_z + \beta \cdot x_r$$
 - ii. Falls $f(x_e) < f(x_r)$ ist:
 1. Ersetze x_{n+1} durch x_e .
 2. Beende den Schleifendurchlauf.
 - iii. Ansonsten führe die **Expansion** durch und ersetze x_{n+1} durch x_r .
 - iv. Beende den Schleifendurchlauf.
 - c. Falls $f(x_r) < f(x_n)$ ist¹⁰⁹, führe eine **Reflektion** durch:

¹⁰⁴„Gradient“, von lat. *gradiens* für Anstieg, Gefälle, Steigung.

¹⁰⁵ Gao & Han (2012) verwenden die Algorithmus-Version von Lagarias et al (1996), haben aber vergessen, vorzeitige Beendigungen eines Schleifendurchlaufs mit zu übernehmen [sic!]. Der Algorithmus wurde daher mit Ergänzungen aus Lagarias et al (1996) übernommen: die Abbruchbedingung wurde als Schritt 2 integriert, die Berechnung von x_z als Schritt 3, weiter wurde die Ersetzung bei der Reflektion für $f(x_1) \leq f(x_r) < f(x_n)$ wegen einer einfacheren Gestaltung der Prüfbedingung (diese wird dadurch in Schritt 3.c zu $f(x_r) < f(x_n)$).

¹⁰⁶ Mittelwertbildung: Koordinaten-Addition, anschließend Normalisierung.

¹⁰⁷ Die Spiegelung eines Punktes an einem anderen Punkt im Raum mit der Schrittweite 1.

¹⁰⁸ Die Spiegelung eines Punktes an einem anderen Punkt im Raum mit einer Schrittweite > 1 , hier 2.

¹⁰⁹ Original: $f(x_1) \leq f(x_r) < f(x_n)$, dies vereinfacht sich durch die Verschiebung nach der Prüfung zu $f(x_r) < f(x_n)$ zu $f(x_r) < f(x_1)$.

- i. Ersetze x_{n+1} durch x_r .
 - ii. Beende den Schleifendurchlauf.
5. Prüfe, ob eine **Kontraktion**¹¹⁰ sinnvoll ist, da $f(x_r) > f(x_n)$ ist und somit bessere Punkte nur innerhalb Volumens aus dem Simplex Δ und x_r vermutet werden.
 - i. Falls $f(x_n) \leq f(x_r) < f(x_{n+1})$ ist, führe eine Außenkontraktion durch:
 1. Berechne den **Außenkontraktionspunkt** x_{ak} :
$$x_{ak} = x_z + \gamma \cdot (x_r - x_z) = (1 - \gamma) \cdot x_z + \gamma \cdot x_r$$
 2. Falls $f(x_{ak}) \leq f(x_r)$ ist:
 - a. Ersetze x_{n+1} durch x_{ak} .
 - b. Beende den Schleifendurchlauf.
 3. Ansonsten springe zu Schritt 5 (Schrumpfen).

¹¹⁰ Ermittlung des Mittelpunktes zwischen zwei Punkten im Raum.

- ii. Falls $f(x_r) \geq f(x_{n+1})$ ist, führe einen Innenkontraktion durch:
 1. Berechne den **Innenkontraktionspunkt** x_{ik} :

$$x_{ik} = x_z - \gamma \cdot (x_z - x_{n+1}) = (1 - \gamma) \cdot x_z + \gamma \cdot x_{n+1}$$
 2. Falls $f(x_{ik}) < f(x_{n+1})$ ist:
 - a. Ersetze x_{n+1} durch x_{ik} .
 - b. Beende den Schleifendurchlauf.
- 6. Bessere Punkte liegen wohl nur innerhalb des Simplex.
Schrumpfe¹¹¹ daher den Simplex in Richtung von x_1 :
 - a. Führe für $i = 2; \dots; n + 1$ Folgendes aus:
 - i. Ersetze x_i :

$$x_i := x_1 + \delta \cdot (x_i - x_1) = (1 - \delta) \cdot x_1 + \delta \cdot x_i$$
- 7. Beende den Schleifendurchlauf.

Zusammengefasst kommen dabei folgende Aktionen zum Einsatz¹¹²:

Aktion	Konstante	Wert	Formel	... mit eingesetztem Wert, aufgelöst
Flächenschwerpunkt berechnen			$x_z = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$	
Reflektion	α	1	$x_r = (1 + \alpha) \cdot x_z - \alpha \cdot x_{n+1}$	$x_r = 2x_z - x_{n+1}$
Expansion	β	2	$x_e = (1 - \beta) \cdot x_z + \beta \cdot x_r$	$x_e = 3x_z - 2x_{n+1}$
Kontraktion				
Außenkontraktion	γ	$\frac{1}{2}$	$x_{ak} = (1 - \gamma) \cdot x_z + \gamma \cdot x_r$	$x_{ak} = \frac{3x_z}{2} - \frac{x_{n+1}}{2}$
Innenkontraktion	γ	$\frac{1}{2}$	$x_{ik} = (1 - \gamma) \cdot x_z + \gamma \cdot x_{n+1}$	$x_{ik} = \frac{x_z}{2} + \frac{x_{n+1}}{2}$
Schrumpfen	δ	$\frac{1}{2}$	Für alle Punkte x_i außer x_1 : $x_i := (1 - \delta) \cdot x_1 + \delta \cdot x_i$	$x_i := \frac{x_1}{2} + \frac{x_i}{2}$

Tabelle 16: Aktionen im Simplex-Downhill-Algorithmus und die zugehörigen, entsprechend algebraisch aufgelösten Formeln.

¹¹¹ Dies wird als „Reduktion“ bezeichnet. Dabei werden alle Punkte durch Kontraktion zum besten Punkt hin ersetzt.

¹¹² Es handelt sich um die Standard-Konstanten von Nelder-Mead (1965).

Die Formeln für die durch Reflektion, Expansion und Kontraktion möglichen Folgepunkte sind aufgelöst nur von x_z und x_{n+1} abhängig. Letztlich liegen die Folgepunkte dieser Operationen auf einer von x_{n+1} ausgehenden Linie durch x_z :

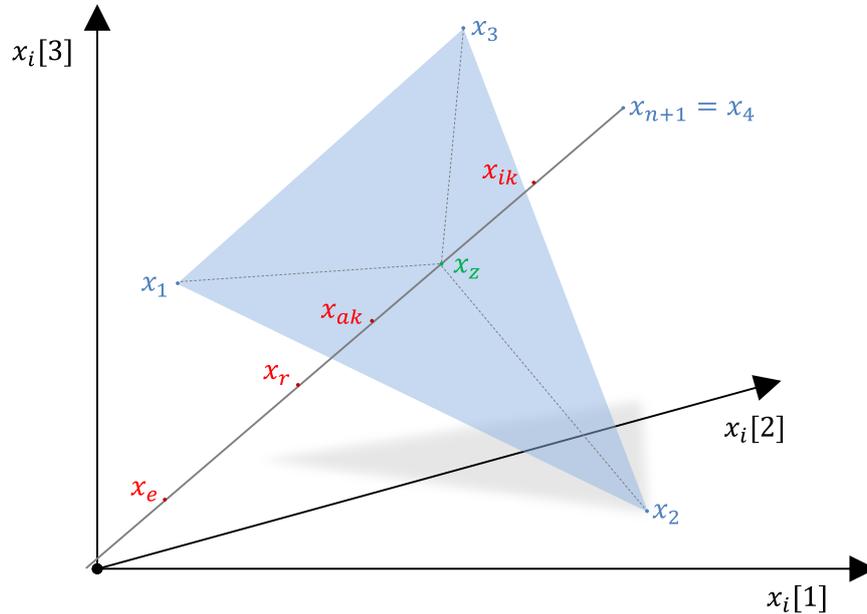


Abbildung 42: Position der möglichen Folgepunkte nach Reflektion, Expansion oder Kontraktion für die gegebenen Konstanten beim Simplex-Downhill-Algorithmus.

Zur Steigerung der Recheneffizienz ist es damit sinnvoll, die Formeln für diese Punkte in Punkt-Richtungsform zu formulieren:

$$x_r = 2x_z - x_{n+1} = x_z + (-1) \cdot (x_{n+1} - x_z) \quad (104)$$

$$x_e = 3x_z - 2x_{n+1} = x_z + (-2) \cdot (x_{n+1} - x_z) \quad (105)$$

$$x_{ak} = \frac{3x_z}{2} - \frac{x_{n+1}}{2} = x_z + \left(-\frac{1}{2}\right) \cdot (x_{n+1} - x_z) \quad (106)$$

$$x_{ik} = \frac{x_z}{2} + \frac{x_{n+1}}{2} = x_z + \left(+\frac{1}{2}\right) \cdot (x_{n+1} - x_z) \quad (107)$$

Es ist ebenso ersichtlich, dass diese Punkte ausgehend von x_{n+1} einfach in folgender Sequenz berechnet werden können:

$$g = x_z - x_{n+1}$$

g stellt den Richtungsvektor von x_{n+1} nach x_z dar.

$$x_{ik} = x_{n+1} + \frac{1}{2} \cdot g \quad (108)$$

$$x_{ak} = x_{ik} + 1 \cdot g \quad (109)$$

$$x_r = x_{ak} + \frac{1}{2} \cdot g \quad (110)$$

$$x_e = x_r + 1 \cdot g \quad (111)$$

Ein Schrumpfen bewegt alle schlechteren Punkte im Simplex auf x_1 zu:

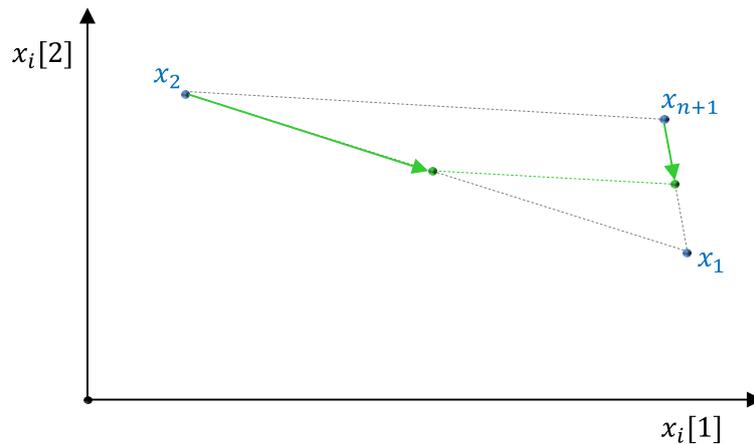


Abbildung 43: Schrumpfen beim Simplex-Downhill-Algorithmus.

Dies verringert die Größe des Simplex.

Für die Problemstellung im Projekt wurden folgende Anpassungen an dieser Vorgehensweise vorgenommen:

- a. Der Startpunkt des Flüssigkeitseinzugs wird subjektiv vom Laborassistent ermittelt, kleinere Ungenauigkeiten können jedoch später zu Modellfehlern führen. Daher kommt ein relativer Startzeitpunkt t_s zum Einsatz.

- Der Parametervektor Φ ergibt sich damit zu:

$$\Phi = [v; h_{\max}; l_u; t_s]$$

- Um eine Variation des Startzeitpunkts zu ermöglichen, wird Differentialgleichung (15) um die Sprungfunktion $h(t - t_s)$ erweitert.

$$h(t - t_s) = \begin{cases} 0 & \text{für } t < t_s \\ \text{ansonsten } 1 \end{cases}$$

$$\frac{dl}{dt} = h(t - t_s) \cdot v \cdot \left(\frac{h_{\max} + \sin(\alpha) \cdot l_u}{l + l_u} - \sin(\alpha) \right)$$

- b. Folgender Algorithmus für die Funktion $f(\Phi)$ kommt zum Einsatz:

- Gleichung (15) wird ausgehend von $l_0 = 0$ bei $t_0 = 0$ bis zum letzten Messzeitpunkt für den Parametervektor Φ integriert. Ergebnisse sind die Schätzwerte y_i zu den Messzeitpunkten t_i .
- Der lokale Schätzfehler $e_i = l_i - y_i$ wird für alle Messzeitpunkte errechnet.
- Der globale Messfehler wird nach den Erläuterungen im obigen Abschnitt „Gewichtete Ermittlung des Fehlers zwischen Modell und vorgegebener Realität“ aus den lokalen Schätzfehlern ermittelt und als Funktionswert zurückgegeben.

- c. Der initiale Arbeitspunkt Φ_A wird nach den Vorgaben im vorherigen Abschnitt „Startwerte für die Parameteridentifikation schätzen“ initialisiert.

- d. Es gelten folgende Wertebereiche für die Parameter:

$$t_s \in [-\min(t_i) \dots \min(t_i)] \text{ s} \tag{112}$$

$\min(t_i)$ stellt dabei den kleinsten von 0 verschiedenen

vom Bediener angegebenen Zeitpunkt dar.

$$v \in [10^{-8} \dots 1] \text{ m/s} \quad (113)$$

$$h_{max} \in [\max(l_i) \dots 10] \text{ m} \quad (114)$$

$$l_u \in [10^{-8} \dots 0,2] \text{ m} \quad (115)$$

Sollte eine Koordinatenposition außerhalb der genannten Grenzen liegen, wird die Koordinatenposition auf den entsprechenden Grenzwert korrigiert.

- e. Die Arbeitspunkt-Initialisierung (Schritt 1) arbeitet wie folgt: durch Variation der Anfangswerte in Φ_A werden weitere $2n$ Anfangspunkte bestimmt. Die besten $n + 1$ Arbeitspunkte $P(\Phi_i)$ werden für den Downhill-Simplex-Algorithmus verwendet.

Folgende Variationen der Startwerte werden verwendet:

- $v \pm 10 \%$
 - $h_{max} \pm 10 \%$
 - $l_u \pm 10 \%$
 - $t_s \pm 0,5 \text{ [s]}$
- f. Folgende Abbruchkriterien kommen in Schritt 4 zum Einsatz¹¹³:
es wird abgebrochen, wenn
- ... eine Zahl von 5.000 Durchläufen erreicht wurde.
 - ... der verbleibende Restfehler [mm] minimal ist: $|\Phi_{n+1} - \Phi_1| < 10^{-15} \cdot \Phi_1$.

¹¹³ Der Algorithmus benötigt bei einer Lösungsgenauigkeit von 10^{-15} ca. 250-500 Iterationen, dies braucht deutlich weniger als eine Sekunde. Dementsprechend wurde auch auf eine Vergrößerung des verbleibenden Restfehlers verzichtet.

5.2.2 Implementierung als Demonstrator

Der im vorherigen Abschnitt beschriebene Algorithmus wurde als im Webbrowser laufende JavaScript-Routine umgesetzt und steht so der interessierten Öffentlichkeit zur Verfügung. Die Umsetzung wurde speziell für manuell ausgelesene Zeitreihen mit vergleichsweise wenigen und nicht äquidistanten Zeitschritten umgesetzt. Mittlerweile wird JavaScript automatisch im Webbrowser zu Maschinencode kompiliert und läuft mit der ca. 1,6-fachen Geschwindigkeit von Compiler-optimiertem C⁺⁺-Code¹¹⁴. Fließkommazahlen werden in JavaScript standardmäßig als float64 nach dem IEEE754-Standard repräsentiert – die damit verbundene Genauigkeit ist für die gegebene Problemstellung mehr als angemessen.

Die Implementierung ist auf <http://aif-kapillarkinetik.dif-mr.de/> als Programmmodul „Parameteridentifikation zur Kapillarkinetik“ verfügbar. Beim Aufrufen des Programmmoduls werden im Hintergrund eine Reihe an JavaScript-Bibliotheken nachgeladen; dies benötigt einen Moment Zeit. Die Webanwendung wurde rein browserbasiert ausgeführt; als JavaScript-Framework kommt das Dojo Toolkit¹¹⁵ zum Einsatz. Dieses Framework bringt aufeinander abgestimmte Module zu allen für die Webanwendung benötigten Funktionen mit. Im Gegensatz zum heutzutage üblichen Einsatz vieler kleiner JavaScript-Bibliotheken handelt es sich beim Dojo Toolkit um integriertes Komplettpaket. Dies vereinfacht die Software-Entwicklung deutlich, da einheitliche Entwicklungsprinzipien und Datenformate zugrunde gelegt werden.

Da mathematische Formeln in Hypertext-Dokumenten von Mozilla Firefox zurzeit am besten dargestellt werden, empfehlen die Forschungsstellen diesen Web-Browser¹¹⁶ zum Nutzen der Webanwendung.

Der Demonstrator ist mit einer Vorgabe-Zeitreihe versehen, so dass seine Programmmodule und die Einstell-Optionen direkt getestet werden können.

Die folgenden Screenshots erläutern den Demonstrator.

¹¹⁴ Das ist hier als eine rein qualitative Aussage zu verstehen. Die Ausführungsgeschwindigkeit von Anwendungen hängt von verschiedensten Faktoren wie (CPU, CUP-spezifische Optimierungsroutinen im Compiler, Thermenstellung des Codes, Aspekte der Rechnerausstattung wie BUS- & Speichertyp, etc.) ab. Der massivste Geschwindigkeitssprung bei JavaScript wird letztlich durch die Kompilierung erreicht. Deutlich Geschwindigkeitseinbußen bei JavaScript ergeben sich insbesondere dann, wenn Änderungen am angezeigten Hypertext-Dokument durchgeführt werden: hier muss jeweils die angezeigte Seite neu gerendert werden. Beim Demonstrator wurde auf Optimierungen der Laufzeit-Geschwindigkeit verzichtet.

¹¹⁵ Dojo Foundation (2016).

¹¹⁶ <https://www.mozilla.org/de/firefox/new/> (22.02.2017).

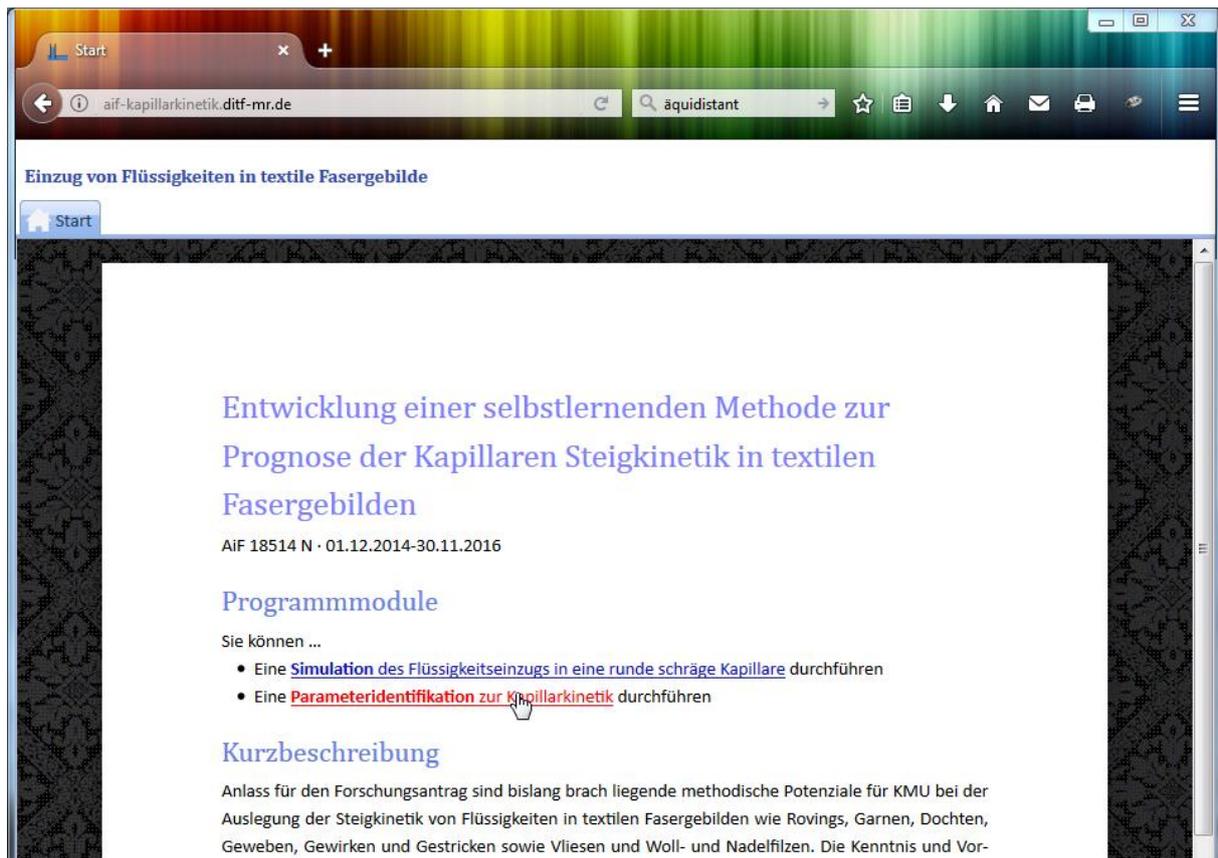


Abbildung 44: Startseite des Demonstrators.

Der Demonstrator wurde als seitenbasierte Webanwendung ausgeführt. Zwischen einzelnen Seiten kann durch Klick auf die die Tab-Leiste gewechselt werden. In obiger Abbildung befindet sich nur die persistent ausgeführte Seite „Start“ in der Webanwendung. Andere Seiten werden auf Benutzeranforderung nachgeladen.

Einzelne Seiten lassen sich direkt aus der Webanwendung heraus drucken. Dabei werden nicht benötigte Layout-Bereiche über CSS ausgeblendet.

Die folgende Abbildung zeigt den Dialog zum Durchführen einer Parameteridentifikation. Der Dialog bietet die Möglichkeit zur Eingabe einer eindeutigen Bezeichnung für die Parameteridentifikation. Weiter ist er in die Abschnitte „Vorgaben“, „Zeitreihe eingeben“, „Zu identifizierende Parameter auswählen“, „Methoden zur Fehlerermittlung und -gewichtung auswählen“ sowie „Abbruchbedingungen festlegen“ untergliedert.

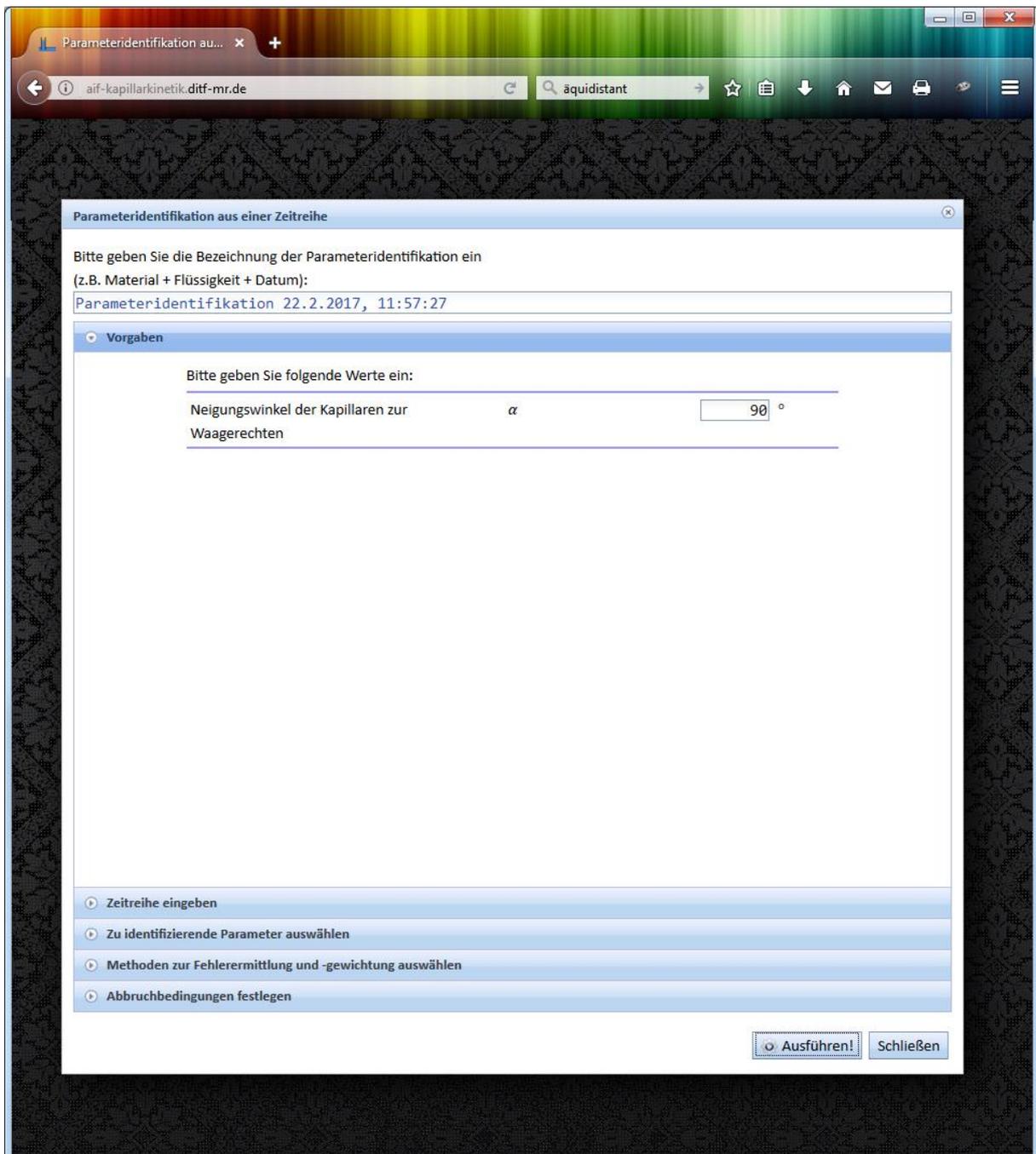


Abbildung 45: Dialog zur Dateneingabe für die Parameteridentifikation.

Vorgabe für die Parameteridentifikation ist alleine der Neigungswinkel α der Kapillaren zur Waagerechten. Es gilt dabei: $0^\circ < \alpha \leq 90^\circ$, da das implementierte Modell keine Parameteridentifikation für liegende Kapillaren zulässt¹¹⁷.

Nach Eingabe von α gilt es, die Zeitreihe einzugeben.

¹¹⁷ Eine mögliche Ausbaustufe der Anwendung.

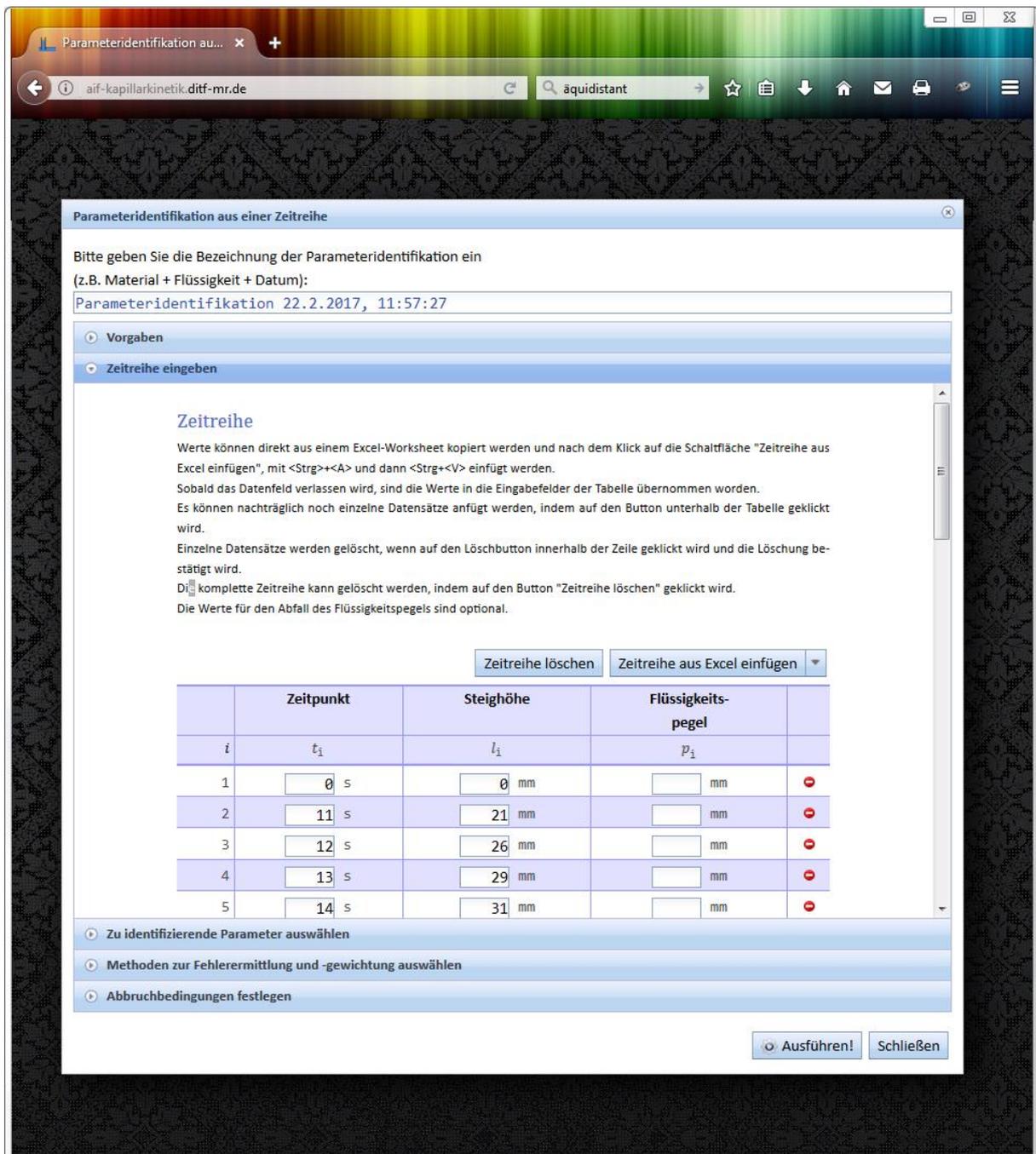


Abbildung 46: Eingabe der Zeitreihe zum Flüssigkeitseinzug.

Für jeden Zeitpunkt der Zeitreihe können dabei der Zeitpunkt, die Steighöhe und – optional – das Niveau des Flüssigkeitspegels eingegeben werden. Alternativ kann die Zeitreihe aus mittels Kopieren & Einfügen aus Excel übernommen werden. Hierzu ist nach einem Klick auf die Schaltfläche „Zeitreihe aus Excel einfügen“ ein spezielles Eingabefeld verfügbar. Beim Übernehmen der Daten aus Excel werden Zeitwerte im Format [hh:mm:ss] automatisch in Sekunden konvertiert.

Anschließend gilt es, die zu identifizierenden Parameter auszuwählen.

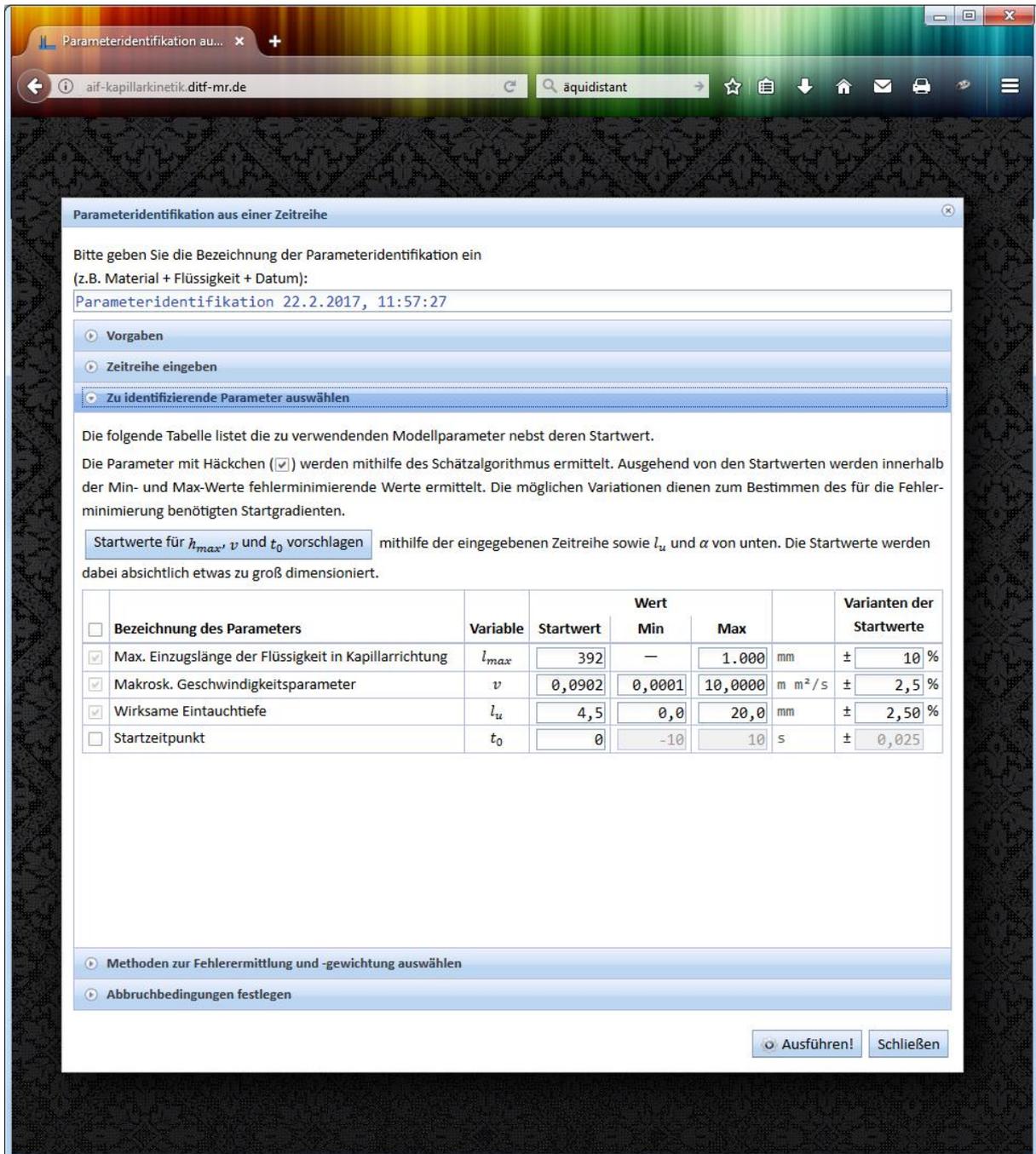


Abbildung 47: Abschnitt zur Auswahl der zu identifizierenden Parameter.

Standardmäßig werden die Parameter l_{max} , v und l_u identifiziert. Optional ist weiter die Identifikation des korrekten Startzeitpunktes des Flüssigkeitseinzugs möglich. Letztere Option ist erhöht die Zeit zum Durchführen der Parameteridentifikation von deutlich unter 1 [s] auf meist mehr als 5 [s].

Sollte der Verdacht bestehen, dass die maximale Einzugslänge der Flüssigkeit in Kapillarrichtung über 1.000 [mm] liegt, sollte dieser Wert auf $\geq 125\%$ des erwarteten Werts korrigiert werden.

Weiter besteht in diesem Dialogabschnitt die Möglichkeit, den prozentualen Abstand der Varianten der Startwerte nach Bedarf anzupassen. Dies war aber im Rahmen der Untersuchungen im Projekt bisher nicht nötig.

Der folgende Abschnitt im Dialog widmet sich den bei der Fehlerermittlung und -gewichtung anzuwendenden Methoden.

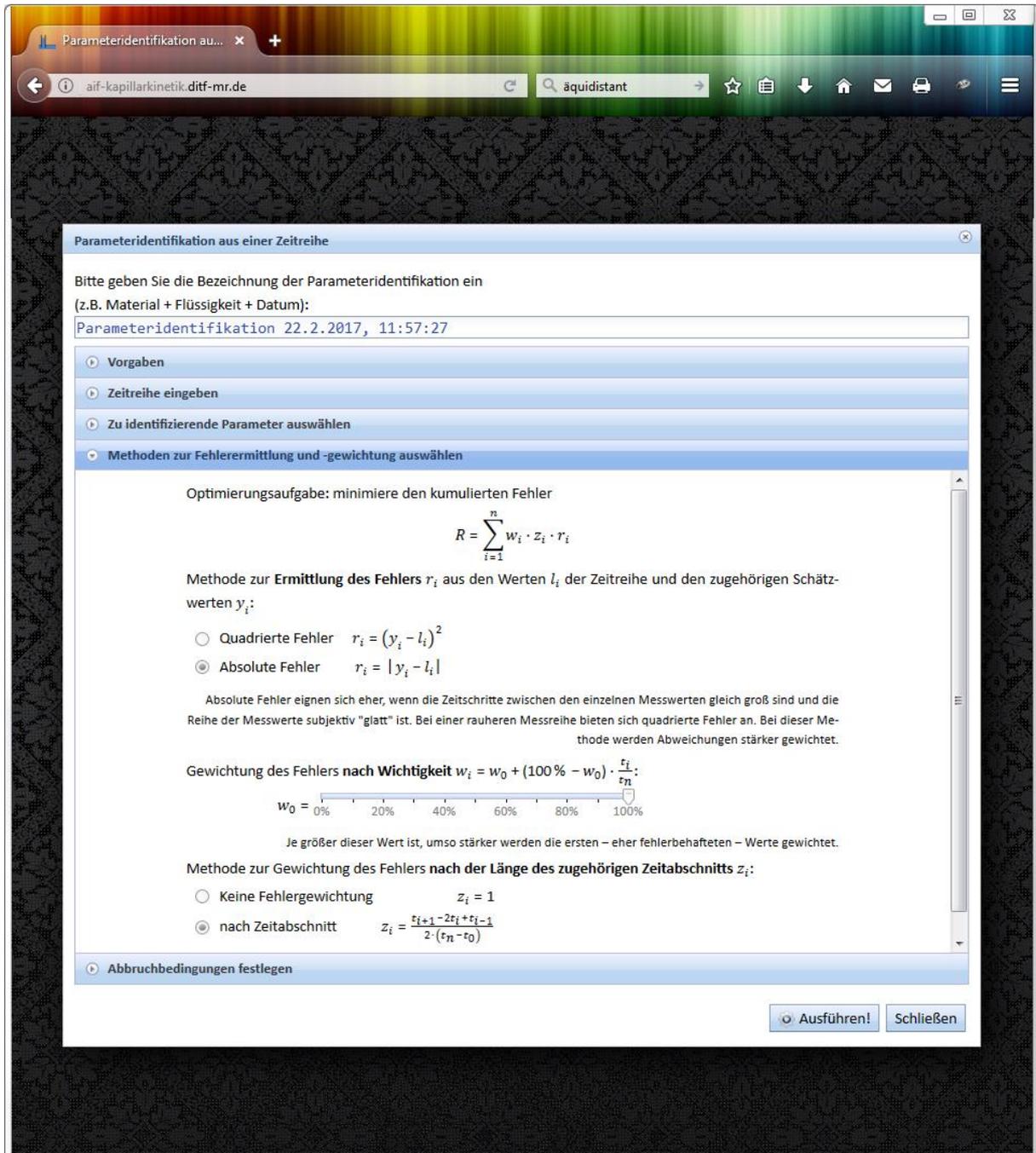


Abbildung 48: Abschnitt zur Wahl der Methoden zur Fehlerermittlung und -gewichtung.

Die sich bei einer sorgfältigen Durchführung des Steighöhenversuchs ergebenden Zeitreihen unterliegen meist vernachlässigbar kleiner stochastischer Unsicherheit. Hier reicht es aus, als Methode zur Fehlerermittlung den absoluten Fehler zu wählen. Dies ist die Standard-Option. Sollte die vorliegende Zeitreihe größeren stochastischen Einflüssen unterworfen sein, bietet es sich an, als Methode zur Fehlerermittlung den quadrierten Fehler zu nutzen.

Bei vielen Proben mit geringem Kontaktwinkel zwischen Material und Flüssigkeit zeigte sich, dass gerade die ersten Werte der Zeitreihe recht stark verrauscht sein können. Hierzu wurde eine Gewichtung der Fehler nach Wichtigkeit implementiert. Diese reduziert den Einfluss der ersten Werte in der Zeitreihe und gewichtet spätere Werte stärker.

Speziell für von Hand ermittelte Zeitreihen ohne äquidistanten Abstand zwischen den einzelnen Zeitpunkten sollten Zeitpunkte mit längeren Intervallen zum vorhergehenden und folgenden Zeitpunkt deutlich stärker gewichtet werden. Dies erfolgt bei der Fehlergewichtung nach Zeitabschnitt. Bei Zeitreihen mit äquidistantem Abstand zwischen den einzelnen Zeitpunkten kann diese Methode abgeschaltet werden.

Der folgende Abschnitt listet die Abbruchkriterien bei der Parameteridentifikation nach dem Simplex-Downhill-Algorithmus. Die Abbruch-Kriterien greifen nach dem Prinzip des Inklusiv-ODER-Operators: so es reicht aus, wenn eines der Abbruchkriterien erfüllt ist.

Abbruch-Kriterien sind:

- a) Das Überschreiten einer vorgegebenen Maximalzahl an Iterationen.
- b) Eine Unterschreitung eines vorgegebenen maximal zulässigen Unterschieds zwischen schlechtester und bester Parameterkombination.

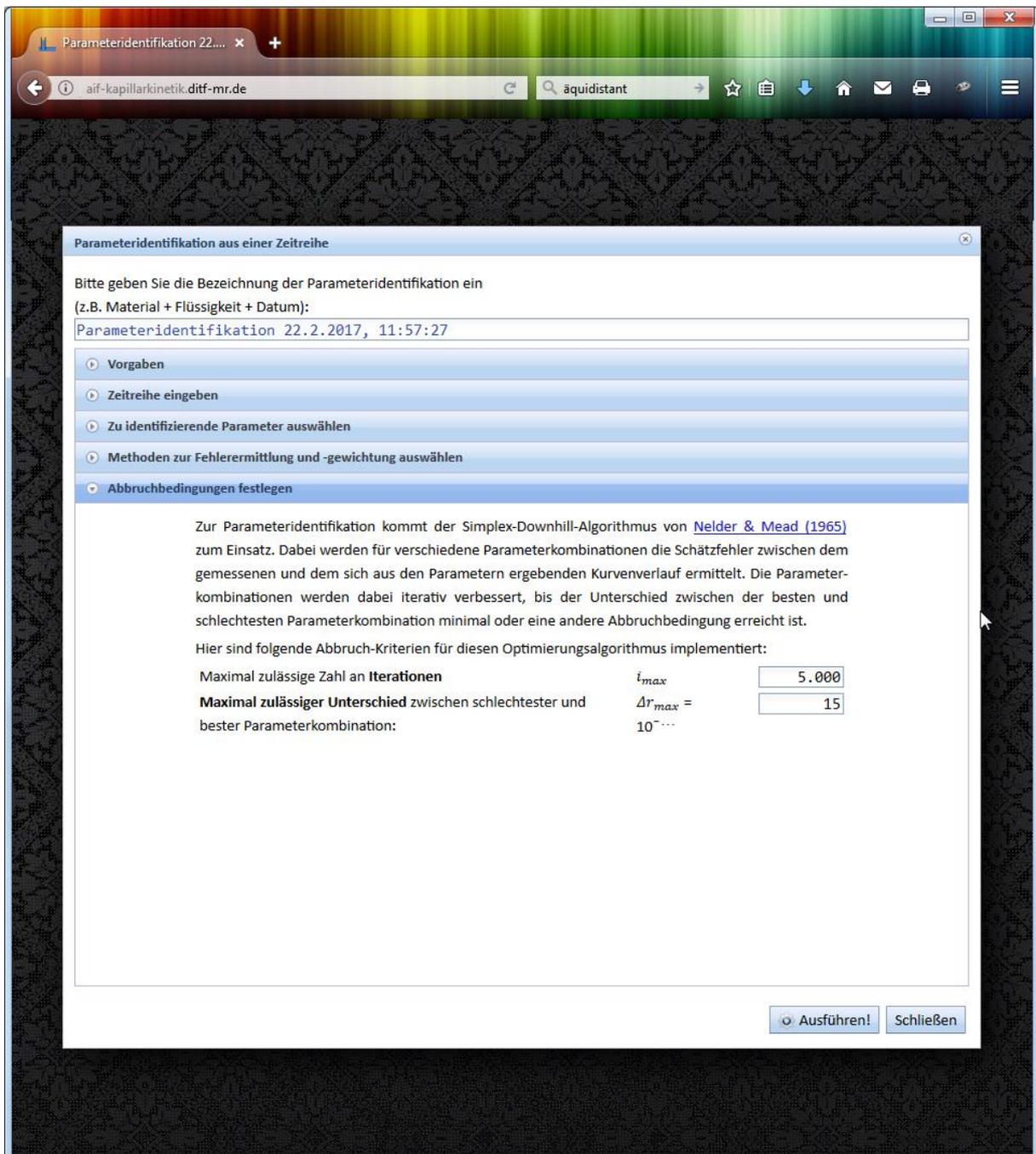


Abbildung 49: Abschnitt "Abbruchbedingungen festlegen".

Nach einem Klick auf „Ausführen!“ wird die Parameteridentifikation durchgeführt. Dies dauert im Allgemeinen weniger als 1 [s]. Sollte auch der Startzeitpunkt geschätzt werden, kann die Parameteridentifikation auch länger dauern.

Die folgenden Abbildungen zeigen das Ergebnis der Parameteridentifikation.

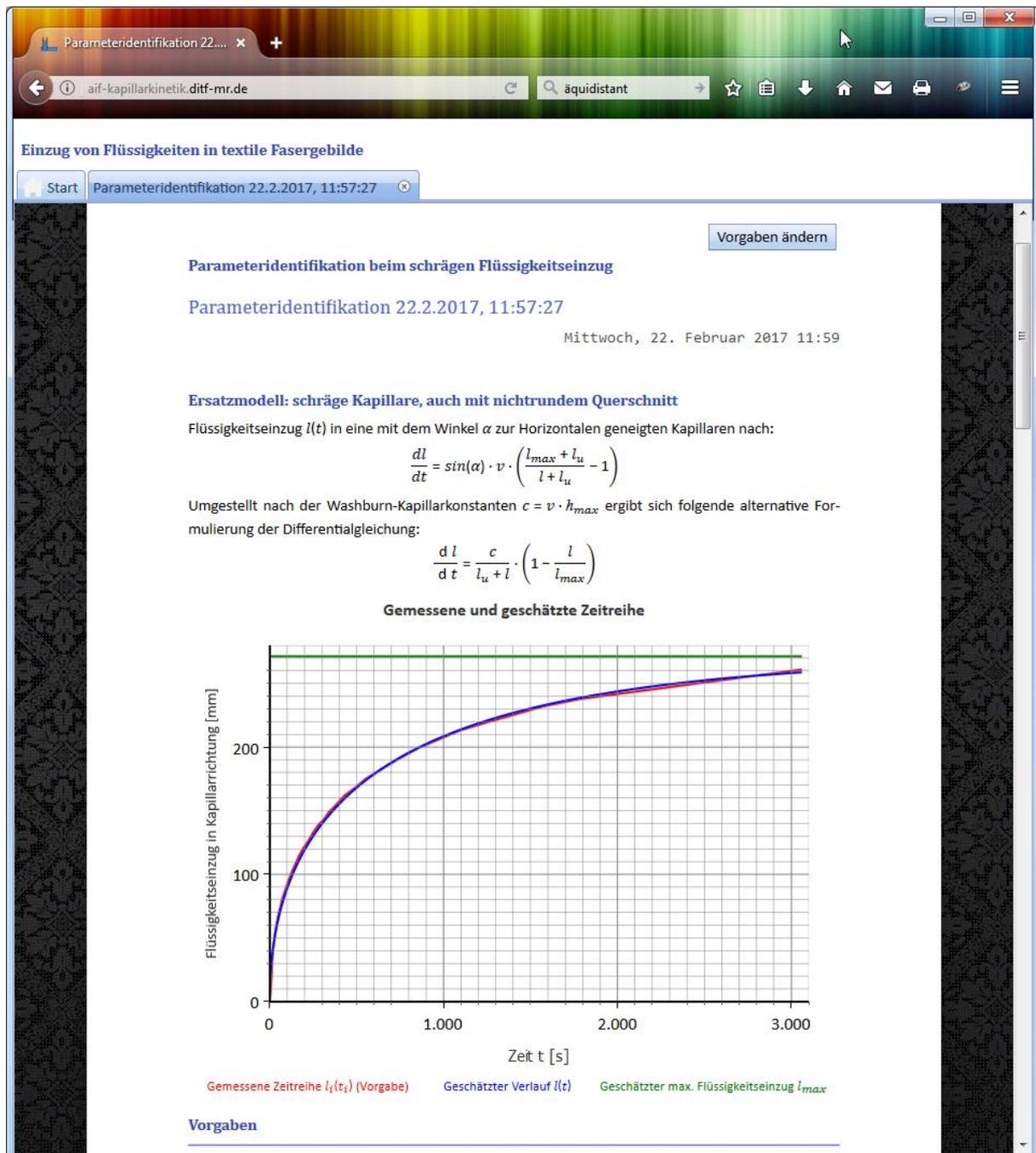


Abbildung 50: Erste Seite des Ergebnisreports der Parameteridentifikation.

