

# Schlussbericht vom 18.03.2024

---

zu IGF-Vorhaben Nr. 21787N

## Thema

Entwicklung einer Systematik zur Eigenschaftsvorhersage von Polyurethanschäumen unter Berücksichtigung der realen Schaummorphologie zur Verwendung in der Qualitätssicherung

## Berichtszeitraum

01.04.2021 bis 30.09.2023

## Forschungsvereinigung

Kunststoffverarbeitung

## Forschungseinrichtung(en)

Institut für Kunststoffverarbeitung in Industrie und Handwerk an der RWTH Aachen

Gefördert durch:

## **KURZZUSAMMENFASSUNG**

Der Reaktivkunststoff PUR wird hauptsächlich zu Schäumen verarbeitet. Anwendungen, wie Polster für Möbel oder thermische Isolationskomponenten, werden weitestgehend von KMU hergestellt. Wichtiger Faktor bei der Bewertung der Qualität dieser Bauteile ist die Schaummorphologie, die direkten Einfluss auf die Eigenschaften hat. Da aktuelle Materialmodelle die reale Schaummorphologie nicht in ihre Berechnungsgrundlage einbeziehen, können Bauteileigenschaften nur unzureichend vorhergesagt werden.

Das Ziel des Forschungsvorhabens war daher eine Systematik, die das halbempirische Materialmodell von Gibson-Ashby mit der real auftretenden Schaummorphologie verknüpft und damit die genauere Vorhersage der mechanischen Eigenschaften des Schaumstoffes unter Einbeziehung der Eigenschaften des Matrixmaterials ermöglicht. Diese Vorhersage kann in der Qualitätssicherung genutzt werden, um Ausschussbauteile zu identifizieren.

Es wurde die Schaummorphologie mit Methoden der Bildverarbeitung charakterisiert, und relevante Größen, wie z.B. die Zellgrößenverteilung, wurden ermittelt. Mit Hilfe experimenteller Daten wurde die erarbeitete Systematik, die eine Auswertemethodik mittels Dunkelfeldaufnahmen, digitaler Bildverarbeitung sowie eines künstlichen neuronalen Netzes beinhaltet, validiert. Die Schaummorphologie wurde gezielt variiert, um den Einfluss auf die Eigenschaften des Bauteils zu quantifizieren. Darüber hinaus ist es möglich, durch Charakterisierung des kompakten Materials, eine Vorhersage für weitere PUR-Systeme auf Basis der realen Schaummorphologie durchzuführen.

Es wurde somit eine Systematik entwickelt, die Herstellern von Schaumstoffprodukten ermöglicht, eine effiziente und kostengünstige Qualitätssicherung basierend auf objektiven Kriterien in ihre Produktion zu integrieren.

Das Ziel des Vorhabens wurde erreicht.

## DANKSAGUNG

Die nachfolgend beschriebenen und erläuterten Untersuchungen wurden im Rahmen des IGF-Vorhabens 21787 N der Forschungsvereinigung Kunststoffverarbeitung über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Der vorliegende Bericht ist der Schlussbericht des Forschungsvorhabens.

Ein wesentlicher Teil der Ergebnisse wurde von Eduard Kremer, M.Sc. erarbeitet und teilweise von Studierenden der RWTH Aachen in Form von studentischen Arbeiten niedergelegt. Eine Kurzfassung von jeder dieser Arbeiten befindet sich im Anhang. Diese Arbeiten sind nicht zur Veröffentlichung vorgesehen, können aber in der Bibliothek des Instituts für Kunststoffverarbeitung eingesehen werden. Eine Gesamtdarstellung des Themenkreises, zu dem dieses Forschungsvorhaben gehört, wird in einem technisch-wissenschaftlichen Bericht des Instituts für Kunststoffverarbeitung nach Abschluss der Arbeiten erfolgen.

Dem Deutschen Bundestag, dem BMWK und der AiF-Mitgliedsvereinigung "Kunststoffverarbeitung" gilt unser Dank. Darüber hinaus gilt unser Dank allen Firmen, die durch Bereitstellung von Kunststoffen, Maschinen und sonstigen Sachmitteln diese Arbeit unterstützt haben.