Der Ergebnisreport zur Parameteridentifikation ist in folgende Teile untergliedert:

- Allgemeine Erläuterungen
- Die identifizierten Modellparameter
- Bewertung der Qualität der Schätzung und Schätzfehler
- Gegenüberstellung der ermittelten Zeitreihe mit den Schätzwerten

Der Ergebnisreport beginnt mit einer Erläuterung des mathematischen Modells. Anschließend wird die vorgegebene Zeitreihe der Gemessenen grafisch gegenüber gestellt. So lassen sich aufgetretene Probleme frühzeitig erkennen. Dies sind insbesondere:

- Deutlich andere Steigungen von Simulation und vorgegebener Datenreihe zu deren Ende hin
- Lokale Einflüsse von Streuungen, speziell in der Anfangsphase

Die nächste Abbildung listet die identifizierten Modellparameter auf.

Einzug von Flüssigkeiten in textile Fasergebilde

Start Parameteridentifikation 22.2.2017, 11:57:27

Vorgaben

Neigungswinkel der Kapillaren zur Waagerechten	α	90,00 °
--	----------	---------

Identifizierte Modellparameter

Methode: Parameteroptimierung im Ersatzmodell mittels der Downhill-Simplex-Methode mit max. 5.000 Iterationen, der minimal zulässige Lösungsunterschied beträgt 10^{-15} .

Makroskopischer Geschwindigkeitsparameter	$v = \frac{\rho \cdot g \cdot r^2}{8 \cdot \eta}$	0,188 mm/s
Max. Einzugslänge	$l_{max} = \frac{1}{\sin(\alpha)} \cdot \frac{2 \cdot \gamma \cdot \cos(\phi)}{\rho \cdot g \cdot r}$	271,3 mm
Max. Steighöhe	$h_{max} = \frac{2 \cdot \gamma \cdot \cos(\phi)}{\rho \cdot g \cdot r}$	271,3 mm
Wirksame Eintauchtiefe	l_u	$< 10^{-3}$ mm
Startzeitpunkt	t_0	0 s

Hierbei ist zu beachten, dass die Kapillarradien in den Formeln des makroskopischen Geschwindigkeitsparameters und der maximalen Steighöhe für nichtrunde Kapillaren separat zu sehen sind, da eine erhöhte Reibung vorliegt.

Daraus abgeleitete Modelleigenschaften:

Zeitdauer, bis 95% der max. Einzugslänge erreicht ist	$t_{95} = \frac{-0,95 \cdot h_{max} - (l_u \cdot \sin(\alpha) + h_{max}) \cdot \ln(1-0,95)}{v \cdot \sin^2(\alpha)}$	2.945 s
Initiale Einzugs geschwindigkeit (schräg und waagrecht)	$\frac{dl}{dt_{t=0}} = \frac{c \cdot h_{max}}{l_u}$	> 1.000 mm/s
Washburn-Kapillarkonstante	$c = v \cdot h_{max}$	51,14 mm ² /s

Bewertung der Qualität der Schätzung

Die Qualität der Schätzung kann über den verbleibenden Schätzfehler ermittelt werden. Hierzu werden die Fehler r_i zwischen den Messwerten l_i und den Schätzwerten y_i ermittelt, mit den individuellen Faktoren w_i und z_i gewichtet und anschließend kumuliert. Ergebnis ist so der verbleibende Schätzfehler R .

$$R = \sum_{i=1}^n w_i \cdot z_i \cdot r_i$$

Gewichtung des Fehlers nach Wichtigkeit $w_i = w_0 + (100\% - w_0) \cdot \frac{r_i}{r_n}$; $w_0 = 100,0\%$

Methode zur Fehlerermittlung	
------------------------------	--

Abbildung 51: Identifizierte Modellparameter im Ergebnisreport.

Neben den identifizierten, direkt im mathematischen Modell vorkommenden Parametern werden weitere Modelleigenschaften aufgelistet, die sich aus diesen Parametern ergeben. Die sind insbesondere:

- a) Die Zeitdauer, bis 95 % der Einzugslänge erreicht sind.
- b) Die Washburn-Kapillarkonstante.

Während der erste Wert einen recht guten Eindruck über die Zeitdauer des Flüssigkeitseinzugs gibt, liefert der zweite Wert einen Anhaltspunkt über die Stärke des kapillaren Flüssigkeitseinzugs im waagerechten Fall.

Die folgende Abbildung zeigt den Abschnitt zur Bewertung der Qualität der Schätzung der Parameteridentifikation.

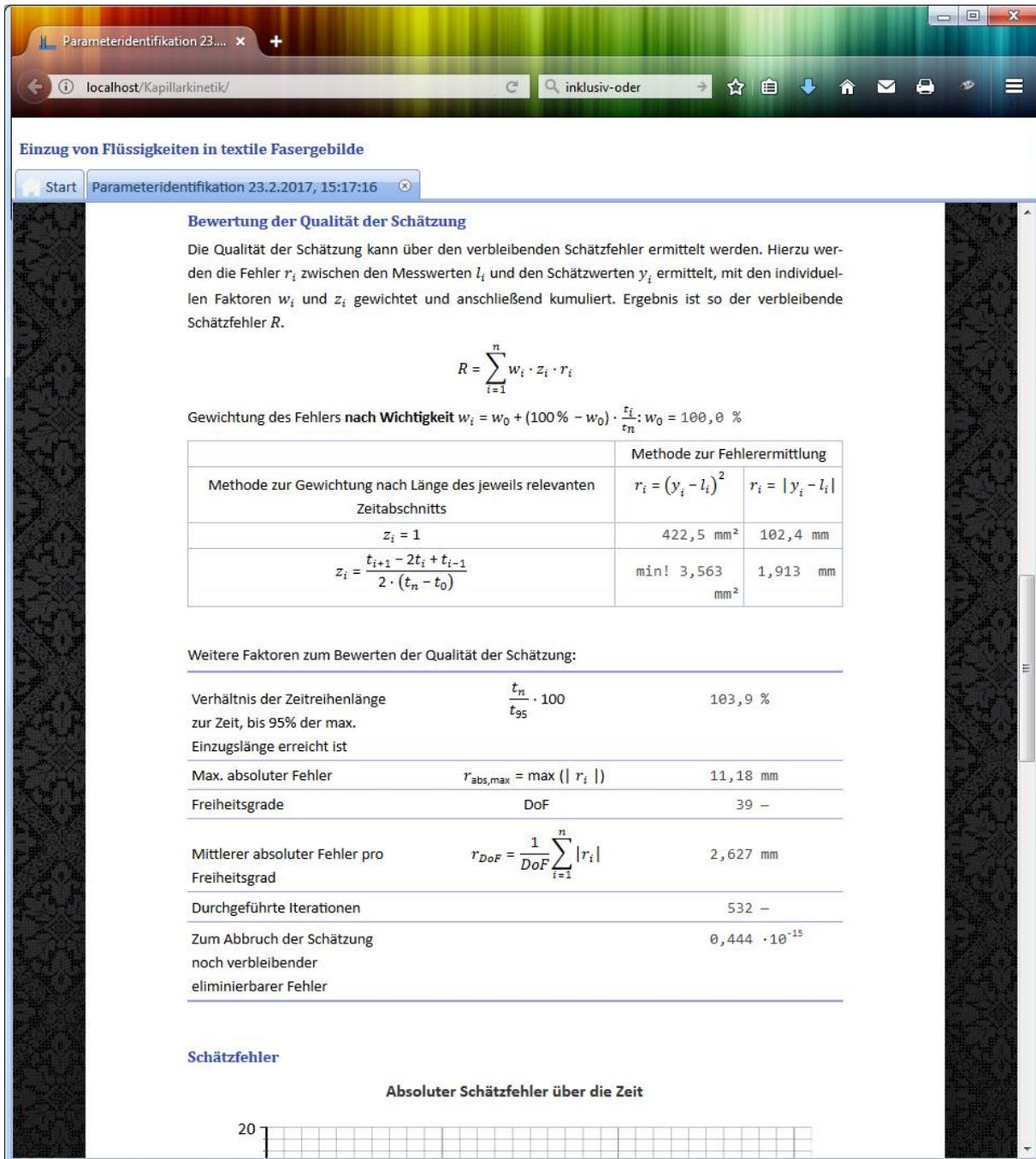


Abbildung 52: Bewertung der Qualität der Schätzung im Ergebnisreport.

Dies umfasst die Schätzfehler nach allen implementierten Methoden zur Fehlerermittlung, weiter verschiedene Faktoren zum Bewerten der Qualität der Schätzung. Die folgende Tabelle führt für diese Faktoren verschiedene Interpretationsoptionen auf.

Tabelle 17: Interpretationsoptionen der Faktoren zum Bewerten der Schätzqualität.

Faktor zum Bewerten der Schätzqualität	Interpretationsoptionen
Verhältnis der Zeitreihenlänge zur Zeit, bis 95 % der max. Einzugslänge erreicht ist	<ul style="list-style-type: none"> Falls die Steigung zu Ende der Zeitreihe noch relativ steil ist und der Verhältniswert klein ist, ist die Wahrscheinlichkeit höher, dass die identifizierte maximale Einzugslänge einen Mindestwert darstellt, d.h. der wirkliche Wert kann noch über dem identifizierten Wert liegen.
Max. absoluter Fehler ¹¹⁸	<ul style="list-style-type: none"> Dieser Wert ist im Verhältnis zur identifizierten maximalen Einzugslänge zu sehen: Werte > 5 % deuten auf Probleme beim Aufnehmen der Zeitreihe hin. Dies kann auf Unregelmäßigkeiten in der Probe, aber auch auf Probleme beim Ablesen der Einzugsängen zurückzuführen sein. Weiter sollte der Zeitpunkt des maximalen absoluten Fehlers in der Startphase des Flüssigkeitseinzugs liegen.
Freiheitsgrade ¹¹⁹	<ul style="list-style-type: none"> Die Zahl der Freiheitsgrade sollte sinnvollerweise > 30 sein. Je mehr Freiheitsgrade, desto besser.
Mittlerer absoluter Fehler pro Freiheitsgrad	<ul style="list-style-type: none"> Dieser Wert sollte nicht mehr als 5 % der max. Einzugslänge ausmachen. Bei sehr guten Parameteridentifikationen ist dieser < 2 %.
Durchgeführte Iterationen	<ul style="list-style-type: none"> Dieser Wert sollte deutlich unter der vorgegebenen Maximalzahl an Iterationen liegen. Weiter steht dieser Wert immer im Verhältnis zur Variantenbreite der Startwerte für die Parameteridentifikation und zum maximal zulässigen Unterschied zwischen schlechtester und bester Parameterkombination.
Nach Abbruch der Schätzung verbleibender Schätzfehler	<ul style="list-style-type: none"> Dieser Wert ist nur dann relevant, wenn die maximal erlaubte Zahl an Iterationen erreicht wurde.

Es ist dabei sicherlich ersichtlich, dass hier sicherlich noch verschiedene Optionen zum Verbessern des Demonstrators bestehen. Bisher nicht berücksichtigt wurden folgende weitere mögliche Bewertungskriterien:

- Die Steigung ab dem letzten Schnittpunkt der Zeitreihe und der Simulation sollte in der Zeitreihe und in der Simulation annähernd gleich sein.
- Je mehr Schnittpunkte es zwischen der vorgegebenen und der simulierten Zeitreihe gibt, umso schlechter ist letztlich die Simulation.

¹¹⁸ Der größte gefundene absolute Fehler zwischen der gegebenen Zeitreihe und der Simulation

¹¹⁹ Ein Maß für die Überbestimmtheit der Schätzung.

- Der relative Schätzfehler sollte zu Simulationseende sehr gering sein. In der Anfangsphase darf er auch etwas größer ausfallen.

Die folgende Abbildung zeigt die Entwicklung des absoluten Schätzfehlers über die Zeit und eine tabellarische Aufstellung der Original-Zeitreihe sowie der Schätzwerte.

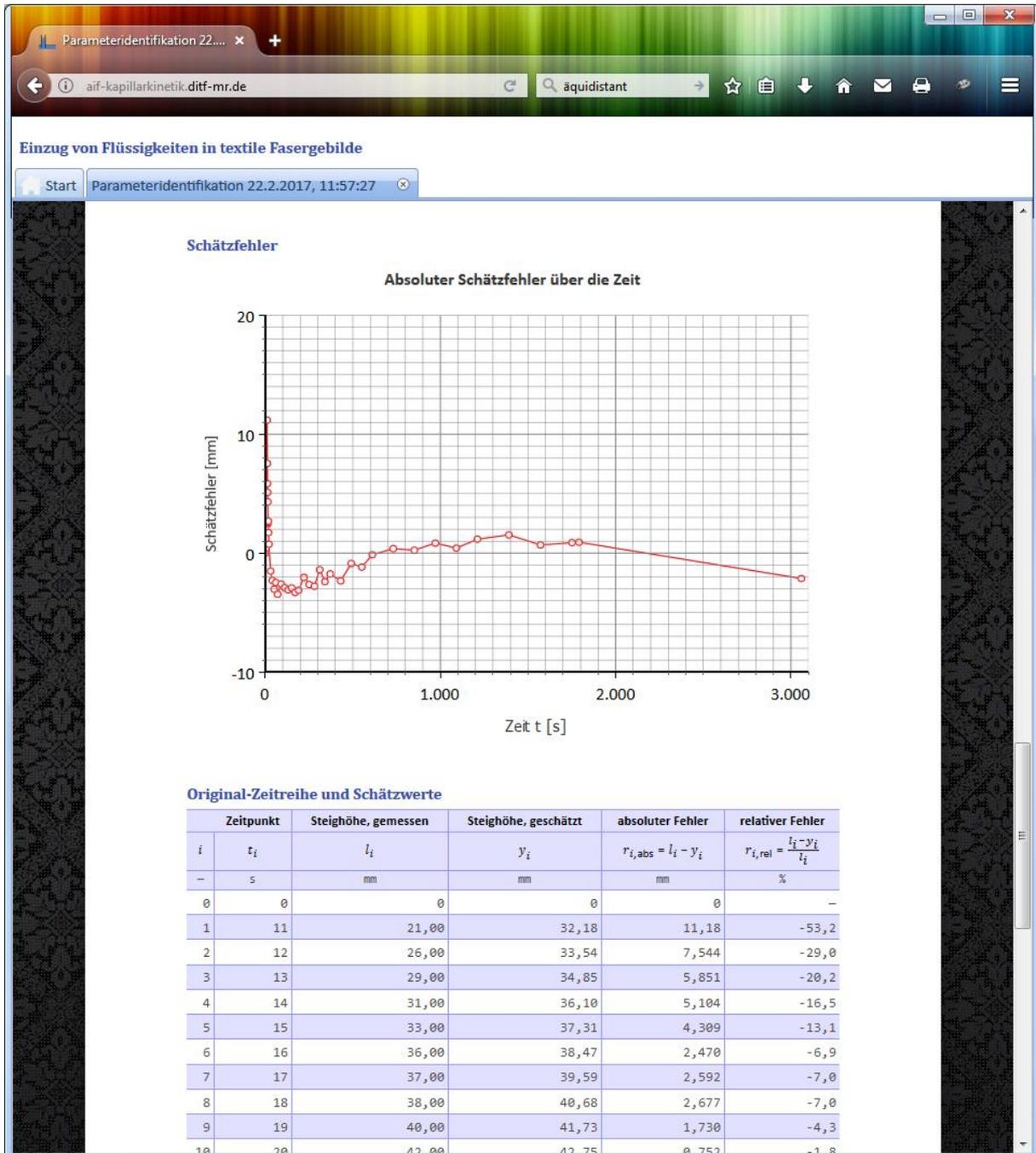


Abbildung 53: Entwicklung des Schätzfehlers über die Zeit und Gegenüberstellung der Original-Zeitreihe mit den Schätzwerten.

Die tabellarische Gegenüberstellung der Original-Zeitreihe mit den Schätzwerten ist hierbei für die Weiterverarbeitung in einer Tabellenkalkulation vorgesehen: die Tabelle kann hierzu einfach aus dem Browser¹²⁰ kopiert werden.

Hier böte es sich noch an, die jeweils angewandten Gewichtungsfaktoren für den Fehler mit in der Tabelle für weitere Auswertungen aufzulisten.

5.2.3 Validierung

Bei den ersten Sitzungen des Projektbegleitenden Ausschusses zeigte sich deutlich, dass die Anwender aus den Unternehmen sich insbesondere für folgende Aspekte interessierten:

- „Wie sieht eigentlich der Kapillareffekt bei meinen Textilstrukturen aus?“
- „Wo liegt eigentlich die maximale Steighöhe für mein Textil?“
- „Wie kann ich Aussagen zum senkrechten Flüssigkeitseinzug auf den waagerechten Flüssigkeitseinzug übertragen?“
- „Was bedeutet dies letztlich für die Auslegung meiner Produkte?“
- „Wie stark sind stochastische Einflüsse?“
- „Wie sieht es mit der Reproduzierbarkeit aus?“
- „Welche Aussagen bekomme ich zu meinem Kontaktwinkel?“

Dementsprechend konzentrierte sich die Validierung neben der Charakterisierung einer Vielzahl an in Konstruktion und Anwendung unterschiedlichen Proben insbesondere auf die Analyse von Zusammenhängen zu den oben aufgeführten Fragen. Die folgenden Abschnitte widmen sich den so gefundenen Erkenntnissen.

5.2.3.1 Verlauf des kapillaren Flüssigkeitseinzugs in verschiedenen Textilkonstruktionen

Der kapillare Flüssigkeitseinzug in verschiedenen Arten von Textilkonstruktionen findet letztlich auf folgende Weise statt:

- a) Alleinige Benetzung der Faseroberflächen
(z.B. beim Feuchteabtransport von der Haut)
- b) Flüssigkeitseinzug in weite Kapillarstrukturen
- c) Flüssigkeitseinzug in enge Kapillarstrukturen
- d) Flüssigkeitsabsorption in das Fasermaterial bzw. in den Faserhohlkern

Effekt a) stellt dabei eine kriechende Benetzung durch kleinste Flüssigkeitsmengen auf der Faseroberfläche dar. Dieser Effekt wird durch einen geringen Kontaktwinkel φ begünstigt. Anschließend füllen sich zuerst die weiten Kapillarstrukturen b) im porösen Körper, da in diese die Flüssigkeit schnell einströmen kann. Da das Verhältnis der benetzbaren Oberfläche im Querschnitt deutlich geringer ist als bei engen Kapillarstrukturen c) steigt die Flüssigkeit in den weiten Kapillarstrukturen b) längst nicht so hoch wie in engen Kapillarstruktu-

¹²⁰ Gegebenenfalls muss hierzu noch ein passendes AddOn nachinstalliert werden. Bei Firefox kommt z.B. das AddOn „TableTools2“ von <https://addons.mozilla.org/de/firefox/addon/tabletools2/> in Frage.

ren c). Sollte das Material selbst in nennenswerter Menge die Flüssigkeit absorbieren, führt dies zum einen zu einer Verengung der Kapillarstrukturen, zum anderen zu einem sinkenden Kontaktwinkel an den Rändern der benetzten Zone.

Mit der Methode zur Parameteridentifikation lassen sich dabei alleinig die Einzugsformen b) und c) beschreiben; a) und d) benötigen andere Charakterisierungsverfahren.

Dementsprechend ergeben sich für verschiedene Arten von Textilstrukturen und Anwendungen auch verschiedene Formen des kapillaren Flüssigkeitseinzugs. Die folgende Tabelle ordnet diese qualitativ zu:

Tabelle 18: Qualitative Zuordnung verschiedener Arten textiler Fasergebilde zu Formen des kapillaren Flüssigkeitseinzugs.

Textiles Fasergebilde	a) Benetzung der Faseroberfläche	b) Flüssigkeitseinzug in weite Kapillarstrukturen	c) Flüssigkeitseinzug in enge Kapillarstrukturen	d) Flüssigkeitsabsorption in das Fasermaterial bzw. in den Faserhohlkern
Einzelne Filamentfaser, Stapelfaser	++			+
Multifilament	++		++	+
Docht	++		++	+
Einlagige Gewebe, Gestrick	++		+++	++
Frotteegewebe	++		+++	+++
Vlies	++	+++	++	++

5. Forschungsergebnisse

So zeigte sich beispielsweise, dass die Einzugs­geschwindigkeit von Wasser in Handtücher aus Frottiergewebe deutlich von deren Ausrüstung abhängt:

Tabelle 19: Qualitative Zuordnung verschiedener Arten textiler Fasergebilde zu Formen des kapillaren Flüssigkeitseinzugs.

Textiles Fasergebilde	Geschwindigkeitskonstante v [mm/s]	Max. Steighöhe h_{max} [mm]	Washburn-Kapillarkonstante c [mm ² /s]	Zeitdauer, bis 95 % der Steighöhe erreicht ist t_{95} [s]
Frottierware, grau 	0,604	149,1	90,07	5.028
Frottierware, weiß 	0,126	166,0	20,92	7.458
Frottierware, grün 	0,115	94,2	10,83	1.671

Das dabei kapillar aufgenommene Flüssigkeitsvolumen lag dabei – subjektiv bewertet¹²¹ – deutlich unter dem von Vliesen aus Baumwolle bzw. mit Rekuperatfasern, da letztlich nur Kapillarstrukturen mit vergleichsweise kleinem Durchmesser sowie Feuchteabsorption in die Fasern vorliegt.

Handtücher aus Vliesstoffen finden sich z.B. bei Decathlon im Handel. Marktgängig sind ebenso Handtücher aus Mikrofasern, oft mit deutlich größer ausgeprägten, über die Garnoberfläche hinausragenden Bögen. Hier Entwicklungspotenziale für Kombihandtücher, die sowohl die Rauheit der Frottierware als auch das speicherbare Flüssigkeitsvolumen von Vliesstrukturen aufweisen.

5.2.3.2 Zur maximalen Steighöhe in Textilstrukturen

Es zeigte sich, dass eine Reihe an Einflüssen die maximale Steighöhe bestimmen:

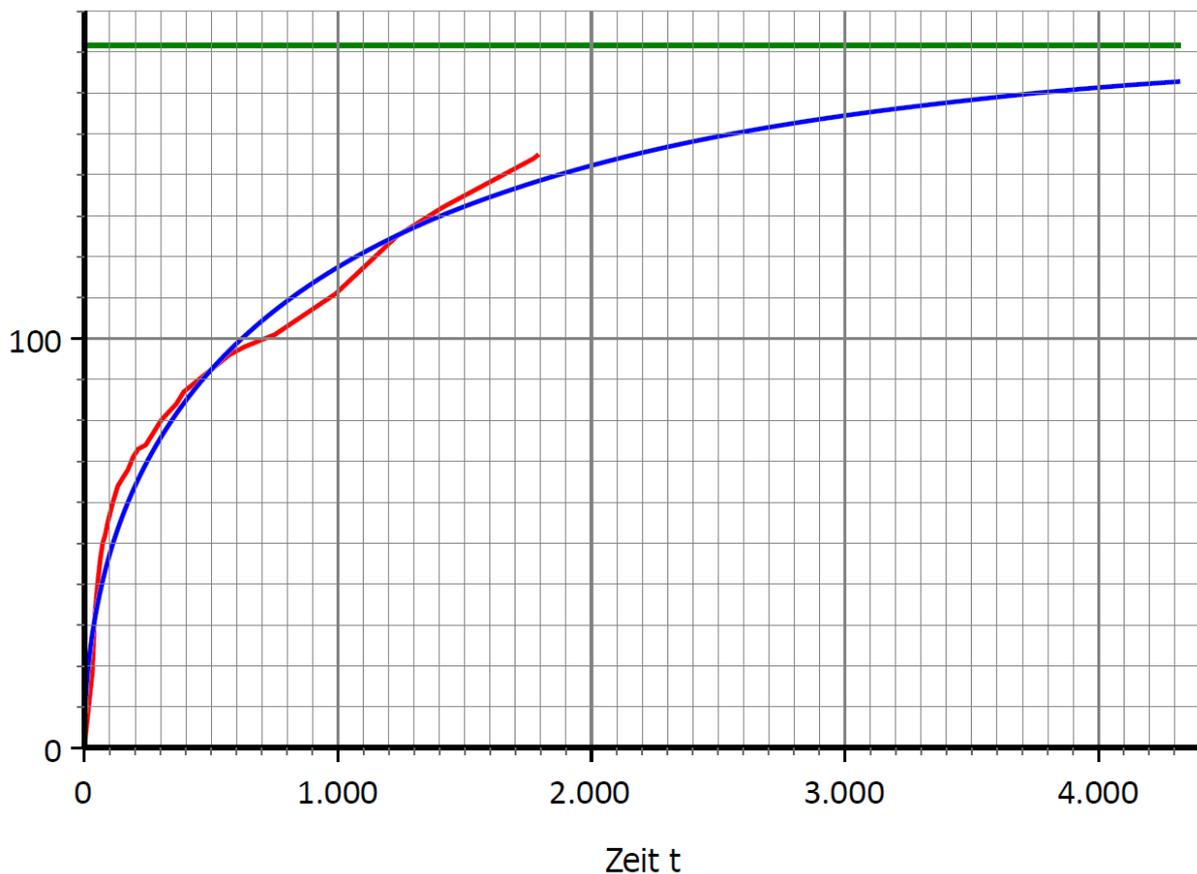
- Quellende Fasern können zu einer Verengung der Kapillarstrukturen führen. Dies erhöht mit der Zeit die maximale Steighöhe. Dies wirkt sich qualitativ auf die aufgenommenen Zeitreihen aus. Sollte die Charakterisierungsdauer des Flüssigkeitseinzugs deutlich unterhalb der geschätzten Zeit bis zum Erreichen von 95 % der geschätzten Einzugslänge liegen, versteht sich demnach die geschätzte maximale Steighöhe grundsätzlich als Untergrenze.
- Die Einzugs geschwindigkeit und die Oberflächenspannung werden erheblich von der Temperatur beeinflusst. Prinzipiell steigert sich die Einzugs geschwindigkeit auch mit dem Flüssigkeitseinzug. Temperaturschwankungen von schon ± 2 °C können einen deutlichen Einfluss auf die Qualität der aufgenommenen Zeitreihen haben¹²².
- Verdunstungseinflüsse können dazu führen, dass die Flüssigkeit nur so hoch im textilen Fasergebilde steigt, bis ein Gleichgewicht zwischen nachströmender und verdunstender Flüssigkeit besteht. Dies zeigt sich beispielsweise durch ausfallenden Farbstoff am Ende des benetzten Teils der Kapillarstruktur¹²³.

¹²¹ Für Frotteehandtücher wurde keine Wasseraufnahme bestimmt, da die Methodik zu diesem Zeitpunkt noch nicht entwickelt war.

¹²² Damit gilt es, die Temperatur während einer Charakterisierung des kapillaren Flüssigkeitseinzugs unbedingt konstant zu halten. Ebenso folgt die Anforderung, dass möglichst bei der Arbeitstemperatur (und -feuchte) des Kapillarsystems charakterisiert werden sollte.

¹²³ Hieraus ergibt sich zwingend die Anforderung, Verdunstungseinflüsse entweder geeignet mit zu charakterisieren oder systematisch auszuschließen.

Hier ein Beispiel für eine zu früh abgebrochene Zeitreihe zum senkrechten Flüssigkeitseinzug von Wasser in ein Viscose-Filamentkabel:



grün: prognostizierter Mindestwert für die max. Einzugslänge [mm], rot: aufgenommene Zeitreihe [mm], blau: aus der Parameteridentifikation resultierende Zeitreihe der senkrechten Einzugslänge [mm].

Abbildung 54: Senkrechter Flüssigkeitseinzug von Wasser in ein Danufil-Filamentkabel (Viscose) mit 3,3dtex.

Dabei ist ersichtlich, dass der Flüssigkeitseinzug in den ersten 500 s schneller erfolgt, als dies das Simulationsmodell erklären würde, weiter scheint die simulierte Zeitreihe in dieser Phase einen deutlich niedrigeren Wert für die maximale Einzugslänge anzustreben. Auch der grün eingezeichnete Mindestwert für die max. Einzugslänge erscheint – bezogen auf die Steigung der roten Kurve zu deren Ende hin – deutlich zu niedrig.

Bei der Auslegung einiger Kapillarsysteme ist geplant, Wasser aus der durch Adhäsionskräfte in der Kapillarstruktur angehobenen Flüssigkeitssäule zu entnehmen. Hierbei ist zu beachten, dass der auf einer gewissen Steighöhe drucklos¹²⁴ entnommene Volumenstrom \dot{V}_{Ent} nicht größer als der auf dieser Steighöhe durch die Fließfront-Geschwindigkeit $\frac{dl}{dt}$ und die benetzbare Querschnittsfläche A_F hervorgerufene kapillare Flüssigkeitseinzug in [m³/s] ist:

¹²⁴ Unter der Annahme, dass das textile Fasergebilde offene Deck- und Seitenflächen hat.

$$\dot{V}_{Ent} \leq \frac{dl}{dt} \cdot A_F \quad [\text{m}^3/\text{s}] \quad (116)$$

Sollte \dot{V}_{Ent} jedoch größer als $\frac{dl}{dt} \cdot A_F$ sein, ist es sinnvoll, mehrere Kapillarstrukturen nebeneinander bereitzustellen: so lässt sich bei Dochtstrukturen die Dochtzahl erhöhen, bei Flächengebilden wie Vliesen und Geweben bietet es sich an, größere Stücke einzusetzen.

5.2.3.3 Zur Übertragbarkeit von Aussagen zum senkrechten Flüssigkeitseinzug auf den waagerechten Flüssigkeitseinzug

Gerade bei Herstellern von Vliesen für Hygieneanwendungen besteht reges Interesse an der Ableitung von Aussagen zum waagerechten Flüssigkeitseinzug aus dem senkrechten Flüssigkeitseinzug. Daher wurden für ausgewählte Materialien auch vergleichende Messungen zum waagerechten Flüssigkeitseinzug durchgeführt. Hierzu wurde die Kapillarstruktur in der Versuchseinrichtung so gekippt, dass diese im Wesentlichen waagrecht lag, aber nach wie vor senkrecht in die Flüssigkeit eintauchte. Dies entspricht im Wesentlichen folgender Versuchsanordnung:

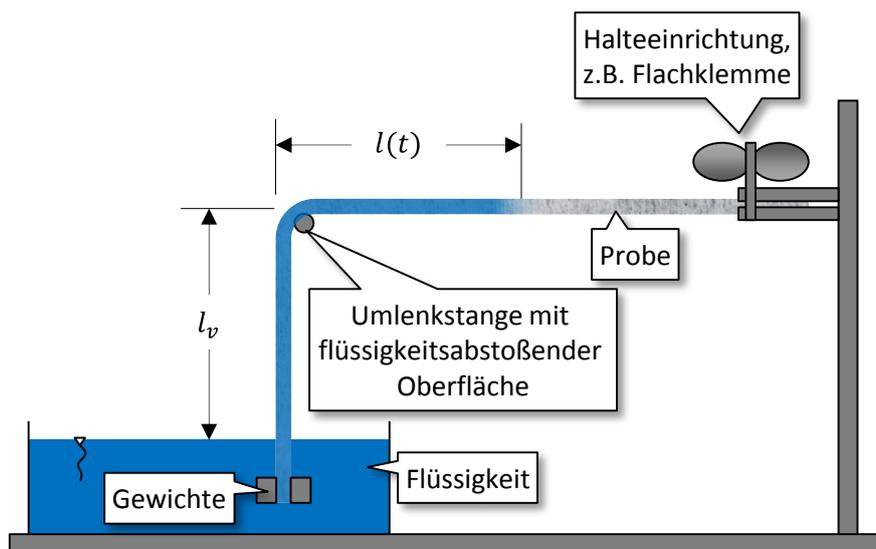


Abbildung 55: Versuchseinrichtung zum Ermitteln des zeitlichen Verlaufs der Einzugsfront $l(t)$ beim waagerechten Flüssigkeitseinzug in ein textiles Fasergebilde.

Es wird derselbe rechteckige Probenzuschnitt wie beim senkrechten bzw. schrägen Flüssigkeitseinzug verwendet. Die Zeitreihe $l(t)$ des Flüssigkeitseinzugs beginnt dabei ab Erreichen einer Umlenkstange mit flüssigkeitsabstoßender Oberfläche. Das textile Fasergebilde ist dabei l_v [m] über der Flüssigkeit angeordnet. So ergibt sich folgendes mathematisches Modell für den Verlauf der Einzugsfront:

$$\frac{dl}{dt} = \frac{c}{l_u + l_v + l} \cdot \left(1 - \frac{l_v}{h_{max}}\right) \quad (117)$$

Dabei stellen wie gehabt $c = h_{max} \cdot v$ die Washburn-Kapillarkonstante und l_u die wirksame Eintauchtiefe dar, weiter h_{max} die maximale Steighöhe.

Unter der Voraussetzung, dass die Kapillaren so fein sind, dass benetzbare Oberfläche bei senkrechter und waagerechter Anordnung des Materials in beiden Fällen ähnlich groß ist, kann nun die Übertragbarkeit von Ergebnissen des senkrechten auf den waagrechten Flüssigkeitseinzugs untersucht werden. Dies wird anhand des folgenden Beispiels illustriert.

Im folgenden Versuch wurden 3 kurze Zeitreihen zum senkrechten Einzug von Sonnenblumenöl bei Standard-Raumklima in ein Baumwoll-Vlies für Hygieneanwendungen aufgenommen¹²⁵. Die Länge dieser Zeitreihen betrug 58 min. Für jede dieser Zeitreihen wurde eine Parameteridentifikation durchgeführt. Anschließend wurden für alle identifizierten Parameter die Mittelwerte von v und h_{max} berechnet. Abbildung 56 zeigt den Kurvenverlauf des kapillaren Flüssigkeitseinzugs mit den identifizierten Parametern sowie die zugrunde liegenden Zeitreihen. Zur Validierung zeigt Abbildung 56 weiter eine längere Zeitreihe. Diese streut zwar – aufgrund einer mäandernden Einzugsfront – deutlich mehr als die ersten Zeitreihen, folgt aber nahe dem Verlauf des sich aus der Parameteridentifikation ergebenden Fließfront-Anstiegs.

¹²⁵ Die Wahl fiel hierbei auf Sonnenblumenöl, da so Verdunstungseffekte ausgeschlossen werden konnten, weiter verringert die – im Vergleich zu Wasser höhere – Viskosität die Einzugs geschwindigkeit.

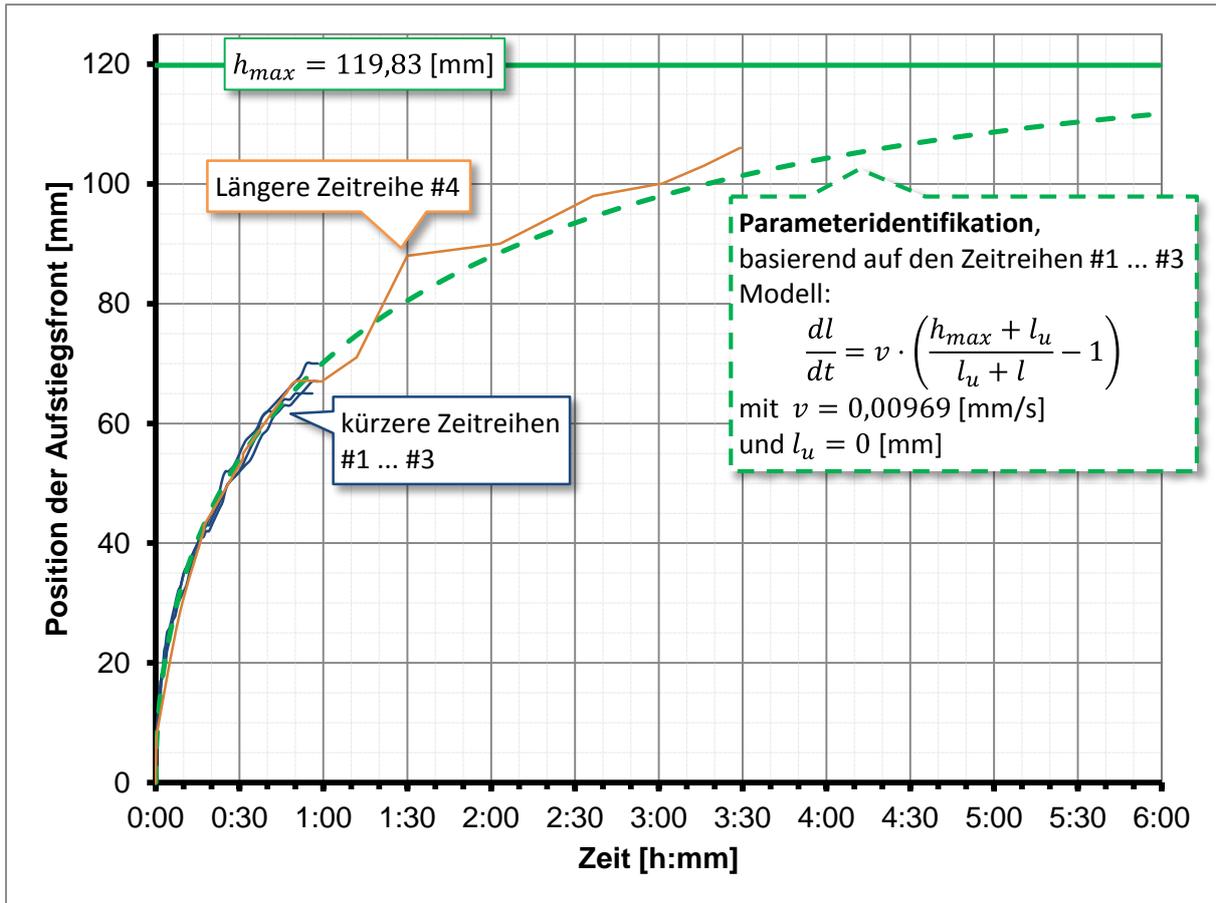


Abbildung 56: Vergleich des Kurvenverlaufs einer auf kurzen Zeitreihen basierenden Parameteridentifikation mit einer längeren Zeitreihe beim senkrechten Flüssigkeitseinzug von Sonnenblumenöl in ein Baumwoll-Vlies.

Die folgende Tabelle zeigt die Ergebnisse der vorgenommenen Parameteridentifikationen beim senkrechten Flüssigkeitseinzug:

Tabelle 20: Parameteridentifikationen zum senkrechten Einzug von Sonnenblumenöl in ein Baumwollvlies.

Messreihe	Verbleibender Fehler [%]	v [mm/s]	h_{max} [mm]	c [mm ² /s]	l_u [mm]	t_{95} [s]	
kurze Messreihen	#1	0,56	0,00929	118,9	1,105	$< 10^{-3}$	26.193
	#2	0,78	0,00968	118,7	1,150	$< 10^{-3}$	25.079
	#3	0,78	0,0101	121,9	1,231	$< 10^{-3}$	24.678
Mittelwert		0,00969	119,8	1,162	$< 10^{-3}$	25.317	
längere Messreihe #4	1,21	0,00898	128,2	1,150	$< 10^{-3}$	29.217	

Zur Validierung dieser Werte beim waagerechten Flüssigkeitseinzug wurde die Probe waagrecht eingespannt, über eine Stange mit flüssigkeitsabstoßender Oberfläche umgelenkt und mit Gewichten beschwert in die Flüssigkeit getaucht (siehe Abbildung 55). Die Zeitreihe $l(t)$ wurde ab dem Moment aufgenommen, zu dem die Fließfront den Teflonzylinder erreicht hatte. Der senkrechte Abstand zwischen dem Flüssigkeitsspiegel und der Probe betrug dabei $l_v = 12$ mm. Es ergibt sich das mathematische Modell in Gleichung (117) für den Verlauf der Einzugsfront.

Die folgende Tabelle zeigt die Ergebnisse von Parameteridentifikationen für 5 ermittelte Messreihen (dargestellt in Abbildung 57) beim waagerechten Flüssigkeitseinzug:

Tabelle 21: Ergebnisse der Parameteridentifikation zum waagerechten Einzug von Sonnenblumenöl in ein Baumwoll-Vlies¹²⁶.

Messreihe	Verbleibender Fehler [%]	h_{max} [mm]	c [mm ² /s]	l_u [mm]
#5	1,28	120,9	1,277	$< 10^{-3}$
#6	0,98	120,5	1,258	$< 10^{-3}$
#7	0,96	117,4	1,092	$< 10^{-3}$
#8	2,30	118,4	1,226	$< 10^{-3}$
#9	1,65	116,5	1,081	$< 10^{-3}$
Mittelwert		1,434	118,74	1,1868
Spanne		1,34	4,4	0,196
95%-Konfidenzbereich des Mittelwerts	obere Grenze	1,92	120,4	1,269
	untere Grenze	0,94	117,1	1,105
Variationskoeffizient		39,00%	1,61%	7,87%

Der Vergleich mit Tabelle 20 zeigt, dass der Mittelwert von h_{max} für die kurzen Messreihen des senkrechten Flüssigkeitseinzugs im Konfidenzintervall des Mittelwerts des waagerechten Flüssigkeitseinzugs liegt. Bei der längeren Messreihe liegt h_{max} knapp außerhalb des Konfidenzintervalls, c jedoch innerhalb – es handelt sich jedoch um Einzelwerte, keine Mittelwerte.

¹²⁶ Die Parameteridentifikation erfolgte auf Basis von Differenzgleichungen.

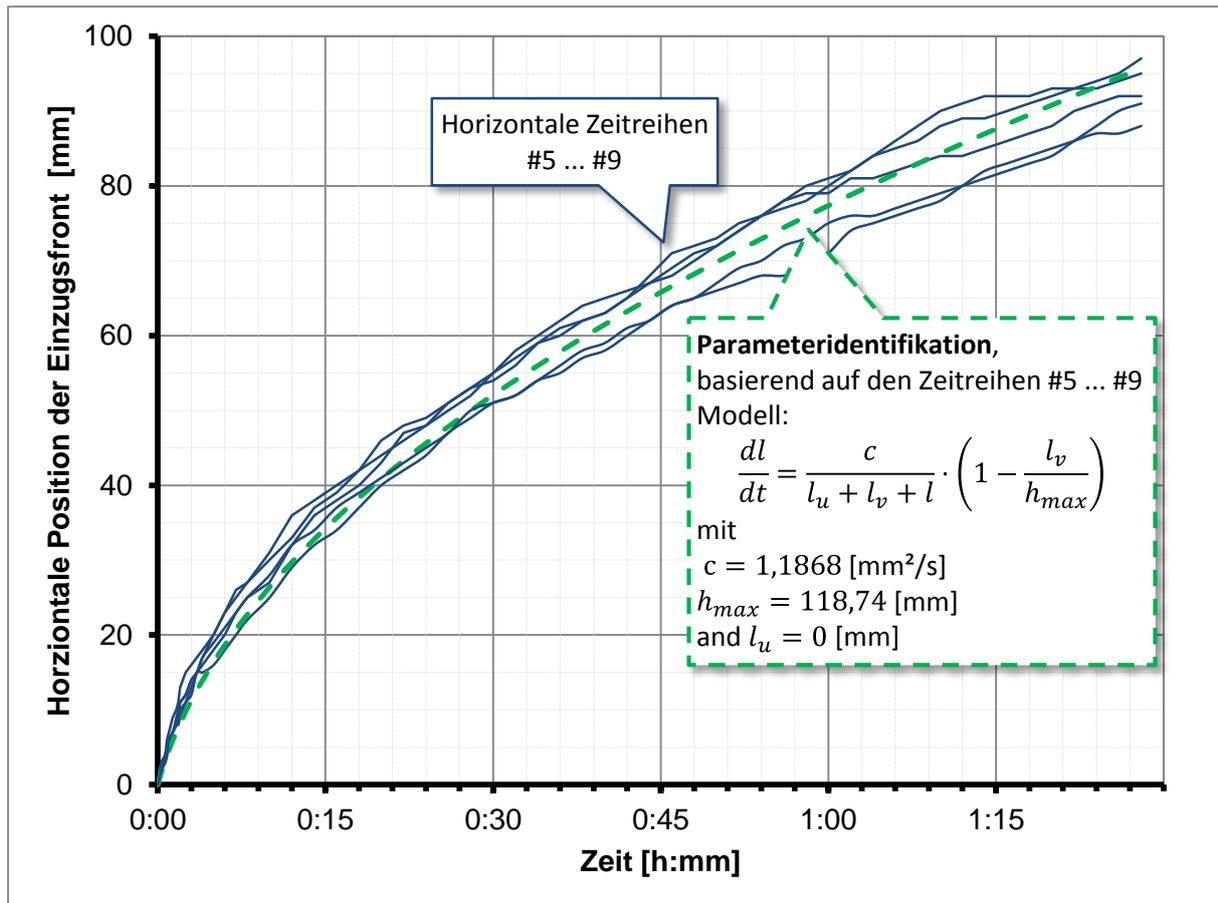


Abbildung 57: Zeitreihen zum waagerechten Flüssigkeitseinzug von Sonnenblumenöl in ein Baumwoll-Vlies.

Zusammengefasst kann also davon ausgegangen werden, dass für dieses Baumwoll-Vlies und Sonnenblumenöl eine Übertragbarkeit der Ergebnisse der Parameteridentifikation vom senkrechten Flüssigkeitseinzug auf den waagerechten Flüssigkeitseinzug gegeben ist.

Ob die hier gezeigte Übertragbarkeit von Aussagen zum waagerechten Flüssigkeitseinzug aus dem senkrechten Flüssigkeitseinzug auch auf andere Kapillarsysteme zutrifft, ist jeweils im Einzelfall zu validieren; speziell bei größeren Kapillarstrukturen kann die im senkrechten und waagerechten Fall jeweils benetzbare Oberfläche im Querschnitt möglicherweise unterschiedlich ausfallen.

5.2.3.4 Formulierung von Produktanforderungen mit kapillarkinetischem Bezug

Die in diesem Abschnitt erläuterte neuartige Methodik erlaubt es nun erstmals, Zielwerte für verschiedene anwendungsbezogene Produktanforderungen zu formulieren.

Wählbar ist dabei jeweils die Einzugsrichtung der Flüssigkeit mit den möglichen Ausprägungen [senkrecht; vorgegebener Winkel zur Horizontalen α [°]; horizontal]. Ebenso zu spezifizieren sind die zu charakterisierenden Materialrichtungen [längs, quer].

So lassen sich folgende kapillarsystembezogene Anforderungen mittels Vorgaben formulieren:

- | | | |
|--|-------------------------|----------------------------|
| • Geschwindigkeitskonstante | v | [mm/s] |
| • Max. Steighöhe | h_{max} | [mm] |
| • Washburn-Kapillarkonstante | c | [mm ² /s] |
| • Benetzbare Querschnittsfläche | A_F | [m ²] |
| • Höhe der Flüssigkeitsbenetzung
bzw. kapillare Flüssigkeitsaufnahme der Fläche | h_{Fl} | [m]
[l/m ²] |
| • Verdunstung pro Längeneinheit, z.B. als Massenstrom | $\Delta m_{Verd,P,rel}$ | [µg/s/mm] |

Folgende geschwindigkeitsbezogene Anforderungen lassen sich mittels entsprechender Vorgaben formulieren:

- | | | |
|--|-------------------------------|-----------------------|
| • Geschwindigkeit der Einzugsfront
zu einem gegebenen Zeitpunkt
bzw. an einer gegebenen Position | $\frac{dl}{dt}$
t
l | [mm/s]
[s]
[mm] |
|--|-------------------------------|-----------------------|

Positionsbezogen lässt sich mittels Vorgaben folgende Anforderung formulieren:

- | | | |
|---|------------|-------------|
| • Einzugsposition
zu einem gegebenen Zeitpunkt | l
t | [mm]
[s] |
|---|------------|-------------|

Vorgaben lassen sich ebenso für folgende Volumen- bzw. Massenstrombezogene Anforderungen verfassen:

- | | | |
|--|---|-------------------------------------|
| • Volumenstrom auf vorgegebener Breite
zu einem gegebenen Zeitpunkt
bzw. an einer gegebenen Position | $\frac{dl}{dt} \cdot A_F$
t
l | [mm ³ /s]
[s]
[mm] |
| • Verdunstung
auf einem gegebenen Textilabschnitt der Länge | Δm_{Verd}
l | [µg/s]
[mm] |

Bezugnehmend auf das eingezogene Volumen lässt sich eine Vorgabe für folgende Anforderung formulieren:

- Eingezogenes Flüssigkeitsvolumen V [ml]
auf einer bestimmten Breite
- auf einer bestimmten vorgegebenen Länge l [mm]
- bzw. zu einem gegebenen Zeitpunkt t [s]

Gegebenenfalls sind diese Vorgabewerte noch in geeigneter Art und Weise mit Vorgaben für die jeweilige Unsicherheit, z.B. in Form von Maximalwerten für den Variationskoeffizienten bzw. in Form von Konfidenzintervallen zu ergänzen.

Wichtig sind beim Formulieren von Anforderungen auch die jeweiligen geltenden Rahmenbedingungen wie die Charakterisierungstemperatur und -luftfeuchte. Ebenso sollte die Größe der Prüflinge und die für die Formulierung der Anforderungskonformität heranzuziehende Dimensionierung festgelegt werden sowie die jeweilige Probenzahl, um stochastische Einflüsse mit erfassen zu können.

5.2.3.5 Stochastische Einflüsse

In DIN 53924 werden zu gegebenen Zeitpunkten ermittelten Steighöhenwerte $l(t)$ stochastisch zum Messergebnis aufbereitet. Dies ist jedoch problematisch, weil so aus kleineren lokalen Materialunregelmäßigkeiten resultierende Streuungen über den Einzugsweg bzw. die -zeit hinweg aufkumuliert werden. Ebenso problematisch ist dabei, dass es sich bei den vorgeschlagenen Ablesezeitpunkten von 10; 30; 60 und optional 300 s in vielen Fällen um die Startphase des kapillaren Flüssigkeitseinzugs handelt.

Die Methode zur Parameteridentifikation charakterisiert hingegen den Flüssigkeitseinzug ohne Bezug auf Zeitwerte, sondern durch die das Kapillarsystem zusammenfassend beschreibenden Konstanten v , h_{max} sowie l_u . Aus diesen Konstanten ergibt sich dann das Systemverhalten und so die Zeitreihe $l(t)$ für den Flüssigkeitseinzug in Kapillarrichtung. Dementsprechend bietet es sich nun an, die stochastische Streuung dieser identifizierten Parameter zu ermitteln. Zum – einigermaßen – sicheren Erkennen von Ausreißern wurden daher im Projekt stochastische Streuungen ab einer charakterisierten Messreihenanzahl von 5 berechnet. Das Charakterisierungsergebnis bilden so Mittelwerte für die ermittelten Konstanten sowie deren Konfidenzintervalle nebst den hierzu nötigen statistischen Hilfsvariablen /-maßen wie der Standardabweichung, dem Variationskoeffizienten sowie z.B. der Spanne.

Die Breite der zu charakterisierenden Prüflinge hat ebenso einen Einfluss auf das Messergebnis: je breiter der Prüfling, umso geringer fallen Einflüsse lokaler Dichteunterschiede auf die abgelesene (mittlere) Steighöhe aus. Ebenso wird die volumetrische Charakterisierung des Flüssigkeitseinzugs einfacher, da das Verhältnis zwischen den einziehenden Flüssigkeitsströmen und der Messunsicherheit der Waage weit geringer ausfällt.

Sollen jedoch lokale Streuungen beim Flüssigkeitseinzug stochastisch charakterisiert werden, bietet es sich an, v und h_{max} jeweils lokal in Unterabschnitten zeitlich hoch aufgelöster Zeitreihen zu bestimmen und die resultierenden – jeweils lokal gültigen – Werte stochastisch zu charakterisieren. Diese Charakterisierungsform könnte z.B. Anhaltspunkte über lokale Dichteschwankungen liefern.

5.2.3.6 Reproduzierbarkeit kapillarkinetischer Charakterisierungen

Letztlich liefert die hier beschriebene Methode zur Parameteridentifikation des Kapillareffekts ein parametrisiertes Simulationsmodell für den Flüssigkeitseinzug im von dem textilen Fasergebilde und der gewählten Flüssigkeit gebildeten Kapillarsystem. Nach Vorversuchen können dabei auch Aussagen über den Kapillareffekt bei anderen Neigungswinkeln der Kapillarstruktur getroffen werden.

Eine Reproduzierbarkeit unter real gegebenen Anwendungsbedingungen eines unter Charakterisierungsbedingungen parametrisierten Simulationsmodells kann durch folgende Aspekte beeinträchtigt werden:

Tabelle 22: Mögliche Auswirkungen geänderter Umgebungsbedingungen auf den kapillaren Flüssigkeitseinzug.

Aufgetragen ist jeweils die Wirkungspolarität (eine Erhöhung von ... [+ → steigert; - → vermindert] ...).

Änderungen der Umgebungsbedingung ...	beeinflusst ...			
	v	h_{\max}	Verdunstung	Gravimetrische Erfassung der einziehenden Flüssigkeitsmasse
Temperatur	+ ¹²⁷	- ¹²⁸	+	
Relative Luftfeuchte			-	
Luftbewegung	- ¹²⁹		+	
Erschütterungen				Steigerung der Streuung
Änderungen des Kontaktwinkels durch alterungsbedingte chemische Reaktionen, Oberflächenablagerungen, etc.¹³⁰	+		+	Leichte Verringerung der einziehenden Flüssigkeitsmasse

Der folgende Abschnitt 5.2.4 „Sensitivitätsanalysen“ liefert dabei Anhaltspunkte, wie entsprechende Einflüsse durch geänderte Umgebungsbedingungen abzuschätzen sind.

Sofern möglich sollten kapillarkinetische Charakterisierungen möglichst unter realen Anwendungsbedingungen stattfinden.

¹²⁷ Über eine Senkung der Viskosität bei einer Erhöhung der Temperatur.

¹²⁸ Über eine Senkung der Oberflächenspannung bei einer Erhöhung der Temperatur.

¹²⁹ Luftbewegung begünstigt die Verdunstung und führt so letztlich zu einer Abkühlung der Flüssigkeit.

¹³⁰ Dies kann insbesondere bei wiederholtem Flüssigkeitseinzug und Trocknen von Bedeutung sein.

5.2.3.7 Aussagen zum Kontaktwinkel

Der Kontaktwinkel zwischen einem Material und einer Flüssigkeit kann durch vergleichendes Ermitteln mit der maximalen Steighöhe und durch anschließendes Errechnen des unbekanntenen Kontaktwinkels bestimmt werden. So bietet es sich an, als Vergleichsflüssigkeit n-Hexan einzusetzen; diese hat immer einen Kontaktwinkel von 0° . Die Umrechnungen hierzu sind im Unterabschnitt „Adaptierte maximale Steighöhe“ von Abschnitt 5.1.4.4 beschrieben.

Ein Beispiel zur Kontaktwinkelermittlung an einem ungeprägten Vlies unbekannter Zusammensetzung mit einer spezifizierten Flächenmasse von 130 g/m^2 :

#	Flüssigkeit	Dichte ρ [g/cm ³]	Oberflächen- spannung γ [N/m]	Kontaktwinkel $\cos \theta$	h_{max} [mm] aus der Parameter- identifikation
1	Sonnenblumenöl mit 0,5 % roter Lebensmittelfarbe	0,91882	0,032944	?	40,00
2	Paraffinöl mit 0,5 % Ceresblau	0,85202	0,029732	?	47,04
3	n-Hexan	0,66	0,0184	$\cos(0^\circ) = 1$	48,00

So folgt nach Gleichung (55) für den Kontaktwinkel von Sonnenblumenöl (1):

$$\cos \theta_1 = \frac{\rho_1 \cdot h_{max,1}}{\rho_3 \cdot h_{max,3}} \cdot \frac{\gamma_3}{\gamma_1} \cdot \cos \theta_3 = \frac{0,91882}{0,66} \cdot \frac{40,00}{48,00} \cdot \frac{0,0184}{0,032944} \cdot 1 = 0,647958$$

Der Kontaktwinkel θ_1 ergibt sich dementsprechend zu:

$$\theta_1 = \arccos(0,647958) \cdot \frac{360}{2\pi} = 49,61^\circ$$

Mittels eines Tensiometers wurde für das Vlies und Sonnenblumenöl ein Kontaktwinkel von 40° gemessen.

Analog ergibt sich für den Kontaktwinkel von Paraffinöl (2):

$$\cos \theta_2 = \frac{\rho_2 \cdot h_{max,2}}{\rho_3 \cdot h_{max,3}} \cdot \frac{\gamma_3}{\gamma_2} \cdot \cos \theta_3 = \frac{0,85202}{0,66} \cdot \frac{47,04}{48,00} \cdot \frac{0,0184}{0,029732} \cdot 1 = 0,7829349$$

Der Kontaktwinkel θ_2 ergibt sich dementsprechend zu:

$$\theta_{21} = \arccos(0,7829349) \cdot \frac{360}{2\pi} = 38,47^\circ$$

Für Paraffinöl und das Vlies mittels eines Tensiometers ein Kontaktwinkel von 41° gemessen.

Die Ermittlung der unbekanntenen Kontaktwinkels erfolgte hier letztlich durch drei Verhältnisbildungen von Dichte, maximaler Steighöhe und Oberflächenspannung. Es ist ersichtlich, dass schon kleinere Fehler bei einem der dafür benötigten sechs Werte zu deutlichen Abweichungen im Ergebnis führen können. Letztlich ist das hier skizzierte Verfahren der Kontaktwinkel-

schätzung über die ermittelte maximale Steighöhe mit der Kontaktwinkelmessung über das Tensiometer nur bedingt vergleichbar: so ist beim hier beschriebenen Verfahren ein hinreichend sicherer Wert für die maximale Steighöhe nötig – dieser ist aber erst dann wirklich sicher, wenn er im Versuch erreicht wird. Weiter wird beim Einsatz des Tensiometers der Kontaktwinkel nach der Washburn-Gleichung zur gravitationsfreien Flüssigkeitsausbreitung bestimmt. Da dabei aber die Flüssigkeit in einen eingetauchten Prüfling adhäsionsgetrieben einzieht, kann der Gravitationseinfluss prinzipiell nur beim waagerechten Einzug vernachlässigt werden. Ein weiterer Gesichtspunkt ist die Probengröße. So wird ins Tensiometer eine vergleichsweise kleine Materialprobe eingespannt, bei der Parameteridentifikation des kapillaren Flüssigkeitseinzugs wird hingegen eine viel größere Probe verwendet. Es liegt nahe, die Kontaktwinkelermittlung mit beiden Verfahren ausführlich vergleichend zu untersuchen.

Bei der Verfahrenswahl ist die zum Ermitteln der Zeitreihe für die Parameteridentifikation benötigte Zeit ein weiteres Auswahlkriterium: So eignet sich das hier beschriebene Verfahren zur vergleichenden Kontaktwinkelbestimmung entweder nur für Kapillarsysteme mit kurzen Einzugszeiten bzw. solche Kapillarsysteme, bei denen der Kontaktwinkel nicht anders charakterisiert werden kann.

5.2.4 Sensitivitätsanalysen und Simulation zum Kapillareffekt

Sensitivitätsanalysen beschreiben im Sinne von Empfindlichkeitsanalysen, wie stark sich Änderungen einer Eingangsgröße auf die Ausgangsgrößen auswirken. So lassen sich die Stärke möglicher Einflüsse abschätzen, ebenso können ungefähre Schätzungen abgegeben werden, welches Systemverhalten sich in an einem anderen Arbeitspunkt zeigen könnte.

Die Sensitivitätsanalyse zum Kapillareffekt ist auf <http://aif-kapillarkinetik.ditf-mr.de/> im Programmmodul „Simulation des Flüssigkeitseinzugs in eine runde, schräge Kapillare“ integriert. Das Programmmodul ist mit Vorgabe-Datensätzen parametrisiert. Die folgenden Screenshots erläutern die Funktion des Moduls.

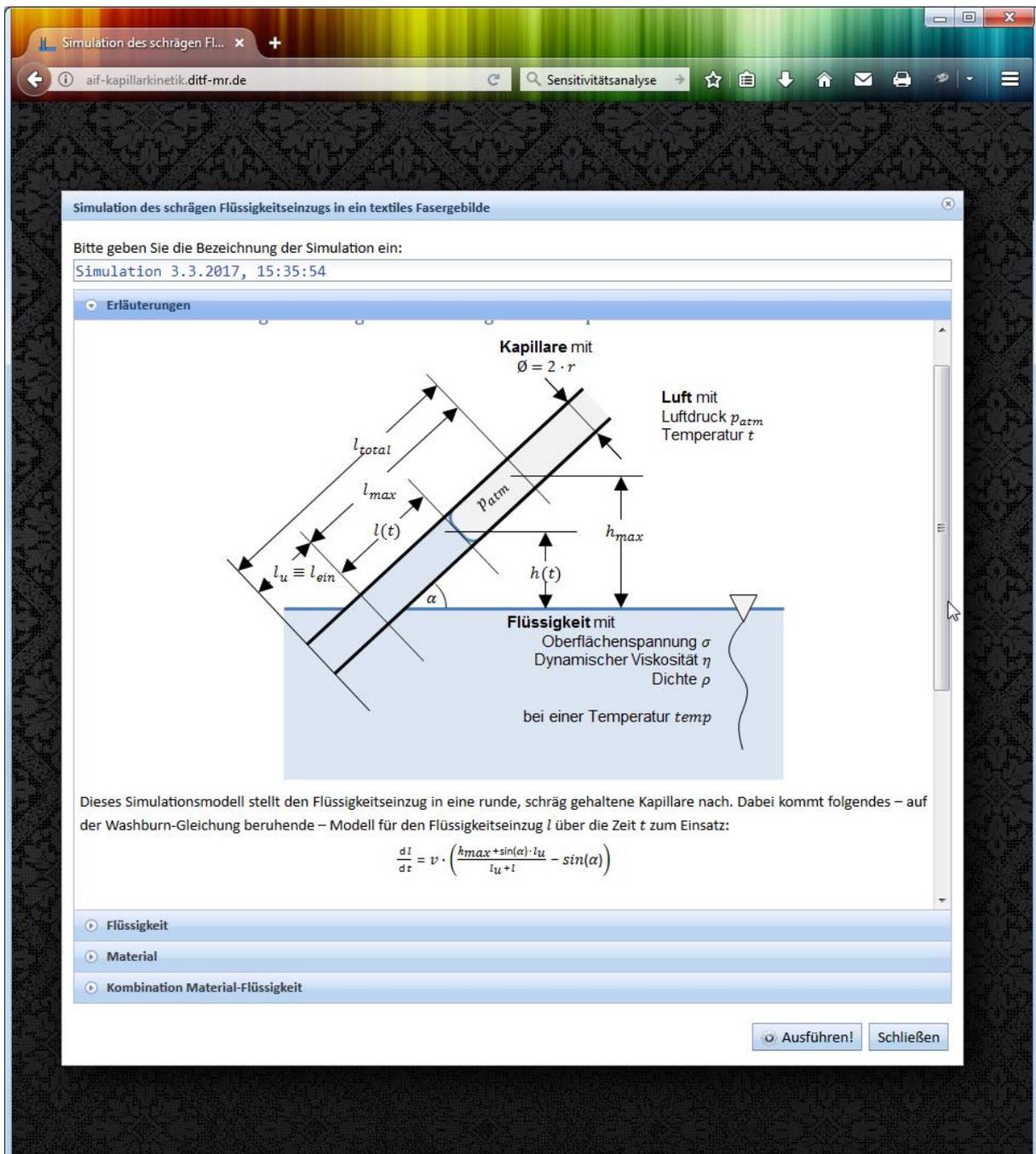
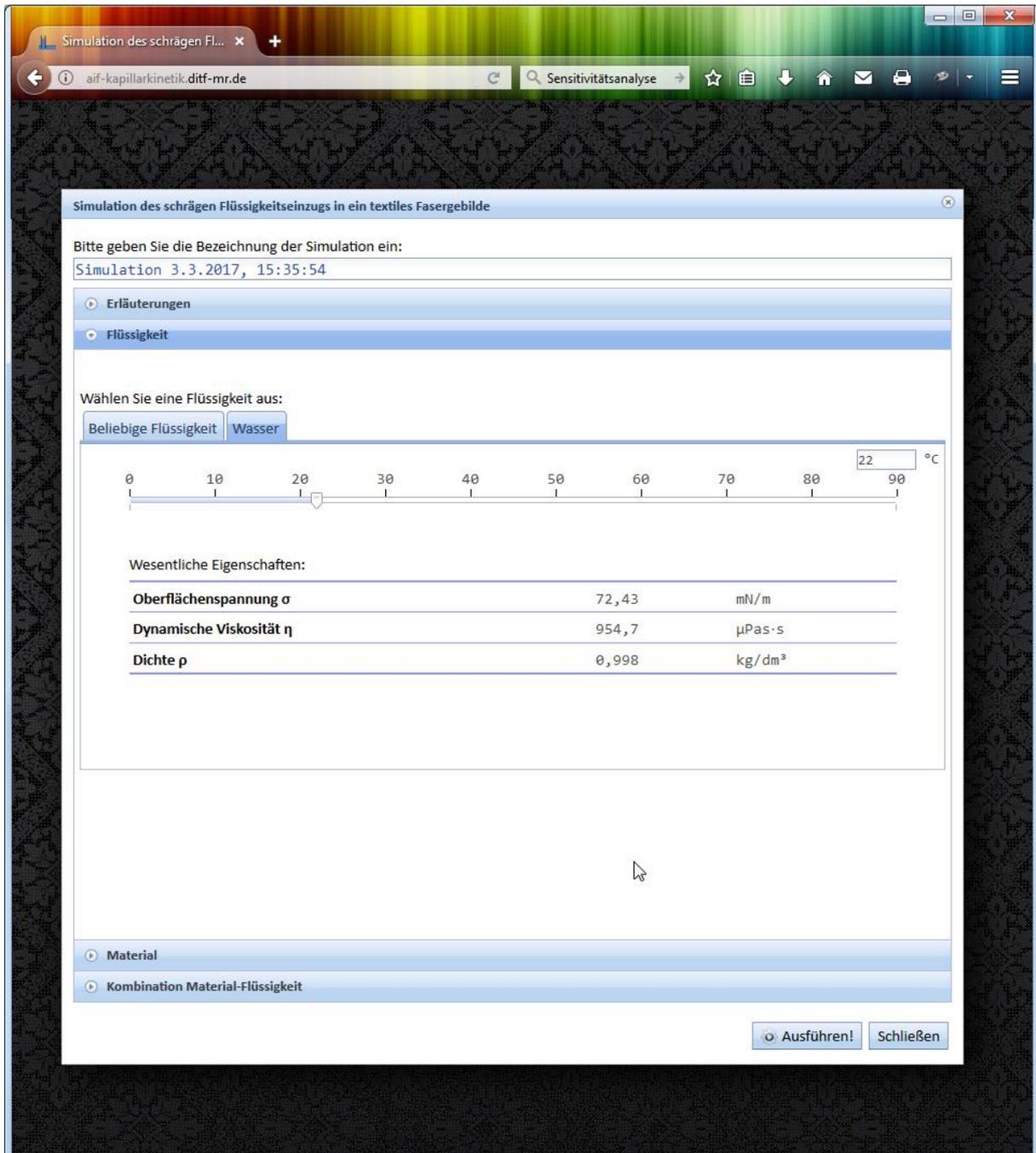


Abbildung 58: Simulation des Flüssigkeitseinzugs in runde Kapillaren: Erläuterungen.

Der erste Dialogteil des Programmmoduls erläutert detailliert das verwendete Ersatzmodell. Es handelt sich dabei um das Ersatzmodell für runde Kapillaren¹³¹.

¹³¹ Siehe Abschnitt 5.1.4.2, ab S. 35.



**Abbildung 59: Simulation des Flüssigkeitseinzugs in runde Kapillaren:
Flüssigkeitseigenschaften.**

Der nächste Abschnitt befasst sich mit den Flüssigkeitseigenschaften. Hier können entweder die Eigenschaften einer beliebigen Flüssigkeit oder die von Wasser eingepflegt werden. Die Eigenschaften von Wasser sind dabei temperaturabhängig. Hierzu wurden die in Abschnitt 5.1.3 beschriebenen Modelle hinterlegt. Nach Wahl einer passenden Temperatur werden so automatisch Werte für die Oberflächenspannung, die dynamische Viskosität und die Dichte errechnet.

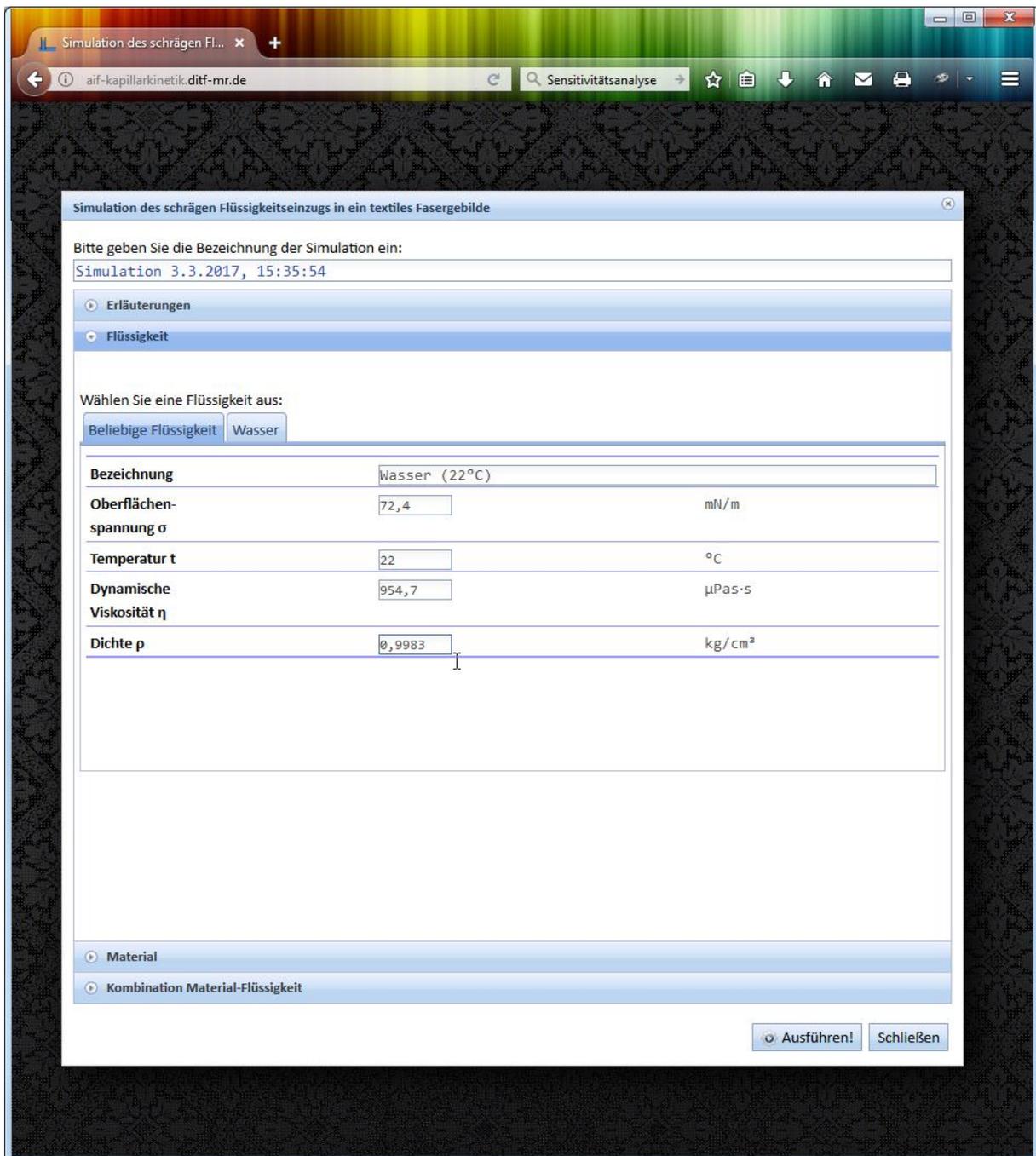


Abbildung 60: Simulation des Flüssigkeitseinzugs in runde Kapillaren: Einpflegen beliebiger Flüssigkeitseigenschaften.

Alternativ können diese Werte für eine beliebige Flüssigkeit direkt eingegeben werden.

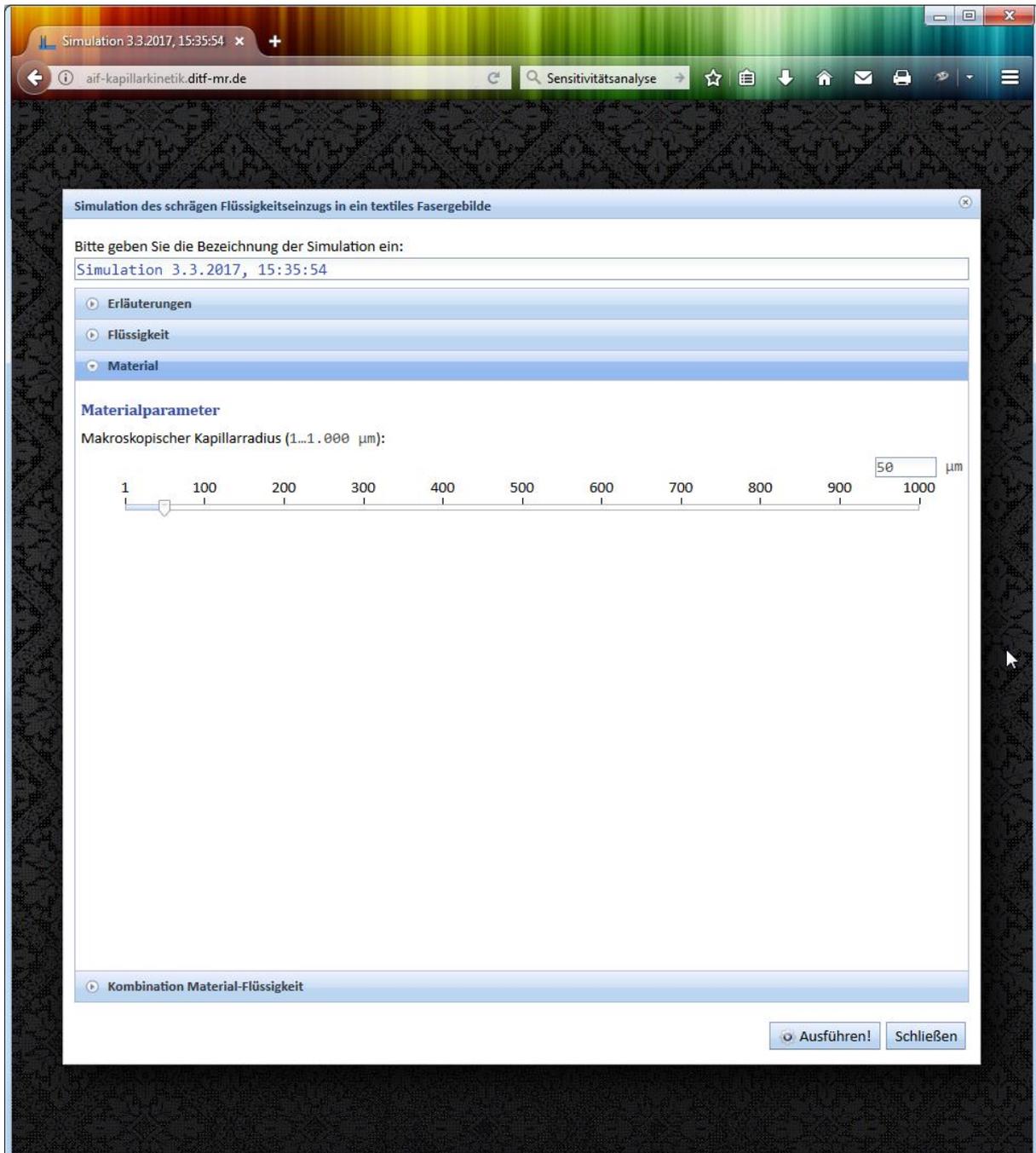


Abbildung 61: Simulation des Flüssigkeitseinzugs in runde Kapillaren: Materialeigenschaften.

Der einzige für runde Kapillaren relevante Materialparameter ist der Kapillarradius r . Typische Werte bewegen sich im Allgemeinen zwischen 5 ... 200 [μm].

Die Kombination von Material und Flüssigkeit zum Kapillarsystem wird über den Kontaktwinkel, die wirksame Eintauchtiefe und den Neigungswinkel der Kapillaren zur Senkrechten beschrieben:

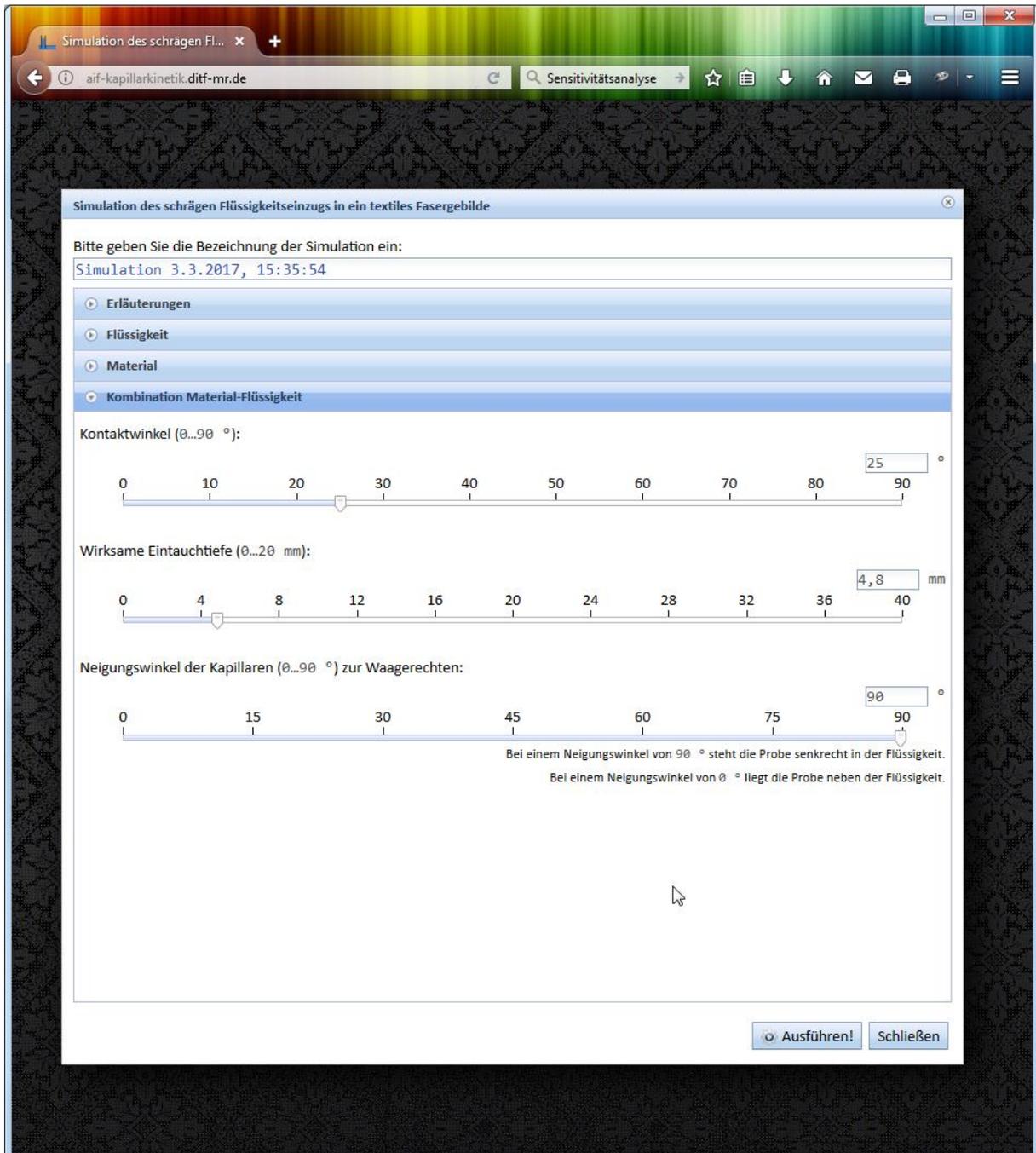


Abbildung 62: Simulation des Flüssigkeitseinzugs in runde Kapillaren: Eigenschaften der Kombination von Material und Flüssigkeit.

Auch hier sind die Werte entweder über einen Schieberegler wählbar oder numerisch einzugeben.

Nach einem Klick auf die Schaltfläche „Ausführen!“ starten die Simulationsrechnungen.

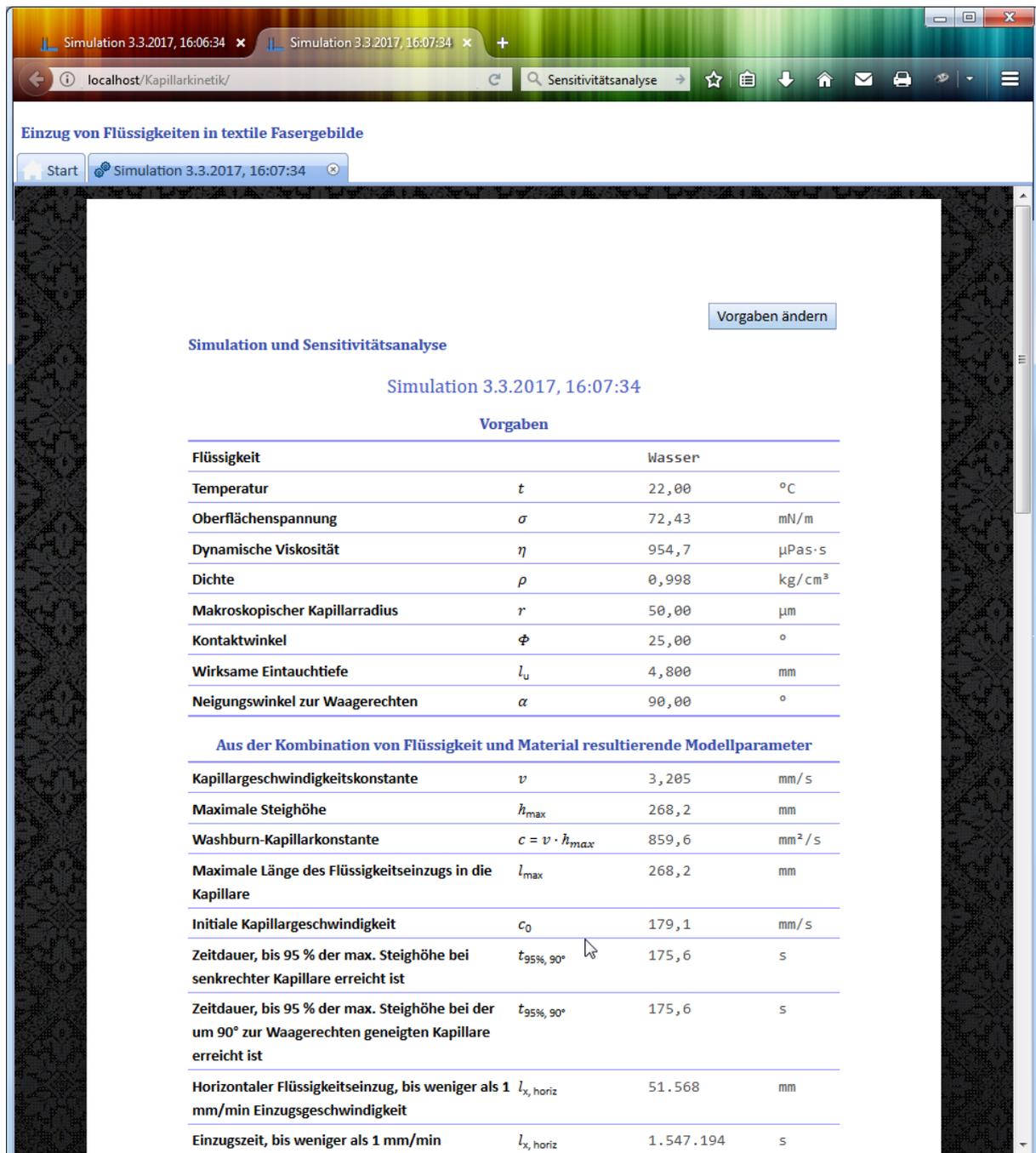


Abbildung 63: Simulation des Flüssigkeitseinzugs in runde Kapillaren: Vorgaben und daraus abgeleitete Modellparameter.

Das Simulationsergebnis kann direkt gedruckt werden. Nicht relevante Teile der Browseranzeige werden beim Drucken ausgeblendet. Im Simulationsergebnis werden zuerst noch einmal die Vorgaben aufgelistet, gefolgt von den sich aus diesen Werten ergebenden Modellparametern. Neben der Zeitdauer, bis 95 % der max. Steighöhe beim senkrechten Flüssigkeitseinzug erreicht ist, wird auch die Zeitdauer, bis 95 % der Steighöhe in der mit dem vorgegebenen Winkel α geneigten Kapillaren erreicht sind, angegeben.

Der nächste Abschnitt zeigt zwei Diagramme: den Flüssigkeitseinzug in Kapillarrichtung über die Zeit sowie die Einzugs geschwindigkeit über die Zeit.

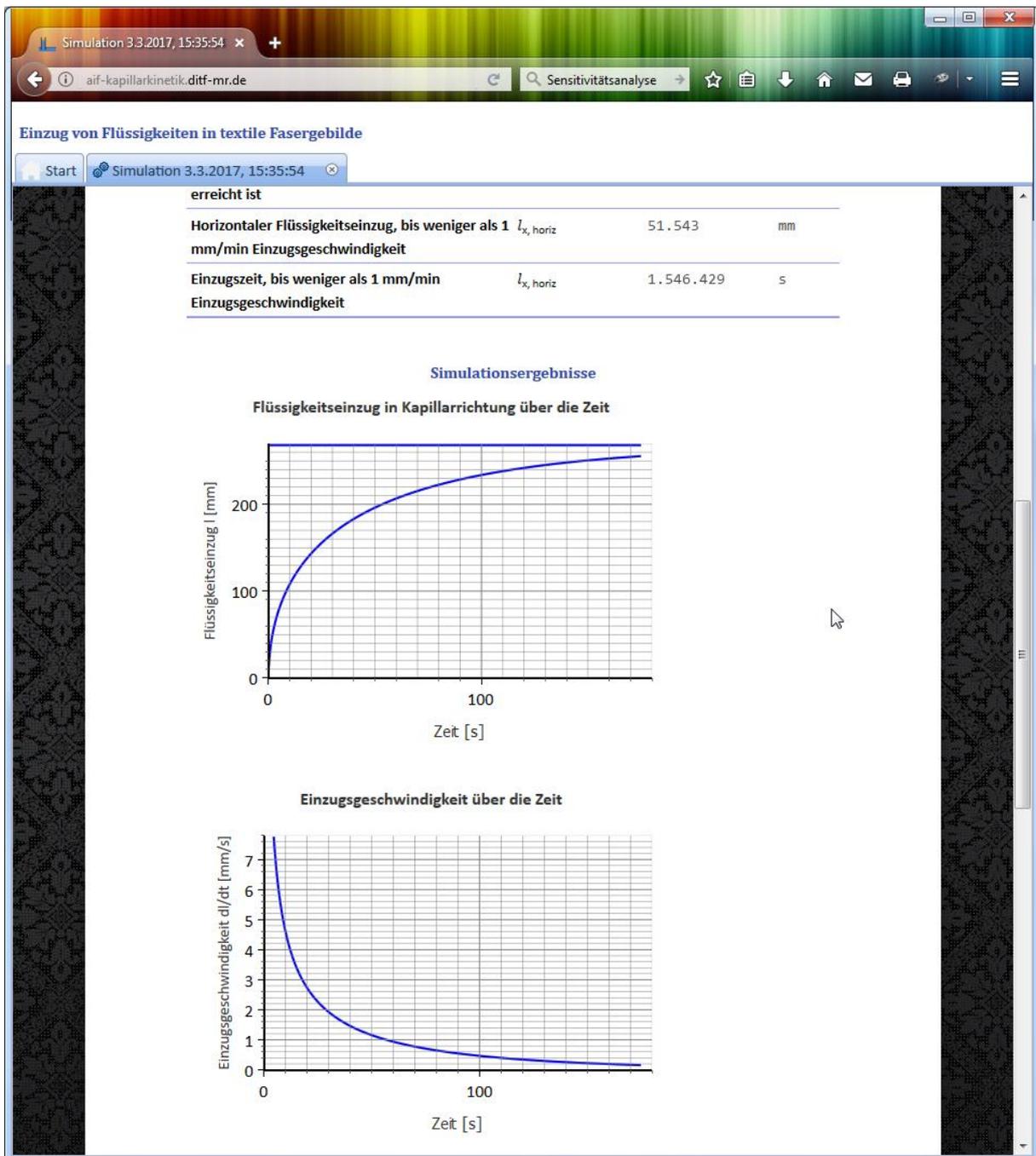


Abbildung 64: Simulation des Flüssigkeitseinzugs in runde Kapillaren: Simulierte Zeitreihe.

Anschließend folgt die Sensitivitätsanalyse:

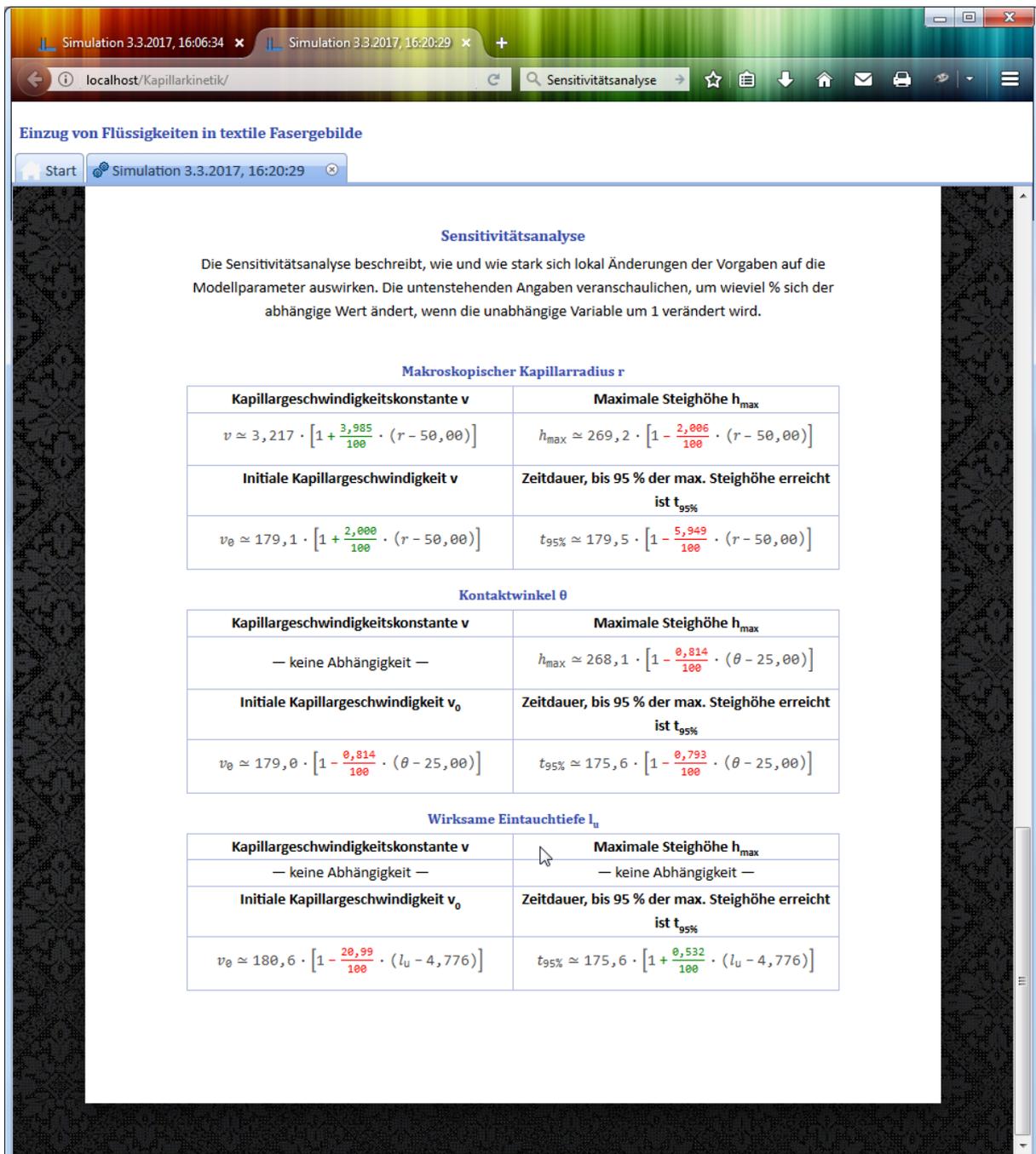


Abbildung 65: Simulation des Flüssigkeitseinzugs in runde Kapillaren: Sensitivitätsanalysen.

Hierzu wird mittels linearer Regression um die Vorgabewerte herum bestimmt, welche Auswirkungen kleinere Änderungen der Vorgabewerte Kapillarradius r , Kontaktwinkel θ und wirksame Eintauchtiefe l_u auf die makroskopische Kapillargeschwindigkeit v , die maximale Steighöhe h_{\max} , die initiale Kapillargeschwindigkeit v_0 sowie die Zeitdauer, bis 95 % der max. Steighöhe erreicht sind, hat. Die Auswirkungen werden dabei jeweils als %-Wert ausgedrückt: so führt beispielsweise eine Vergrößerung des Kapillarradius um 1 μm zu einer Steigerung der Kapillargeschwindigkeitskonstante v um 3,985 %. Steigerungen sind dabei in **Grün** dargestellt, Verminderungen in **Rot**.

5.2.5 Ausblick auf mögliche Einsatzszenarien

So ergeben sich für die beschriebene Methode zur Parameteridentifikation des Kapillareffekts in erster Linie folgende prinzipiellen Einsatzszenarien:

- Entwicklungstechnische Auslegung und
- Anforderungsspezifikation

von textilen Halbzeugen zur

- Flüssigkeitsaufnahme,
- -verdunstung und
- -verteilung.

Weiter sind folgende Einsatzszenarien denkbar:

- automatische Bildung von Kapillarsystemen zum Flüssigkeitsabfluss über Höhen, die kleiner als h_{max} sind
- Charakterisierung von Materialeigenschaften wie
 - Kontaktwinkel
 - Adhäsionswirksame Oberflächen im Querschnitt
 - Benetzbare Querschnittsfläche und Raumvolumen im Material

5.3 Selbstlernende Methode zur Berechnung und Auslegung der Kapillarkinetik von Flüssigkeiten in textilen Fasergebilden

5.3.1 Übersicht

Dieser gibt eine Übersicht über die Aufgabenstellung zur Methodenentwicklung, wesentliche Ziele und Anforderungen sowie die gewählte Vorgehensweise.