Danken möchten wir auch den Mitarbeitern der Fachbeiratsgruppe Polyurethane, die durch Rat und Tat die Untersuchungen unterstützt haben.

---

<b>1</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>EINLEITUNG .....</b>	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>STAND DER TECHNIK .....</b>	<b>4</b>
<b>4</b>	<b>FORSCHUNGSZIEL UND LÖSUNGSWEG .....</b>	<b>11</b>
<b>5</b>	<b>ANALYSE MORPHOLOGISCHER UND MECHANISCHER EIGENSCHAFTEN VON PUR-SCHÄUMEN .....</b>	<b>12</b>
5.1	Materialauswahl .....	12
5.2	Probekörperherstellung .....	12
5.3	Bildaufnahme der Schaumstrukturen .....	14
5.4	Schaumstrukturanalyse mittels neuronaler Netze .....	18
5.5	Verknüpfung eines Materialmodells mit der realen Schaummorphologie.....	23
<b>6</b>	<b>FAZIT UND AUSBLICK .....</b>	<b>28</b>
<b>7</b>	<b>WIRTSCHAFTLICHE BEDEUTUNG UND NUTZEN FÜR KMU .....</b>	<b>29</b>
<b>8</b>	<b>PLAN ZUM ERGEBNISTRANSFER IN DIE WIRTSCHAFT .....</b>	<b>31</b>
8.1	Während der Projektlaufzeit durchgeführte Transfermaßnahmen .....	31
8.2	Nach der Projektlaufzeit durchgeführte Transfermaßnahmen .....	34
<b>9</b>	<b>NOTWENDIGKEIT UND ANGEMESSENHEIT DER GELEISTETEN ARBEIT .....</b>	<b>35</b>
<b>10</b>	<b>EINSCHÄTZUNG DER REALISIERBARKEIT DES VORGESCHLAGENEN UND AKTUALISIERTEN TRANSFERKONZEPTS .....</b>	<b>36</b>
<b>11</b>	<b>EINSATZ VON GERÄTEN UND WISSENSCHAFTLICH-TECHNISCHEM PERSONAL .....</b>	<b>37</b>
<b>12</b>	<b>ABKÜRZUNGEN.....</b>	<b>38</b>
12.1	Abkürzungen .....	38
12.2	Formelzeichen.....	38
<b>13</b>	<b>LITERATUR.....</b>	<b>39</b>

## 1 ZUSAMMENFASSUNG

Deskriptoren: Bildverarbeitung, Künstliche Neuronale Netze, Morphologie, Schaumstruktur, Simulation

Schlagworte: Halbempirisches Materialmodell, Polyurethane, Zellgrößenverteilung

Der Reaktivkunststoff Polyurethan (PUR) wird hauptsächlich zu Schäumen verarbeitet. Anwendungen wie Polster für Möbel oder thermische Isolationskomponenten werden weitestgehend von kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) hergestellt. Wichtiger Faktor bei der Bewertung der Qualität dieser Bauteile ist die Schaummorphologie, die direkten Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften hat. Die Qualitätssicherung verursacht vor allem für KMU teils erhebliche Kosten. Zur Durchführung müssen Prüfmaschinen angeschafft werden, die von geschultem Personal bedient werden müssen, oder es muss auf Dienstleister zurückgegriffen werden. Neben den entstehenden Kosten stellt vor allem der Zeitaufwand für die Durchführung der Prüfungen eine große Herausforderung für die Hersteller von PUR-Bauteilen dar. Da aktuelle Materialmodelle die reale Schaummorphologie nicht in ihre Berechnungsgrundlage einbeziehen, können Bauteileigenschaften nur unzureichend vorhergesagt werden.

Das Ziel des Forschungsvorhabens war daher die Entwicklung einer Systematik, die ein Materialmodell mit der real auftretenden Schaummorphologie verknüpft, um auf diese eine genauere Vorhersage der mechanischen Eigenschaften des Schaumstoffes unter Einbeziehung der Eigenschaften des Matrixmaterials zu ermöglichen. Es wurde eine neue Methode zur einfachen Qualitätssicherung bei geschäumten Bauteilen bereitgestellt, um Kosten im Vergleich zu bisherigen Qualitätssicherungsmethoden einzusparen.