Die Methode zum Optimieren der kapillaren Steigkinetik textiler Fasergebilde ist speziell für die Produktentwicklung in textile Halbzeuge produzierenden kleinen und mittelgroßen Unternehmen (kmU) gedacht. Die Märkte dieser Unternehmen zeichnen sich durch folgende wesentlichen Eigenschaften aus:

- Gefragt werden Produkte, die sich durch besondere Eigenschaften bzw. Anforderungen von ähnlichen, auf Produktionsvolumen und niedrigste Kosten hin optimierten Massenprodukten abheben. Die zugehörigen Anforderungen lassen sich wie üblich in solche an die Produktqualität, Reaktionszeit, Kundenservice¹³² sowie Kosten segmentieren.
- Das Marktvolumen ist im Vergleich zum jeweiligen allgemeinen Massenmarkt vergleichsweise klein, d.h. zur Produktion werden meist keine prinzipiell auf Massenproduktion abgestimmten Produktionssysteme genutzt.
- Daraus ergibt sich wiederum, dass Unternehmen mit entsprechend flexibler Prozesstechnologie Aufträge in Produktionslosen produzieren.
- Aus diesem flexiblen Bedienen verschiedenster Nischenmärkte folgt wiederum, dass
 - die Produktentwicklung ausgehend von vom Kunden aus dem jeweiligen Anwendungsmarkt vorgetragenen Anforderungen eine geeignete Konfiguration für die Produktionsprozesse und die zu verwendenden Vorprodukte ausarbeitet,
 - die vorgehaltene Prozesstechnologie sehr flexibel einsetzbar sein muss und
 - mit Umrüstzeiten, aber teilweise auch ungenutzter Prozesstechnologie gerechnet werden muss.
- So stellen die vorgehaltenen Kapazitäten in der Produktentwicklung sowie in der Produktion Kostenfaktoren dar, die letztlich die Preise für die Produkte von denen im Massenmarkt abheben.
- Im Umkehrschluss gibt wiederum die im Unternehmen und bei dessen Lohnauftragnehmern vorhandene Prozesstechnologie das Produktspektrum des Unternehmens und damit die erschließbaren Märkte vor.

¹³² Inkl. Risikomanagement.

Daraus ergibt sich dann wiederum folgende allgemeine Zielstellung für die Produktentwicklung¹³³ in Halbzeuge produzierenden kmU: Aufgabe der Produktentwicklung ist die Konsentierung der Produkthanforderungen mit dem Kunden und der sichere Nachweis der Machbarkeit des gewünschten Produktes. Dies ist zum einen die Wahl einer geeigneten Prozesskonfiguration und zum anderen von einer ersten, anforderungskonformen Produktkonstruktion. Die Zielfunktion – und Entwicklungsprämisse – beim Ausarbeiten dieser Produktkonstruktion ist damit die anforderungskonforme Produktrealisierung zu den niedrigstmöglichen Kosten.

Übertragen auf die Kapillarkinetik bedeutet dies, dass der dazugehörige Teil der Produkthanforderungen analog zu Abschnitt 5.2.3.4 „Formulierung von Produkthanforderungen mit kapillarkinetischem Bezug“ formuliert sein sollte. Ergebnis der selbstlernenden Methode zur Berechnung und Auslegung der Kapillaren Steigkinetik ist wiederum der Vorschlag einer geeigneten Prozesskonfiguration und Produktkonstruktion. „Selbstlernend“ bedeutet hierbei, dass die Ergebnisse der während der Produktentwicklung erfolgenden Machbarkeitsnachweise wiederum für die Wissensbasis für spätere Produktentwicklungen herangezogen werden. Dies mag auf den ersten Blick eigentlich eine Selbstverständlichkeit darstellen – jedoch findet sich in der täglichen betrieblichen Praxis für die nötigen Aufarbeitungs- und Pfllegetätigkeiten oftmals kaum die benötigte Zeit: kurzfristigen, dringenden Kundenwünsche wird eben oftmals einfach der Vorzug gegeben. Letztlich ist die Pflege einer entsprechenden Wissensbasis ein vom Management vorzugebendes und kontinuierlich einzuforderndes Arbeitsziel für die Produktentwicklung.

5.3.2 Grundlagen

Die folgenden Abschnitte beschreiben die zur Methodenentwicklung nötigen Grundlagen in Kürze. Ausgehend von allgemeinen Begriffsabgrenzungen wird so die Methode des Fallbasierten Schließens erläutert. Anschließend erfolgt die Auswahl eines geeigneten Schätz- und Optimierungsverfahrens. Weiter werden Annahmen für die zur Produktoptimierung heranzuziehende Zielfunktion zusammengetragen.

¹³³ Die Produktentwicklung kümmert sich um das Ausarbeiten einer Produkt- und Prozesskonfiguration in einem vorgegebenen Rahmen. Neuartige Vorprodukte und Prozesstechnologie werden im Rahmen der Vorentwicklung bereitgestellt. Von der Produktentwicklung sind ebenso Prozessoptimierungstätigkeiten zu trennen: so sind die Anforderungsdefinition mit dem Kunden und der Nachweis der sicheren Machbarkeit der so spezifizierten Produkte eine der Aufgaben der Produktentwicklung, während bei der – vor Produktion eines spezifischen Produktes stattfindenden – Prozessoptimierung die Minimierung der Loskosten im Vordergrund steht.

5.3.2.1 Begriffsabgrenzungen

Die im Rahmen der Methodenentwicklung verwendeten Begriffe lassen sich wie folgt abgrenzen:

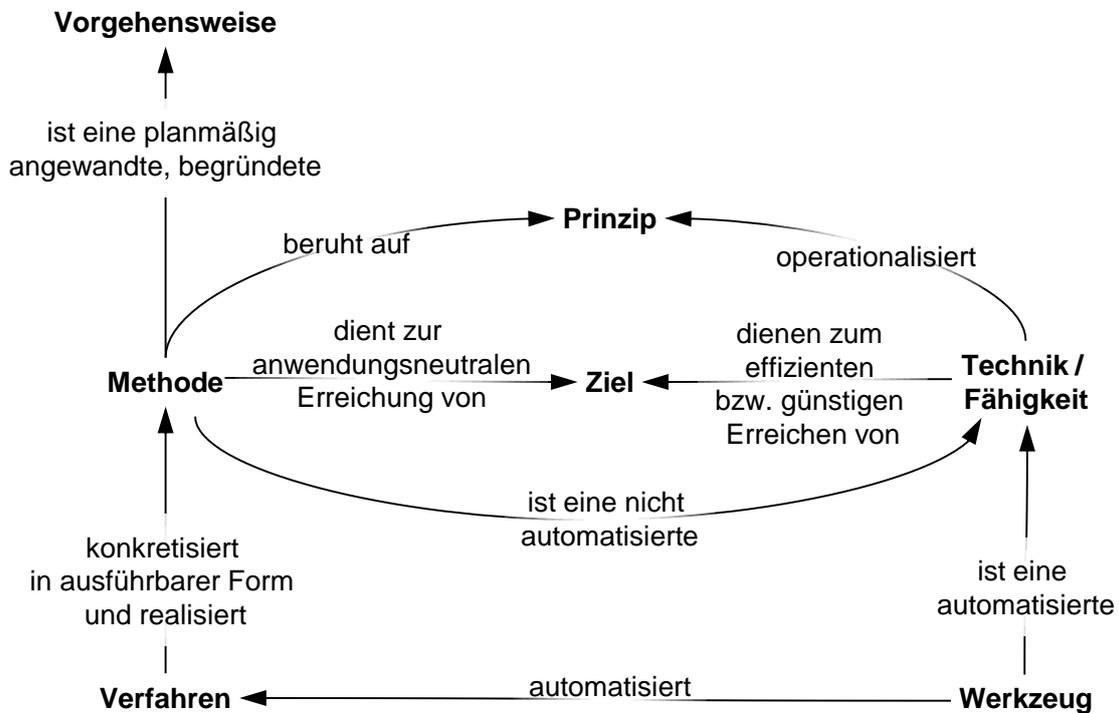


Abbildung 66: Begriffsabgrenzungen¹³⁴.

5.3.2.2 Fallbasiertes Schließen

„Fallbasiertes Schließen [engl. Case-based reasoning] (CBR) ist eine Vorgehensweise zum informationssystemgestützten, auf Erfahrungswissen basierenden Problemlösen und Lernen durch Analogieschlüsse. Dabei werden neue Probleme durch Erinnern an vergangene, ähnliche Situationen und durch erneutes, kombinierendes Nutzen von Informationen und Wissen aus diesen Situationen gelöst. Fallbasiertes Schließen ist in den frühen 80er Jahren in den Vereinigten Staaten entstanden und etwas weniger als zehn Jahre später in Europa übernommen worden.“¹³⁵

In CBR werden die Kombinationen aus

Problembeschreibung + angewandter Lösung + deren Bewertung

als „Fall“ bezeichnet. Der in Abbildung 3 auf S. 17 dargestellte Prozess beschreibt dabei in allgemeiner Weise die Vorgehensweise beim durch eine Fallbasis unterstützten Problemlösen.

¹³⁴ Aus Maschler (2015), S. 60. Maschler (2015) verwendet die Begriffe aus Gesellschaft für Informatik (2012).

¹³⁵ Maschler (2015), S. 76.

Diese Vorgehensweise kann komplett, aber auch nur in Teilen in Anwendungssystemen implementiert werden; dies ist jedoch kein Kriterium für ihre Einsatzfähigkeit. Vielmehr können ihre wesentlichen Schritte grundsätzlich auch als manuelle Tätigkeiten ausgeführt werden.

Der CBR-Prozess wird hier als Vorgehensweise herangezogen, weil er folgenden Anforderungen genügt:

- (a) Es erfolgt eine strukturierte Erfassung der Problemstellung in Prozessschritt 1.
- (b) Die Ergebnisse vergangener Durchläufe werden zur Problemlösung im aktuellen Fall herangezogen.
- (c) Schon beim Abruf vergangener ähnlicher Fälle kann eine den Anforderungen genügende Lösung identifiziert und direkt übernommen werden.
- (d) Es erfolgt eine explizite Bewertung der Lösungsqualität¹³⁶.

Folgende Anforderungen müssen erfüllt sein, um die beschriebene Vorgehensweise des CBR-Prozesses integrieren zu können:

- i. Es muss ein geeignet konfiguriertes Anwendungssystem als Werkzeug zur Unterstützung bereitgestellt werden.
- ii. Das Ermitteln einer Lösung und deren Qualität (Versuch und Ermittlung des Versuchsergebnisses) ist mit Kosten verbunden. Auch die Ergebnisse von Zwischenschritten sollten daher erfasst und dokumentiert werden. Hierzu gibt es zwei Möglichkeiten:
 - a. Den in den Schritten 3-6 zu ermittelnden Lösungsteil separat als eigenen Fall pflegen. Damit wird zwischen Anwendungsfällen mit einer gewählten Produktrealisierung für diese und zwischen einzelnen, weiteren – für diese Produktrealisierung erfolgenden – Realisierungsvarianten unterschieden.
 - b. Den CBR-Prozess geeignet ergänzen:
 1. Übernahme eines schon vorhandenen Anwendungsfalls als Lösung
 2. Direkte Übernahme einer schon vorhandenen Produktrealisierung als Lösung in den Anwendungsfall
 3. Getrennte Lenkung von Produktrealisierungen und Anwendungsfällen
 4. Ein Verfahren für Schritt 3 „Lösungsvorschlag ausarbeiten“ bereitstellen.
- iii. Problemspezifische Verfahren zum Anwenden und zum Bewerten angewandter Lösungen (Musterproduktion + Charakterisierung) müssen noch angegliedert werden.

Die ermittelten Anforderungen werden wie folgt umgesetzt:

- i. Zum generellen Unterstützen der Vorgehensweise und für die Erfassung der Fälle wird im Sinne der Vorwettbewerblichkeit das ontologiebasierte Expertensystem vDiscover¹³⁷ von DITF-MR als Werkzeug herangezogen. Der Entwurf des Referenz-Informationsschemas erfolgt in Abschnitt 5.3.3.4, ebenso wie dessen Ergänzung des Informationsschemas um benötigte numerische Zusammenhänge.

¹³⁶ Auch hier der „Grad, in dem sein Satz inhärenter [(inwohnender, im Gegensatz zu zugeordneter)] Merkmale eines Objekts Anforderungen erfüllt“ (ISO9000, 2015, Abschnitt 3.6.2, S. 45), also die Konformität mit gestellten Anforderungen.

¹³⁷ Siehe vDiscover (2016).

- ii. Die Ermittlung der Lösung stellt im Rahmen der hier zu betrachtenden Anwendungsfälle die Musterproduktion eines textilen Fasergebildes nebst dessen Charakterisierung hinsichtlich des Kapillareffekts dar. Da es für textile Fasergebilde natürlich verschiedenste Herstellvarianten gibt, ist es sinnvoll, für die – technologiespezifische – Ausarbeitung des Lösungsvorschlags und (Schritt 3) die Art und Weise der Lösungsermittlung (Schritt 4) Varianten im Sinne der Anforderungsoption a. zuzulassen. Jedoch muss dann der CBR-Prozess in einen allgemeinen, kapillarkinetik-bezogenen sowie einen produktionstechnologie-spezifischen Teil untergliedert werden. Die Untergliederung des CBR-Prozesses erfolgt in Abschnitt 5.3.3.3.
- iii. Im Forschungsbereich des Fallbasierten Schließens wurden eine Vielzahl an Verfahren für die Fallkombination in Schritt 3 entwickelt¹³⁸. Diese setzen jedoch meist eine relativ hohe Mindestzahl an schon existierenden Fällen voraus, weiter handelt es sich um einmalige Vorschläge, es wird keine Suchstrategie verfolgt. Abschnitt 5.3.3.1 widmet sich daher der Auswahl eines für Schritt 3 in Frage kommenden Suchverfahrens.

5.3.3 Methodenentwurf

Das im Folgenden beschriebene Verfahren wurde zur einfacheren Übertragbarkeit anwendungsneutral spezifiziert.

5.3.3.1 Verfahren

Gerade die charakteristischen Eigenschaften von Textilien machen es recht anspruchsvoll, hinreichend gut quantifizierbare Zusammenhänge zwischen den Eigenschaften ihrer Vorprodukte, dem gewählten Herstellungsverfahren, dessen Einstellungen und den resultierenden Produkteigenschaften zu ermitteln: so handelt es sich bei Textilien nicht um ein Material von monolithischem Aufbau, sondern um eines mit (teilweise mehreren) inneren, sich kapselnden Strukturbildungen¹³⁹. So lassen sich durch die innere, kapselnde Strukturierung oftmals keine klaren Prognosen mehr über Produkteigenschaften wie Dehn- und Biegsamkeit mehr geben¹⁴⁰, weiter kommen neue Produkteigenschaften – wie hier die Möglichkeit der kapillaren Flüssigkeitsaufnahme – hinzu. Sollte für ein gegebenes Produktionsverfahren also noch keine hinreichende Charakterisierung der oben skizzierten Zusammenhänge vorliegen, muss also ein geeignetes – auf der Charakterisierung von Mustern basierendes – Schätzverfahren zum Einsatz kommen.

Praxisgängig ist dabei die Statistische Versuchsplanung¹⁴¹ mit der anschließenden Bildung von Regressionsmodellen bei der Versuchsauswertung. Ziel ist dabei, unter vertretbaren

¹³⁸ Siehe z.B. Kolodner (1993).

¹³⁹ Auf Mikroebene ist dabei die monolithische Materialstrukturierung als Faser bzw. Filament zu sehen, auf Mesoebene die Bündelung von Fasern als Filamentstrang oder Garn, auf Makroebene die Verknüpfung von Fasern, Filamentsträngen oder Garnen zu flachen, auch voluminösen Flächen durch Stricken, Weben, Wirken, Vernadeln, Filzen, etc. Die dabei entstehenden Fasergebilde können z.B. durch Lagenbildung weiter einer Metastruktur zusammengefügt werden.

¹⁴⁰ So ist es für textile Materialien grundsätzlich sinnvoll, die Ausprägung von Produkteigenschaften auch über deren Variationskoeffizienten zu beschreiben.

¹⁴¹ Siehe beispielsweise Siebertz (2010).

Kosten ein Ersatzmodell für das unbekannte Zustandekommen der Ausprägung einer Eigenschaft y_j eines Produktes durch Variation beeinflussender Faktoren x_i in den Stücklisten bzw. der Rezeptur oder der Prozesseinstellungen zu bilden.

Die Faktoren x_i und die zu ermittelnde Produkteigenschaft y_i haben weiter einen speziellen Wertetyp, auch als Datentyp oder Skalenniveau bezeichnet. Dieser beeinflusst wiederum die mit diesen zulässigen mathematisch-logischen Operationen, ebenso deren Messbarkeit¹⁴².

Weiter werden für die Ausprägungen der einzelnen Faktoren zulässige Wertebereiche angenommen, so beispielsweise folgende Rahmenbedingungen R :

$$x_i \geq x_{i,min}$$

$$x_i \leq x_{i,max}$$

Diese p Rahmenbedingungen R_p sind damit ebenso in Betracht zu ziehen.

¹⁴² In der Statistischen Versuchsplanung werden oftmals vereinfachend Transformationen auf definierte Ausprägungsniveaus, z.B. -1; 1 durchgeführt. Dies ist aber nur dann hilfreich, wenn es sich nicht um ein Skalenniveau handelt, das gleiche Abstände zwischen Werten voraussetzt.

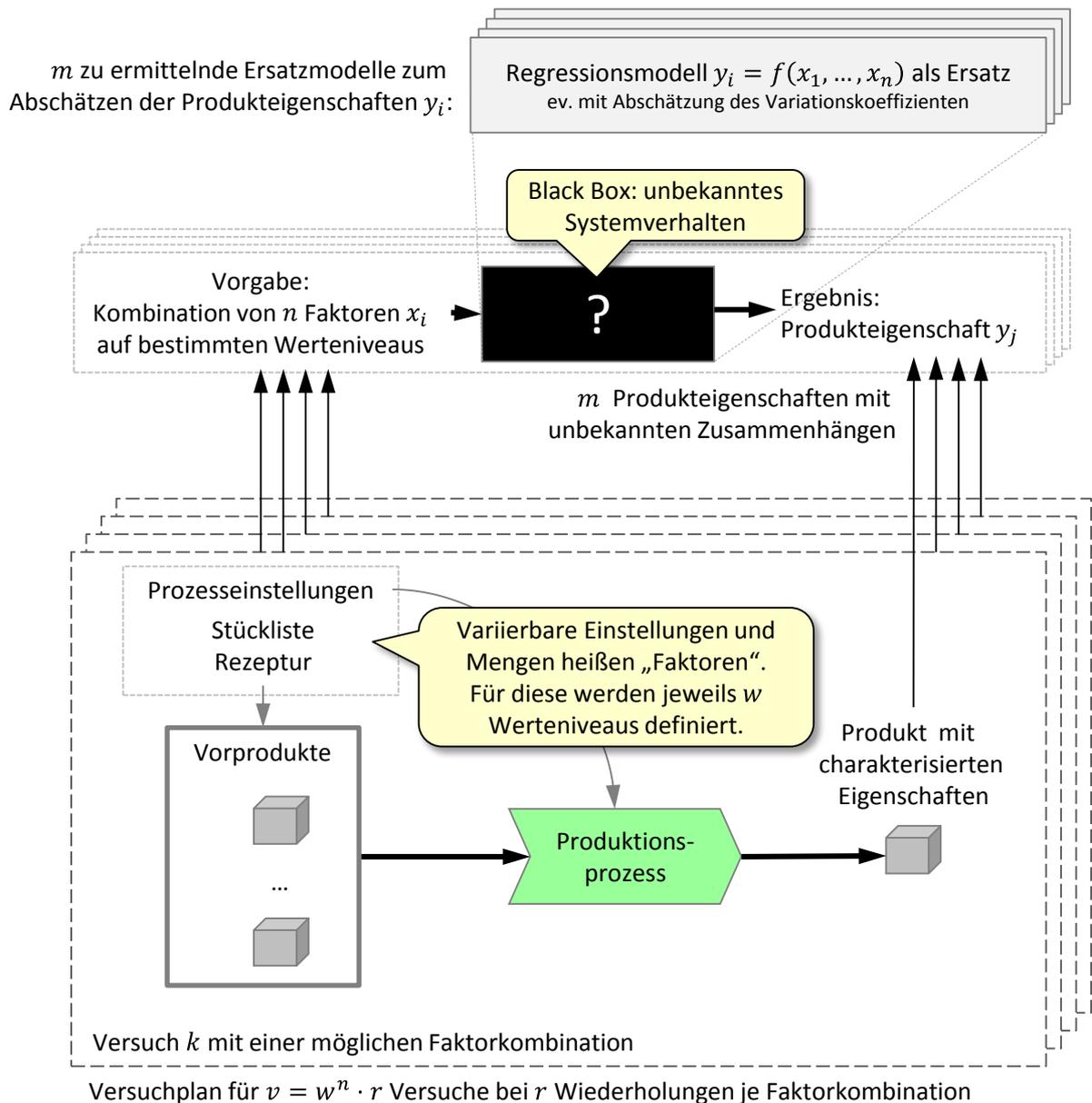


Abbildung 67: Statistische Versuchsplanung zum Ermitteln von Ersatzmodellen zu den Zusammenhängen zwischen einer Produkteigenschaft y_j und den diese beeinflussenden Faktoren x_i .

Dem bei der statistischen Versuchsplanung auszuarbeitenden Versuchsplan liegen im Allgemeinen folgende Prinzipien zugrunde:

- Die Faktoren als Eingangsvariablen werden jeweils variiert, üblich sind mindestens die beiden Werteneiveaus „niedrig“ und „hoch“. Die Zahl und Positionierung der Werte hängt vom zu wählenden Regressionsmodell ab¹⁴³.

¹⁴³ Für multilineare Modelle reichen jeweils zwei Werteausprägungen; für quadratische Modelle, die im Prinzip Taylor-Entwicklungen vom Grad 2 darstellen, sollten es mindestens drei sein. Es ist jedoch anzumerken und kritisch zu sehen, dass gelegentlich reziproke Beziehungen vorliegen, die Modellteile der Form $a/(x + b)$ verlangen. So ist z. B. bei verschiedenen Nonwovens-Prozessen die Flächenmasse invers proportional zur Bandgeschwindigkeit.

- Versuche zu einer Faktorkombination sollten möglichst wiederholt werden, um einen Eindruck über die lokale Stärke unbekannter Einflüsse zu bekommen.
- Unbekannte Einflüsse können aus folgenden Quellen kommen: dem produzierenden Personal, der Produktionslinie, dem Analyseverfahren zur Bestimmung von y_j und dem die Analyse durchführenden Laboranten sowie Kombinationen von diesen.
- Unwesentliche Wechselwirkungen können auch weggelassen werden, sofern dadurch die Zahl der Versuche nicht kleiner als die Zahl der Variablen im Regressionsmodell wird.

Für die gegebene Problemstellung in kmU können wir davon ausgehen, dass mittels der Verfahrensanweisung für der Produktionsprozess sowie Personaltraining personalbezogene Einflüsse ausgeschossen werden können. Ebenso ist bekannt, ob es produktionslinien-spezifische Einflüsse auf Produkteigenschaften gibt; das Personal weiß diese meist zu kompensieren.

Ein wesentlicher Nachteil der statistischen Versuchsplanung ist die Zahl der durchzuführenden Versuche v . Diese lässt sich vereinfacht folgendermaßen abschätzen:

n	Zahl der Faktoren
w	Zahl der verwendete Werteniveaus („niedrig“, „hoch“, „mittel“,)
r	Zahl der Wiederholungen für jede Faktorkombination

$$v = w^n \cdot r$$

Es ist ersichtlich, dass dies mit zunehmender Zahl n an Faktoren einen potenziell wachsenden Mehraufwand bedeutet; weiter erlaubt die statistische Versuchsplanung nicht, eine optimale Faktorkombination $[x_1, \dots, x_n]$ für eine zu erzielende optimale Produkteigenschaft $y_{j,opt}$ zu finden. Ebenso wenig werden dabei die Produktionskosten betrachtet, sinnvoll wäre eine Beziehung, die den Nutzen ins Verhältnis zum Aufwand im Sinne der Vorprodukt- und Anlagenkosten stellt. Es liegt daher nahe, ein Optimierungsverfahren heran zu ziehen.

Eine geeignete Optimierungsmethode muss folgenden Auswahlkriterien genügen:

- (a) Sie muss mit unbekanntem nichtlinearen Zusammenhängen in der Zielfunktion $Z_i(y_i(x_1, \dots, x_n), x_1, \dots, x_n)$ umgehen können¹⁴⁴.
- (b) Lokale Ableitungen der Zielfunktion sind nicht explizit bekannt, sie können aber gegebenenfalls bestimmt werden.
- (c) Es kann mit vorgegebenen Rahmenbedingungen R_p für alle x_i im Sinne von Nebenbedingungen umgehen.
- (d) Der Einfachheit halber gehen wir davon aus, dass sich sämtliche x_i als Werte in einem gegebenen Kontinuum zwischen gegebenen Nebenbedingungen einstellen lassen. Praxiserfahrungen lassen darauf schließen, dass es auch in der Zielfunktion nicht zu Unstetigkeiten bzw. Sprüngen kommt.

¹⁴⁴ Dies schließt ein, dass auch die lokalen Ableitungen der Zielfunktion unbekannt sind. Es kommen also nur „ableitungsfreie“ Methoden in Frage.

- (e) Die Bestimmung des Wertes der Zielfunktion $Z_i(y_i(x_1, \dots, x_n), x_1, \dots, x_n)$ ist kostenbehaftet; die Anzahl der Schritte auf dem Weg zum Optimum muss daher minimal gehalten werden. Daraus ergibt sich ein kostenbasiertes Abbruchkriterium.

Der Arbeitsablauf beim Durchführen der Versuche gestaltet sich wie folgt:

1. Prozesseinstellungen vornehmen.
2. Gegebenenfalls: Abwarten, bis der Einschwingvorgang vorüber ist und die Produktqualität hinreichend konstant ist.
3. Muster von gewünschter Länge produzieren.
 - a. Gegebenenfalls: Online-Charakterisierung vornehmen.
4. Muster kennzeichnen.
5. Noch ein Muster nötig? → Weiter mit Schritt 1.
6. Muster im Labor charakterisieren
7. Auswertungen durchführen
8. Zielfunktionen für die einzelnen Muster bestimmen

Für die gegebene Themenstellung ist dabei wichtig, dass nicht alle wesentlichen Produkteigenschaften online charakterisiert werden können, auch, weil bei verschiedenen Charakterisierungen entnommenen Proben zerstört bzw. wesentlich beeinflusst¹⁴⁵ werden. Ebenso müssen bestimmte Eigenschaften unter vorgegebenen Klimabedingungen charakterisiert werden. Daraus ergibt sich, dass die Musterung nicht kontinuierlich bis zum Erreichen eines Optimums durchgeführt werden kann, da auf Laborergebnisse gewartet werden muss. Die Anlage, auf der die Muster gefertigt werden, sollte während dieser Wartezeit aber verfügbar sein.

Prinzipiell kommen für die Themenstellung „ableitungsfreie“ Optimierungsmethoden in Frage¹⁴⁶, jedoch nur solche ohne zufällige Suchstrategie¹⁴⁷ und damit einer geringen Zahl an Arbeitsschritten: nicht direkt zielorientierte arbeitende Suchstrategien sind dem unter Kostendruck arbeitenden Personal schwerlich bis kaum vermittelbar. Theoretisch bietet es sich an, hier das Downhill-Simplex-Verfahren von Nelder & Mead (1965) heranzuziehen. Nachteilig ist jedoch dabei, dass das Simplex-Downhill-Verfahren sich absichtlich auf einem nicht-optimalen Pfad dem Optimum nähert. Auch dies ist so in der Praxis nicht vermittelbar.

Für die angestrebte Anwendung des Algorithmus in Entwicklungsprozessen zu einem bestimmten Anwendungsfall ergeben sich weiter folgende Besonderheiten:

¹⁴⁵ Beim kapillaren Flüssigkeitseinzug können beispielsweise auf der Faseroberfläche haftende Substanzen ausgewaschen werden, weiter kann es dabei bzw. beim anschließenden Trocknungsvorgang zu Faserverschiebungen kommen.

¹⁴⁶ Grundlage für die Auswahl bildet dabei das Review von Rios & Sahinidis (2013) für die Optimierung einer deterministischen Funktion $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ mit Ober- und Untergrenzen für die Variablen und nicht verfügbaren symbolischen sowie numerischen Ableitungen. Optimierungsmethoden, die den obigen Auswahlkriterien nicht genügten, wurden im Rahmen des Auswahlprozesses verworfen, darunter auch die sehr effizienten, aber eine massiv-parallele Ausführung benötigenden evolutionären sowie Ameisenkolonie-Algorithmen, beispielsweise der Bergsteigeralgorithmus (Hill Climbing in Russel & Norvig, 2003).

¹⁴⁷ Prominente Beispiele für Optimierungsalgorithmen mit zufälliger Suche sind der Metropolis-Algorithmus von Metropolis et al (1953) sowie Algorithmen mit Schwellenakzeptanz, z. B. Dueck & Scheuer (1990).

- (a) Für alle zu identifizierenden Parameter sind Ober- und Untergrenzen vorgegeben.
- (b) Es sind schon einige Punkte mit einem bekannten Zielfunktionswert aus früheren Musterentwicklungsprozessen vorhanden.
- (c) Je nach verfügbarer Punktzahl mit Zielfunktionswert lassen sich Regressionsmodelle parametrieren, anhand derer vereinfachende Aussagen über die Topologie von $f(x_i)$ getroffen werden können.
- (d) Praxiserfahrungen zeigten, dass die Zielfunktion im Suchfeld als konvex angenommen werden kann; d.h. lokale Optima sind immer auch globale Optima im Suchraum. Daraus folgt, dass wenn ein $f(x_i)$ mindestens so gut ist wie alle $f(x_{...})$ in seiner Umgebung, dieses $f(x_i)$ mindestens so gut ist wie alle zulässigen Lösungen.

Aus (c) und (d) folgt, dass die Verwendung von ableitbaren Regressionsmodellen es auch ermöglicht, Extremstellen und damit Optima in diesen zu prognostizieren. Diese liegen dann entweder im Suchraum bzw. an dessen Grenzen R .

Weiter sind die Abbruchkriterien zu diskutieren. Interessant ist dabei, ob sich aus weiteren Musterungen noch wesentliche Verbesserungen ergeben oder nicht. Dies liegt dann vor, wenn das Gebiet, in dem sich der Optimalpunkt befindet, rundum durch einen Polygonzug eingegrenzt ist und eine weitere Verkleinerung des Polygonzugs keine wesentlichen Verbesserungen mehr bringt. Dies ist der Fall, wenn die Abstände aller einzelnen Parameter minimal geworden sind bzw. die Steigung von außen nach innen ins Polygon hinein eine Grenze unterschreitet.

Es bieten sich mittlerweile eine Reihe an Regressionsmodellen und -verfahren für die Praxis an. Gängig sind die multilineare Regression, ebenso wie quadratische Regressionsmodelle. Beide werden gelegentlich in Kombination mit transformierten Eingangsgrößen genutzt:

Tabelle 23: Allgemeine Typen von Regressionsmodellen. Eine Auswahl.

Modelltyp	Formel	Parameter	Bemerkungen
Multilineare Regression	$y = p_0 + \sum_{i=1}^n p_i \cdot x_i$	$n + 1$	<ul style="list-style-type: none"> • Liefert kein Optimum innerhalb des Suchraums, sondern an dessen Grenzen
Quadratische Regression	$y = p_0 + \sum_{i=1}^n p_i \cdot x_i$ $+ \sum_{i=1}^n \sum_{j=i}^n p_{i,j} \cdot x_i \cdot x_j$	$n = 1 \rightarrow 3$ $n = 2 \rightarrow 6$ $n = 3 \rightarrow 10$ $n \rightarrow \frac{n(n+1)}{2}$	<ul style="list-style-type: none"> • Kann ein Optimum innerhalb des Suchraums liefern • Benötigt viele Datenpunkte, um aussagekräftige Ergebnisse zu liefern • Problematisch bei gewundenen Topologien im Suchraum • Einfache Gradientenbildung • Entspricht einer nach dem quadratischen Term abgebrochenen Taylorreihe

Gerade in der Vliesherstellung sollten jedoch auch andere Funktionen bei der Regression mit berücksichtigt werden: so gilt beispielsweise folgende allgemeine Bilanzgleichung für eine Vliesbildemaschine im stationären Zustand:

eingehender Massenstrom = ausgehender Massenstrom

$$\dot{m}_{zu} = m_{fl} \cdot b \cdot v_{Band}$$

Dabei sind

\dot{m}_{zu}	Zugeführter Materialstrom	[kg/s]
m_{fl}	Flächenmasse	[g/m ²]
b	Vliesbreite	[m]
v_{Band}	Bandgeschwindigkeit	[m/s]

Die Flächenmasse m_{fl} ist dabei ein sich aus den Kundenanforderungen ergebender Zielwert. Die Vliesbreite b ist im Allgemeinen eine von der Maschinenbreite abhängige Konstante. Variierbare Prozesseinstellungen sind der zugeführte Materialstrom \dot{m}_{zu} sowie die Bandgeschwindigkeit v_{Band} . Es ist ersichtlich, dass die für die Preisbildung wesentliche Flächenmasse m_{fl} dabei auch umgekehrt proportional zur Bandgeschwindigkeit ist. Dementsprechend sollten passende Regressionsmodelle ebenso umgekehrte Proportionalität abbildende Modellteile der Form $f(x) = p_1/(p_2 + x)$ mit berücksichtigen.

Diese beispielhafte Überlegung zeigt, dass es nicht unbedingt sinnvoll ist, die Modellteile für Regressionsmodelle von vornherein vorzugeben. So hat sich zum Finden von mathematischen Ersatzmodellen die Software Eureka zur so genannten „genetischen Regression“ bewährt¹⁴⁸: Dabei entwickelt ein Computer anfangs willkürlich eine große Zahl an Regressionsmodellen verschiedenen zur Verfügung stehenden Modellteilen aus, parametriert diese und rekombiniert die besten von diesen anschließend untereinander. So entwickeln sich über zahlreiche Generationen hinweg mathematische Modelle von erheblicher Genauigkeit. Dabei sind verschiedenste Varianten möglich; der Benutzer wählt letztlich das Modell aus, das den besten Kompromiss zwischen Einfachheit und Genauigkeit bietet. Da Eureka so nicht nur lineare und quadratische Modellteile, sondern auch verschiedene weitere prinzipiell mögliche Modellteile berücksichtigt, wird durch die flexible Kombination automatisch eine große Zahl möglicher Modellvarianten zur Modellbildung herangezogen.

Aus diesen Überlegungen lässt sich so folgendes selbstlernendes Verfahren für die optimierende, musterungsbasierende Produktentwicklung herleiten:

1. Den Anwendungsfall definieren. Alle Anforderungen der nachgelagerten Branchen und für die Produktnutzungsphase erfassen. Die zu optimierende Zielfunktion definieren.
2. Ausgehend von ähnlichen Anwendungsfällen geeignete, in Frage kommende Möglichkeiten zur Produktrealisierungen auswählen.

¹⁴⁸ Schmidt & Lipson (2009, 2014).

3. Für jede in Frage kommende Produktrealisierung die folgenden Schritte ausführen:
 - a. Optimale Parameter für eine Produktrealisierung finden (→ s.u.)
4. Produktrealisierung mit den besten Zielfunktionswerten auswählen.
5. Produktrealisierung für Kunde umsetzen. Ggf. werden dabei die Prozesseinstellungen und die Produkt-konfiguration verbessert.
6. Reale Herstellkosten sowie mögliche Prozessrisiken analysieren und erfassen.
7. Produktrealisierung in Fallbasis dokumentieren.

→ Optimale Parameter für eine Produktrealisierung finden
(sich wiederholender Verfahrensteil)

1. Die zu variierenden Parameter(Faktoren) identifizieren.
2. Für jeden zu variierenden Parameter sinnvolle Ober- und Untergrenzen festlegen. Es ergeben sich n Parameter mit den Untergrenzen $Ug[1 \dots n]$ und den Obergrenzen $Og[1 \dots n]$. Weiter wird jeweils eine kleinste sinnvolle Schrittweite sw_i für Änderungen im Wertebereich festgelegt.
3. Alle schon bekannten Musterungen mit denselben Vorprodukten im selben oder einem vergleichbaren Produktionsprozess mit für die Zielfunktion interessanten Produktcharakterisierungen zusammenstellen. Dies erfolgt mithilfe der Wissensbasis (z.B. ein Produktdatenmanagement- (PDM) bzw. Engineering-Data-Management-Anwendungssystem (EDM)). Die Werte der Zielfunktion für alle Musterungen bestimmen.
4. Lässt sich ausgehend von den schon vorhandenen Musterungen ein Regressionsmodell für die Zielfunktion entwickeln?
 - a. Ja. Das Regressionsmodell anhand der schon vorhandenen Musterungen für die Zielfunktion entwickeln.
 - b. Nein. Falls kein Regressionsmodell möglich ist:
 - i. Im gesamten Parameterraum so Punkte verteilen, dass eine Parametrierung z.B. eines quadratischen Regressionsmodells möglich wird¹⁴⁹. Für ein Regressionsmodell der Form
$$y = p_1x_1 + p_2x_1^2 + p_3x_2 + p_4x_2^2 + p_5x_1x_2 + p_6$$
werden mindestens 6 Punkte benötigt¹⁵⁰. Die Positionen der Punkte sollten so gewählt werden, dass sie auf $\frac{1}{2}$; $\frac{1}{4}$; $\frac{1}{8}$; ... der Spanne der einzelnen Parameter liegen.
 - ii. Musterproduktionen für alle gewählten Punkte durchführen.
 - iii. Alle Muster im Labor charakterisieren. Entsprechende Eintragungen im PDM/EDM-System vornehmen.
 - iv. Den Wert der Zielfunktion für alle Muster bestimmen.
 - v. Ein Regressionsmodell für die Zielfunktion entwickeln.

¹⁴⁹ Lineare Modelle würden nur Aussagen zu Optima auf den Grenzen des Parameterraumes liefern, bei stetigen nichtlinearen Modellen können die Optima auch im Parameterraum liegen.

¹⁵⁰ Partielle Ableitungen des Regressionsmodells: $\frac{\partial y}{\partial x_1} = p_1 + 2p_2x_1 + p_5x_2$; $\frac{\partial y}{\partial x_2} = p_3 + 2p_4x_2 + p_5x_1$

5. Das Optimum im Regressionsmodell innerhalb der zulässigen Wertebereiche identifizieren. Dies kann z.B. durch die Bildung von Ableitungen zum Identifizieren von Extremwerten erfolgen.
6. Liegt das Optimum der Zielfunktion weniger als eine kleinste sinnvolle Schrittweite vom Zielfunktionswert eines Musters entfernt? Ist dies glaubhaft das Optimum?
 - a. Ja → Fertig. Den Algorithmus beenden.
 - b. Nein → Fortfahren.
7. Die Kantenlängen des zu durchsuchenden Parameterraums jeweils auf die Hälfte verkleinern. Falls die Kantenlängen des Parameterraums schon die kleinste sinnvolle Schrittweite darstellen oder die Suche nach einem verbesserten Optimum zu kostspielig ist:
→ Fertig. Den Algorithmus beenden.
8. Den verringerten Parameterraum um das errechnete Optimum herum so zentrieren, dass sich seine Eckpunkte auf Koordinaten, die sich durch Viertelung/ Achtelung des ursprünglichen Parameterraums beruhen, ergeben.
9. Im Parameterraum die bisherigen gemusterten Punkte so ergänzen, dass mindestens $3n + 1$ Punkte platziert sind: auf dem errechneten Optimum sowie jeweils auf $1/2$ Spanne zwischen dem errechneten Optimum und den Grenzen des Parameterraums.
10. Musterproduktionen für alle neuen Punkte durchführen.
11. Alle Muster im Labor charakterisieren. Entsprechende Eintragungen im PDM/EDM-System vornehmen.
12. Den Wert der Zielfunktion für alle neuen Muster bestimmen.
13. Ein Regressionsmodell mit allen bisherigen Datenpunkten für die Zielfunktion ermitteln.
14. Weiter bei 5.

Abschnitt 5.3.4 liefert zu dieser Vorgehensweise ein ausführliches Beispiel.

5.3.3.2 Anforderungen zur Integration der Methode

Es ergeben sich so folgende Voraussetzungen zur Anwendung einer solchen Methode:

- (a) Die Produktentwicklung erfasst Entwicklungsprojekte und -ergebnisse laufend und greift auf dieses für neue Entwicklungsprojekte zurück.
- (b) Alle Produktentwicklungen werden hinreichend elektronisch in einem geeigneten Produktdatenmanagement- (PDM) bzw. Engineering-Data-Management-Anwendungssystem (EDM) dokumentiert. Dies umfasst so mindestens:
 - a. Für welchen Anwendungsfall ist das Produkt entwickelt worden? Welche Anforderungen wurden spezifiziert?
 - b. Welche Anforderungen gelten für die Vorprodukte? Welche Vorprodukte werden eingesetzt?
 - c. Welche Produktkonstruktion und welche Prozesskonfiguration ist gewählt?
 - d. Welche Produktcharakterisierungen wurden durchgeführt? Welche konkreten Werteausprägungen haben die jeweiligen charakterisierten Produkteigenschaften?

- (c) Aus den im PDM- bzw. EDM-System abgelegten Daten lassen sich auf mathematischen Wege zum einen die Anforderungserfüllung ermitteln und zum anderen auch die Produktionskosten abschätzen.

5.3.3.3 Adaption des CBR-Prozesses

Die Fallbasis aus **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** stellt das Produktdatenmanagement- (PDM) bzw. Engineering-Data-Management-Anwendungssystem (EDM) dar, in welchem sämtliche bisherigen Musterungen dokumentiert sind.

Das in Abschnitt 5.3.3.1 beschriebene Verfahren lässt sich prinzipiell als zwei einzelne CBR-prozesse, die beide auf dieselbe Fallbasis zugreifen, beschreiben. Dies sind:

- (1) Die Auswahl der geeignetsten Produktrealisierung
- (2) Optimale Parameter für eine Produktrealisierung finden

Die folgenden Tabellen zeigen jeweils Zuordnung zu den einzelnen Schritten des generischen CBR-Prozesses auf.

Tabelle 24: CBR-Prozess (1): Die Auswahl der geeignetsten Produktrealisierung.

Schritt im generischen CBR-Prozess	Schritt im Verfahren	Ergebnis des Schritts
1: Neuen Fall identifizieren	Spezifikation der Produkthanforderungen zusammen mit dem Kunden. Definition der Zielfunktion ¹⁵¹ .	Neuer Fall: Anforderungsspezifikation für ein neues Produkt.
2: Ähnliche Fälle abrufen	Recherchieren von Möglichkeiten für Produktrealisierungen.	Neuer Fall + Ähnliche Fälle: vergleichbare vergangene Produktrealisierungen.
3: Lösungsvorschlag ausarbeiten	Für jede in Frage kommende Produktrealisierungsform optimale Parameter finden (2).Anschließend die Produktrealisierung mit den besten Zielfunktionswerten auswählen.	Neuer Fall mit Lösungsvorschlag: parametrisierte Produktrealisierung.
4: Lösungsvorschlag prüfen / anwenden	Produktrealisierung umsetzen. Ggf. werden dabei die Prozesseinstellungen und die Produktkonfiguration verbessert.	Neuer Fall mit angewandter Lösung: angewandte Produktrealisierung.
5: Angewandte Lösung bewerten	Reale Herstellkosten sowie mögliche Prozessrisiken erfassen.	Neuer Fall mit bewerteter Lösung: Reale Herstellkosten und identifizierte Prozessrisiken.
6: Neuen Fall einpflegen	Produktrealisierung in Fallbasis dokumentieren.	Eingepflegte Falldokumentation.

¹⁵¹ Oftmals: hinreichend sichere Erfüllung aller Anforderungen bei niedrigstmöglichen Kosten. Die Kosten ergeben sich wiederum aus den Rohmaterial- und den Herstellkosten zuzüglich der Fixkosten.

Tabelle 25: CBR-Prozess (2): Optimale Parameter für eine Produktrealisierung finden.

Schritt im generischen CBR-Prozess	Schritt im Verfahren	Ergebnis des Schritts
1: Neuen Fall identifizieren	Prozessbeschreibung für die Produktrealisierung nebst Anforderungen festlegen. Zu variierende Parameter nebst Ober- und Untergrenzen für deren Werte und kleinstmöglicher sinnvoller Schrittweite festlegen.	Neuer Fall: Prozessbeschreibung für eine Produktrealisierung nebst Anforderungen.
2: Ähnliche Fälle abrufen	Alle ähnlichen und anforderungskonformen in Frage kommenden Produktrealisierungen und Musterungen recherchieren.	Neuer Fall + Ähnliche Fälle: in Frage kommende frühere Produktrealisierungen und Musterungen.
3: Lösungsvorschlag ausarbeiten	Optimumsbestimmung mittels Zielfunktionsoptimierung durch modellbasierte Suchraum-Rasterung und -Halbierung.	Neuer Fall mit Lösungsvorschlag: vielversprechendste bisherige Realisierungen/ Musterungen.
4: Lösungsvorschlag prüfen / anwenden	Falls noch nicht erfolgt: Mustering im mit der optimalen Parameterkombination sowie Bestimmung der Zielfunktion.	Neuer Fall mit angewandter Lösung: optimale Parameterkombination.
5: Angewandte Lösung bewerten		Neuer Fall mit bewerteter Lösung: Wert der Zielfunktion für die optimale Parameterkombination
6: Neuen Fall einpflegen	Produktrealisierung in Fallbasis dokumentieren.	Eingepflegte Falldokumentation.

5.3.3.4 Referenz-Informationsschema, Zusammenstellung der abzubildenden Zusammenhänge

Aus den Zielen der Aufgabenstellung und dem entworfenen Verfahren ergeben sich folgende, in einem Referenz-Informationsschema für PDM/EDM-Systeme abzubildende Informationstypen:

- Kunde
- Entwicklungsprojekt
- Anwendungsfall
- Produktrealisierung
- Vorprodukt/ Material
- Produktionsprozess
- Prozessschritt
- Produktkonstruktion
- Anforderung
- Zielfunktion
- Produktcharakterisierung

Die folgende Abbildung zeigt hierzu ein Referenz-Informationsschema in der Notation von UML2-Klassendiagrammen. Eigenschaften von Beziehungen wurde der Übersichtlichkeit halber verzichtet. Diese ergeben sich aus dem jeweiligen Kontext.

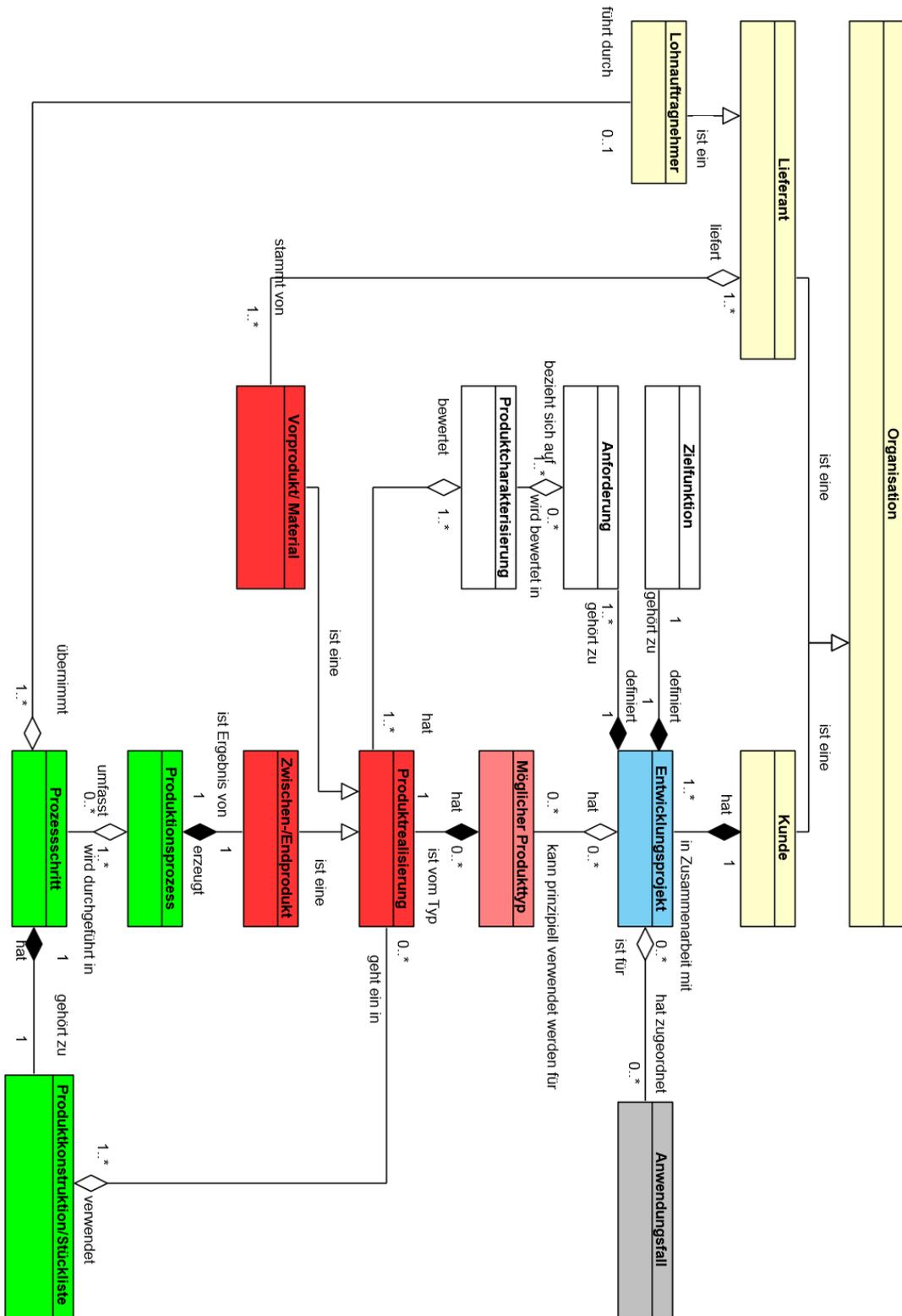


Abbildung 68: Informationsschema zur selbstlernenden Berechnung und Auslegung von Produkten.

Die kapillarkinetischen Aspekte gehen dabei wie folgt ein:

- Mit einem Kunden werden in einem Entwicklungsprojekt Anforderungen mit Bezug auf die Kapillarkinetik vereinbart.
- Die Methode zur Charakterisierung der Kapillarkinetik ist ein Untertyp einer Produktcharakterisierung.

Die oben gelisteten Informationstypen wurden in Abbildung 68 noch etwas erweitert. So wurden neben Kunden auch Lieferanten eingeführt, ebenso Lohnauftragnehmer. Kunden, Lieferanten und Lohnauftragnehmer werden als Untertyp von Organisationen modelliert. Im Informationstyp Organisation definiert dabei die gemeinsamen Eigenschaften. Produktrealisierungen werden weiter unterschieden in zugekaufte Vorprodukte bzw. Materialien sowie Zwischen- und Endprodukte am Ende eines Produktionsprozesses.

Es ergeben sich so folgende Zusammenhänge:

- Kunden führen Entwicklungsprojekte mit dem Unternehmen durch.
 - Das Unternehmen ordnet diese ein oder mehreren Anwendungsfällen¹⁵² zu.
 - Das Unternehmen vereinbart mit dem Kunden die vom gewünschten Produkt zu erfüllenden Anforderungen.
 - Der Erfüllungsgrad dieser projektspezifischen Anforderungen wird wiederum über eine zu definierende Zielfunktion geprüft.
- Nach der Anforderungsdefinition ordnet das Unternehmen dem Entwicklungsprojekt über mögliche Produkttypen verschiedene Produktrealisierungen zur Bewertung zu. Dabei kann es sich um schon existierende bzw. neu auszuarbeitende Produktrealisierungen handeln¹⁵³.
- Die Produktrealisierungen werden über Produktcharakterisierungen bewertet. Dabei handelt es sich z.B. um Messvorgänge (z.B. Kraft-Dehnungsverhalten, Flächenmasse, kapillarkinetisches Verhalten, etc.), die ein Messergebnis liefern.
- Der Erfüllungsgrad von Anforderungen wird wiederum anhand des Messergebnisses einer Produktcharakterisierung bewertet.
- Die Zielfunktion fasst wiederum den Erfüllungsgrad aller gestellten Anforderungen zusammen und bewertet weiter die Wirtschaftlichkeit.
- Vorprodukte bzw. Materialien darstellende Produktrealisierungen sind einem oder mehreren möglichen Lieferanten zugeordnet.
- Sollte es sich bei Produktrealisierungen um Zwischen- oder Endprodukte handeln, so wird für diese ein Produktionsprozess spezifiziert. Dies stellt die sequentielle Ausführung von ein oder mehreren Prozessschritten dar. Ein Prozessschritt kann dabei einen Produktionsschritt auf einer einzelnen Arbeitsstation oder auch den Produktdurchlauf durch eine Produktionslinie darstellen. Gegebenenfalls werden bei einem Prozessschritt die einzelnen, vorzunehmenden Einstellungen dokumentiert.

¹⁵² Diese Anwendungsfälle stellen letztlich Zusammenstellungen von Informationen und Anforderungen für einen Markt dar. Dieser Informationstyp wird hier nicht weiter detailliert betrachtet, da er für die Optimierungsmethodik nicht von zentraler Bedeutung ist.

¹⁵³ Der Ausarbeitungsgrad einer Produktrealisierung stellt letztlich eine Phasenbeschreibung in deren Lebenszyklus dar. Dieser Lebenszyklus könnte z.B. mit Workflow-Methodik abgebildet werden.

- Einem Prozessschritt ist wiederum eine Beschreibung der Produktkonstruktion bzw. eine Stückliste zugeordnet¹⁵⁴. Dabei wird auf in das Zwischen-/Endprodukt als Vorprodukte bzw. Material eingehende Produktrealisierungen verwiesen¹⁵⁵. CAD-Zeichnungen und andere Dokumente werden dabei der Produktkonstruktion zugeordnet.
- Ein Prozessschritt kann auch von einem Lohnauftragnehmer durchgeführt werden.

Der folgende Abschnitt erläutert die hierfür benötigte Expertensystem-Konfiguration.

5.3.3.5 Expertensystem-Konfiguration

Die Expertensystem-Konfiguration ist nach den wesentlichen Informationstypen in Abbildung 68 gegliedert. Es werden jeweils wesentliche zuzuordnende Eigenschaften, die Beziehungszuordnung und zu realisierende Software-Funktionen sowie für die Aufgabenstellung zentrale Sichten beschrieben.

Folgende allgemeine Eigenschaften und Funktionen werden bei allen Informationstypen benötigt: universaler eindeutiger Identifizierer, Bezeichnung, Beschreibung inkl. Alternativbezeichnungen, z.B. über Workflows abgebildetes Lebenszyklus-Management. Sinnvoll ist sicherlich ebenso Versionsmanagement-Funktionalität.

Organisation: Lieferant, Lohnauftragnehmer, Kunde

Für die Themenstellung wesentliche Eigenschaften:

Eigenschaft	Typ	Kardinalität	Erläuterung
Typen	Auswahl aus Vorgaben (Lieferant, Lohnauftragnehmer, Kunde)	<i>n</i>	Diese Eigenschaft ist nur nötig, wenn keine segmentierende Untergliederung von Organisationen möglich ist.

Beziehungszuordnung:

- «Organisation (bzw. Kunde)» ist Partner in «Entwicklungsprojekt»
- «Organisation bzw. Lieferant» liefert «Produktrealisierung (bzw. Vorprodukt/Material)»
- «Organisation bzw. Lohnauftragnehmer» übernimmt «Prozessschritt»

Zu realisierende Software-Funktionen:

—

¹⁵⁴ Letztlich könnte die Produktkonstruktion/ Stückliste auch direkt als Teil des Prozessschrittes modelliert werden. Darauf wurde hier verzichtet, da es sich bei einem Prozessschritt um eine Tätigkeit handelt; bei der Produktkonstruktion/ Stückliste stellt wiederum eine Zusammenstellung von Dokumenten dar.

¹⁵⁵ Diese Modellierungsform erlaubt die aggregierende Beschreibung der Herstellprozesse eines Produktes: so gehen z.B. Stapelfasern als Vorprodukt in ein Vlies ein. Dieses Halbzeug geht wiederum in ausgeschnittener Form in eine Komponente, z.B. eine Schmiermittelbereitstellung für ein bewegliches Maschinenteil ein. Verschiedene Komponenten werden dann zu einem Modul integriert, das dann wiederum in einem Aggregat bzw. einem Endprodukt verbaut wird.

Für die Aufgabenstellung wichtige Sichten:

- Liste der zugeordneten Entwicklungsprojekte
- Liste der zugeordneten Prozessschritte
- Liste der lieferbaren Materialien

Entwicklungsprojekt

Für die Themenstellung wesentliche Eigenschaften:

Eigenschaft	Typ	Kardinalität	Erläuterung
Beginn	Zeitpunkt	1	
Ende	Zeitpunkt	1	
Dauer	Zeitspanne	1	
Beschreibung	Text mit Formatauszeichnungen	1	
Material	Angehängte Dateien	n	

Beziehungszuordnung:

- «Entwicklungsprojekt» hat Partner «Organisation (bzw. Kunde)»
- «Entwicklungsprojekt» hat «Anforderung»
- «Entwicklungsprojekt» hat «Zielfunktion»
- «Entwicklungsprojekt» hat «Möglicher Produkttyp»

Zu realisierende Software-Funktionen:

- Wenn Beginn und Ende gepflegt: Berechnung der Dauer: $Dauer := Ende - Beginn$

Für die Aufgabenstellung wichtige Sichten:

- Liste der zu erfüllenden Anforderungen
- Liste der möglichen Produkttypen, jeweils mit dem Stand der Optimierung und der besten Produktrealisierung

Anforderung

Für die Themenstellung wesentliche Eigenschaften:

Eigenschaft	Typ	Kardinalität	Erläuterung
Typ	Auswahl aus Vorgaben (Mindestanforderung; Maximalanforderung)	1	Für den Suchalgorithmus ist es wichtig, immer eine Unter- und Obergrenze für
Anforderung als Text	Vorlage mit automatischem Einsetzen von Werten	1	z.B. „Die Produktrealisierung nimmt in 10 s mindestens 50 ml Wasser in einem 10cm breiten Streifen auf.“
Mindestwert	50	1	
Höchstwert	200	1	Dieser Wert muss für den Optimierungsalgorithmus vorgegeben werden, da er den Parameterraum begrenzt.

Beziehungszuordnung:

- «Anforderung» gehört zu «Entwicklungsprojekt»
- «Anforderung» bewertet «Produktcharakterisierung»

Zu realisierende Software-Funktionen:

- Typ, Mindestwert und Höchstwert vorhanden: Anforderung als Text aus Vorlage zusammensetzen.

Für die Aufgabenstellung wichtige Sichten:

–

Zielfunktion

Für die Themenstellung wesentliche Eigenschaften:

Eigenschaft	Typ	Kardinalität	Erläuterung
Beschreibung als Text	Text mit Formatauszeichnungen	1	
Algorithmus	Mehrzeiliger Text	1	Code für ein Computer-Algebra-System bzw. in einer Programmiersprache

Beziehungszuordnung:

- «Zielfunktion» gehört zu «Entwicklungsprojekt»

Zu realisierende Software-Funktionen:

- Syntax-Check der Zielfunktion

Für die Aufgabenstellung wichtige Sichten:

- Mit der Zielfunktion verknüpfte Entwicklungsprojekte

Zielfunktionen werden zum einen abprüfen, ob alle mit einem Entwicklungsprojekt verknüpften Anforderungen erfüllt sind. Zum anderen errechnen sie eine die Qualität beschreibende Größe. Dies können z.B. die Produktionskosten bzw. die Erfüllung einer Eigenschaft in Funktion der Produktionskosten – wie die Flüssigkeitsaufnahme pro € – sein.

Möglicher Produkttyp

Für die Themenstellung wesentliche Eigenschaften:

Eigenschaft	Typ	Kardinalität	Erläuterung
–			

Beziehungszuordnung:

- «Möglicher Produkttyp» kann prinzipiell für «Entwicklungsprojekt» verwendet werden
- «Möglicher Produkttyp» hat mögliche «Produktrealisierung»

Zu realisierende Software-Funktionen:

–

Für die Aufgabenstellung wichtige Sichten:

- Liste aller verknüpften Entwicklungsprojekte
- Liste der zugeordneten Produktrealisierungen

Produktcharakterisierung, am Beispiel der Kapillarkinetik in der Senkrechten ($\alpha = 90^\circ$)

Bei einer Produktcharakterisierung handelt es sich um das Ergebnis der Bestimmung einer speziellen Produkteigenschaft, also letztlich einem Messergebnis.

Von diesem Informationstyp sind geeignete Untertypen zu spezifizieren. Diese bilden die Ergebnisse der im Unternehmen angewandten Produktcharakterisierungen ab.

Die hier aufgeführte Produktcharakterisierung der Kapillarkinetik in der Senkrechten ($\alpha = 90^\circ$) versteht sich als ein mögliches, spezielles Beispiel.

5. Forschungsergebnisse

Für die Themenstellung wesentliche Eigenschaften:

Eigenschaft	Typ	Kardinalität	Erläuterung
Umwelt			
Klimatyp	Auswahl aus Vorgaben (Standard-Laborklima, Anwendungsklima)	1	
Temperatur	Zahl mit Fixkommastellen	1	
Luftfeuchte	Zahl mit Fixkommastellen	1	
Flüssigkeitseigenschaften			
Bezeichnung	Text	1	
Viskosität	Zahl mit Fixkommastellen	1	
Oberflächenspannung	Zahl mit Fixkommastellen	1	
Identifizierte Modellparameter			
Mittelwert der Kapillargeschwindigkeitskonstante v	Zahl mit Fixkommastellen	1	
Einseitiges 95%-Konfidenzintervall zum Mittelwert der Kapillargeschwindigkeitskonstante	Zahl mit Fixkommastellen	1	
Mittelwert der max. Steighöhe h_{max}	Zahl mit Fixkommastellen	1	
Einseitiges 95%-Konfidenzintervall zum Mittelwert der max. Steighöhe	Zahl mit Fixkommastellen	1	
Abgeleitete Eigenschaften (nur Beispiele sind aufgeführt)			
Waagrecht eingezogenes Flüssigkeitsvolumen auf 50 mm Breite nach 10 s	Zahl mit Fixkommastellen	1	
Zeit bis zum Erreichen von 95 % der max. Steighöhe in der Senkrechten	Zahl mit Fixkommastellen	1	
...			

Beziehungszuordnung:

- « Produktcharakterisierung » liefert Input zur Bewertung der Konformität mit «Anforderung»
- « Produktcharakterisierung » bewertet «Produktrealisierung»

Zu realisierende Software-Funktionen:

- Unterstützung der Produktcharakterisierung, Z.B. Parameteridentifikation
- Berechnung abgeleiteter Eigenschaften

Für die Aufgabenstellung wichtige Sichten:

- Zusammengefasste Charakterisierungsergebnisse
- Aus den Charakterisierungsergebnissen abgeleitete Eigenschaften
- Statistische Absicherung
- Liste möglicher Produkttypen

Produktrealisierung: Vorprodukt/ Material, Zwischen-/Endprodukt

Für die Themenstellung wesentliche Eigenschaften:

Eigenschaft	Typ	Kardinalität	Erläuterung
Typen	Auswahl aus Vorgaben (Vorprodukt/ Material, Zwischenprodukt, Endprodukt)	<i>n</i>	Diese Eigenschaft ist nur nötig, wenn keine segmentierende Untergliederung von Produktrealisierungen möglich ist.

Beziehungszuordnung:

- «Produktrealisierung» wird durch «Produktionsprozess» erzeugt
- «Produktrealisierung» wird durch «Produktcharakterisierung» beschrieben
- «Produktrealisierung» stammt von «Lieferant»
- «Produktrealisierung» geht ein in «Produktkonstruktion/(Stückliste)»
-

Zu realisierende Software-Funktionen:

–

Für die Aufgabenstellung wichtige Sichten:

- Liste der Produkteigenschaften und -charakterisierungsergebnisse
- Anzeige des Produktionsprozesses und der jeweils zugehörigen Produktkonstruktionen und Stücklisten

Produktionsprozess

Für die Themenstellung wesentliche Eigenschaften:

Eigenschaft	Typ	Kardinalität	Erläuterung
Mindestdurchlaufdauer	Zeitspanne	1	Die Summe aller Rüst- und Transportwegezeiten, die für alle Lose dieses Prozesses unabhängig von deren Stückzahl veranschlagt werden kann.
Zusätzliche einheitsbezogene Durchlaufdauer	Zeitspanne	1	Die Durchlaufzeit für eine Einheit des entstehenden Produktes.
Fixe Produktionskosten für ein Los	Zahl mit Fixkostmastellen	1	Rüstkosten, etc. aller Prozessschritte und andere Fixkosten
Zusätzliche variable Produktionskosten	Zahl mit Fixkostmastellen	1	Material-, Maschinen- und Lohnkosten pro Einheit für alle Prozessschritte

Beziehungszuordnung:

- « Produktionsprozess » erzeugt « Zwischen-/Endprodukt »
- « Produktionsprozess » umfasst « Prozessschritt »

Zu realisierende Software-Funktionen:

- Errechnung der aufgeführten wesentlichen Eigenschaften
- Errechnung der Durchlaufdauer und -kosten eines Produktionsloses mit vorgegebener Größe

Für die Aufgabenstellung wichtige Sichten:

- Anzeige der kompletten Prozesskette inkl. der jeweiligen Produktkonstruktion und Stücklisten

Prozessschritt mit Produktkonstruktion, Stückliste

Die detaillierten Prozesseinstellungen sind bei abzuleitenden Untertypen von «Prozessschritt» zu definieren.

Für die Themenstellung wesentliche Eigenschaften:

Eigenschaft	Typ	Kardinalität	Erläuterung
Allgemeine Eigenschaften			
Mindestdurchlaufdauer	Zeitspanne	1	Die Summe aller Rüst- und Transportwezeiten, die für alle Lose dieses Prozesses unabhängig von deren Stückzahl veranschlagt werden kann.
Zusätzliche einheitsbezogene Durchlaufdauer	Zeitspanne	1	Die Durchlaufzeit für eine Einheit des entstehenden Produktes.
Fixe Produktionskosten für ein Los	Zahl mit Fixkommastellen	1	Rüstkosten, etc. aller Prozessschritte und andere Fixkosten
Zusätzliche variable Produktionskosten	Zahl mit Fixkommastellen	1	Material-, Maschinen- und Lohnkosten pro Einheit für alle Prozessschritte
Produktkonstruktion	BLOBs ¹⁵⁶ , Dateien	1	Konstruktionszeichnungen, spezielle Verfahrensanweisungen, etc.
Spezielle Eigenschaften, hier beispielhaft¹⁵⁷ für «Umspulen und Ablängen»			
Maschine	Auswahl aus Liste (z.B. Spulmaschine 1, Spulmaschine 2, Spulmaschine 7)	1	Welche Maschine zum Spulen verwendet wird. Es könnte statt einer konkreten Maschine auch ein Maschinentyp gewählt werden.
Zu verwendende Spule	Auswahl aus Liste (z.B. Karton, blau; Karton, rot; PET, weiß)	1	Auf welchen Spulentyp aufgespult wird. Diese Eigenschaft ist nur dann erforderlich, wenn keine Stückliste geführt wird.
Aufzuspulende Länge	Zahl mit Fixkommastellen	1	Diese Eigenschaft ist nur dann erforderlich, wenn keine Stückliste geführt wird.

¹⁵⁶ Binary large objects.

¹⁵⁷ Dieses einfache Beispiel veranschaulicht beispielhaft, welche weiteren Eigenschaften für den « Prozessschritt»-Untertyp «Umspulen und Ablängen» hinzu kommen. Es wurde bewusst ein Prozessschritt mit wenigen losspezifisch zu konfigurierenden Eigenschaften gewählt.

Beziehungszuordnung:

- «Prozessschritt mit Produktkonstruktion, Stückliste» ist Teilschritt in «Produktionsprozess»
- «Prozessschritt mit Produktkonstruktion, Stückliste» verwendet «Produktrealisierung» als eingehendes Material in einer vorgegebenen Menge
- «Lohnauftragnehmer» führt Prozessschritt durch

Zu realisierende Software-Funktionen:

- Errechnung der Durchlaufdauer und -kosten eines Produktionsloses mit vorgegebener Größe

Für die Aufgabenstellung wichtige Sichten:

- Konfiguration (Eingabemaske mit Hinweisen zu den einzelnen Eigenschaften sowie zur Stückliste) für die Arbeitsvorbereitung bzw. Produktentwicklung
- Verfahrensanweisung (vorgegebener, in Schritte gegliederter Text mit automatisch einsetzten Attributwerten und der Stückliste) für die Produktion

5.3.4 Validierung

Übersicht

Die Validierung hat sich in erster Linie der für die selbstlernende Produktentwicklung zentralen Methode zum musterungsbasierten Finden eines Optimums zwischen variierbaren Prozesseinstellungen und Zielprodukteigenschaften gewidmet. Dies lag mithin daran, dass verschiedenste Unternehmen im PA vertreten waren und daher ein Konsens gefunden werden musste, der kein Unternehmen durch Bereitstellung einer für dieses spezifischen Expertensystemkonfiguration bevorteilt.

Zur Konzeption der Validierung wurden auf PA-Sitzungen Gespräche mit verschiedenen Firmen initiiert, anschließend wurden vertiefende Gespräche geführt. Der Validierungsgegenstand war dabei – um Vorwettbewerblichkeit zu gewährleisten – ein beispielhafter, erläuterter theoretischer Durchlauf der Methode zum musterungsbasierten Finden eines Optimums zwischen variierbaren Prozesseinstellungen und Zielprodukteigenschaften. Dies ermöglicht weiter z.B. eine einfachere Übernahme der Prozedur in die Lehre, da auf die Bereitstellung einer entsprechenden Anlage verzichtet werden kann¹⁵⁸.

Die beiden folgenden Abschnitte erläutern den Validierungsgegenstand und die -ergebnisse.

Validierungsgegenstand: Beispiel für selbstlernende Methode zum Optimieren der kapillaren Steigkinetik textiler Fasergebilde

Die theoretische Nachstellung der Zielfunktionssuche erfolgt anhand der Gleichungen in Maschler et al (2013b), S. 103f zur Wasseraufnahme und Flächenmasse bei der Airlaid-Vliesbildung mit Viscose Galaxy- und Biko-Fasern. Es handelt sich dabei um Regressionsmodelle für den Airlaid-Prozess, variiert werden dabei die folgenden Eingangsvariablen:

Tabelle 26: Eingangsvariablen der Validierung.

Variablenbezeichnung ¹⁵⁹	Variablenname	Einheit	Mindestwert	Maximalwert
Länge der Viscose Galaxy- und der Biko-Fasern	Faserlaenge	[mm]	3	12
Anteil an Biko-Fasern	Anteil_Biko	[%]	10	20
Abzugsgeschwindigkeit/ Formierbandgeschwindigkeit	V_ab	[m/min]	2	4

Die Mindest- und Maximalwerte der Regressionsmodellbildung geben hier jeweils auch die Grenzen für die Parameteridentifikation vor.

¹⁵⁸ Sollten auch die Anlagentechnologie, Musterungen sowie Produktcharakterisierungen Lehrgegenstand sein, kann auf das theoretische Regressionsmodell verzichtet werden.

¹⁵⁹ Die jeweils zur Modellbildung gewählten Werte finden sich in Maschler et al (2013), Tabelle 10 auf S. 45.

Hier eine Aufstellung der verfügbaren Regressionsmodelle:

```
# Wasseraufnahme WA = f(Dichte)
WA = 9106.4*pow(Dichte,-0.483)
# R2 = 0.8747; 39.5 <= Dichte <= 62

# Wasserrückhaltevermögen = f(Dichte)
WRV = 0.0818*Dichte*Dichte
- 10.251 * Dichte + 407.39
# R2 = 0.73265; 39.5 <= Dichte <= 62

# Dicke = f(Faserlaenge, Anteil_Biko, V_ab)
Dicke = 0.2098*Faserlaenge
+ (51.92*Anteil_Biko - 1117)
/(Faserlaenge*Anteil_Biko*V_ab
- 0.3517*Anteil_Biko
- 20.63 *Faserlaenge*V_ab)
# R2 = 0.97231234

# Flaechenmasse = f(Faserlaenge, V_ab)
Flaechenmasse = 2451
+ 155.8*Faserlaenge*V_ab
+ 20.9*Faserlaenge*Faserlaenge
+ 11.29*V_ab*V_ab*V_ab
- 478.5*Faserlaenge
- 694.2*V_ab
- 4.776*Faserlaenge*Faserlaenge*V_ab
- 11.71*Faserlaenge*V_ab*V_ab
# R2 = 0.97

# Dichte = Flächenmasse / Dicke
Dichte * Dicke = Flaechenmasse

# Steighoehe = f (Dichte, Anteil_Biko)
Steighoehe = 2
+ Dichte
+ ( -134.3
- 21.93*Anteil_Biko)/Dichte
+ 79.51/(pow(Dichte,2)
- 44.17*Dichte)
# R2=0.92447143

# Faserverbrauch [kg/min] = f(Vliesbreite [cm]
#                               * Flaechenmasse [g/m2]
#                               * Abzugsgeschwindigkeit [m/min]
Faserverbrauch = Vliesbreite
* Flaechenmasse
* V_ab /1000 /100
```

Abbildung 69: Regressionsgleichungen als Basis für die Validierung¹⁶⁰.

¹⁶⁰ Maschler et al (2013), S. 103f. Als Dezimaltrennzeichen wird dabei „.“, nicht „.“ verwendet.

Die aufgeführten Regressionsgleichungen enthalten keine Zustandsvariablen. Damit beziehen sich die Regressionsmodelle alle auf den statischen, eingeschwungenen Produktionsprozess. Die Regressionsmodelle haben folgende Ausgangsvariablen:

Tabelle 27: Ausgangsvariablen der Validierung.

Variablenbezeichnung	Variablenname	Einheit
Relative Wasseraufnahme bezogen auf die Masse	WA	[%]
Wasserrückhaltevermögen	WRV	[%]
Vliesdicke	Dicke	[mm]
Vliesdichte	Dichte	[g/l]
Flächenmasse	Flaechenmasse	[g/m ²]
Max. Steighöhe h_{max}	Steighoehe	[mm]
Faserverbrauch	Faserverbrauch	[kg/min]

Folgende Anforderungen werden definiert:

- (a) Die Vliesdicke beträgt maximal 10 [mm].
- (b) Die Dichte beträgt maximal 100 [g/l].

Folgende Zielfunktion wird definiert:

*Maximiere bei Konformität mit allen Anforderungen
das Verhältnis von max. Steighöhe zur Flächenmasse.*

Der Zielfunktion liegt die Annahme zugrunde, dass die Flächenmasse letztlich in der Produktentwicklung einer der besten Bezugspunkte zu den Kosten darstellt. Die Zielfunktion lässt sich so folgendermaßen in Pseudo-Programmcode formulieren:

```
function Zielfunktion(Faserlaenge, Anteil_Biko, V_ab) {
    # Berechne Dicke, Dichte, Flaechemasse und Steighoehe ++++++
    # mittels Regressionsmodellen (diese Parameter wuerden im Anschluss an
    # eine Musterung mittels Produktcharakterisierungen bestimmt)

    # Dicke = f(Faserlaenge, Anteil_Biko, V_ab)
    Dicke = 0.2098*Faserlaenge
    + (51.92*Anteil_Biko - 1117)
    / (Faserlaenge*Anteil_Biko*V_ab
    - 0.3517*Anteil_Biko
    - 20.63 *Faserlaenge*V_ab);

    # Flaechenmasse = f(Faserlaenge, V_ab)
    Flaechenmasse = 2451
    + 155.8*Faserlaenge*V_ab
    + 20.9*Faserlaenge*Faserlaenge
    + 11.29*V_ab*V_ab*V_ab
    - 478.5*Faserlaenge
    - 694.2*V_ab
    - 4.776*Faserlaenge*Faserlaenge*V_ab
    - 11.71*Faserlaenge*V_ab*V_ab;

    # Dichte
    Dichte = Flaechenmasse / Dicke;

    # Steighoehe = f (Dichte, Anteil_Biko)
    Steighoehe = 2
    + Dichte
    + ( -134.3
    - 21.93*Anteil_Biko/Dichte
    + 79.51/(pow(Dichte,2)
    - 44.17*Dichte)

    # Prüfe, ob alle Anforderungen erfüllt sind ++++++
if(
        (Dicke <= 10)
        AND (Dichte<= 100)
    ) {
        # Alle Anforderungen sind erfüllt:
        # Zielfunktionswert berechnen
        return Steighöhe/Flaechemasse;
    } else {
        # Ansonsten: 0 zurückgeben
        return 0;
    } # Ende des if-Blocks

} # Ende der Funktionsdeklaration ++++++
```

Abbildung 70: Zielfunktion für die Validierung als Pseudo-Programmcode.

Für die drei zu variierenden Parameter werden nun folgende Ober- und Untergrenzen sowie kleinste sinnvolle Schrittweiten festgelegt:

Tabelle 28: Ober- und Untergrenzen und kleinste sinnvolle Schrittweite der Parameter.

Parameter-/ Variablenbezeichnung	Parameter- /Variablenname	Einheit	Untergrenze	Obergrenze	Schrittweite sinnvolle	Kleinste
Länge der Viscose Galaxy- und der Biko-Fasern	Faserlaenge	[mm]	3	12		2
Anteil an Biko-Fasern	Anteil_Biko	[%]	10	20		5
Abzugsgeschwindigkeit/ Formier- bandgeschwindigkeit	v_ab	[m/min]	2	4		0,25

Wir gehen anfangs davon aus, dass noch keine Musterungen vorliegen. Dementsprechend lässt sich auch noch kein erstes Regressionsmodell der Zielfunktion entwickeln.

Dementsprechend werden in den Parameterraum die in der folgenden Tabelle gelisteten Punkte verteilt. Dabei werden in die Eckpunkte des zu rasternden Raums Punkte gesetzt, weiter auf die Mittelpunkte der Spannen zwischen den Eckpunkten:

Tabelle 29: Validierungsdurchlauf 1 durch „Optimale Parameter für eine Produktrealisierung finden“: Punkte im Parameterraum mit Zielfunktionswerten.

Durchgang	Muster	Faserlänge	Anteil_Biko	V_ab	Dicke	Flächenmasse	Dichte	Steighöhe	Anforderungen erfüllt?	Zielfunktionswert Z(...)
1	1	3	10	2	9,51	613,83	64,53	61,0	ja	0,099
1	2	3	10	3	6,66	382,91	57,52	53,3	ja	0,139
1	3	3	10	4	5,19	284,94	54,90	50,4	ja	0,177
1	4	3	15	2	9,29	613,83	66,08	61,0	ja	0,099
1	5	3	15	3	6,67	382,91	57,37	51,3	ja	0,134
1	6	3	15	4	5,27	284,94	54,04	47,4	ja	0,166
1	7	3	20	2	7,90	613,83	77,72	72,3	ja	0,118
1	8	3	20	3	6,82	382,91	56,17	47,9	ja	0,125
1	9	3	20	4	6,02	284,94	47,37	37,2	ja	0,131
1	10	7,5	10	2	5,24	188,20	35,90	28,0	ja	0,149
1	11	7,5	10	3	4,04	169,23	41,92	35,4	ja	0,209
1	12	7,5	10	4	3,43	177,83	51,88	47,0	ja	0,264
1	13	7,5	15	2	5,34	188,20	35,22	24,0	ja	0,128
1	14	7,5	15	3	4,14	169,23	40,91	31,5	ja	0,186
1	15	7,5	15	4	3,52	177,83	50,59	43,4	ja	0,244
1	16	7,5	20	2	6,34	188,20	29,68	12,3	ja	0,065
1	17	7,5	20	3	5,28	169,23	32,05	16,1	ja	0,095
1	18	7,5	20	4	4,60	177,83	38,62	25,7	ja	0,145
1	19	12	10	2	4,83	222,15	46,00	40,3	ja	0,181
1	20	12	10	3	4,07	221,72	54,54	50,0	ja	0,226
1	21	12	10	4	3,68	143,46	38,97	31,9	ja	0,222
1	22	12	15	2	4,93	222,15	45,09	36,8	ja	0,166
1	23	12	15	3	4,14	221,72	53,50	46,8	ja	0,211
1	24	12	15	4	3,75	143,46	38,31	28,2	ja	0,196
1	25	12	20	2	6,07	222,15	36,63	22,9	ja	0,103
1	26	12	20	3	5,16	221,72	42,95	31,6	ja	0,142
1	27	12	20	4	4,63	143,46	31,01	14,5	ja	0,101

Mittels der Software Eureqa Pro von Schmidt & Lipson (2009, 2014) lässt sich die Topologie der Zielfunktion $Z(\text{Faserlaenge}, \text{Anteil_Biko}, V_{ab})$ wie folgt mittels eines Regressionsmodells beschreiben¹⁶¹:

Tabelle 30: Regressionsmodell für die Zielfunktion aus Validierungsdurchlauf 1.

Solution	Zielfunktionswert = 0,104063156285246 + 0,00314862731849303*Faserlaenge*V_ab^2 - 0,0125651850183231*V_ab - 1,95931007653972e-8*Faserlaenge *V_ab*Anteil_Biko^4 - 4,48239384227551e-5*Faserlaenge^2*V_ab^3
"R² Goodness of Fit"	0,89526055
"Correlation Coefficient"	0,94775213
"Maximum Error"	0,045288426
"Mean Squared Error"	0,00026203482
"Mean Absolute Error"	0,010725584
Coefficients	5
Complexity	39

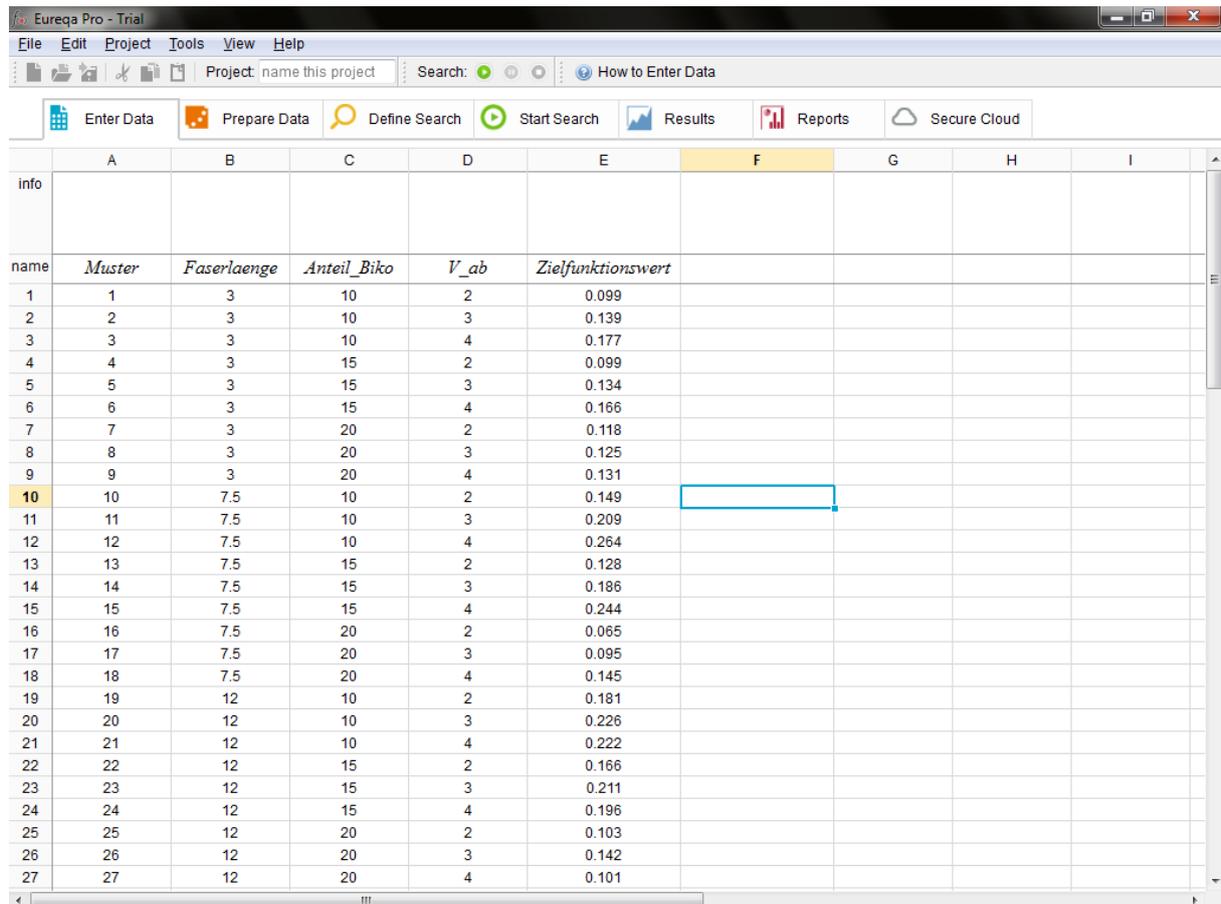
Dabei ist zu beachten, dass es sich um eine mittels genetischer Regression ermittelte Lösung handelt. Hierzu wurden von der Software Eureqa Pro eine Anzahl verschiedene Regressionsmodelle zufällig entworfen und parametrisiert. Die besten dieser Regressionsmodelle wurde dann für die nächste Modellgeneration übernommen und vermischt. Dieser Übernahme der besten Lösungen wird solange fortgeführt, bis keine nennenswerten Verbesserungen mehr erfolgen. Da die Regressionsmodelle zufällig entwickelt werden, ist es möglich, dass die Software bei einem erneuten Durchlauf ein anderes Regressionsmodell vorschlägt.

¹⁶¹ Schmidt M., Lipson, H. (2009): Distilling Free-Form Natural Laws from Experimental Data. Science, Vol. 324, no. 5923, pp. 81 - 85.

Schmidt, M., Lipson, H. (2014): Eureqa (Version 0.98 beta) [Software]. Available from www.nutonian.com

5. Forschungsergebnisse

Die folgenden Screenshots zeigen dabei beispielhaft die einzelnen Schritte mit Eureka Pro:



	A	B	C	D	E	F	G	H	I
info									
name	<i>Muster</i>	<i>Faserlaenge</i>	<i>Anteil_Biko</i>	<i>V_ab</i>	<i>Zielfunktionswert</i>				
1	1	3	10	2	0.099				
2	2	3	10	3	0.139				
3	3	3	10	4	0.177				
4	4	3	15	2	0.099				
5	5	3	15	3	0.134				
6	6	3	15	4	0.166				
7	7	3	20	2	0.118				
8	8	3	20	3	0.125				
9	9	3	20	4	0.131				
10	10	7.5	10	2	0.149				
11	11	7.5	10	3	0.209				
12	12	7.5	10	4	0.264				
13	13	7.5	15	2	0.128				
14	14	7.5	15	3	0.186				
15	15	7.5	15	4	0.244				
16	16	7.5	20	2	0.065				
17	17	7.5	20	3	0.095				
18	18	7.5	20	4	0.145				
19	19	12	10	2	0.181				
20	20	12	10	3	0.226				
21	21	12	10	4	0.222				
22	22	12	15	2	0.166				
23	23	12	15	3	0.211				
24	24	12	15	4	0.196				
25	25	12	20	2	0.103				
26	26	12	20	3	0.142				
27	27	12	20	4	0.101				

Abbildung 71: Dateneingabebereich von Eureka Pro.

Die notwendigen Daten wurden mittels Kopieren und Einfügen übernommen. Dabei ist zu beachten, dass Eureka Pro keine „.“ als Dezimaltrennzeichen akzeptiert. Diese wurden daher vorab durch einen „.“ ersetzt.

Der nächste Screenshot zeigt die Auswahl der zulässigen Termteile für die und die Definition der Zielfunktion. Weiter kann in diesem Dialog die Bestimmungsart des Fehlers zwischen Modell und Daten ausgewählt werden.

5.3 Selbstlernende Methode zur Berechnung und Auslegung der Kapillarkinetik von Flüssigkeiten in textilen Fasergebilden

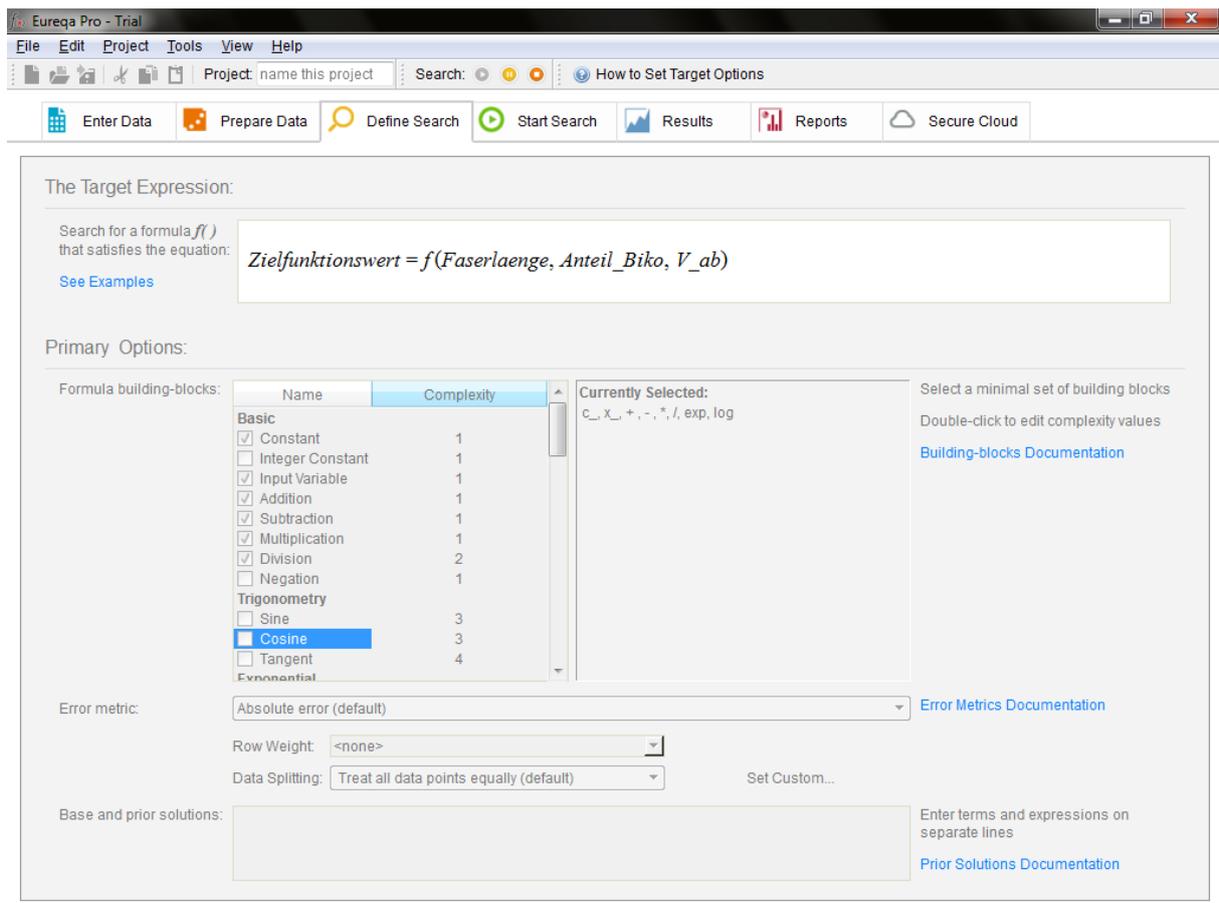


Abbildung 72: Definition der Bestandteile der Zielfunktion in Eureka Pro.

Der folgende Screenshot zeigt den Dialog zur Formelsuche. Angezeigt wird dabei die Entwicklung des kleinsten mittleren Modellfehlers über die Zeit. Die Zeitskala ist dabei logarithmisch aufgetragen.

5. Forschungsergebnisse

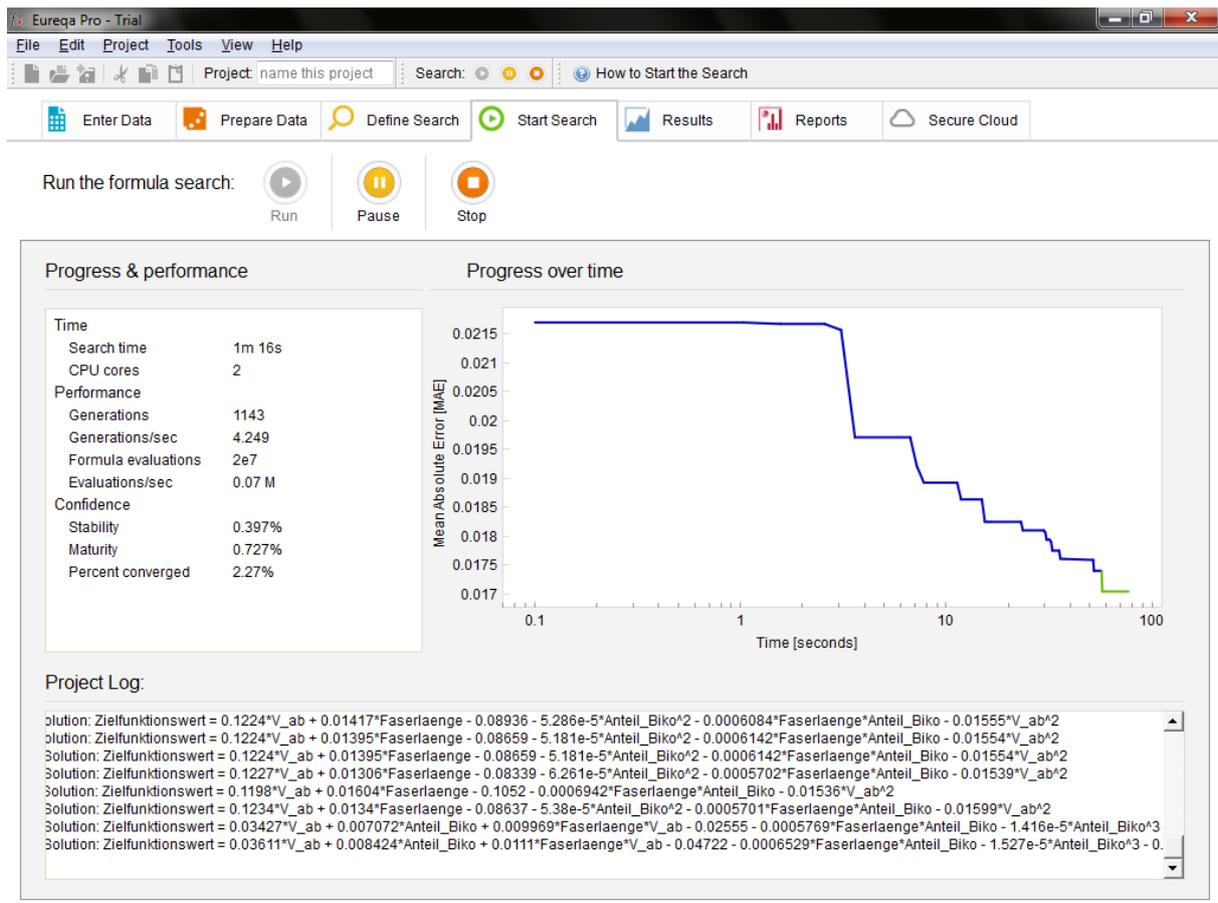


Abbildung 73: Dialog zur Formelsuche in Eureka Pro.

Die ermittelten Regressionsmodelle werden zusammen mit ihrer Termgröße (Size) und ihrer Qualität (Fit, je niedriger, desto besser) angezeigt. Rechts davon ist ein Plot der zur Zeit besten Lösung zu sehen. Dabei ist zu erkennen, dass diese bei den Mustern 6 und 7 deutlich unterhalb der vorgegebenen Zielfunktionswerte liegt. Letztlich geht es aber im Weiteren darum, ein Maximum für die Zielfunktion zu ermitteln. Daher ist dies hier weniger relevant.