In diesem Forschungsvorhaben wurden mithilfe Bildanalyse- und Bildverarbeitungstechniken detaillierte Informationen über die Zellstruktur, die Zellgröße, die Zellverteilung und andere morphologische Merkmale erfasst. Diese gewonnenen Daten wurden in Verbindung mit den Eigenschaften der Polyurethanschäume analysiert. Die Schaummorphologie wurde hierbei gezielt variiert, um den Einfluss auf die Eigenschaften des Bauteils zu quantifizieren. Durch die Anwendung statistischer Modelle und maschineller Lernalgorithmen, die am IKV entwickelt wurden, wurde eine Systematik entwickelt, die es ermöglicht, die Eigenschaften der Schäume vorherzusagen, basierend auf ihrer spezifischen Schaummorphologie.

Durch die Verknüpfung der realen Schaummorphologie mit einem Materialmodell wurde ein Vorteil gegenüber bestehenden Vorhersagemöglichkeiten generiert und dadurch eine objektive Qualitätssicherungsmethode geschaffen, statt sich auf bisherige subjektive Methoden zu verlassen.

## 2 EINLEITUNG

Die Herstellung von PUR-Formteilen erfolgt in der Regel im Reaction-Injection-Moulding (RIM)-Verfahren [Lep12]. An die Bauteilherstellung ist die Qualitätssicherung (QS) angeschlossen. Dabei werden meist manuell mechanische Prüfungen oder Sichtprüfungen der Bauteile durchgeführt. Mechanische Prüfungen haben den Nachteil, dass sie oftmals eine Lagerzeit der Bauteile und eine separate Probenpräparation erfordern. Neben der Anschaffung der Prüfmaschine entfallen auf die Lagerung und die Probenpräparation zusätzliche Kosten. Bei der Sichtprüfung durch einen Mitarbeiter werden subjektive Kriterien angewendet, die den Qualitätssicherungsprozess anfällig für Fehler machen.

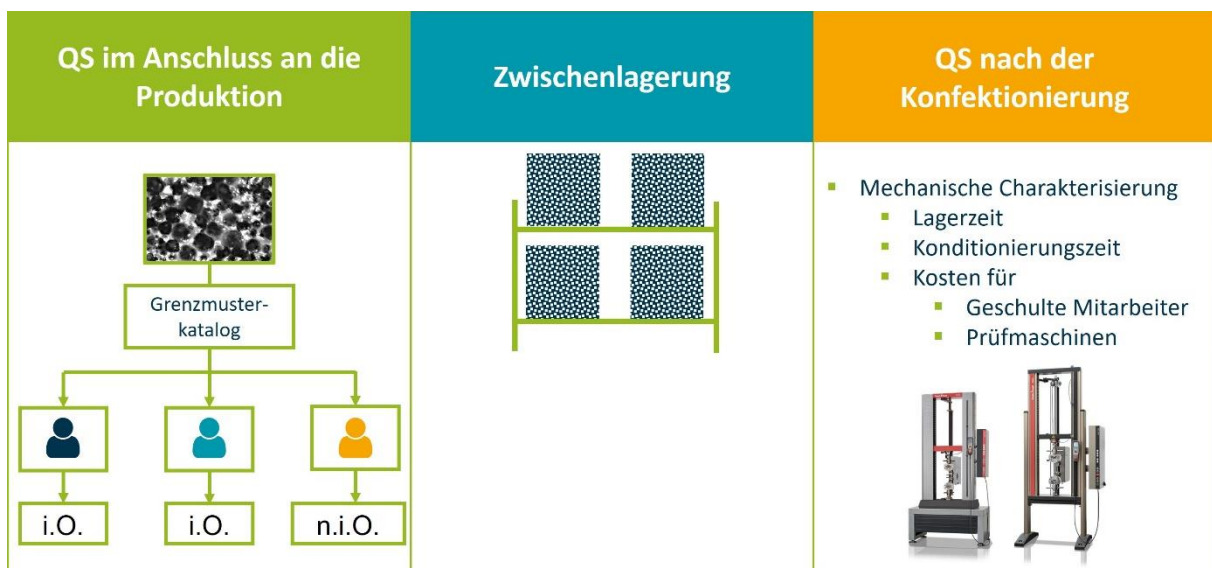


Bild 2.1 Qualitätskontrolle in der Produktion von Polyurethanschaumbauteilen

Die QS verursacht vor allem für kleine und mittlere Unternehmen teils erhebliche Kosten. Zur Durchführung müssen Prüfmaschinen angeschafft werden, die von geschultem Personal bedient werden müssen, oder es muss auf Dienstleister zurückgegriffen werden [Mül17]. Neben den entstehenden Kosten stellt vor allem der Zeitaufwand für die Durchführung der Prüfungen eine große Herausforderung für die Hersteller von PUR-Bauteilen dar.

Aus diesem Grund wurde im Rahmen dieses Forschungsvorhabens eine Möglichkeit geschaffen, das mechanische und physikalische Verhalten direkt mit Hilfe existierender Materialmodelle unter Einbeziehung der optisch ermittelten Schaummorphologie abzuleiten. In aktuellen Materialmodellen werden starke Vereinfachungen bezogen auf die Struktur des Schaumes getroffen und die reale Schaummorphologie nicht berücksichtigt [SS14]. Aus diesem Grund ist die Abbildegenauigkeit und damit die Vorhersagegenauigkeit dieser Materialmodelle stark eingeschränkt, sodass die zuvor beschriebenen QS-Maßnahmen die einzige Möglichkeit darstellen, anwendungsrelevante Eigenschaften zu bestimmen.

---

Die in dem abgeschlossenen Forschungsvorhaben entwickelte Systematik ermöglicht erstmalig die realitätsgetreue Berücksichtigung der vorhandenen Schaumstruktur. Damit kann es KMU möglich gemacht werden, eine schnelle und kostengünstige Qualitätssicherung auf Basis der Schaummorphologie durchzuführen.

### 3 STAND DER TECHNIK

Polyurethane gehören mit einer Verbrauchsmenge von ca. 18,5 Mio. t weltweit im Jahr 2016 mengenmäßig zu den fünf meisthergestellten Kunststoffen [AH17]. Bei einem Großteil der PUR-verarbeitenden Unternehmen handelt es sich um kleine und mittelständische Unternehmen (KMU). Diese KMU kommen aus verschiedenen Branchen, wie dem Transportsektor, dem Bauwesen (z. B. Isolationskomponenten), dem Sport- und Freizeitsektor, der Medizintechnik sowie dem technischen Gerätebau [LAB+17]. Die jährliche Steigerung der gesamten verarbeiteten Menge PUR wird auf etwa 5 % prognostiziert. Dadurch besteht ein erhebliches Wachstumspotenzial für die PUR-verarbeitende Branche [Aus17]. In Deutschland, einem der größten PUR-Absatzmärkte in Europa wurde im Jahr 2013 ein Umsatz von etwa 5,1 Mrd. € erwirtschaftet [NN18, Sch13].

PUR wird zu mehr als 65 % zu geschäumten Produkten verarbeitet [LAB+17, Lim14]. Schaumstoffe sind „ein Werkstoff mit über die gesamte Masse verteilten Zellen (offen, geschlossen oder beides) und einer Rohdichte [...], die niedriger ist als die Gerüstsubstanz“ [NN18]. Im Falle von PUR bestehen die Zellen aus in einer polymeren Matrix dispergierten Gasmolekülen. Die Gestalt der Zellen hat bei Kunststoffschäumen einen erheblichen Einfluss auf die späteren mechanischen und physikalischen Eigenschaften des Bauteils, wie z. B. dem Elastizitätsmodul, dabei sind als wichtige Einflussgrößen die relative Anzahl der offenen Zellen, die relative Schaumdichte, die Zellgeometrie, die Zellgröße und die Zellwanddicke hervorzuheben [Mai12, SS14].