5.3 Selbstlernende Methode zur Berechnung und Auslegung der Kapillarkinetik von Flüssigkeiten in textilen Fasergebilden

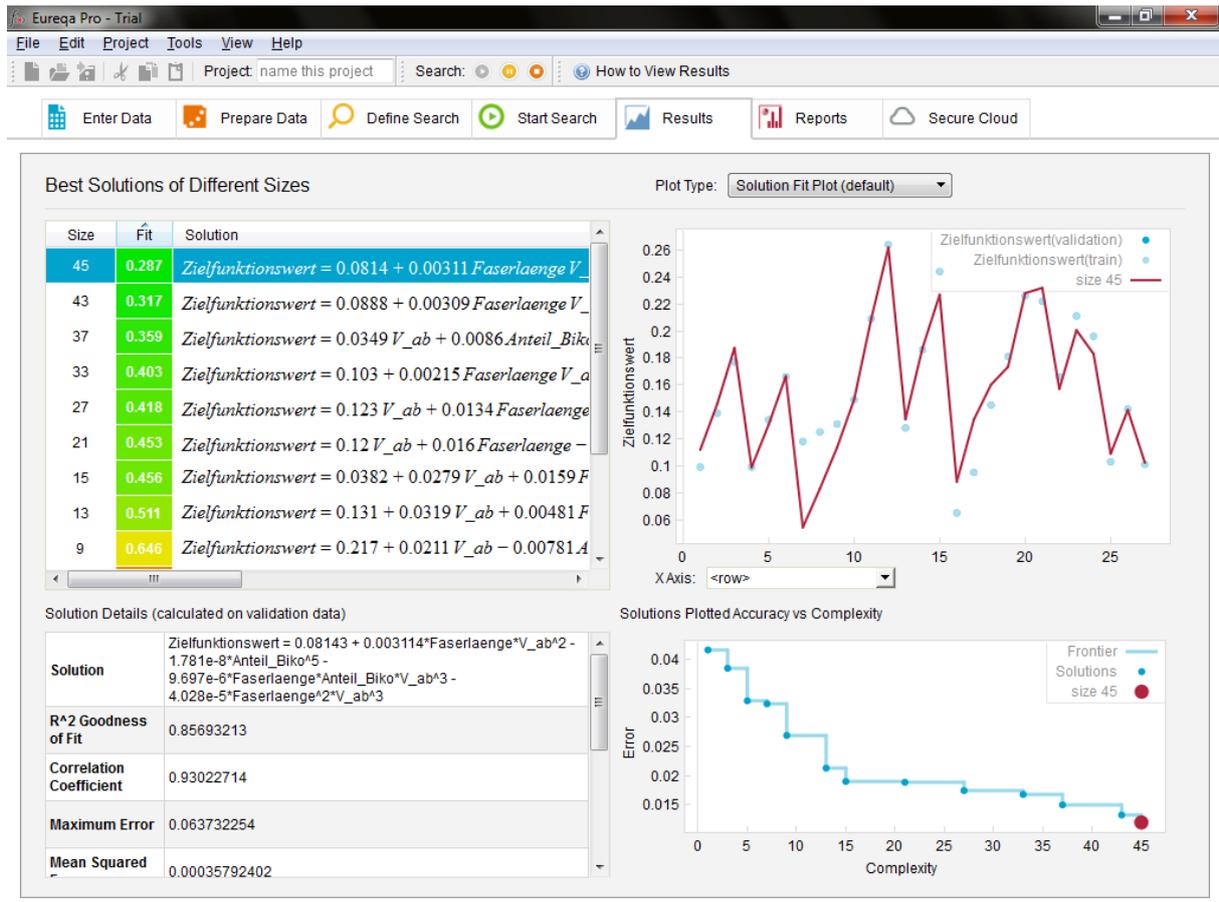


Abbildung 74: Dialog mit den ermittelten Regressionsmodellen.

5. Forschungsergebnisse

Nun wird für das Regressionsmodell aus Durchgang 1 das Maximum ermittelt. Wird hier mit dem Gleichungslöser¹⁶² von Microsoft Excel durchgeführt:

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1										
2		Zielfunktion	0,18850582							
3				min	max					
4		Faserlaenge	7,5	3	12					
5		Anteil_Biko	15	10	20					
6		V_ab	3	2	4					

Solver-Parameter

Ziel festlegen:

Bis: Max. Min. Wert:

Durch Ändern von Variablenzellen:

Unterliegt den Nebenbedingungen:

- Anteil_Biko <= \$E\$5
- Anteil_Biko >= \$D\$5
- Faserlaenge <= \$E\$4
- Faserlaenge >= \$D\$4
- V_ab <= \$E\$6
- V_ab >= \$D\$6

Nicht eingeschränkte Variablen als nicht-negativ festlegen

Lösungsmethode auswählen: EA (Evolutionärer Algorithmus)

Lösungsmethode
Wählen Sie das GRG-Nichtlinear-Modul für Solver-Probleme, die kontinuierlich nichtlinear sind. Wählen Sie das LP Simplex-Modul für lineare Solver-Probleme und das EA-Modul für Solver-Probleme, die nicht kontinuierlich sind.

Hilfe Lösen Schließen

Abbildung 75: Konfiguration des Excel-Gleichungslösers zur Maximumermittlung für die Zielfunktion.

¹⁶² Bei Excel 2013 muss dieser erst aktiviert werden: „Datei > Optionen > Add-Ins > Verwalten: Excel-Add-Ins“ + „Gehe zu“. Anschließend die Option „Solver“ aktivieren. Anschließend steht der Gleichungslöser auf dem Reiter „Daten > Analyse“ zur Verfügung.

So ergibt sich für die ermittelte Zielfunktion des 1. Durchgangs ein Maximum von $Z = 0,2681$ bei folgenden Werten:

$$Faserlaenge = 8,644$$

$$Anteil_Biko = 10$$

$$V_ab = 4$$

Damit liegt das detektierte Maximum bei der maximalen Abzugsgeschwindigkeit und bei einem minimalen Anteil an Biko-Fasern. Die optimale Faserlänge liegt bei ca. 8,65 mm.

Für den zweiten Durchgang wird werden nun weitere Musterungen im halbierten Parameter-raum durchgeführt. Es ergeben sich so folgende neue Ober- und Untergrenzen des Parameterraums:

Tabelle 31: Theoretische Ober- und Untergrenzen der Parameter in Validierungsdurchlauf 2.

Parameter-/ Variablenbezeichnung	Parameter- /Variablenname	Einheit	Untergrenze	Obergrenze
Länge der Viscose Galaxy- und der Biko-Fasern	Faserlaenge	[mm]	3→ <u>6,4</u>	12→ <u>10,9</u>
Anteil an Biko-Fasern	Anteil_Biko	[%]	10	20 → <u>15</u>
Abzugsgeschwindigkeit/ Formierbandgeschwindigkeit	V_ab	[m/min]	2 → <u>3</u>	4

Gerade die Werte der Faserlänge werden sich in der Praxis so nicht umsetzen lassen. Es wird möglichst auf schon vorhandene bzw. machbare Faserlängen zurückgegriffen. Dementsprechend werden folgende praktische Ober- und Untergrenzen in Validierungsdurchlauf 2 verwendet:

Tabelle 32: Praktische Ober- und Untergrenzen der Parameter in Validierungsdurchlauf 2.

Parameter-/ Variablenbezeichnung	Parameter- /Variablenname	Einheit	Untergrenze	Mittlerer Wert	Obergrenze
Länge der Viscose Galaxy- und der Biko-Fasern	Faserlaenge	[mm]	7,5	9	12
Anteil an Biko-Fasern	Anteil_Biko	[%]	10	12,5	15
Abzugsgeschwindigkeit/ Formierbandgeschwindigkeit	V_ab	[m/min]	3	3,5	4

Ergänzend zu den Musterungen des 1. Validierungsdurchlaufs werden nun folgende weitere Musterungen durchgeführt:

Tabelle 33: Validierungsdurchlauf 2 durch „Optimale Parameter für eine Produktrealisierung finden“: neue Punkte im Parameterraum mit Zielfunktionswerten.

Durchgang	Muster	Faserlänge	Anteil_Biko	V_ab	Dicke	Flächenmasse	Dichte	Steighöhe	Anforderungen erfüllt?	Zielfunktionswert Z(...)
2	28	7,5	10	3						
2	29	7,5	10	3,5	3,69	165,85	44,96	39,1	ja	0,235
2	30	7,5	10	4						
2	31	7,5	12,5	3	4,07	169,23	41,56	33,7	ja	0,199
2	32	7,5	12,5	3,5	3,72	165,85	44,56	37,4	ja	0,225
2	33	7,5	12,5	4	3,46	177,83	51,42	45,4	ja	0,256
2	34	7,5	15	3						
2	35	7,5	15	3,5	3,78	165,85	43,84	35,2	ja	0,212
2	36	7,5	15	4						
2	37	9	10	3	3,95	157,15	39,83	32,9	ja	0,209
2	38	9	10	3,5	3,65	154,44	42,25	35,8	ja	0,232
2	39	9	10	4	3,44	158,30	46,07	40,4	ja	0,255
2	40	9	12,5	3	3,98	157,15	39,50	31,1	ja	0,198
2	41	9	12,5	3,5	3,68	154,44	41,91	34,1	ja	0,221
2	42	9	12,5	4	3,46	158,30	45,70	38,7	ja	0,245
2	43	9	15	3	4,04	157,15	38,91	29,0	ja	0,184
2	44	9	15	3,5	3,74	154,44	41,29	32,0	ja	0,207
2	45	9	15	4	3,51	158,30	45,04	36,7	ja	0,232
2	46	12	10	3						
2	47	12	10	3,5	3,85	188,08	48,90	43,6	ja	0,232
2	48	12	10	4						
2	49	12	12,5	3	4,09	221,72	54,17	48,6	ja	0,219
2	50	12	12,5	3,5	3,87	188,08	48,59	42,1	ja	0,224
2	51	12	12,5	4	3,70	143,46	38,74	30,1	ja	0,210
2	52	12	15	3						
2	53	12	15	3,5	3,92	188,08	48,02	40,3	ja	0,214
2	54	12	15	4						

Die ~~rot durchgestrichenen~~ Muster haben schon im 1. Validierungsdurchlauf charakterisierte Parameterkombinationen. Auf eine erneute Charakterisierung von diesen Werten wird hier verzichtet, in der Praxis könnte dies aber zur Ergebnisabsicherung durchaus erfolgen.

Mit den Musterungen aus dem 1. und 2. Durchgang wurde so folgendes, durch mehr Vorgabe-Punkte verbesserte Regressionsmodell gefunden:

Tabelle 34: Regressionsmodell für die Zielfunktion aus Validierungsdurchlauf 2.

Solution	Zielfunktionswert = $0,072549245499528 * \exp(1,1353438773442e-6 * \text{Faserlaenge} * \text{Anteil_Biko})$ $+ 0,002712227931444802 * \text{Faserlaenge} * V_{ab}^2 * \exp(1,1353438773442e-6 * \text{Faserlaenge} * \text{Anteil_Biko})$ $+ 0,000673939402156013 * V_{ab} * \text{Faserlaenge}^2 * \exp(1,1353438773442e-6 * \text{Faserlaenge} * \text{Anteil_Biko})$ $- 1,1353438773442e-6 * \text{Faserlaenge} * \text{Anteil_Biko}^3$ $- 0,000321098189113028 * \text{Faserlaenge}^2 * V_{ab}^2$
"R² Goodness of Fit"	0,91596332
"Correlation Coefficient"	0,95731184
"Maximum Error"	0,047643742
"Mean Squared Error"	0,0002218913
"Mean Absolute Error"	0,0095952512
Coefficients	8
Complexity	67

So ergibt sich für die ermittelte Zielfunktion des 2. Durchgangs ein Maximum von $Z = 0,2555$ bei folgenden Werten:

$$\text{Faserlaenge} = 8,657$$

$$\text{Anteil_Biko} = 10$$

$$V_{ab} = 4$$

Die beste – gemusterte Parameterkombination ist damit Muster 39 mit einem Zielfunktionswert von $Z = 0,255$, einer Flächenmasse von $158,3 \text{ [g/m}^2\text{]}$ und einer max. Steighöhe von $40,4 \text{ [mm]}$. Es ist ersichtlich, dass diese Parameterkombination einen Kompromiss aus Funktionalität und Wirtschaftlichkeit darstellt.

Sollte nun in einem anderen Entwicklungsprojekt eine andere Zielfunktion für dieselbe Produktionslinie definiert werden, können die schon durchgeführten Musterungen wieder verwendet werden. Dieser selbstlernende Effekt senkt dann den Musterungsaufwand erheblich.

Validierungsergebnisse

Der oben aufgeführte Validierungsdurchlauf wurde verschiedenen Unternehmen vorgestellt und mit Produktentwicklern diskutiert. Die folgenden – zusammengeführten – Punkte geben die Meinungen der Entwickler wieder:

Verwendbarkeit der Vorgehensweise

- Der aufgezeigte Weg ist so in der Praxis prinzipiell gangbar.
- Der Hauptaufwand des Verfahrens liegt – neben den Musterungen – bei den durchzuführenden Produktcharakterisierungen. Vermiedene Musterungen bedeuten hier ein klares Sparpotenzial. Dies setzt aber auch eine entsprechende kontinuierliche und konsistente Datenpflege voraus.

Risiken, veranschlagter \longleftrightarrow tatsächlicher Entwicklungsaufwand

- Eventuell kann es Probleme mit nichtkontinuierlichen Eigenschaften geben, wie hier z.B. mit der Faserlänge. Fasern sind nur in bestimmten Längen bzw. Längenbereichen lieferbar.
- Die Faserlänge von Naturfasern kann stark streuen. Wie können aus der Streuung resultierende Unsicherheiten beschrieben werden?
- Es ist immer sinnvoll, Entwicklungsaufwand „mit Reserve“ zu veranschlagen, um termingerecht fertig zu sein. D.h. die aus der Vorgehensweise heraus möglichen Sparpotenziale sollten nicht komplett in der Aufwandskalkulation berücksichtigt werden. Sinnvoll ist eher, normal kalkulierte Entwicklungsprojekte anzusetzen.
- Es fehlt noch ein Methodenteil, der die vielen Einstellmöglichkeiten hinsichtlich ihres Einflusses priorisiert bzw. zusammenfasst. So lassen sich die zu variierenden Parameter auf ein sinnvolles Minimum beschränken.

Qualitätsaspekte

- Speziell die Abrufbarkeit früherer in Frage kommender Musterungen und deren Vortsortierung hinsichtlich der Anforderungskonformität ist eine deutliche Arbeitserleichterung.
- Wiederholversuche sind zur Ergebnisabsicherung wichtig. Beim zum Einsatz gekommenen Musterungsmodell könnte dies durch die Integration eines kleineren Zufallsanteils mit berücksichtigt werden.
- Das Produktdatenmanagement ist eine wichtige Voraussetzung für gute Entwicklungsergebnisse.

Zeit- und Kostenaspekte entsprechender Entwicklungsprojekte

- Eine deutlich bessere Datenversorgung lässt erwarten, dass Entwicklungsprojekte etwas beschleunigt werden können.

Serviceaspekte für den Kunden

- Neuartig ist, dass vertrauenswürdigen Kunden prinzipiell auch ein Regressionsmodell zur Integration in Simulationsrechnungen zugänglich gemacht werden könnte.

5.3.5 Zusammenfassende Bewertung

Die beschriebene Methode bindet die Charakterisierung der Kapillarkinetik als einen möglichen Fokus der Produktentwicklung ein. Damit ist die Methode auch auf andere Produktentwicklungsvorgänge übertragbar.

Der selbstlernende Aspekt der Methode ist dabei das konsequente digitale, gemeinsame Dokumentieren aller Musterungen und Produktrealisierungen – ob nun für ein Entwicklungsprojekt sinnvoll oder nicht und der einfache Zugriff auf diese bei späteren Musterungen.

Die zweistufige Vorgehensweise fragt zum einen nach in Frage kommenden Möglichkeiten zur Produktrealisierung; hier besteht noch Potenzial zum vergleichenden „Vorfiltern“ geeigneter Produkttypen. Zum anderen fragt die Vorgehensweise für jeden Produkttyp nach einer Gestaltung durch zu erfüllende Anforderungen, aber auch eine flexible Bewertungsfunktion.

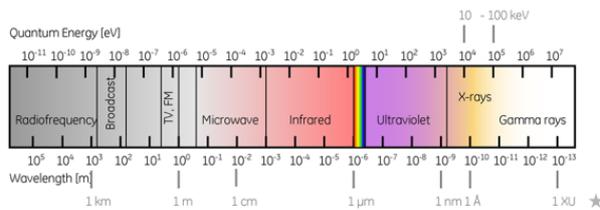
Letztlich benötigt die Methodik ein funktionierendes digitalisiertes Produktdatenmanagement im Unternehmen als Grundlage – erst dann können ihre Potenziale voll genutzt werden.

5.4 Der kapillare Flüssigkeitseinzug im Computertomographen – Erkenntnisse und Potentiale

Nach einer Einführung in die computertomographische Abbildung textiler Fasergebilde erläutert dieser Berichtsteil computertomographische Untersuchungsergebnisse zum kapillaren Flüssigkeitseinzug in verschiedene Arten textiler Fasergebilde. Die durchgeführten Untersuchungen teilen sich in drei Untergruppen auf: 1) Tampons trocken und flüssigkeitsbeladen, 2) 2D-Dochtanalyse bei der Flüssigkeitsaufnahme (dynamisch), 3) 3D-Dochtanalyse (statisch). Es wurden Tampons trocken und mit Flüssigkeit beladen 3-dimensional tomographiert. Die Tampons sind aus Viskose und saugen sich sehr schnell mit Wasser voll und quellen dabei stark auf. Baumwolldochte und Dochte aus nichtquellenden Fasern (PES; Glas) wurden für die Untersuchungen von aufsteigenden Wassersäulen eingesetzt. Ein Teil der Dochte wurde dann auch noch trocken bzw. mit Flüssigkeit beladen 3-dimensional tomographiert.

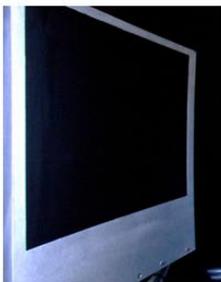
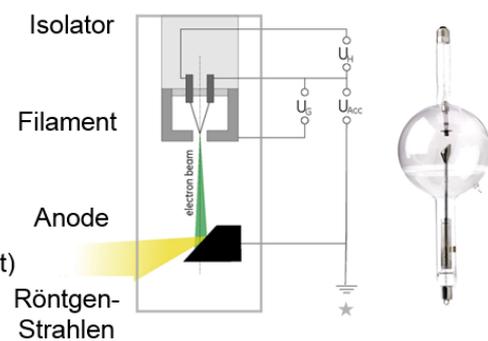
5.4.1 Einführung in die computertomographische Abbildung textiler Fasergebilde

Bei der Computertomographie werden Materialien mit einer speziellen Röntgentechnik durchleuchtet.

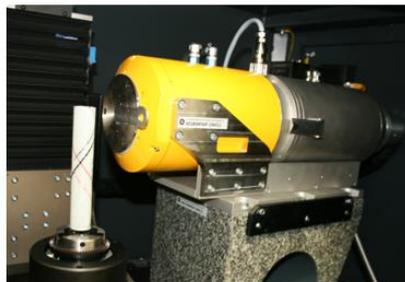


- Röntgenstrahlen sind elektromagnetische Wellen (vgl. Licht)
Wellenlänge liegt zwischen 0,001 bis 1 nm

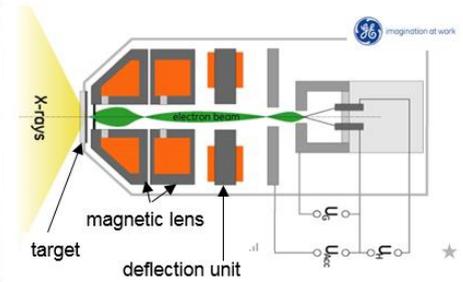
★ Fundamentals of X-ray Inspection / Dr. H. Roth
2009-04-15



Hochdynamischer Detektor



„nanofocus“ Röhre mit Probe

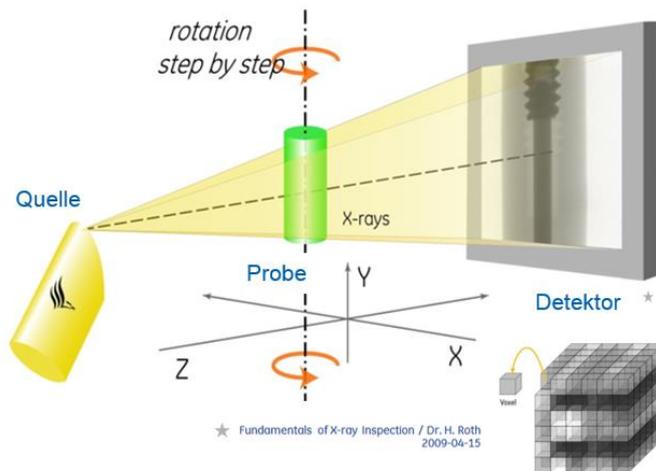


X-ray Röhre „nanofocus“

Abbildung 76: Allgemeines Funktionsprinzip der Röntgentechnik und des am ITV betriebenen Computertomographen „nanotom m“.

Die 2D-Röntgenbilder werden von einem digitalen Sensor erfasst, abgespeichert und weiter verarbeitet. Um die Probe dreidimensional rekonstruieren zu können, wird die Probe schrittweise um 360 Grad gedreht und zu jeder Position ein 2D-Röntgenbild erzeugt (s. Abbildung 77). Mit dem 7,4MP großen Detektors des Computertomographen „nanotom m“ führt ein

hochauflösender CT-Scan mit 4.000 Tiff-Bildern zu je 14,3 MB pro 360° Drehung zu Bilddaten von **57 GB**. Das aus diesen 2D-Bildern mittels spezieller Rekonstruktionssoftware berechnete 3D-Volumenmodell besitzt eine ähnliche Datengröße, die vor Analysesoftware verarbeitet, berechnet und dargestellt werden muss.



CT-Gesamtscan:

- Probe wird um 360° gedreht
- Drehgrad pro CT-Bild: $360^\circ/\text{Bildanzahl } n$

CT-Gesamtscandauer:

abhängig von den Aufnahmeparametern:

- Bildanzahl (abhg. Detektorausnützung)
- Belichtungsdauer (abhg. Probe)
- Mittelwertbildanzahl (abhg. Qualität)
- Skipwert Bilder (abhg. Qualität)

Generierung und Analyse von 3D-CT Modellen:

- speziellen Rekonstruktions-Software verrechnet alle Einzelbilder (0-360°) zum 3D-Voxelmodell.
- 3D-Voxelmodell wird mit der marktführenden Voxel-Analyse-Software VGStudioMax (Fa. Volume Graphics) visualisiert und mit umfangreichen Analysemethoden ausgewertet.

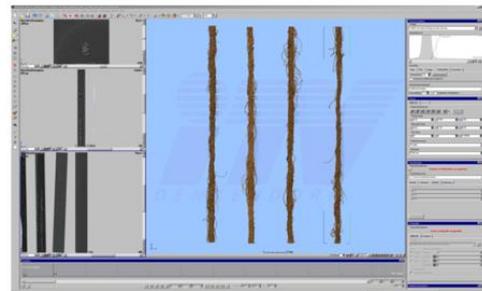


Abbildung 77: Funktionsprinzip der 3D-Röntgenanalyse.

5.4.1.1 Der Computertomograph am ITV

Am ITV steht der μ -Computertomograph **nanotom m** Phoenix | X-Ray der Fa. GE Sensing & Inspection Technologies GmbH für hochauflösende CT-Analysen zur Verfügung. Herausragende Eigenschaften dieses Computertomographen sind insbesondere der temperaturstabilisierte 7 Megapixel große Detektor mit höchster Grauwertdynamik und -auflösung, sehr gutem Signal-/Rausch-Verhältnis sowie die neu entwickelte und ebenfalls temperaturstabilisierte nanofocus Röntgenröhre. Als Untersuchungsobjekte eignen sich Bauteile aus Werkstoffen jeglicher Art, wobei die besondere Stärke des CTs bei der hochauflösenden Analyse textiler Werkstoffe, Kunststoffen und Faserverbundbauteilen liegt. Durch seine hohe Leistungsfähigkeit erzielt das System eine überragende 3D- und Kontrastauflösung für zahlreiche Anwendungen und gewährleistet CT-Ergebnisse in bester Qualität, die mit anderen CTs nur schwer erreichbar sind:

- 180kV/15W nanofocus-Röntgenröhre mit **interner Röhrenkühlung**
- Temperaturstabilisierter digitaler Detektor:
- DXR-Flächendetektor mit **3072 x 2400 Pixel**, Pixelgröße: **100 μm**
- Minimale Voxelgröße von 300 nm
- 14bit Detektordynamik ($2^{14} = 16384$ Grauwerte)

- Granitbasierter 5-Axen Manipulator mit luftgelagerter Präzisionsdreheinheit
- Probendimensionen **250 mm x 240 mm**
- Einsatz der marktführenden Analysesoftware VGStudioMax der Fa. Volume Graphics GmbH
- Optimal geeignet für textil- und kunststoffbasierte Werkstoffe



Abbildung 78: μ -Computertomograph nanotom m Phönix | X-Ray der Fa. GE am ITV, Bereich Simulation.

5.4.1.2 Zur Auflösung einer CT-Aufnahme

Der Abstand zwischen Röntgenröhre und Probe und zwischen Probe und Detektor definiert den optischen Vergrößerungsfaktor. Aus dem Vergrößerungsfaktor und der Pixelgröße des Detektors ergibt sich das Probenvolumen, das auf einen Pixel abgebildet wird und daraus die Auflösung der Aufnahme.

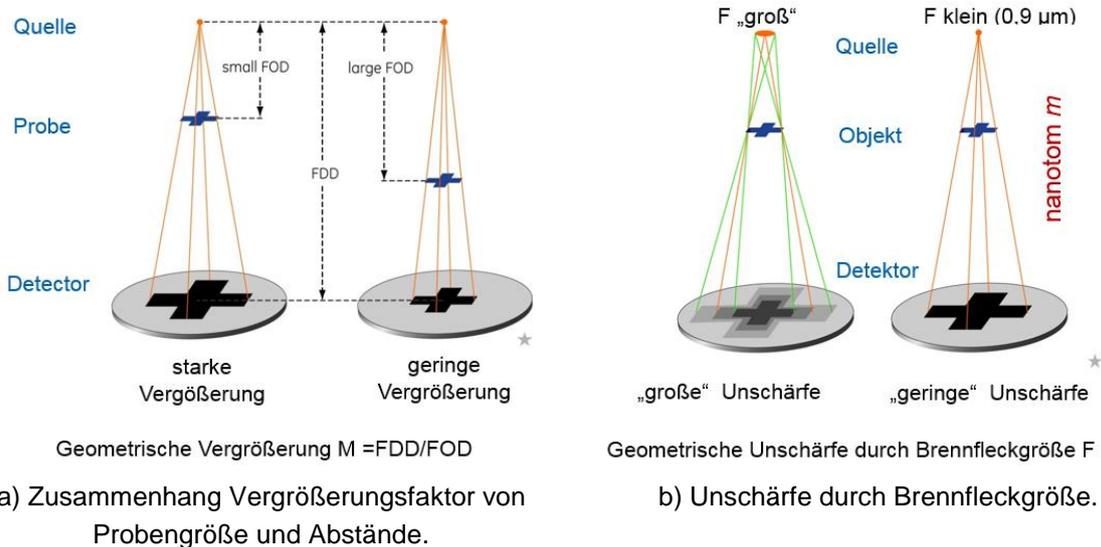


Abbildung 79: Auflösung und Unschärfe bei computertomographischen Abbildungen.

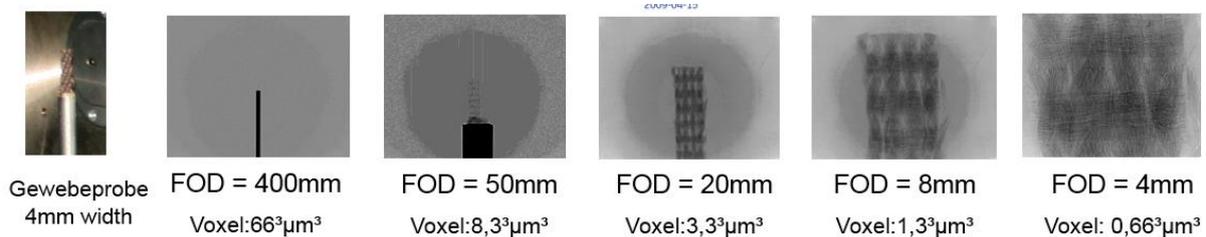


Abbildung 80: Beispiele der Auflösung eines Gewebeausschnitts bei Variation von Abstand Röntgenaustrittsquelle/Probe.

Die höchste Auflösung ergibt sich, wenn der Detektor 600mm (größtmöglicher Abstand beim nanotom m) von der Lichtquelle entfernt ist und die Probe gleichzeitig die Röntgenröhre nahezu berührt. Proben mit geringer radialer Ausdehnung (z.B. einzelne Fasern, Garne oder schmale Dochte) können so nah an die Röntgenaustrittsquelle (Wolframtarget) gebracht werden, dass weniger als $2\mu\text{m}$ der Probe auf einen Detektorpixel abgebildet wird. Bei dieser geringen Auflösung wird die Brennfleckgröße relevant. Durch eine stärkere Fokussierung des Elektronenstrahls, der durch Abbremsen im sogenannten Target die Röntgenstrahlung erzeugt, können die Unschärfefeffekte reduziert werden. Dabei wird das Wolframtarget jedoch sehr viel stärker thermisch belastet. Obwohl ein mit Diamantstrukturen versehenes Targetmaterial verwendet mit sehr guter Wärmeleitung verwendet und die Röntgenröhre durch einen Wasserkreislauf gekühlt wird, muss die Leistung (Beschleunigungsspannung und Röhrenstrom) bei minimaler Brennfleckgröße stark reduziert werden und hat eine Ver-

schiebung des Röntgenspektrums und wesentlich geringere Lichtausbeute zur Folge. Um ein gutes, kontrastreiches Röntgenbild zu erhalten, muss dann die „Belichtungszeit“ pro Bild deutlich heraufgesetzt werden, was schnell zu einer Vervielfachung der CT-Gesamtanalysendauer führt.

5.4.1.3 Fixierung textiler Proben im Computertomographen

Während eines 3D-Scans wird die Probe um eine Achse gedreht. Geringste Bewegungen der Probe während des CT-Scans führen zur Unschärfe, was bei der Probenvorbereitung berücksichtigt werden muss. Die Proben wurden daher durch eine steife Halterung gestützt oder leicht gestreckt bzw. leicht auf Zug belastet. Bei sehr feinen abstehenden Fasern muss dafür gesorgt werden, dass sie sich durch Luftbewegungen z.B. durch die Probenraumtemperierung nicht bewegen. Bei den Dochtproben wurde das erreicht, indem die Probe in ein abgeschlossenes Kunststoffröhrchen mit einer Verankerung am Boden und einer Ausrichtungsmöglichkeit unterhalb des Deckels gespannt wurde.

Ferner stellt sich beim Einsatz von Flüssigkeiten schnell eine gesättigte Atmosphäre und damit ein dynamisches Gleichgewicht ein und der Innenraum des CTs ist auch vor schädlichen Flüssigkeiten geschützt. Das Gleichgewicht ist wiederum wichtig, da nur Materialien dreidimensional erfasst werden können, wenn sie sich nicht weiter verändern. So konnte der Prozess der aufsteigenden Flüssigkeiten z.B. nicht dreidimensional gescannt werden. Hier wurde die schnelle Technik des 2D-Röntgens eingesetzt.

5.4.1.4 Erfassung des Flüssigkeitseinzugs im Computertomographen

Es wurden sowohl die dynamischen Prozesse des Flüssigkeitseinzuges untersucht, als auch die stationären Beladungen von Fasermaterialien mit Flüssigkeiten. Es wurden unterschiedliche Flüssigkeiten je nach Anwendungsfall ausgewählt: Wasser, Salzlösungen und Spezialflüssigkeiten mit definierten Oberflächenspannungen. Darüber hinaus wurden die trockenen Fasermaterialien dreidimensional charakterisiert und z.T. auch einzelne Garne separiert und getrennt betrachtet. Ferner wurden erste Simulationen zum Verhalten von Flüssigkeiten in Fasermaterialien durchgeführt.

5.4.2 Flüssigkeitseinzug in Tampons

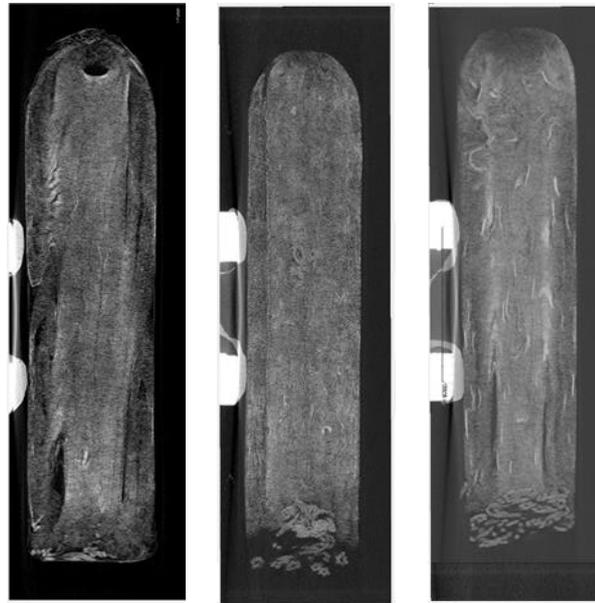
5.4.2.1 Zielsetzung

Bei den Tamponproben ging es darum, Erkenntnisse und Verständnis zur kapillaren Steigkinetik aus einem Produkt zu gewinnen, dass hinsichtlich Saug- und kapillarer Steigkinetik bereits langjährig experimentell optimiert wird. Hier gilt es die Struktur im Innern der Tampons zu analysieren, lokale Bereiche zu identifizieren und Hohlräume etc. zu erkennen. Außerdem sollte untersucht werden, in wie weit es bei der CT-Analyse möglich ist, die Einlagerung von Testflüssigkeit sichtbar zu machen.

5.4.2.2 Muster

Es wurden hierfür drei verschiedene Tampons unterschiedlicher Hersteller im trockenen Zustand untersucht. Diese waren neutral mit A, B und C gekennzeichnet worden. Die Größe

war jeweils vergleichbar (Größe: normal). Die drei Tampons sind in Abbildung 81 in einer Schnittbilddarstellung vergleichend nebeneinander gestellt. Dichte Bereiche, wie z.B. das Glasröhrchen, das als Probehälter Verwendung fand, sind weiß dargestellt, die vergleichsweise dünne Luft ist schwarz.



Probe

A

B

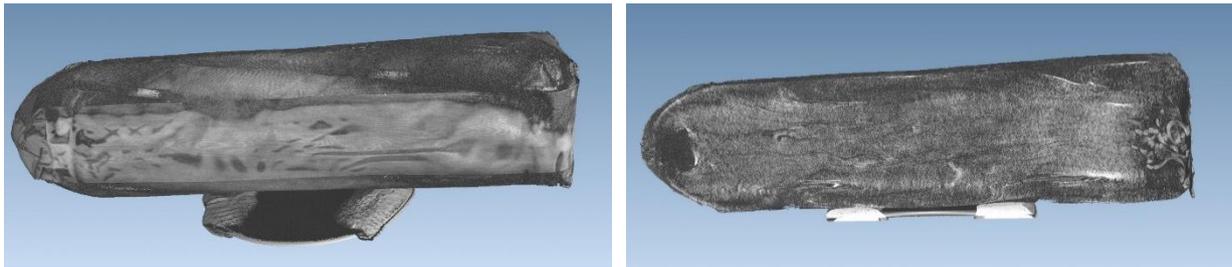
C

Abbildung 81: Längsschnittbilder der drei Tamponproben.

5.4.2.3 Versuchsdurchführung

Die Tampons sollten als Ganzes in einem Scan untersucht werden. Durch die Größe des Tampons ergibt sich mit dem nanotom m immer noch eine sehr gute Auflösung von min. $19\mu\text{m}$. D.h., die Informationen aus einem (3D-Voxel)/„Würfel“ mit der Kantenlänge von $19\mu\text{m}$ werden zu einem Dichte- bzw. Grauwert gemittelt.

In Abbildung 82 ist das Ergebnis des 3D-Scans des in Folie eingepackten Tampons dargestellt. Die umgebende Luft wurde ausgeblendet und man kann die Probe virtuell von allen Seiten virtuell durchwandern.



a) Komplettansicht.

b) Schnitt durch die Mitte.

Abbildung 82: Ergebnis des 3D-CT Scans des in Folie eingepackten Tampons (Probe A).

Um eine höhere Detailgenauigkeit zu erhalten wurde die Tamponspitze (Probe A) hoch aufgelöst gescannt (Abbildung 83 und Abbildung 84). Hier beträgt die Auflösung $3,3\mu\text{m}$, die Struktur ist deutlich klarer zu erkennen und einzelne Fasern können unterschieden werden. Allerdings ist der abbildbare Ausschnitt mit ca. 8mm relativ klein (ca. $1/7$ der Tamponlänge). Prinzipiell können aus 7-8 hochaufgelöste Einzelscans, die dann später zusammengesetzt werden, die gesamte Probe in dieser Detailgenauigkeit verfügbar und analysierbar gemacht werden.

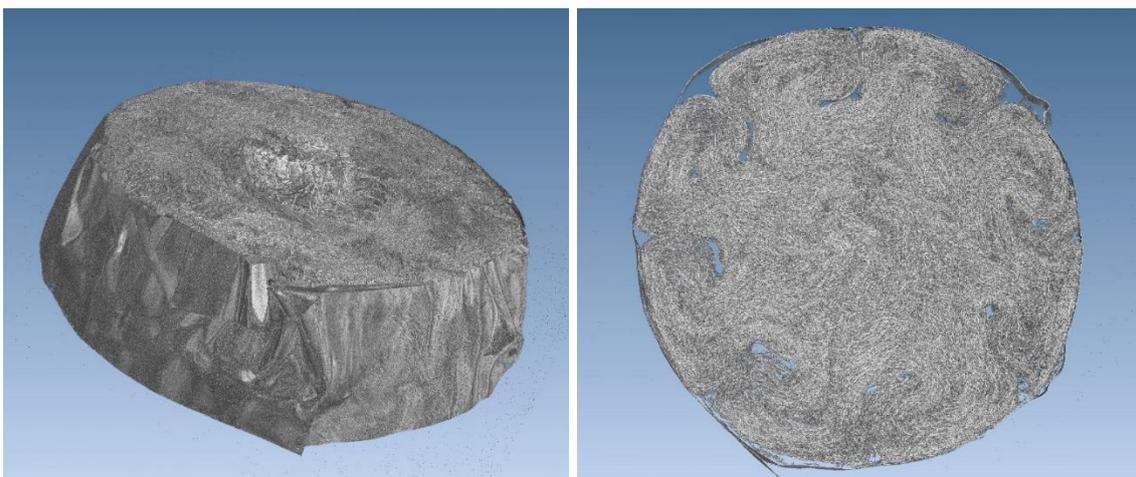


Abbildung 83: 3D-Ansicht des Detailscans der trockenen Tamponspitze (Probe A).

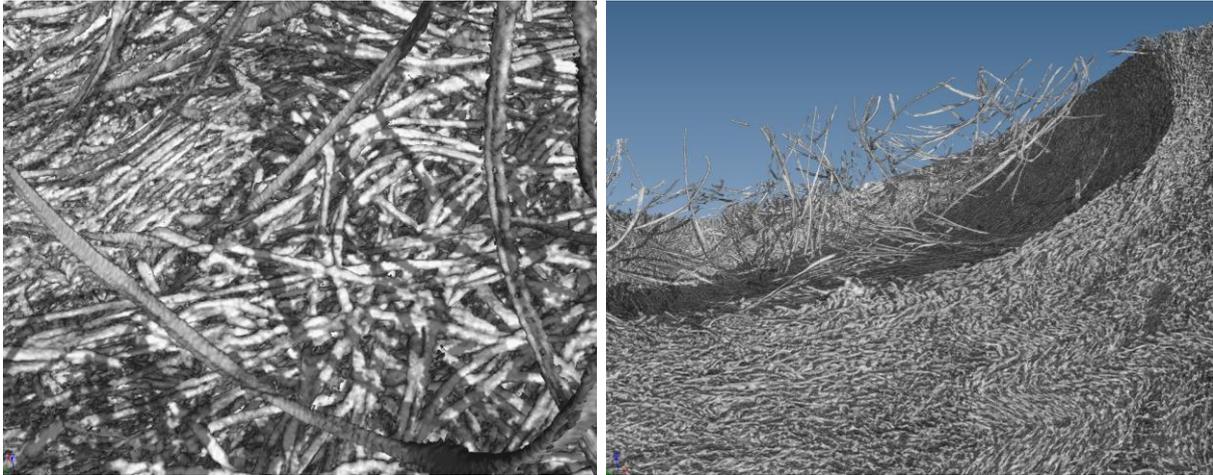


Abbildung 84: Detailscan der einzelnen Fasern in der trockenen Tamponspitze (Probe A).

Wie bei realen Versuchen zur Saugfähigkeit wurde eine 20%ige Kochsalzlösung (gängiger Blutersatz) zur Analyse des gequollenen Tampons eingesetzt. Es wurden 10ml Kochsalzlösung auf den Tampon getropft, die nach wenigen Sekunden vollständig aufgenommen waren. Um einen stationären Zustand für den CT Scan zu gewährleisten, wurde die komplette Probe erst nach 1 Stunde tomographiert. Die Abbildung 85 und Abbildung 86 zeigen das CT-Ergebnis. Abbildung 86 zeigt ein 2D-Röntgenbild des Tampons im trocken und im gequollenen Zustand.

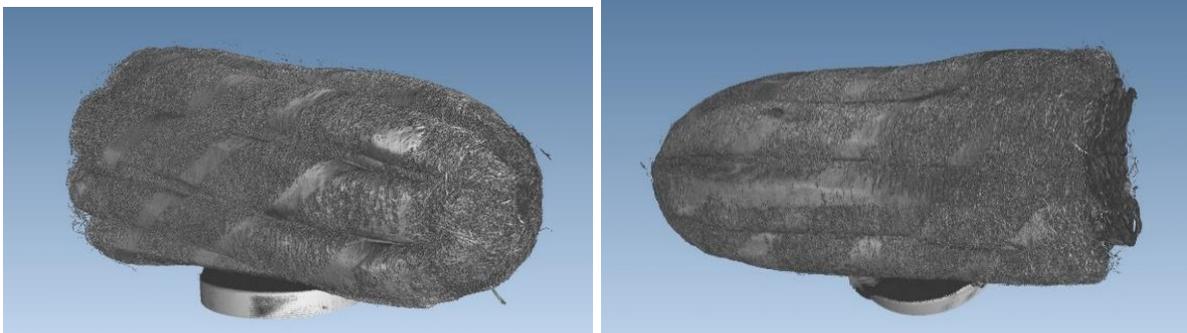


Abbildung 85: 3D-Ansicht des gequollenen Tampons (Probe A).

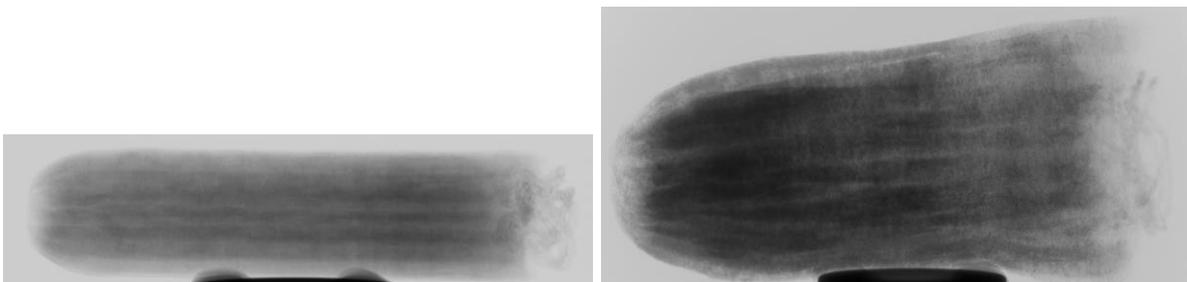


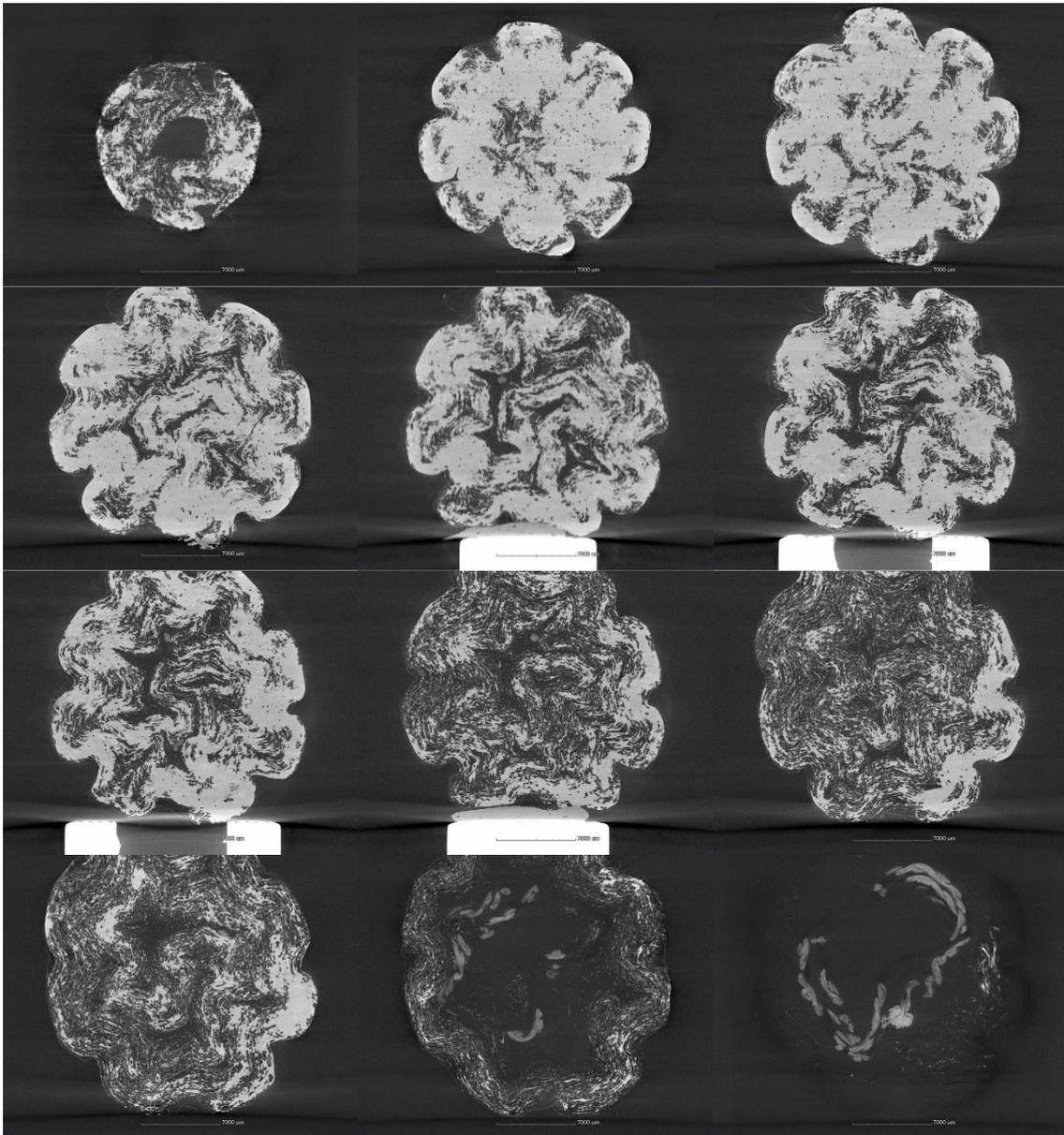
Abbildung 86: Röntgenbild ohne und mit 10ml isotonomischer Kochsalzlösung.

Wasser hat bei 20°C eine Dichte von 0,998g/cm³. Viskose ist mit 1,52g/cm³ etwas dichter. Dagegen hat Luft nur 0,0012 g/cm³. Ferner erhöht Salz die Dichte von Wasser nochmals um bis zu 20%, d.h., die aufgenommene isotonische Kochsalzlösung hat bei 20° die Dichte 1,005 g/cm³ und erschwert eine Trennung vom Viskosematerial. Ferner lagert sich die Kochsalzlösung nicht nur an den Fasern an (z.B. bei Polyesterfasern), sondern die Viskosefaser nimmt die Flüssigkeit auf und quillt dabei sehr stark auf. Damit wird der für die CT-Analyse relevante Dichteunterschied zwischen Faser und Flüssigkeit weiter verringert. Die analytische Trennung Kochsalzlösung vom Viskosematerial ist bei dieser Auflösung daher nicht möglich.

5.4.2.4 Auswertung

Es wurden verschiedene virtuelle Schnitte durch das Material gelegt, wobei die Dichte des Materials durch den Grauwert des Bildes erkennbar ist. Luft mit geringer Dichte wird schwarz, Wasser (Kochsalzlösung) hell dargestellt. Graue Bereiche sind Bereiche mit trockenen oder feuchten Fasern, die nicht vollständig mit Flüssigkeit beladen sind. Es wurde eine geringe Menge Wasser für das Beladen des Tampons gewählt, um nicht den gesamten Faserraum zu füllen, sondern nur die Bereiche zu identifizieren, die für den Weitertransport der Flüssigkeit wichtig sind.

5.4.2.5 Ergebnisse



Links oben: Tamponspitze; rechts unten Ende des Tampons mit der Kordel.

Abbildung 87: 12 Schnitte durch den mit 10ml Salzlösung gefüllten Tampon (Probe A).

5.4.2.6 Fazit

Durch die CT-Analyse mit 19µm Auflösung (Voxelkantenlänge) der gesamten Tamponprobe sind Struktur und Dichteunterschiede sehr gut analysier- und darstellbar, einzelne Viskosefasern können in der Auflösung nicht klar bzw. nicht abgebildet werden. Um Abstände zwischen den Viskosefasern bzw. die Viskosefaserstrukturen zu erkennen, sind Detailscans mit ca. 3µm Auflösung erforderlich, wobei einzelne Fasern und deren Abstände zueinander scharf erkennbar sind. Die Untersuchungen zeigten deutlich, wie die hochauflösende CT-Technologie nutzbringend eingesetzt werden kann. Mit dem zeit- und arbeitsintensiven Detail-Segmentsscann an den ausgewählten Proben konnte dem PA die Möglichkeiten der

hochauflösenden CT-Technologie demonstriert werden und ermöglichte tiefgehende Diskussionen. Insbesondere die Generierung von Filmen erwies sich als wichtige Art der Ergebnispräsentation, da man persönlich die interessierenden Bereiche genau analysieren und daraus Rückschlüsse ziehen kann.

5.4.3 Flüssigkeitseinzug in Dochtstrukturen

5.4.3.1 Zielsetzung

Das Ziel des Projektes war es, ein tiefgehendes Verständnis über den Flüssigkeitstransport durch Kapillarkräfte zu erarbeiten. Mittels der hochauflösenden CT sollten bei Dochten zum einen die Feinstruktur und der genaue Aufbau des Dochtes visualisiert und ausgemessen werden. Zum anderen sollte untersucht werden, wie das CT nutzbringend eingesetzt werden kann, um die Prozesse der aufsteigenden Flüssigkeiten besser zu verstehen.

5.4.3.2 Muster

Vom Projektpartner waren sechs Dochte ausgewählt worden, die einerseits repräsentativ für übliche Dochtgruppen waren und andererseits auch für die mittelständische Firma von Interesse waren.

Tabelle 35: Probenbeschreibungen der untersuchten Dochte 1..6.

Bezeichnung	Material	Vorbereitung	Präparation	Stehfäden	Texturierung
Docht 1	Baumwolle	gebleicht	ja	Nein	Nein
Docht 2	Baumwolle	gebleicht	ja	Nein	Nein
Docht 3	Baumwolle	roh	nein	Ja	Nein
Docht 4	Baumwolle	roh	nein	Ja	Nein
Docht 5	Glasfaser			nein	Nein
Docht 6	Polyester			nein	Ja

5.4.3.3 Versuchsaufbau

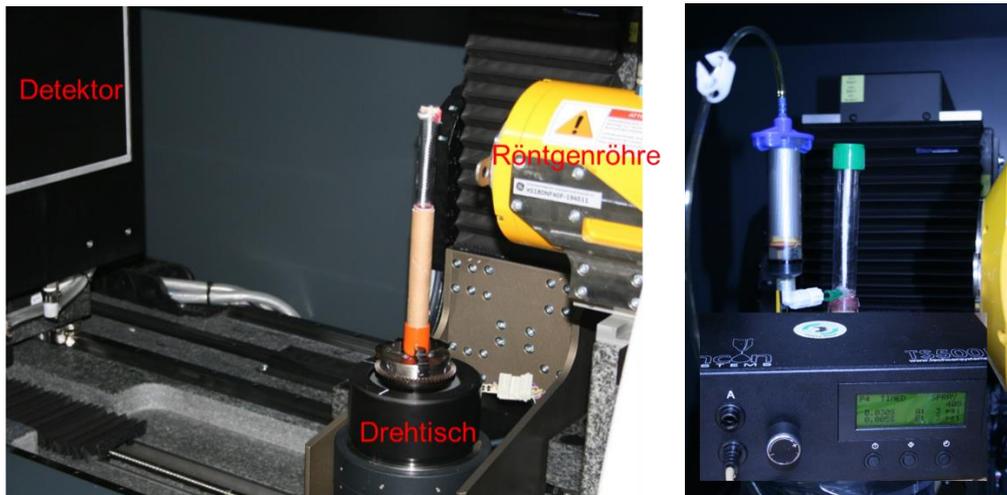


Abbildung 88: Innenraum des Computertomographen mit eingebrachter Dochtprobe und Flüssigkeitsdosiervorrichtung.

Der Versuchsaufbau in Abbildung 88 zeigt die Röntgenröhre (gelb), wobei die Röntgenstrahlungsausstrittsquelle an deren Stirnwand befindet. Links ist ein Teil des Detektors erkennbar, der die Röntgenstrahlung für einen CCD-Sensor sichtbar macht. Dazwischen wird die Probe mit dem textilen Material in einer durchsichtigen und verschließbaren Kunststoffröhre platziert. Die Probenhalterung ist so gestaltet, dass nur wenig Strahlung absorbiert wird, um einen hohen Kontrast ohne Artefakte zu bekommen. Die Probe ist unter geringer Vorspannung unverdreht eingespannt und berührt die Röhrenwand an keiner Stelle. Um den Flüssigkeitseinzug mit dem CT zu analysieren, waren zahlreiche Vorversuche erforderlich. Zu Beginn wurde ohne eine Dosiervorrichtung gearbeitet und der Probe unmittelbar vor Scanbeginn Flüssigkeit über eine Spritze zugeführt. Das manuelle Zudosieren von Wasser kann nur bei geöffneter CT-Schutzeinrichtung erfolgen. Die Schließung der Schutzvorrichtung und CT-Start dauert ca. 20 Sekunden. In diesem Zeitraum steht keine Messung zur Verfügung, wobei aber der Flüssigkeitsaufstieg bereits im Gange ist. Ferner führte das Einführen und Entfernen des dünnen Schlauches beim manuellen Dosieren zur unerwünschten Probenbewegung und -beeinflussung.

Daher wurde zur Flüssigkeitszufuhr die in Abbildung 88 rechts gezeigte Dosiervorrichtung eingesetzt, die von außen angesteuert wurde. Durch eine seitliche Bohrung wurde ein Schlauch in die abgeschlossene Kunststoffröhre mit Probe geführt. Über diesen Schlauch konnte Flüssigkeit, die in einer druckluftgesteuerte Spritze vorgehalten wurde, bei Bedarf in den Bodenbereich des Probengefäßes eindosiert werden. Das Steuergerät wurde außerhalb der CT-Abschirmung bedient und konnte über einstellbare Druckluftstöße definierte Mengen der Probe zuführen. Das Spritzensystem ist auf die Oberflächenspannung von Wasser bzw. hochviskosen Medien ausgelegt, was bei der niedrigviskosen Testflüssigkeit mit geringer Oberflächenspannung zu Problemen (Undichtigkeiten, Dosierungsungenauigkeiten) führte. Ferner mussten die sensible Teile innerhalb des CTs (z.B. Motor des Drehtisches) geschützt und der Dosierkolben senkrecht positioniert werden, damit keine Luft dringt in das Dosiersystem eindringt und unerwünschten Spritzer erzeugt. Das System wurde optimiert.

5.4.3.4 Versuchsdurchführung

Zunächst wurden Vorversuche mit Wasser durchgeführt. Aus dem 2D-Röntgenbild können verschiedene Benetzungsparameter ermittelt werden:

- Die Höhe der Wasserfront.
- Die Kontaktwinkel am Fuße des benetzten Dochtes.
- Das Absinken des Wasserspiegels des Reservoirs über die Zeit und darüber das Volumen des aufgesaugten Wassers.
- Zum Teil die Inhomogenität der Wasserfront, die die Inhomogenität der Benetzungseigenschaften der Fasern bzw. unterschiedliche Kapillarradien widerspiegelt.



Abbildung 89: Röntgenbilder von Docht 1 ohne und mit Wasser sowie Detailaufnahme von Docht 4 mit Wasser.

Es wurden auch Details der Wasserfront im Docht untersucht. Dazu musste die Probe jedoch näher zur Röntgenquelle platziert werden. Ein Beispiel zeigt die Abbildung 89c. Man erkennt, dass das Wasser in den senkrecht verlaufenden Stehfäden des Geflechtes weiter als im Rest des Geflechtes gestiegen ist. Das Kunststoffrohr mit der Probe wurde gedreht, so dass man die Fließfront aus mehreren Winkeln betrachten konnte. Anfangs wurden die Röntgenbildersequenzen per Mausklick aufgenommen und abgespeichert, was sehr aufwendig und mit zeitlichen Ungenauigkeiten verbunden war. Dies war erforderlich, da während der automatischen CT-Aufnahme die Probe immer rotiert wird. Die CT-Steuerung, die für 3D-Scans ausgelegt ist, wurde daher so modifiziert, dass Aufnahmeserien mit exaktem Zeitabständen und automatischer Speicherung möglich sind. Die mit dem CT-Scan automatisch mit festem Zeitabstand durchgeführten Tiff-Bilder können nun mittels Software zu einem Film verarbeitet werden. Mit der Software „VirtualDub“ werden die Tiff-Bilder in das JPEG-Format konvertiert. Durch die Vorgabe der „frame rate“ ist auch die korrekte Zeitinformation verfügbar. Der so generierte Bildstapel wird entsprechend der gewünschten Ausrichtung gedreht und invertiert. Dieser Bildstapel wird in die CT-Analysesoftware VGStudioMax importiert und einzeln analysiert. Die Zeit wird als z-Koordinate dargestellt.



a) Docht mit Wassersäule b) Docht mit kontrastreicher Flüssigkeit

Abbildung 90: Beispiele für 2D-Röntgendokumentationen des Flüssigkeitsaufstiegs in Dochten.

Wie Abbildung 89c und Abbildung 90a zeigen, ist die Grenze des Wassereinzugs schlecht erkennbar. Der Kontrast zwischen Wasser und Baumwolle ist nicht sehr groß, so dass mittels aufwändiger Analyse eine Einfärbung zwar möglich, jedoch die unterschiedlich schnelle Ausbreitung der Flüssigkeit in unterschiedlichen Garnen des Geflechts nicht eindeutig darstellbar war. Aus diesem Grund wurden Flüssigkeiten untersucht, die zu einem größeren Kontrast zum Fasermaterial führen. Dies hat die Vorteile, dass die Flüssigkeit besser den einzelnen Garnen zugeordnet werden kann und dann auch kann mit geringerer Auflösung röntgen kann. Damit können im CT einen größeren Steighöhenbereich analysiert werden, ohne die Probe in der Höhe verschieben zu müssen.

5.4.3.5 Auswertung und Ergebnisse

Die aufgenommenen Einzelbilder wurden entsprechend der Grauwertinformationen mit der CT Analysensoftware entsprechend der Absorption der Röntgenstrahlung eingefärbt. So konnte die Höhe der Wasserfront mit der Zeit korreliert werden. Die Nulllinie der Flüssigkeit ist im Bild leicht bestimmbar.

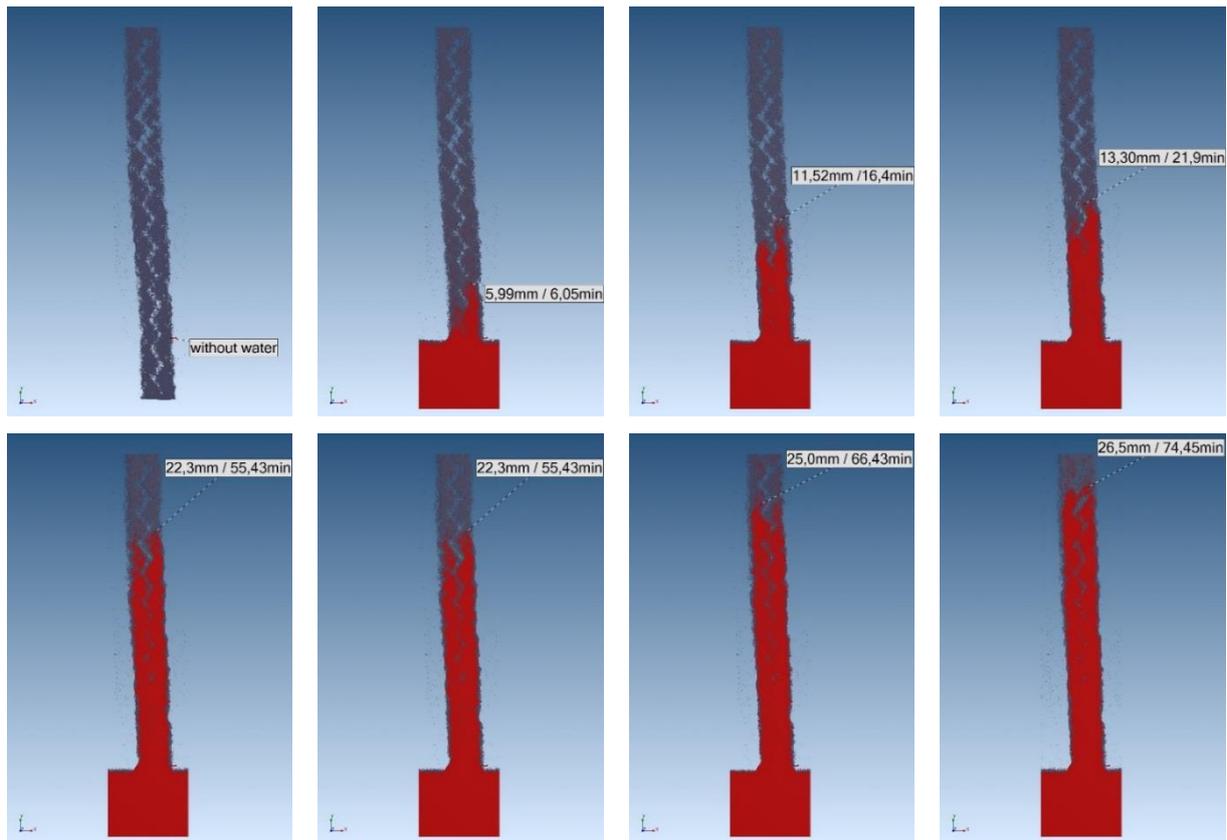
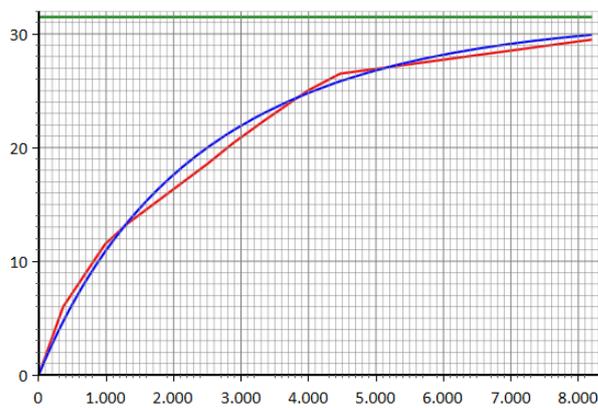


Abbildung 91: Darstellung des Wasseraufstiegs im Docht 4 durch Einzelanalyse der Grauwertbilder.



Kapillargeschwindigkeitskonstante v	0,0395 [mm/s]
Max. Steighöhe h_{max}	31,48 [mm]
Freiheitsgrade DoF	7
Rel. Schätzfehler $\Sigma r /DoF$	0,944 [mm]

Abbildung 92: Abgelesener und geschätzter zeitlicher Verlauf der Steighöhe aus Abbildung 91.

Bei den Dochten bilden sich im Bereich der Flüssigkeitsbenetzung unterschiedliche Formen und Ausprägung der Flüssigkeit aus. Beim Docht 1 in Abbildung 93a ist die Flüssigkeitsform als positive Meniskusform erkennbar, deren Ausprägung mit der Zeit zunimmt und eine stationäre Form annimmt. Beim Docht 2 hingegen stellt sich eine negative Meniskusform ein. Die Ausmessung der Meniskusform wird bislang durch die „Tensiometrie“ Messtechnik zur Bestimmung der Oberflächenspannung ausgemessen. Mit der Röntgentechnik steht nun ein alternatives bildgebendes Verfahren zur Verfügung, bei dem auch das Herunterdrücken der Flüssigkeitsoberfläche von hydrophoben Proben beobachtet werden kann (negative Meniskusform). Vorteilhaft ist ferner, dass auch die Basislinie der ungekrümmten Oberfläche im Bild klar erkennbar ist und eine exakte Vermessung ermöglicht.

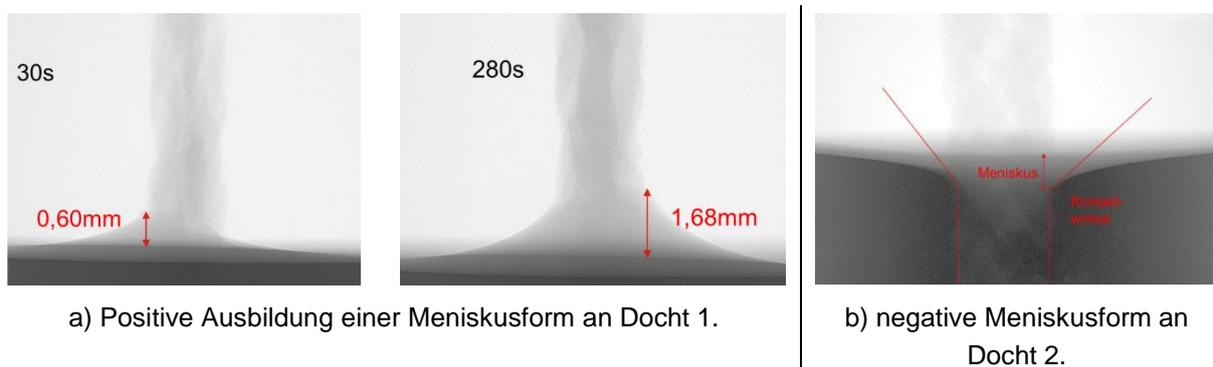


Abbildung 93: Ausbildung verschiedener Meniskusformen an den Dochten 1 und 2.

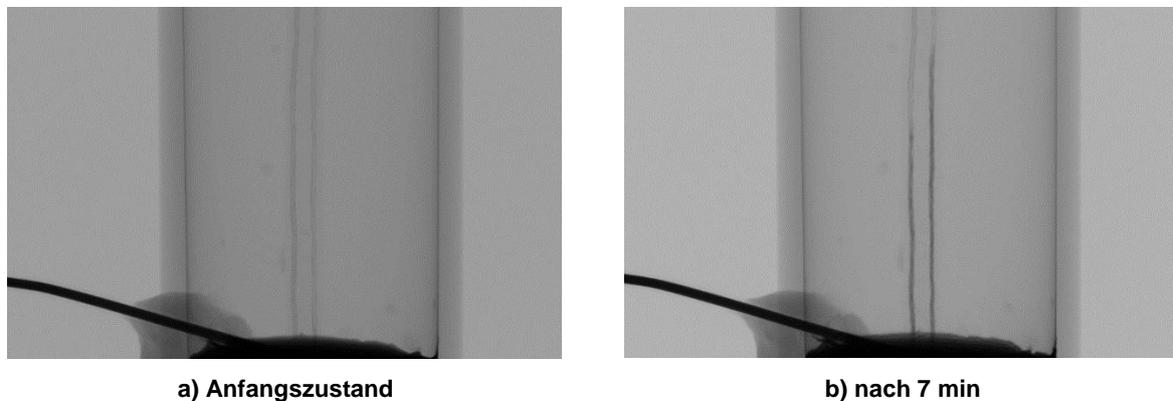
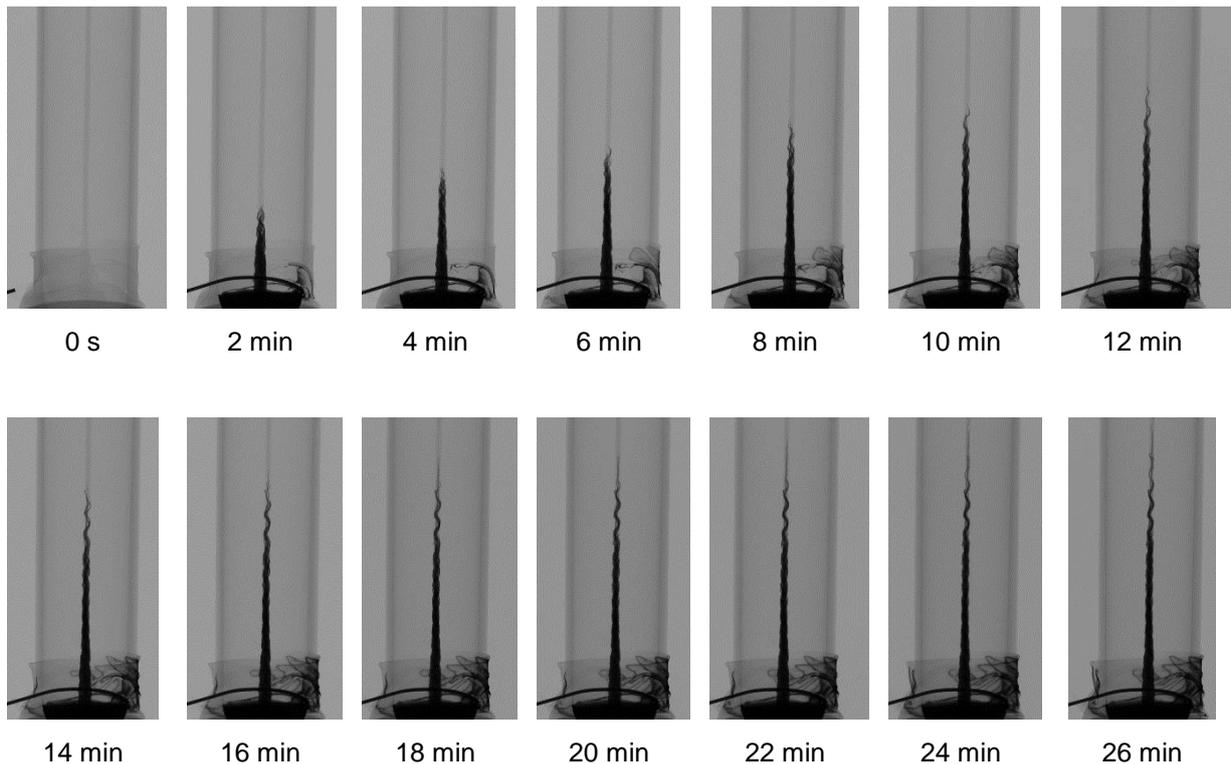


Abbildung 94: Aufsteigende Flüssigkeit in den Stehfäden von Docht 3.



Es handelt sich um eine im 3 s-Takt aufgenommene Serie von 1.000 Bildern.

Dargestellt ist jedes 40-te Bild in den ersten 26 Minuten.

Abbildung 95: 2D-Röntgenbildaufnahmeserie von Docht 2.

5.4.3.6 Fazit

Mit dem entwickelten Messaufbau für das hochauflösende CT können exakte Steighöhenbestimmungen für komplex aufgebaute Strukturen durchgeführt werden. Es konnte gezeigt werden, dass mit der am ITV verfügbaren Röntgentechnik eine sehr gewinnbringende Methode zur Aufklärung von Prozessen in Garnen und Geflechten zur Verfügung steht. Mit dem an die Aufgabenstellung angepassten Computertomographen nanotom m kann hochaufgelöst durch Dochte hindurch geschaut und die Flüssigkeiten und deren Steighöhe hervorragend beobachtet werden. Noch kontrastreicher werden die Röntgenbilder, wenn spezielle Flüssigkeiten mit hoher Dichte eingesetzt werden. Die 2D-CT-Scans zur Steighöhenbestimmung erfolgen jetzt vollautomatisch mit definiertem Zeitschritt über der gesamten Versuchsdauer und wird vollständig dokumentiert. Es konnten Steighöhenverläufe „gefilmt“ und ausgewertet werden und auch der sich ausbildende Meniskus konnte beobachtet und genau vermessen werden. Außerdem kann der globale Kontaktwinkel direkt beobachtet werden, selbst wenn dieser über 90° hat und damit die lokale Flüssigkeitsoberfläche unter dem normalen Flüssigkeitsspiegel liegt. Ferner ist das Absinken des Flüssigkeitsspiegels exakt messbar und somit die zeitliche Flüssigkeitsaufnahme. Hier sind weiterführende Arbeiten am ITV geplant.

5.4.4 3D-Modelle aus Computertomographie-Aufnahmen eines Kerzendochts

5.4.4.1 Zielsetzung

Die Dochte 4 und 6, die für den PA von besonderem Interesse waren, wurden im trockenen Zustand dreidimensional gescannt. Neben dem Aufbau waren die geometrischen Abmessungen in und zwischen den Garnen und die Ermittlung der benetzenden Länge für analytische Berechnungen zur Steigkinetik gefragt.

5.4.4.2 Versuchsdurchführung

Mit der CT-Analysesoftware VG-StudioMax der Fa. Volume Graphics GmbH (PA Mitglied) wurde die aus den 4000 2D-Röntgenbildern rekonstruierte 3D-Voxelvolumendatei analysiert. Beim Polyesterdocht (Probe 6, Abbildung 96), bei dem die Filamente durch das Benetzen mit Wasser nicht aufquellen, wurde der Umfang aller Fasern über den gesamten Dochtquerschnitt für Schnitte im 100µm Abstand ermittelt. Aus der Oberflächenbestimmung in der Schnittebene und der Schnittbildtiefe kann mit der bekannten Auflösung (hier 12,5µm) die „benetzende Länge“ berechnet werden. Hierfür wurden einzelne Schnittbilder als region of interest (ROI) definiert und die Volumeninformationen dieser ROI ausgewertet. Unter Berücksichtigung der Tiefe des ROIs konnte aus der Oberflächenberechnung die Länge der die Fasern umschließenden Linie berechnet werden. Diese in der Benetzungstheorie genannte „benetzende Länge“ ist ein Parameter zur Oberflächenenergieberechnung nach Wilhelmy und beeinflusst die Kapillarität. Hierzu waren analytische Untersuchungen geplant.

5.4.4.3 Auswertung und Ergebnisse

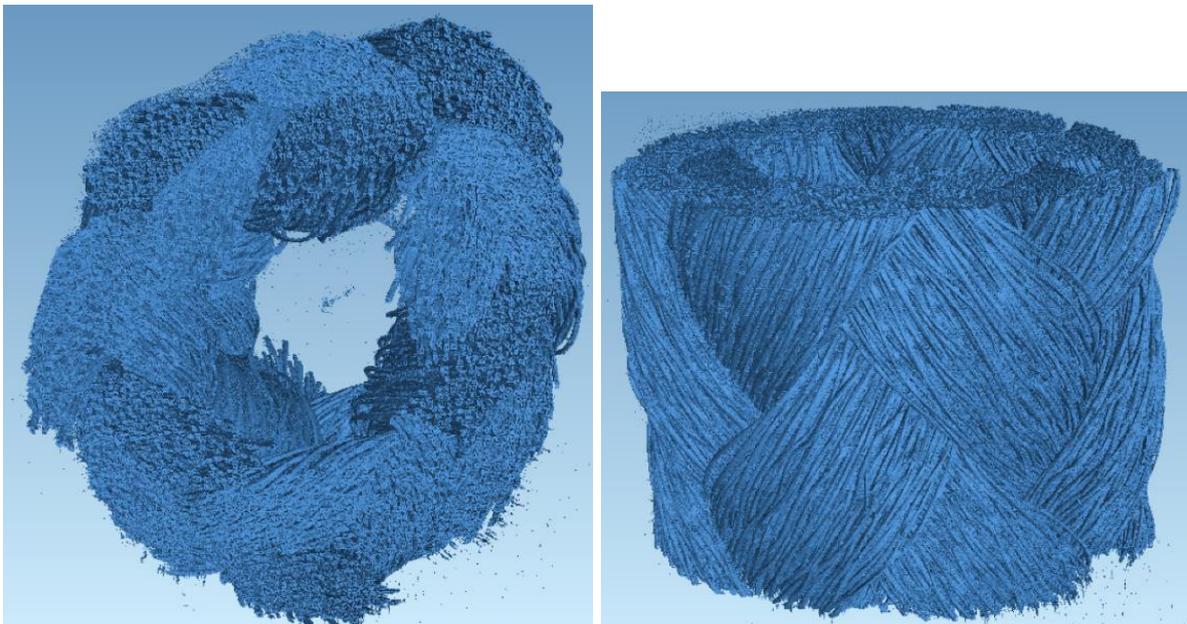


Abbildung 96: 3D-Scan-Ausschnitte eines Polyesterdochts (Probe 6).

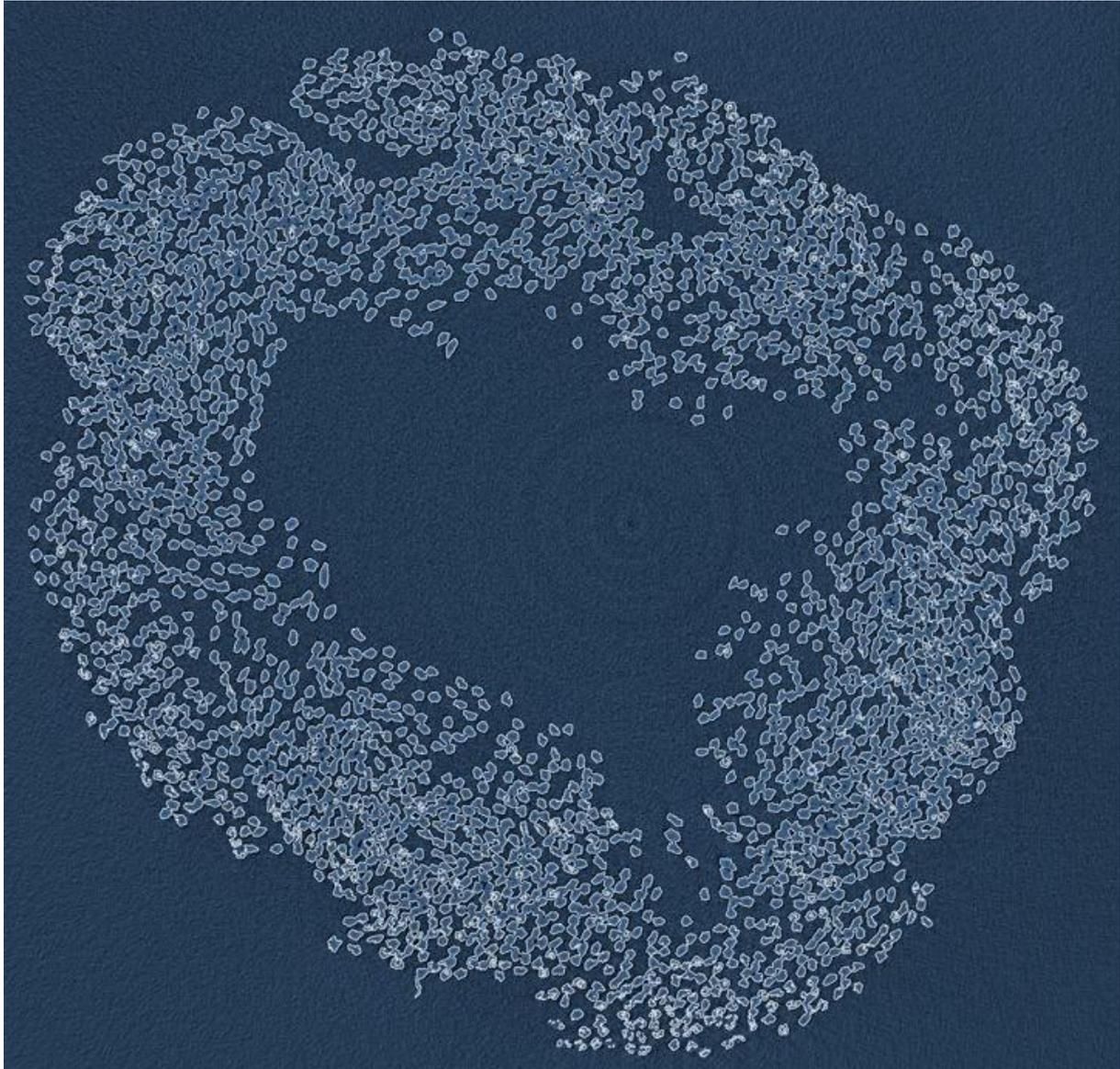
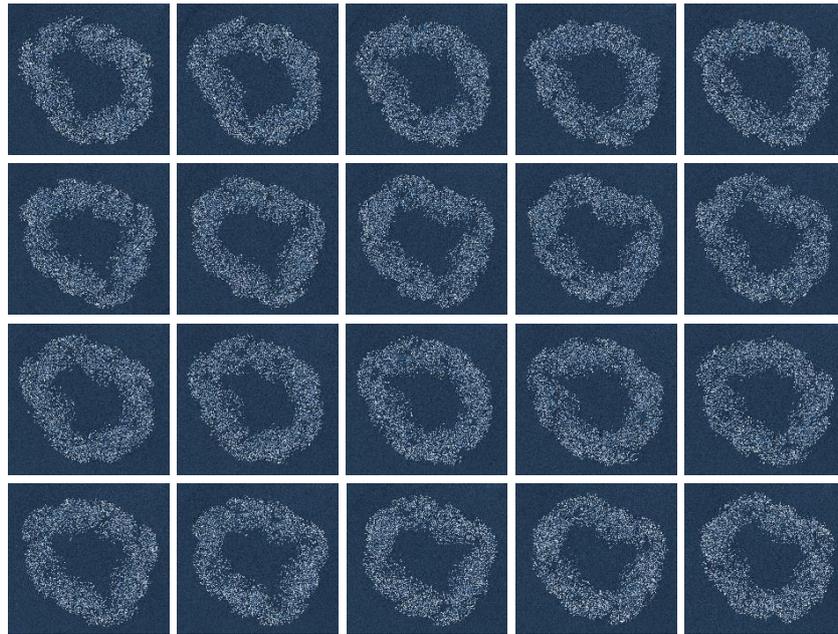
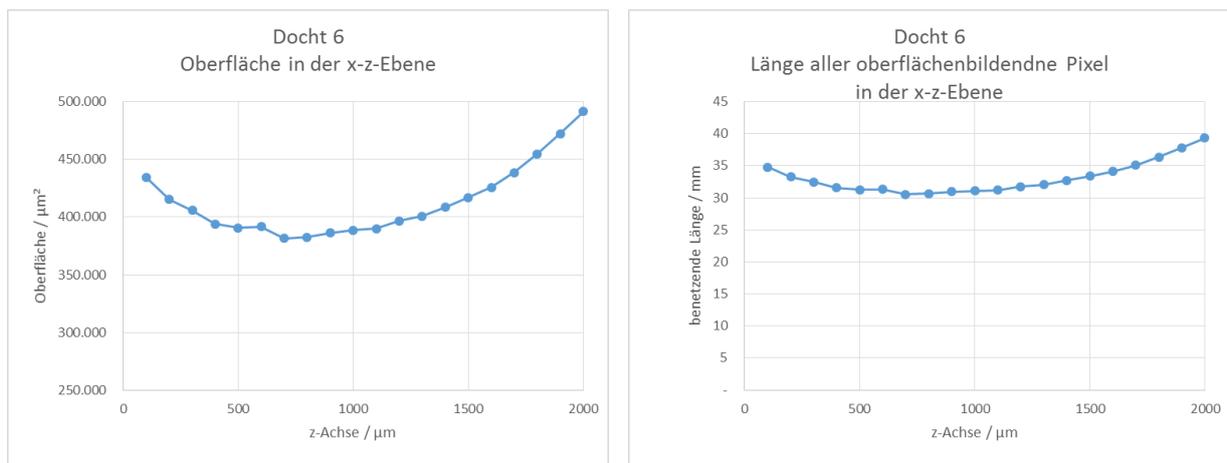


Abbildung 97: Schnittbild von Docht 6 nach Ermittlung der Faseroberfläche.



20 Schnittbilder. Die Schrittweite beträgt jeweils 100 μm über 2,00 mm Probenlänge.

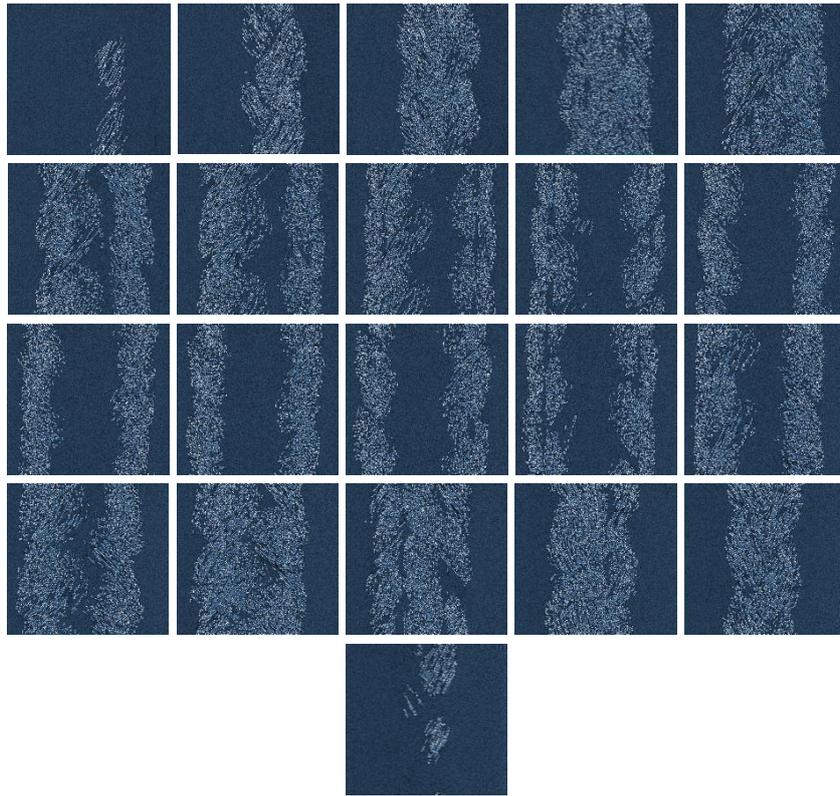
Abbildung 98: Querschnitt-Bildserie von Docht 6.



a) Detektierte Querschnittsfläche in [μm^2].

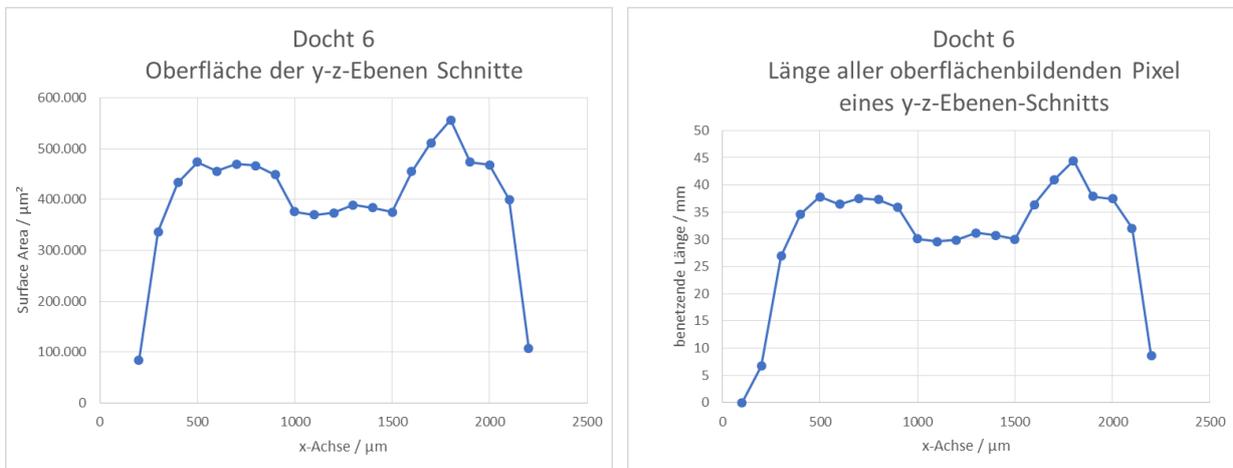
b) Detektierte benetzende Länge (Ränder der Querschnittsflächen) in [mm].

Abbildung 99: Auswertung der Querschnitt-Bildserie von Docht 6 bezüglich Querschnittsfläche und benetzender Länge.



21 Schnittbilder. Die Schrittweite beträgt jeweils 100 μm über 2,100 mm Probenlänge.

Abbildung 100: Längsschnitt-Bildserie von Docht 6.



a) Detektierte Längsschnittfläche in [μm^2].

b) Detektierte benetzende Länge (Ränder der Längsschnittflächen) in [mm].

Abbildung 101: Auswertung der Längsschnitt-Bildserie von Docht 6 bezüglich der Schnittfläche und benetzenden Länge.

Der Baumwolldocht mit den beiden Stehfäden (Docht 4) wurde ebenfalls im 3D-Scanverfahren aufgenommen und rekonstruiert. In Abbildung 102 ist das Ergebnis des Scans zu sehen. Der relativ komplizierte Aufbau ist von außen nicht erkennbar. Das Schnittbild ist in der Dichte- und als Faserorientierungsdarstellung gezeigt und man erkennt sehr

deutlich die beiden Stehfäden im Docht. Diese sind nicht gekrümmt und sind daher bei gleicher Dochthöhe wesentlich kürzer als die Flechtfäden. Im der Abbildung 102d sind die separierte Garnen des Dochtes dargestellt. Die Stehfäden sind rot und ein gelber Flechtfaden zeigt den längeren Fadenverlauf.

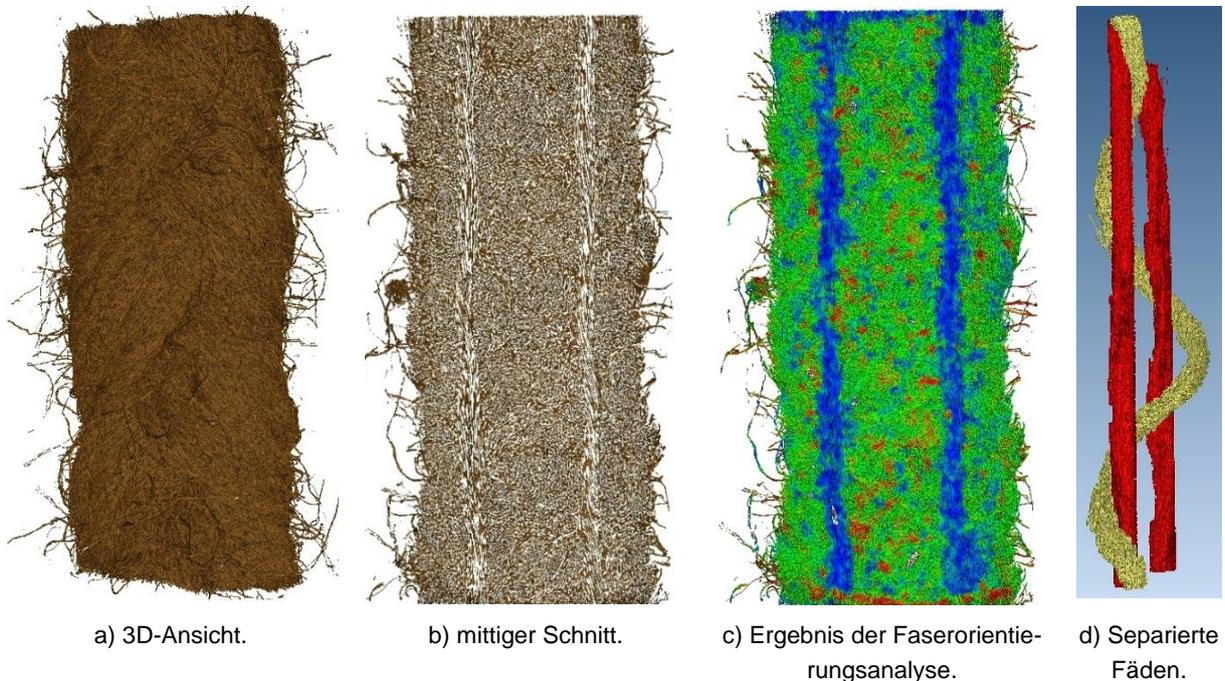
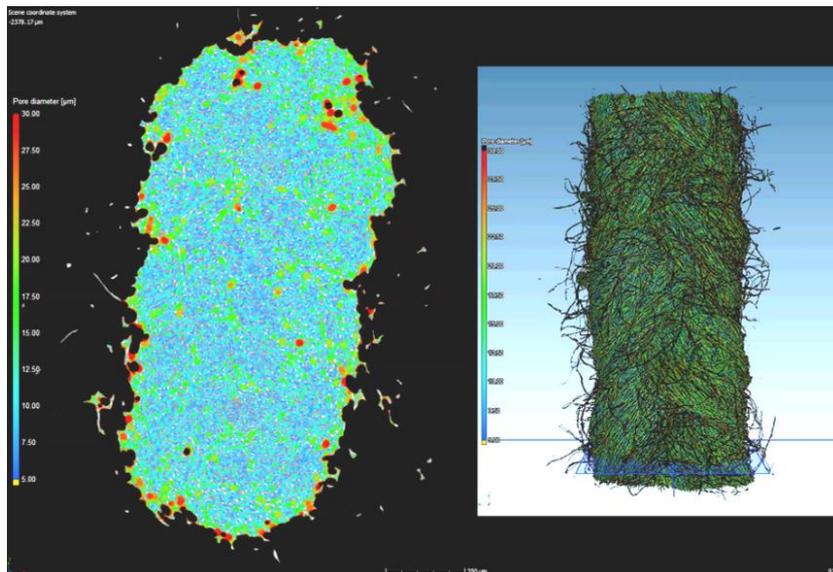
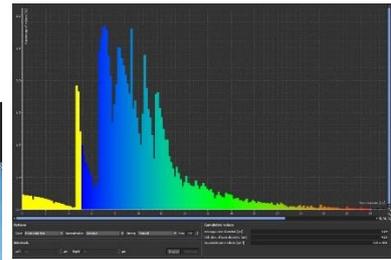


Abbildung 102: Ergebnisse des 3D-Scans von Docht 4.

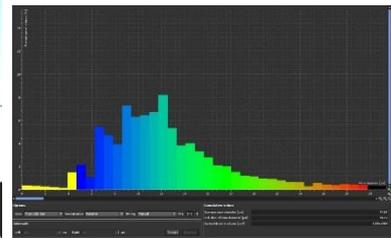
Mit dem neuen Softwaremodul der CT-Analysesoftware von Volume Graphics wurde an dieser komplexen Probe 4 die Porosität des Dochtes bestimmt. Nach der Oberflächenbestimmung werden Kugeln in die Zwischenräume eingepasst. Als Ergebnis erhält man ein Histogramm, in dem über den gesamten betrachteten Bereich die Häufigkeit der Porengrößen dargestellt ist. Die Porengrößen werden auch farblich klassifiziert dargestellt. Abbildung 103 zeigt ein Schnittbild mit einer farblichen Scala der Porengröße.



a) Farblich nach Größe codierte Porenvolumina in einer Schnittebene durch Docht.



b) Porengrößenverteilung in einem separierten Stehfaden des Dochtes (rot in Abbildung 102d dargestellt).



c) Porengrößenverteilung in einem separierten Flechtfaden des Dochtes (gelb in Abbildung 102d dargestellt).

Abbildung 103: Beispiele für Porenverteilungsanalysen im 3D-Modell von Docht 4.

Der mit Kontrastmittel befüllte Docht wurde in einem 50-minütigen Scan 3-dimensional erfasst. Dabei stieg die Flüssigkeitsfront noch an, was im oberen Proben teil durch die filigranen Strukturen und im CT-Analyseprogramm durch Sollwertverschiebungen erkennbar ist.