Um die Eigenschaften von Polyurethanen zu beeinflussen, werden Hilfs- und Zusatzstoffe eingesetzt. Mit Katalysatoren kann sowohl die Reaktionskinetik der Urethan-Bildungsreaktion als auch die der Wasser-Isocyanat-Reaktion beeinflusst werden. Die Veränderung der Reaktionskinetik hat Auswirkungen auf die Schaummorphologie. Weitere Möglichkeiten auf die Schaummorphologie Einfluss zu nehmen sind Schaumstabilisatoren, mit denen eine feinere Zellstruktur möglich ist, Zellöffner, mit denen sich die Offenzelligkeit steuern lässt und Nukleierungsmittel, die die Zellkeimbildung begünstigen [Lep12, EHE08].

Trotz der weiten Verbreitung von PUR gibt es bisher noch keine Möglichkeit, unter Einbeziehung der real auftretenden Schaummorphologie mit Hilfe von Materialmodellen die Bauteileigenschaften vorherzusagen [SS14]. Daher muss die Qualitätssicherung über nachgeschaltete Prozesse durchgeführt werden. Dabei werden meist manuell mechanische Prüfungen oder Sichtprüfungen durchgeführt.

Mechanische Prüfungen haben den Nachteil, dass sie oftmals eine Lagerzeit der Bauteile und eine separate Probenpräparation erfordern. Neben der Anschaffung der Prüfmaschine, die von

geschultem Personal bedient werden muss, entfallen auf die Lagerung und die Probenpräparation zusätzliche Kosten bzw. es muss auf Dienstleister zurückgegriffen werden [Mül17]. Bei der Sichtprüfung durch einen Mitarbeiter werden subjektive Kriterien angewendet, die den Qualitätssicherungsprozess anfällig für Fehler machen [HM12]. Die QS verursacht vor allem für kleine und mittlere Unternehmen teils erhebliche Kosten. Neben den entstehenden Kosten stellt vor allem der Zeitaufwand für die Durchführung der Prüfungen eine große Herausforderung für die Hersteller von PUR-Bauteilen dar.

Es fehlt aktuell eine Möglichkeit, das mechanische und physikalische Verhalten direkt mit Hilfe existierender Materialmodelle unter Einbeziehung der optisch ermittelten Schaummorphologie abzuleiten. Die Gestalt der Zellen hat bei Kunststoffschäumen einen erheblichen Einfluss auf die späteren mechanischen und physikalischen Eigenschaften des Bauteils [Mai12]. In aktuellen Materialmodellen werden starke Vereinfachungen bezogen auf die Struktur des Schaumes getroffen und die reale Schaummorphologie nicht berücksichtigt [SS14]. Aus diesem Grund ist die Abbildegenauigkeit und damit die Vorhersagegenauigkeit dieser Materialmodelle stark eingeschränkt, sodass die zuvor beschriebenen QS-Maßnahmen die einzige Möglichkeit darstellen, anwendungsrelevante Eigenschaften zu bestimmen.

#### Strukturmechanische Materialmodelle zur Beschreibung zellulärer Strukturen

Bei der Modellierung von Kunststoffschäumen wird zwischen offen- und geschlossenzelligen Schäumen unterschieden [SS14]. Auf einer weiteren Ebene wird, wie in Tabelle 3.1 zu sehen, zwischen regulären und irregulären Modellen unterschieden. Reguläre Modelle gehen von einer Einheitszelle zur Beschreibung der Schaumstruktur aus, wohingegen irreguläre Modelle keine Regelmäßigkeiten in der Schaumstruktur vorgeben. Dadurch lassen sich realitätsnahe Schaumstrukturen modellieren. Um Kunststoffschäume beschreiben zu können, sind Kenntnis über die Dichte, die Zellgröße, die Geometrie der Zellen und die Eigenschaften der polymeren Matrix notwendig. Bei geschlossenzelligen Schäumen müssen zusätzlich Eigenschaften der Gasphase, wie die molekulare Zusammensetzung des Gases oder der Zellinnendruck, berücksichtigt werden [SR65].