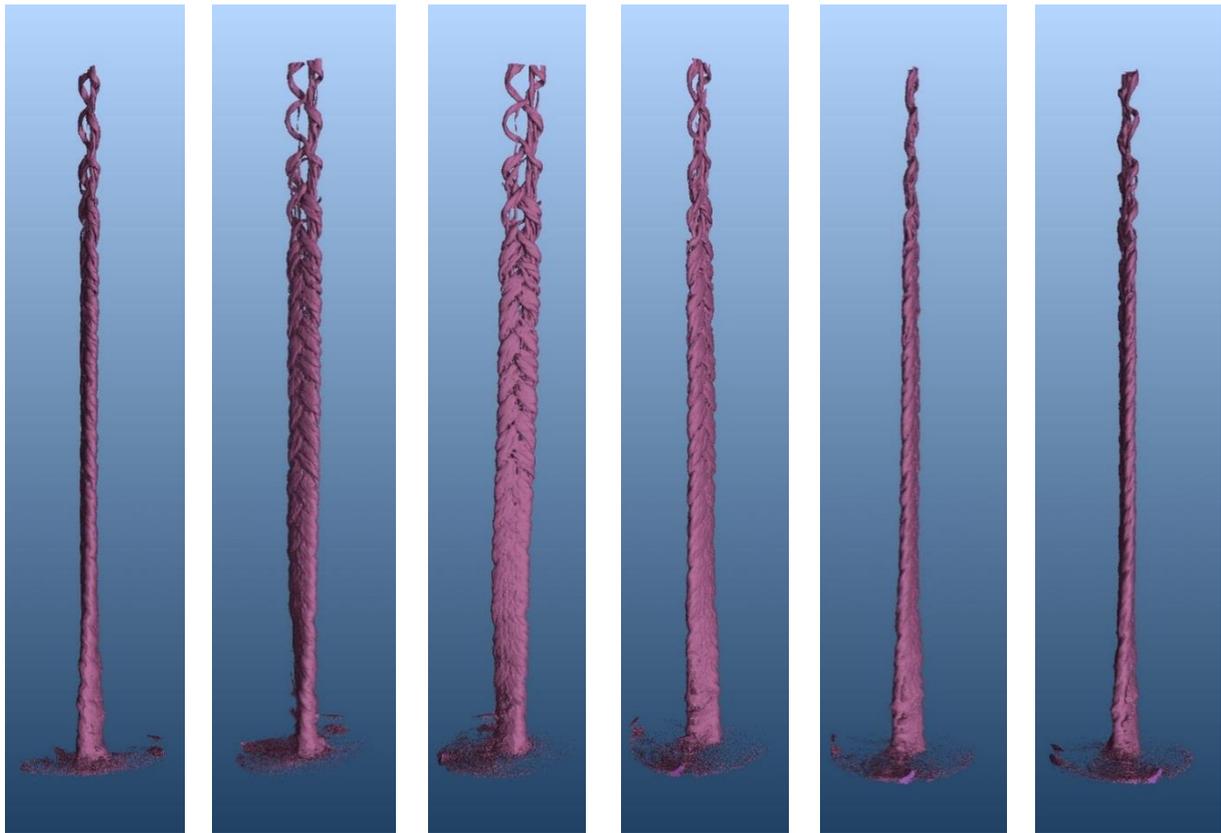
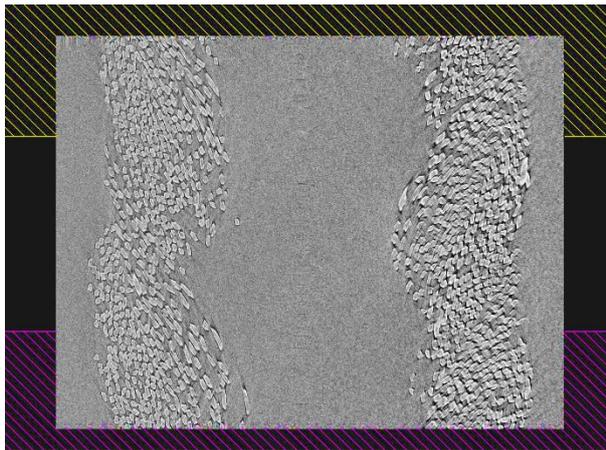
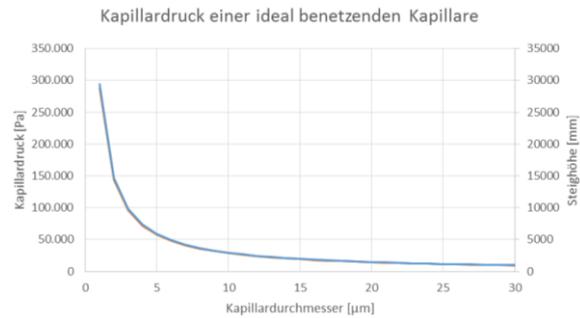


Abbildung 104: Verschiedene Ansichten der Flüssigkeitssäule im 3D-Modell des Dochtes bei ausgeblendetem Fasermaterial.

Ein neues Softwaremodul der CT-Analysensoftware, das speziell für Geologieanwendungen entwickelt wurde, wurde auf den Docht angewandt und getestet, ob dessen Funktionalitäten auch diese faserbasierte Materialien einsetzbar sind. Bei Geologen ist von Interesse, wie sich ein poröser Stein oder Sand verhält, wenn Flüssigkeiten z.B. Wasser hineingedrückt wird. Dabei ist von Interesse, ab welchem Druck das ursprünglich enthaltene Öl verdrängt und damit freigesetzt wird und ob dabei Ölvolumina eingeschlossen bleiben. Aus der Bestimmung der Porosität der Materialien und der Verteilung der Porenradien in der jeweiligen Strömungsebene kann das Programm errechnen, welcher Kapillardruck herrscht. Der geringste Druck entsteht an den größten Poren. Das Programm sucht den Weg mit dem geringsten Widerstand zwischen den vom Benutzer definierten Ebenen (Abbildung 105, pink und gelb schraffiert). In den Scans von Dochten gibt es in der Regel Außenbereiche, die mit Luft gefüllt sind. Da der PES-Docht eine Schlauchkonstruktion ist, ist hier auch in der Seele hauptsächlich Luft vorhanden. Dies kann das Programm jedoch (noch) nicht berücksichtigen. Hier wäre der errechnete Kapillardruck minimal, da weite Bereiche keinen Widerstand darstellen.



a) Im CT-Analysesoftware definierten Ebenen innerhalb des PES-Dochtes.



b) Theoretische Umrechnung des Kapillardrucks in eine Steighöhe.

Abbildung 105: Berechnung des Kapillardrucks mittels hochauflösendem 3D- CT-Scan und dem neuen Softwaremodul „capillary pressure“ zu VGStudioMax.

Daher wurde am Stehfaden des Baumwolldochtes die Kapillardrucksimulation exemplarisch durchgeführt. Der Stehfaden ist von anderen Fäden dicht umwundenen und bleibt immer innerhalb der Probe. Das Ergebnis der Berechnung ist in Abbildung 105a graphisch dargestellt. Dort ist die berechnete Flüssigkeit in dem ausgeblendeten Stehfaden zu sehen. Bei steigenden Drücken kommt die Flüssigkeit jeweils bis zu einer Engstelle im Garn. Ist diese überwunden, kann die Flüssigkeit weiterströmen. Kommt dann eine noch engere Stelle, so behindert diese wiederum den Fluß, andernfalls wird das gesamte Garn gefüllt. Diese Berechnungsmethode ist für faserbasierte Materialien noch nicht besonders gut geeignet. Man kann zwar aus dem Druck, der für eine vollständige Befüllung erforderlich ist, eine virtuelle Steighöhe berechnen, diese stimmt aber mit der Realität (noch) nicht überein. Die Berechnung des Kapillardruckes ergab, daß erst bei 82,5kPa das Garn vollständig gefüllt wird. Dies bedeutet, daß der engste Durchmesser der „überwunden“ werden muss, ca. 4 μm beträgt (siehe Abbildung 103b). Beim Kapillareffekt in Dochten ist der engste Durchmesser aber nicht für die Steighöhe verantwortlich, sondern dieser begrenzt allenfalls die Geschwindigkeit. Für die globale Steighöhe ist vielmehr wichtig, welcher Kapillardurchmesser im Material durchgängig vorhanden ist. Hierfür ist das Histogramm aller Porositäten entscheidend. Hier sind noch weitere Forschungen und Entwicklungen erforderlich.

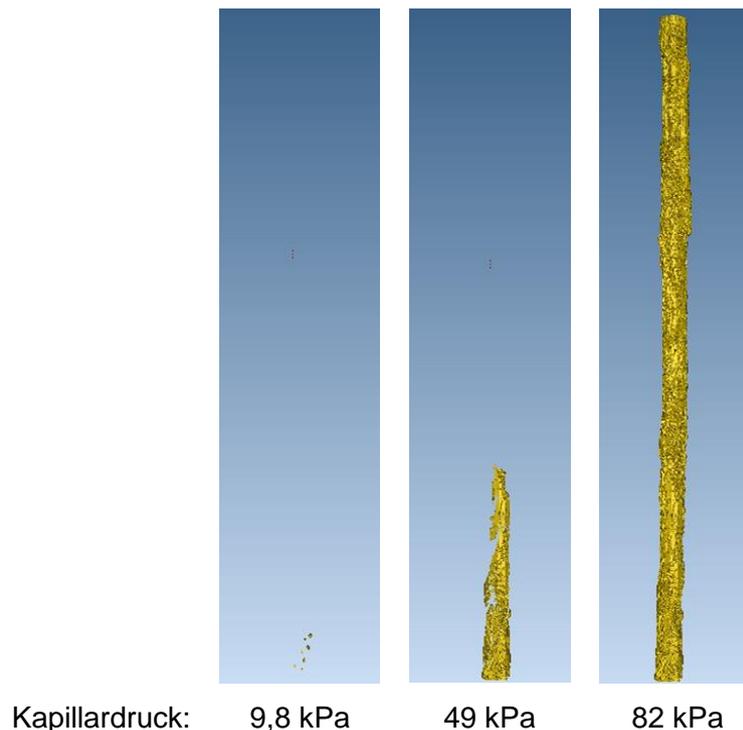


Abbildung 106: Simulierte Flüssigkeitssäule im Stehfaden für verschiedene Kapillardrücke.

5.4.4.4 Fazit

Die hochauflösende Computertomographie eignet sich nicht nur für kontrastreiche, trockene Materialien. Mit dem geeigneten Equipment können auch gering absorbierende Materialien wie Polymerfasern von der umgebenden Luft klar unterschieden werden. Auch Flüssigkeiten dämpfen bzw. streuen die Röntgenstrahlen und können hierdurch dreidimensional vermessen werden. Wenn es darum geht, in Dochten aufsteigende Flüssigkeiten oder in Tampons verborgene Flüssigkeitsdepots aufzuklären, so ist die hochauflösende Tomographie hier ein zwar aufwändiges, aber auch sehr genaues und gewinnbringendes Werkzeug. Es ist schwierig, den Dichteunterschied zwischen einer Flüssigkeit und einem Polymer zu trennen, da im Histogramm die Dichteunterschiede die beiden Gaußverteilungen ineinander übergehen. Solange die Flüssigkeit vom Fasermaterial nicht absorbiert wird, kann der Unterschied noch herausgearbeitet werden, hingegen ist das bei saugfähigen Fasern wie Viskose oder Baumwolle bislang nicht möglich. Wenn die zeitliche Auflösung von Prozessen (dynamischer Vorgang) relevant ist, so kann die schnelle zweidimensionale Röntgenaufnahme eingesetzt werden. Mit Modifizierung der CT-Steuerung und speziellen Vorrichtungen können CT Filme von in Textilien/Garnen aufsteigenden Flüssigkeiten gemacht werden. Hierfür eignet sich Wasser, besser sind hingegen spezielle Kontrastflüssigkeiten mit höherer Dichte. Über das beobachtete Anstiegsverhalten, das oftmals sehr inhomogen und un stetig voranschreitet, können Rückschlüsse über die Eignung für technische Produkte oder auch über Fehlstellen in der Veredlung gemacht werden. Da der Übergang zwischen Flüssigkeit und Luft sehr gut im 2D-Röntgenbild erkennbar ist, können auch die Meniskuskonturen am Fuße der Flüssigkeitssäule und die Kontaktwinkel aus verschiedenen Betrachtungswinkeln ermittelt werden. Zudem kann das Flüssigkeitsvolumen, das sich durch das Absinken des Reservoirspiegels ergibt, berechnet werden.

Bei trockenen Materialien können mit neuester Auswertesoftware wichtige Erkenntnisse zur Kapillarität abgeleitet werden. Der Umfang aller an der Flüssigkeitsfront verfügbaren Fasern (benetzenden Länge) konnte in verschiedenen Ebenen bestimmt werden. Die Porosität eines Dochtes wurde analysiert, die Permeabilität bestimmt und es wurden virtuelle Strömungsexperimente durchgeführt. Ergebnisse hiervon sind lokale Kapillaritäten, Strömungsgeschwindigkeitsfelder, Drücke und indirekt daraus dann auch die Steighöhen.

6. Fazit

6.1 Wesentliche Projektergebnisse

Im Projekt wurde das Basiswissen zum kapillaren Flüssigkeitseinzug in textile Fasergebilde umfassend aufgearbeitet. Mithilfe der entwickelten Methode zur Parameteridentifikation lassen sich dabei die Bewegung der Einzugsfront im Kapillarsystem ebenso schätzen wie Produktanforderungen mit Bezug zur Kapillarkinetik definieren und auf ihre Erfüllung prüfen. Auch die einziehende Flüssigkeitsmasse sowie die Verdunstung lassen sich mit charakterisieren; die zugehörige gravimetrische Erfassung wird dabei mit breiteren Prüflingen einfacher. Es werden eine Reihe von Möglichkeiten zur Anforderungsspezifikation vorgeschlagen.

Die entwickelte Methode zur Parameteridentifikation kann in der Lage sein, auch aus kurzen Zeitreihen heraus einen Mindestwert für die max. Steighöhe vorzuschlagen. Dieser wird umso verlässlicher, je größer das Verhältnis von der zeitlichen Länge der der Parameteridentifikation zugrunde liegenden Zeitreihe zu t_{95} ist. Verschiedene Einsatzszenarien der Methode werden ebenso erläutert, die Methode ist voraussichtlich auch auf poröse Körper bzw. Schüttgut übertragbar und wird von den DITF in die Normung als DIN SPEC eingebracht. Die Methode lässt sich sowohl manuell ausführen als auch in Charakterisierungseinrichtungen für die Kapillarkinetik übernehmen.

Eine Übertragbarkeit der beim vertikalen kapillaren Flüssigkeitseinzug gewonnenen Erkenntnisse auf den horizontalen Flüssigkeitseinzug *kann* gegeben sein. Hierzu wird ein modifiziertes Design für die Charakterisierungseinrichtung sowie ein passendes mathematisches Modell vorgestellt.

Eine Identifizierung des Kontaktwinkels mittels der Methode zur Parameteridentifikation ist möglich, aber – weil letztlich drei Verhältnisbildungen multiplikativ verrechnet werden – wohl vergleichsweise sensitiv auf kleinere unbekannte Einflüsse, z.B. auf die Oberflächenspannung.

Folgende Demonstratoren wurden entwickelt:

- Verfügbar auf <http://aif-kapillarkinetik.ditf-mr.de/>
 - (a) Programmmodul „Parameteridentifikation zur Kapillarkinetik“
 - (b) Programmmodul „Simulation des Flüssigkeitseinzugs in eine runde, schräge Kapillare“
- Neigbare Einrichtung zur Aufnahme von Zeitreihen zum kapillaren Flüssigkeitseinzug

Die beschriebene selbstlernende Methode zur anforderungskonformen Auslegung und Optimierung von Produkten in verfahrenstechnischen Produktionsprozessen setzt auf ein konsequent gepflegtes Produktdatenmanagementsystem auf und ermöglicht dann eine deutliche Reduktion des Musterungsaufwands. Die Methode wurde ausführlich vorgestellt und beispielhaft validiert, ebenso werden ein Referenz-Informationsschema und die Expertensystem-Konfiguration vorgestellt. Sie kann direkt verwendet werden.

Im Projekt wurde ebenso beispielhaft für Tampons und Dochte gezeigt, wie mittels Computertomographie der Flüssigkeitseinzug in textile Fasergebilde analysiert werden und in 3D-Modelle überführt kann. Dabei lassen sich die benetzbaren Oberflächen ebenso abschätzen wie die Porengrößenverteilungen. Es zeigte sich dabei, dass der Flüssigkeitseinzug in engeren Hohlräumen deutlich schneller als in weiteren Hohlräumen stattfindet, ebenso lassen sich unterschiedlich schnell bewegende Fließfronten in verschiedenen Komponenten eines textilen Fasergebildes sichtbar machen – hier in den unterschiedlichen Fasermaterialien eines Dochtes. Simulieren lassen sich ebenso die unterschiedlichen Porenöffnungsdrücke in verschieden dichten Zonen des textilen Fasergebildes. Anwendungsmöglichkeiten dieser Arbeiten liegen auch hier in der konstruktiven Produktoptimierung.

6.2 Weiterer Forschungsbedarf

Zu untersuchen ist, inwieweit sich die bei der Charakterisierung der Kapillarkinetik ergebenden Erkenntnisse auf Anwendungsfälle, bei denen die alleinige Benetzung der Faseroberflächen eine Rolle spielen, übertragen lässt. Ebenso weiter zu modellieren sind die Auswirkungen der Flüssigkeitsabsorption direkt in die Faser auf den Kapillareffekt.

Die experimentelle Untersuchung von faserbasierten Materialien ist für die realitätsnahe Simulation von Benetzungsprozessen von großer Bedeutung. Die Interaktion von Fasern und Flüssigkeiten ist ein wichtiges und komplexes Themengebiet. Viele verbrauchernahe Anwendungen betreffen die Kombination von Wasser und Faser (z.B. Hygiene, Reinigung, Regenschutz, Pflanzenbewässerung ...).

Daneben gibt es zahllose technische Anwendungen, bei denen Flüssigkeiten wie Öle, Benzin, flüssiges Wachs, Harze, Klebstoffe, Imprägniermittel, Färbeflotter, Tinten, Nährlösungen etc. relevant sind. Auch im technischen Bereich ist die Kapillarität der Fasern ein oft genutztes, aber kaum vorausberechenbarer Effekt. Hier besteht trotz des erfolgreich abgeschlossenen Projektes weiterer Forschungsbedarf. Die im Projekt entwickelte Messvorrichtung funktioniert, bietet jedoch noch weiteres Optimierungspotential. Ferner sollte die Eignung von Kontrastmittel weiter untersucht werden.

Ein großes Thema, bei dem noch erheblicher Forschungsbedarf herrscht, ist die Simulation des Eindringens von Harz in Fasermatten bei der Faserverbundherstellung. Momentan kann mit großem Aufwand nur ganz grob simuliert werden, wie Harz in die offenen Zwischenräume zwischen den Fasersträngen (Rovings) eingedrückt wird. Die Durchtränkung der Faserbündel kann nicht vorausberechnet werden, sondern muss im „try and error“-Verfahren erprobt werden. Es muss mit Schnitten bzw. Ultraschall oder Röntgen-CTs ermittelt werden, ob und in welchem Ausmaß die Fasern „trockene“ – d.h. nicht vernetzte Fasern – Stellen aufweisen. Eine sichere Vorausberechnung der Verhältnisse im trockenen Material wäre eine sinnvolle Erleichterung in der Produktentwicklung.

Die Simulationsmodule der Software sind noch nicht ganz ausgereift. Es gibt Entwicklungsbedarf, um die Strömungs- und -quelleneffekte noch genauer simulieren zu können.

Danksagungen

Das IGF-Vorhaben 18514 N «Entwicklung einer selbstlernenden Methode zur Charakterisierung und Prognose der kapillaren Steigkinetik von Fluiden in textilen Fasergebilden (Kapillare Steigkinetik)» der Forschungsvereinigung Forschungskuratorium Textil e.V., Reinhardtstraße 14-16, 10117 Berlin wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Wir danken den Unternehmen und Verbänden im Projektbegleitenden Ausschuss für ihre wohlwollende und zuvorkommende Unterstützung des Vorhabens:

AFBW – Allianz Faserbasierter Werkstoffe
Baden-Württemberg e.V.

B+M Textil GmbH & Co KG

Wilhelm Bahmüller Maschinenbau Präzisionswerkzeuge GmbH

Bartels-Feldhoff GmbH & Co. KG

Bauer GmbH Bandweberei

Bergal Erfurter Flechttechnik GmbH

BODE Chemie GmbH

BSN-JOBST GmbH

CHT R. Beitlich GmbH

CMC GmbH der Paul Hartmann AG

DataPhysics Instruments GmbH

Dyckhoff GmbH

Eing Textilveredlung und Handelsgesellschaft mbH & Co.KG

FM Siebdruck Werbung & Design GmbH

Freudenberg Haushaltsprodukte Augsburg GmbH

Fritz Moll Textilwerke GmbH & Co. KG

Gebr. Röders AG

Hansegrand Klimabaustoffe (GbR)

HQT high Quality Tapes GmbH & Co. KG

IMETER – MSB Breitwieser MessSysteme

IVC – Industrievereinigung Chemiefaser e.V.

IVGT – Industrieverband Garne-Gewebe-Technische Textilien e.V.

Johnson Manville Europe GmbH

Kelheim Fibres GmbH

Lenzing AG

Lenzing Instruments GmbH & Co. KG

Ortmann Kapillarbewässerung

P-D INTERGLAS TECHNOLOGIES GmbH

Procter & Gamble Service GmbH

Sandler AG

Schill+Seilacher GmbH

Sika Deutschland GmbH

slowtec GmbH

Textechno Herbert Stein GmbH & Co., KG

ThyssenKrupp System Engineering GmbH

Trevira GmbH

Volume Graphics GmbH

Westdeutsche Dochtfabrik GmbH & Co. KG

Bibliographie

- 3M (1999): 3M Repellency Test II: Water/ Alcohol Drop Test. Interne Testmethode von 3M.
- Aamodt A., Plaza E. (1994): Case-Based Reasoning: Foundational Issues, Methodological Variations, and System Approaches. AI Communications. IOS Press, Vol. 7: 1, S. 39-59.
- Accu Dyne Test (o.J.): Critical Surface Tension and Contact Angle with Water for Various Polymers. https://www.accudynetest.com/polytable_03.html?sortby=contact_angle (23.01.2017).
- Allweyer Th. (2009): BPMN 2.0 Business Process Model and Notation. Einführung in den Standard für die Geschäftsprozessmodellierung. 2. Auflage. Books on Demand, Norderstedt 2009, ISBN 978-3-8391-2134-4.
- Anik, Yavuz: Telefongespräch zum Einbringen der angestrebten Projektergebnisse in den Normenüberarbeitungsprozess am 20.01.2014. Kontaktdaten: Deutsches Institut für Normung e. V., yavuz.anik@din.de, Tel. 030 2601 2595.
- Anthonysigma (2011): Poiseuille Abstraction. https://en.wikipedia.org/wiki/File:Poiseuille_abstraction.svg (06.02.2017).
- ASTM (1963): Methods of Test for Water Resistance of Textile Fabrics (Withdrawn 1971). ASTM International. <http://www.astm.org/Standards/D583.htm> (19.02.2014).
- ASTM (2010): Standard Test Method for Evaluation of Wetting Agents by the Skein Test. ASTM D2281-10. ASTM International. <http://www.astm.org/Standards/D2281.htm> (19.02.2014).
- Bagkesen, F., Stegmaier, Th. (2011): Bionik: Patente aus der Natur. Energieautarker Flüssigkeitsferntransport mit faserbasierten Systemen. Tagungsbeiträge zum 5. Bionik-Kongress, Hochschule Bremen (2011), Hrgs. Bionik-Innovations-Centrum Bremen, 1. Aufl. 2011, ISBN: 978-3-00-33467-2, S. 191-193.
- Bagkesen, F., Stegmaier, Th. (2012): Bionik: Patente aus der Natur. Energieautarker Flüssigkeitsferntransport mit faserbasierten Systemen. Tagungsbeiträge zum 6. Bionik-Kongress, Hochschule Bremen (2012), Hrgs. Bionik-Innovations-Centrum Bremen, 1. Aufl. 2013, ISBN: 978-3-00-040885-4, S. 118-129.
- Bal, K., Fan, J., Sarkar, M. K., & Ye, L. (2011): Differential spontaneous capillary flow through heterogeneous porous media. International Journal of Heat and Mass Transfer, 54(13), 3096-3099. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2011.02.048>

- Bates D. M. & Watts D. G. (2008): Nonlinear Regression: Iterative Estimation and Linear Approximations. In: Nonlinear Regression Analysis and Its Applications, John Wiley & Sons, Inc., 2008, S. 32–66.
- Bear, J. (2013): Dynamics of fluids in porous media. Courier Dover Publications.
- Benltoufa, S. et al (ohne Jahr): Capillary Rise in Macro and Micro Pores of Jersey Knitting Structure. <http://www.jeffjournal.org/papers/Volume3/JEFF08-00007R1Benltoufa.pdf> (28.02.2014).
- Bodendorf F. & Kaiser C. (2009): Case-based Reasoning. In Kurbel K., Becker J., Gronau N. Sinz E. & Suhl L. (2008): Enzyklopädie der Wirtschaftsinformatik. Online-Lexikon. <http://www.enzyklopaedie-der-wirtschaftsinformatik.de/wi-enzyklopaedie/lexikon/technologienmethoden/KI-und-Softcomputing/Case-Based-Reasoning> (19.04.2010), Stand des Artikels: 27.03.2009.
- Breitwieser, M. (2013a): Charakterisierung von Pulvern und porösen Werkstoffen durch Flüssigkeitsinfiltration. <http://www.imeter.de/imeter-methoden/kapillaritaet-kontaktwinkel-sorptivitaet.html> (28.02.2014).
- Breitwieser, M. (2013b): Übersicht der IMETER-Methoden zur Viskositätsmessung und Rheometrie. <http://www.imeter.de/imeter-methoden/viskositaet-und-rheologie.html> (28.02.2014).
- Chapra S. C. & Canale R. (2006): Numerical Methods for Engineers. 5. Aufl. New York, NY, USA: McGraw-Hill, Inc., 2006.
- Chemie.de (o.J.): Oberflächenspannung. <http://www.chemie.de/lexikon/Oberfl%C3%A4chenspannung.html> (03.02.2017).
- Das, B. (2013): Modeling and Simulation of Moisture Transmission through Fibrous Structures Part II: Liquid Water Transmission. Journal of Fiber Bioengineering and Informatics 6:4 (2013) 383-404 doi:10.3993/jfbi12201304.
- Das, B. et al (2013): Modeling and Simulation of Moisture Transmission through Fibrous Structures Part II: Liquid Water Transmission. DOI:10.3993/jfbi12201304.
- DataPhysics (o.J.): Understanding Interfaces: Basics. <http://www.dataphysics.de/2/start/understanding-interfaces/basics/> (03.02.2017).
- Deutsches Institut für Normung e. V. (1976): Prüfung von Tensiden; Bestimmung des Tauchnetzvermögens von Tensidlösungen. DIN EN 53901:1976-01, zurückgezogen, ersetzt durch DIN EN 1772:2000-08 sowie DIN ISO 8022:1989-09 (ebenso zurückgezogen). Beuth Verlag.
- Deutsches Institut für Normung e. V. (1997): Prüfung von Textilien - Bestimmung der Sauggeschwindigkeit von textilen Flächengebilden gegenüber Wasser (Steighöhenverfahren). DIN 53924, Ausgabe 1997-03. Beuth Verlag.
- Deutsches Institut für Normung e. V. (2000): Grenzflächenaktive Stoffe - Bestimmung des Tauchnetzvermögens. DIN EN 1772:2000-08 (ISO 8022:1990, modifiziert). Beuth Verlag.
- Deutsches Institut für Normung e. V. (2011): Beschichtungsstoffe - Benetzbarkeit. Normfamilie DIN 55660. Beuth Verlag.
- Deutsches Institut für Normung e. V. (ohne Jahr): Prüfverfahren für Vliesstoffe. Normfamilie DIN EN ISO 9073. Beuth Verlag.
- DeValve, C., & Pitchumani, R. (2013): Simulation of void formation in liquid composite molding processes. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 51, 22-32.
- Dojo Foundation (2016): Dojo Toolkit 1.10. <https://dojotoolkit.org/> (22.03.2.16).

- Dueck G. & Scheuer T. (1990): Threshold accepting: A general purpose optimization algorithm appearing superior to simulated annealing. In: Journal of Computational Physics. 90, 1990, S. 161-175, doi:10.1016/0021-9991(90)90201-B
- Dullien, F. A. (1991): Porous media: fluid transport and pore structure. Academic press.
- EDANA (2012): Harmonized Test Methods Nonwovens and Related Industries. 2012 Edition. <http://www.edana.org/docs/default-source/default-document-library/harmonized-test-methods--2012-edition---1.pdf?sfvrsn=4> (19.02.2014).
- Freund J. & Rücker B. (2010): Praxishandbuch BPMN 2.0. Hanser, 2010, ISBN 978-3-446-42455-5.
- Gao, F., & Han, L. (2012): Implementing the Nelder-Mead simplex algorithm with adaptive parameters. Computational Optimization and Applications, 51(1), 259-277. https://www.researchgate.net/profile/Lixing_Han/publication/225691623_Implementing_the_Nelder-Mead_simplex_algorithm_with_adaptive_parameters/links/0c9605346dd8f07dd3000000.pdf (27.04.2016).
- Gao, F., & Han, L. (2012): Implementing the Nelder-Mead simplex algorithm with adaptive parameters. Computational Optimization and Applications, 51(1), 259-277. https://www.researchgate.net/profile/Lixing_Han/publication/225691623_Implementing_the_Nelder-Mead_simplex_algorithm_with_adaptive_parameters/links/0c9605346dd8f07dd3000000.pdf (27.04.2016).
- Gesellschaft für Informatik (2012): Prinzip, Methode, Werkzeug. Gesellschaft für Informatik e.V. Informatiklexikon. <http://www.informatikbegriffsnetz.de/arbeitskreise/vorgehensmodelle/themenbereiche/prinzipMethodeWerkzeug.html> (05.09.2012).
- Gries, Th. & Klopp, K. (2007): Füge- und Oberflächentechnologien für Textilien. Verfahren und Anwendungen. Springer-Verlag: Berlin, Heidelberg 2007.
- Grigull, U.; Straub, J. & Schiebener, P. (1990): Steam Tables in SI-Units – Wasserdampfatafel. Springer Verlag.
- Gronau (Hrsg), Bahrs, Valdova u.a. (2009): Anwendungen und Systeme für das Wissensmanagement: Ein aktueller Überblick. Berlin: GITO (2009).
- Hohenstein Textile Testing Institute GmbH & Co. KG (ohne Jahr): Textile Prüfkompetenz auf seiner Hand. http://www.hohenstein.de/de/testing/ueberblick_pruefungen/testing.html (28.02.2014).
- IAPWS (2014): Revised Release on Surface Tension of Ordinary Water Substance. <http://www.iapws.org/relguide/Surf-H2O-2014.pdf> (15.06.2015).
- Iliev, O., Printsypar, G. & Rief, S. (2011): A one-dimensional model of the pressing section of a paper machine including dynamic capillary effects. Berichte des Fraunhofer ITWM, Nr. 206 (2011).
- Iliev, O., Printsypar, G. & Rief, S. (2012): A two-dimensional model of the pressing section of a paper machine including dynamic capillary effects. Berichte des Fraunhofer ITWM, Nr. 211 (2012).
- ISO 9000 (2015): Qualitätsmanagementsysteme – Grundlagen und Begriffe (ISO 9000:2015); Deutsche und Englische Fassung EN ISO 9000:2015. Beuth Verlag GmbH, Berlin, Nov. 2015. ICS 01.040.03; 03.120.10.
- Jacoangeli, M. (2013): Konjunkturübersicht 2005-2012. Gesamtverband Textil+Mode. http://www.textil-mode.de/_obj/BE3AFC4C-58AC-42DB-95B5-673B2DD6C745/outline/Konjunkturuebersicht-05-12.pdf (27.02.2014).
- Kaffeewiki (2014): Espresso. <https://www.kaffeewiki.de/index.php?title=Espresso&oldid=23588>.

- Klunker, F.; Aranda, S.; Ziegmann, G. & Brenner, G. (2006): Bestimmung der Permeabilität von Fasermaterialien – Einsatz der Computersimulation. In: Hanschke, Th. (2006): Forschungsbericht 2005-2006 des Simulationswissenschaftlichen Zentrums der Technischen Universität Clausthal. ISBN: 978-3-9811720-0-3. S. 168ff.
<http://www.simzentrum.de/fileadmin/Materialien/SWZ-Jahrbuch-2005-2006.pdf> (13.02.2014).
- Kolodner, J. (2014): Case-based reasoning. Morgan Kaufmann.
- Körkel S. (2002): Numerische Methoden für Optimale Versuchsplanungsprobleme bei nichtlinearen DAE-Modellen. <http://archiv.ub.uni-heidelberg.de/volltextserver/2980/>. (18.11.2013).
- Krüss GmbH (ohne Jahr, a): Dynamische Oberflächenspannung. <http://www.kruss.de/de/service/schulung-theorie/glossar/dynamische-oberflaechenspannung/> (28.02.2014).
- Krüss GmbH (ohne Jahr, b): Kontaktwinkel. <http://www.kruss.de/de/service/schulung-theorie/glossar/kontaktwinkel/> (28.02.2014).
- Lagarias, J. C., Reeds, J. A., Wright, M. H., & Wright, P. E. (1998): Convergence properties of the Nelder-Mead simplex method in low dimensions. *SIAM Journal on optimization*, 9(1), 112-147.
- Lago M. & Araujo M. (2001): Capillary rise in porous media. In: *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Bd. 289, Nr. 1–2, S. 1–17, Jan. 2001.
- Liang H. & Wu H. (2008): Parameter Estimation for Differential Equation Models Using a Framework of Measurement Error in Regression Models. In: *Journal of the American Statistical Association*, Bd. 103, Nr. 484, S. 1570–1583, Dez. 2008.
- Lomov, S. (2014): Textile/fibre composites: Modelling.
https://www.mtm.kuleuven.be/Onderzoek/Composites/Research/meso-macro/textile_composites_map/textile_modelling (18.02.2014).
- Maschler, T. (2015): Fallbasierte Unterstützung von wissensintensiven Produktionsprozessen mit einem ontologiebasierten Expertensystem. Dissertation, Einreichungsversion bei der Fakultät Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik der Universität Stuttgart.
- Maschler, T., Gulich, B., Mählmann, I. (2013a): Abschätzung von Prozesseinstellungen und Produktionskosten für thermisch gebundene Airlaids auf Viskosebasis mit einem flexibel konfigurierbaren Expertensystem. Vortrag auf den 28. Hofer Vliesstofftagen 2013. Bei DITF-MR bzw. am STFI erhältlich.
- Maschler, T., Gulich, B., Reichel, S. & Matheis, M. (2013b): Forschungsbericht zum Vorhaben IGF/AiF 16828 BG „Einzelfasercharakterisierung bezüglich ihrer Verarbeitbarkeit zu Vliesstoffen und der resultierenden Produkteigenschaften“. Erhältlich beim STFI und bei DITF-MR.
- Maschler, T.; Wolfrum, J. (2007): Erarbeitung eines adaptiven Systems zur erfahrungsbasierten optimalen Einstellung von Webmaschinen. Schlussbericht zum Projekt AiF 14320 N, 2005-2007. Bei den DITF Denkendorf erhältlich.
- Metropolis N., Rosenbluth A., Rosenbluth M., Teller A. und Teller E. (1953): Equation of State Calculations by Fast Computing Machines. In: *Journal of Chemical Physics*. 21, 1953, S. 1087-1092, doi:10.1063/1.1699114.
- Motulsky H. (2004): Fitting Models to Biological Data Using Linear and Nonlinear Regression: A Practical Guide to Curve Fitting. Oxford University Press, 2004.
<http://www.mcb5068.wustl.edu/MCB/Lecturers/Baranski/Articles/RegressionBook.pdf> (18.11.2013).

- Motulsky H. J. & Ransnas L. A. (1987a): Fitting curves to data using nonlinear regression: a practical and nonmathematical review. In: FASEB J, Bd. 1, Nr. 5, S. 365–374, Jan. 1987.
- Motulsky H. J. & Ransnas L. A. (1987b): Fitting curves to data using nonlinear regression: a practical and nonmathematical review. FASEB J, Bd. 1, Nr. 5, S. 365–374, Jan. 1987.
<http://www.fasebj.org/content/1/5/365.full.pdf> (18.11.2013).
- Mullins B. J. & Braddock R. D. (2012): Capillary rise in porous, fibrous media during liquid immersion, International Journal of Heat and Mass Transfer, Bd. 55, Nr. 21–22, S. 6222–6230, Okt. 2012.
- Nelder J.A.; Mead, R. (1965): A Simplex Method for Function Minimization. Computer Journal, 1965, 7, p308–313. <http://comjnl.oxfordjournals.org/content/7/4/308.full.pdf> (27.04.2016).
- Nelder J.A.; Mead, R. (1965): A Simplex Method for Function Minimization. Computer Journal, 1965, 7, p308–313. <http://comjnl.oxfordjournals.org/content/7/4/308.full.pdf> (27.04.2016).
- Nutonian (2015): Internet-Auftritt. <http://www.nutonian.com/> (16.06.2015).
- Oberflächenspannung. <https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Oberfl%C3%A4chenspannung&oldid=162167086>.
- Offinger, R. (2009): Statistische Methoden der Parameteridentifikation in strukturmechanischen Modellen (Doctoral dissertation, Magdeburg, Univ., Diss., 2009). <http://d-nb.info/100245977X/34> (18.11.2013).
- Ohne Autor (2007): Simulation des Verhaltens von hochviskosen Auftragsmassen bei der Beschichtung textiler Materialien und beim Streichen von Papier. Forschungsbericht zu AiF 14316 des Deutsches Textilforschungszentrum Nord-West e.V. sowie des Papiertechnisches Institut - PTS-PTI, München.
- Pan, N., & Zhong, W. (2006): Fluid transport phenomena in fibrous materials. Textile Progress, 38(2), 1-93. http://www.researchgate.net/publication/233336813_Fluid_Transport_Phenomena_in_Fibrous_Materials/file/50463519ab354c1f14.pdf (19.02.2014).
- Park, C. H., Lebel, A., Saouab, A., Bréard, J., & Lee, W. I. (2011): Modeling and simulation of voids and saturation in liquid composite molding processes. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 42(6), 658-668. http://www.ewp.rpi.edu/hartford/~mcphej2/ET/Reference/Modeling_and_simulation_of_voids_and_saturation_in_liquid_composite_molding_processes.pdf (20.02.2014).
- Planck, H., Stegmaier, Th., Bagkesen, F. (2011): Bionik – die Natur als Quelle für Innovationen mit textilen Werkstoffen. http://www.sachsentextil.de/fileadmin/Inhalt/Bionik2010/1_Bionik_die_Natur_als_Quelle_fuer_Innovationen_mit_faserbasierten_Werkstoffen.pdf (20.02.2014).
- Planck, H., Stegmaier, Th., Bagkesen, F. (2011): Öffentlicher Abschlussbericht "Energieautarker Flüssigkeitsferntransport mit faserbasierten Systemen", BMBF 01RB0713A, 2008-2011.
- Popov, V.L. (2009): Kontaktmechanik und Reibung. Springer. ISBN 978-3-540-88836-9.
- Rajagopalan, D., Aneja, A. P., & Marchal, J. M. (2001): Modeling capillary flow in complex geometries. Textile Research Journal, 71(9), S. 813-821.
- Reed, C. M., & Wilson, N. (1999): The fundamentals of absorbency of fibres, textile structures and polymers. I. The rate of rise of a liquid in glass capillaries. Journal of Physics D: Applied Physics, 26(9), S. 1378ff.

- Reincke et al (2016): Oberflächen- und Grenzflächenspannung. http://wiki.polymerservice-merseburg.de/index.php/Oberfl%C3%A4chenspannung_und_Grenzfl%C3%A4chenspannung (03.02.2017).
- Reinhardt, H.-J. (2012): Numerik gewöhnlicher Differentialgleichungen. Anfangs- Und Randwertprobleme. Berlin, De Gruyter.
- Rietmüller, Ch. (2013): Denkendorfer Zukunftswerkstatt - Nahrung für Innovationen. <http://www.itv-denkendorf.de/leistungen/zukunftswerkstatt.htm> (19.11.2013).
- Rios, L. M., & Sahinidis, N. V. (2013): Derivative-free optimization: a review of algorithms and comparison of software implementations. *Journal of Global Optimization*, 56(3), 1247-1293.
- Russell, S. J.; Norvig, P. (2003): *Artificial Intelligence: A Modern Approach* (2nd ed.), Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall, pp. 111–114, ISBN 0-13-790395-2.
- Saltelli A., Tarantola S., Campolongo F. & Ratto M. (2004): *Sensitivity Analysis in Practice: A Guide to Assessing Scientific Models*. John Wiley & Sons, 2004.
- Scheer, A. W., & Nüttgens, M. (2000). ARIS architecture and reference models for business process management (pp. 376-389). Springer Berlin Heidelberg. http://www.wiso.uni-hamburg.de/fileadmin/WISO_FS_WI/Team/Mitarbeiter/Prof._Dr._Markus_Nuettgens/Publikationen/LNCS_Geschaeftsprozessarchitektur.pdf (01.10.2013).
- Scheer, A.W. (1998): *ARIS-Modellierungsmethoden, Metamodelle, Anwendungen*. Springer, 1998.
- Schmidt, M., Lipson, H. (2011): Distilling Free-Form Natural Laws from Experimental Data. *Science*, Vol. 324, no. 5923, pp. 81 - 85. <http://www.nutonian.com> (28.02.2014).
- Schmidt, M., Lipson, H. (2014): Eureka (Version 0.98 beta) [Software]. Available from <http://www.nutonian.com> (02.05.2016).
- Siebertz K., Bebbber, D. van & Hochkirchen T. (2010): *Statistische Versuchsplanung*. Springer, 2010.
- Spektrum (1998): Oberflächenspannung. *Lexikon der Physik*. Spektrum Akademischer Verlag. Heidelberg. <http://www.spektrum.de/lexikon/physik/oberflaechenspannung/10567> (03.02.2017).
- Stange, M. (2004): *Dynamik von Kapillarströmungen in zylindrischen Röhren*. Dissertation. Cuvillier Verlag, Göttingen, 2004. ISBN 3-86537-230-9.
- Stellmach, D. (2012): *Textile Work Intelligence by closed-loop control of product and process quality in the Textile Industry (TexWIN)*. Europäisches FP7-Forschungsprojekt, Start am 15. März 2010, 36 Monate Dauer. Mehr Informationen sind bei den DITF Denkendorf erhältlich.
- Studer R. (2012): Ontologien. In: Kurbel K., Becker J., Gronau N., Sinz E. & Suhl L. (2012): *Enzyklopädie der Wirtschaftsinformatik*. Online-Lexikon. <http://www.enzyklopaedie-der-wirtschaftsinformatik.de/wi-enzyklopaedie/lexikon/daten-wissen/Wissensmanagement/Wissensmodellierung/Wissensrepräsentation/Semantisches-Netz/Ontologien/index.html> (30.07.2013), Stand: 23.10.2012.
- Sutera, S.P. & Skalak, R. (1993): The History of Poiseuille's Law. *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol.25:1-602 (Volume publication date January 1993) DOI: 10.1146/annurev.fl.25.010193.000245. <http://www.annualreviews.org/doi/10.1146/annurev.fl.25.010193.000245> (06.02.2017).
- Tan, H., & Pillai, K. M. (2010). Fast liquid composite molding simulation of unsaturated flow in dual-scale fiber mats using the imbibition characteristics of a fabric-based unit cell. *Polymer Composites*, 31(10), 1790-1807.

- Thénevin, D. (o.J.): Stoffwerte – Flüssigkeiten. <http://www.uni-magdeburg.de/isut/LSS/Lehre/Arbeitsheft/IV.pdf> (06.02.2017).
- Tornero, J. (2010): Development of a rapid configuration system for textile production machinery based on the physical behaviour simulation of precision textile structures (MODSIMTex). Europäisches FP7-Forschungsprojekt, November 2008-April 2012, <http://www.modsimtex.eu> (04.02.2010).
- Turan, R. B., & Okur, A. (2013): Prediction of the in-plane and through-plane fluid flow behavior of woven fabrics. *Textile Research Journal*, 83(7), 700-717.
- Vafai, K. (Ed.). (2010): *Handbook of porous media*. Crc Press.
- vDiscover (2016): Internet-Auftritt. <http://www.vdiscover.eu/> (25.04.2016).
- Verbundprojekt Wissensmanagement (2005) : Verbundprojekt «Wissensmanagement in der textilen Wertschöpfungskette», Aktenzeichen : 4-4332.62 – DITF/34. Abschlussbericht zum 30.11.2005. Am Zentrum für Management Research der DITF Denkendorf erhältlich.
- ViBiNeT (2013): Das virtuelle Bildungsnetzwerk der Textil- und Bekleidungsindustrie. <http://www.vibinet.de/index.php/Hauptseite> (19.11.2013).
- Viskosität. <https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Viskosit%C3%A4t&oldid=161981354>.
- W. Heeg und F. Häfner (1976): Numerische Behandlung von Grundaufgabe (Vorausberechnung) und Umkehrtaufgabe (Parameteridentifikation) für die Strömung in porösen Stoffen. *ZAMM - Journal of Applied Mathematics and Mechanics / Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik*, Bd. 56, Nr. 10, S. T392–T399, 1976.
- Walther, J., Simacek, P., & Advani, S. G. (2012): The effect of fabric and fiber tow shear on dual scale flow and fiber bundle saturation during liquid molding of textile composites. *International journal of material forming*, 5(1), 83-97.
- Washburn, E. W. (1921): The dynamics of capillary flow. *Physical review*, 17(3), S. 273ff.
- Wikipedia (2014): Kanban (Softwareentwicklung). http://de.wikipedia.org/wiki/Kanban_%28Softwareentwicklung%29 (13.02.2014, 10:58).
- Wikipedia (2014): Scrum. <http://de.wikipedia.org/wiki/Scrum> (22.01.2014, 22:15).
- Willems, A. (2010): *Forming Simulation of textile reinforced composite structures*. Dissertation. https://lirias.kuleuven.be/bitstream/1979/2010/2/thesis_AnWillems.pdf (18.02.2014).
- Wissen.de (2016): Herkunftswörterbuch.
viskos, viskös. <http://www.wissen.de/wortherkunft/viskos> (03.02.2017).
Kapillare. <http://www.wissen.de/wortherkunft/kapillare> (06.02.2017).
- www.wer-liefer-was.de (2014): Lieferantensuche nach «Faserverbund». 27.02.2014.
- Young, T. (1805): An essay on the cohesion of fluids. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 95, p65-87. <http://www.jstor.org/stable/107159> (23.01.2017).
- Yu, W., Chen, G., Cao, J., Lu, J., & Parlitz, U. (2007): Parameter identification of dynamical systems from time series. *PHYSICAL REVIEW-SERIES E-*, 75(6), 067201. <http://www.physik3.gwdg.de/~ulli/pdf/YCCLP07.pdf> (18.11.2013).
- Zhang, Y. et al (2006): Capillary Effect of Hydrophobic Polyester Fiber Bundles with Noncircular Cross Section. DOI 10.1002/app.24261.

Bibliographie

- Zhong, W., Pan, N., & Lucas, D. (2005): Multi-scale modeling of liquid transport in fibrous materials. In The 2005 MIT Conference Proceedings of Computational Fluid and Solid Mechanics (pp. 954-958). <http://ningpan.net/Publications/101-150/102-LiquidMultiscale.pdf> (19.02.2014).
- Zhu, Ch. & Takerata, M. (2013): Effect of Fabric Structure and Yarn on Capillary Liquid Flow within Fabrics. Journal of Fiber Bioengineering and Informatics 6:2 (2013) p. 205-215, doi:10.3993/jfbi06201309.
- Ziegmann, G.; Klunker, F. & Aranda, S. (2006): Rechnergestützte Bestimmung der Fehlprägung im RTM-Verfahren. In: Hanschke, Th. (2006): Forschungsbericht 2005-2006 des Simulationswissenschaftlichen Zentrums der Technischen Universität Clausthal. ISBN: 978-3-9811720-0-3. S. 34ff. <http://www.simzentrum.de/fileadmin/Materialien/SWZ-Jahrbuch-2005-2006.pdf> (13.02.2014).