Zellart	Modelltyp	Modell	Ansatz	Vereinfachung bzw. Abbildungsgüte
Geschlossen	Regulär	Gibson-Ashby	Kubische Einheitszelle	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Zellsteglänge und Zellstegdike konstant</li> <li>▪ Übertreffen der realen Eigenschaften (etwa Faktor 4)</li> </ul>
		Kelvin-Modell	Oktaederstümpfe als Schaumzellen	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Schaummatrix als Flüssigkeit</li> <li>▪ Regelmäßigkeit der Zellanordnung</li> </ul>
	Irregulär	Roberts-Garboczi-Modell	Zufällig modellierte Voronoi-Schaum-Struktur als Wiederholungseinheit	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Empirisches Modell mit 100 Zellen</li> <li>▪ Statistische Unsicherheit der Modellierung etwa 10 %</li> </ul>
		Shulmeister-Modell	Tetraedraeder und rhombische Dodekaeder-Modell aus Voronoi-Tessellation	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Isotropes Werkstoffverhalten</li> <li>▪ Ausschließlich elastische Verformung der Zellstege</li> <li>▪ Übertreffen der realen Eigenschaften um etwa 10 %</li> </ul>
Offen	Regulär	Gibson-Ashby-Modell	Kubische Einheitszelle	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Zellsteglänge und Zellstegdike konstant</li> <li>▪ Vereinfachung des geschlossenzelligen Gibson-Ashby Modells</li> <li>▪ Übertreffen der realen Eigenschaften</li> </ul>
		Kelvin-Modell	Oktaederstümpfe als Schaumzellen	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Schaummatrix als Flüssigkeit</li> <li>▪ Regelmäßigkeit der Zellanordnung</li> </ul>
	Irregulär	Van der Burg-Modell	Voronoi-Schaum mit zufälliger Zellverteilung und -kernverschiebung	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Isotropes Werkstoffverhalten</li> </ul>
		Voronoi-Tessellation nach Zhu et al.	Zufällig modellierte Voronoi-Schaum-Struktur als Wiederholungseinheit	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Empirisches Modell</li> <li>▪ Isotroper Schaum</li> <li>▪ Gültigkeit für <math>0,015 &lt; \rho^*/\rho_s &lt; 0,1</math></li> </ul>

Tabelle 3.1 Materialmodelle für zelluläre Strukturen

In Tabelle 3.1 sind die unterschiedlichen Materialmodelle kategorisiert und mit ihren Modellbildungsansätzen aufgeführt und sofern bekannt ist ihre Abbildungsgüte (Abweichung vom experimentell ermittelten Wert) angegeben. Nachfolgend werden die Modelle genauer erläutert.

Empirische Zusammenhänge zwischen den mechanischen Eigenschaften des Matrixmaterials und denen des geschäumten Bauteils gibt es schon seit Anfang der siebziger Jahre. Hier fand Rusch einen Zusammenhang für den Elastizitätsmodul (Gl. 3.1) [Rus70].

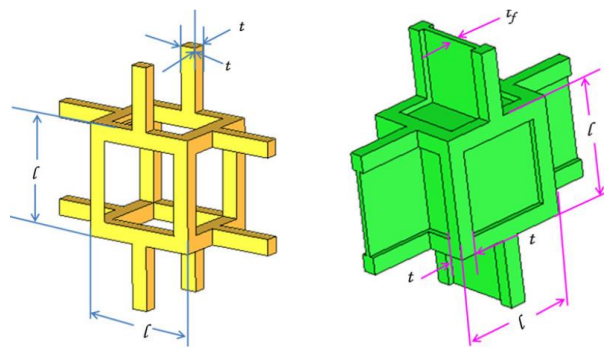
$$\frac{E^*}{E_s} = \frac{1}{12} \frac{\rho^*}{\rho_s} \left\{ 2 + 7 \frac{\rho^*}{\rho_s} + 3 \left( \frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^2 \right\} \quad (\text{Gl. 3.1})$$

Das halbempirische Gibson-Ashby-Modell gibt für geschlossenzellige Schäume mit der Näherung aus Gl. 3.2 einen Zusammenhang zwischen dem Elastizitätsmodul des Schaumes  $E^*$  und dem Elastizitätsmodul  $E_s$  der Matrix. Der Faktor  $\Phi$  bildet das Verhältnis zwischen der Gesamtmasse der Matrix und der Matrixmasse in den Zellstegen. Bei offenzelligen Schäumen gilt  $\Phi = 1$ . Es entfallen die beiden hinteren Terme. Zur Berechnung werden weiterhin noch die Dichte des Schaumes  $\rho^*$ , die Dichte des Matrixmaterials  $\rho_s$ , die Dichte des Gases in den Zellen  $\rho_0$  und die Querkontraktionszahl  $\nu^*$  des Schaumes benötigt. Das Gibson-Ashby-Modell wird mit einer kubischen Einheitszelle modelliert, diese ist für offen- und geschlossenzellige Schäume nachfolgend in Bild 3.1 dargestellt.

$$\frac{E^*}{E_s} \approx \phi^2 \left( \frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^2 + (1 - \phi) \frac{\rho^*}{\rho_s} + \left( \frac{\rho_0}{E_s} \right) \frac{(1 - 2\nu^*)}{1 - \left( \frac{\rho^*}{\rho_s} \right)} \quad (\text{Gl. 3.2})$$

Bei kleinen Verformungen kann für offenzellige Schäume eine Näherung auf Basis der kubischen Einheitszelle getroffen werden.

$$\frac{E^*}{E_s} \approx \left( \frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^2 \approx \left( \frac{t}{l} \right)^4 \quad (\text{Gl. 3.3})$$



*Bild 3.1 Kubische Einheitszelle für offen- und geschlossenzellige Schäume des Gibson-Ashby Modells [GA97, SS14]*

Die hier getroffene Näherung zeigt, dass sowohl die Zellsteglänge  $l$  als auch die Zellstegbreite  $t$  eine Korrelation mit den Eigenschaften des Schaumes aufweisen. Da es sich sowohl bei der Zellsteglänge als auch bei der Zellstegbreite in realen Schäumen um Größen handelt, die einer Verteilung unterliegen, wird durch die Verwendung von Durchschnittswerten ein Fehler in die Vorhersage eingebracht [GA97, SS14]. Dieser Fehler geht mit der Höhe der Standardabweichung der beiden Werte in der vierten Potenz in die

Näherung nach Gleichung 3.3 ein. Das Gibson-Ashby-Modell ermöglicht zudem die Vorhersage weiterer Eigenschaften, wie z. B. den Kompressionsmodul und den Schubmodul.

Beim Kelvin-Modell wird der Schaum aus Oktaederstümpfen modelliert, die in der Schaumstruktur regelmäßig verteilt sind. Die Zelle ist so aufgebaut, dass sie dem energetisch günstigsten Zustand genügt. Die Zellgröße und die Zellstegbreite sind konstant. Die Matrix um die Zellen herum wird als Flüssigkeit modelliert. Dabei wird das Modell hauptsächlich als mathematische Basis für die weitere Modellierung von zellulären Strukturen genutzt und dient nicht direkt als strukturelles Modell zur Vorhersage von Eigenschaften von Schäumen.

Das Roberts-Garbocki-Modell modelliert mittels der Voronoi-Tessellation, die weiter unten beschrieben ist, eine zufällig geartete Wiederholungseinheit, die über eine Verknüpfung der Randbedingungen eine unendliche Schaumstruktur erzeugt. Mit dem so modellierten Schaum lässt sich über eine FEM-Berechnung die Steifigkeitsmatrix ermitteln. Mit den Einträgen des Steifigkeitstensors  $C_{ij}$  lassen sich die Ingenieurskonstanten, wie der Elastizitätsmodul, berechnen. Dabei ergibt sich der Elastizitätsmodul in X-Achsen-Richtung zu:

$$E_{100} = \frac{(C_{11} - C_{12})(C_{11} + 2C_{12})}{C_{11} + C_{12}} \quad (\text{Gl. 3.4})$$

Die Querkontraktionszahl kann mit folgendem Zusammenhang berechnet werden:

$$\nu_{12} = \frac{C_{12}}{C_{11} + C_{12}} \quad (\text{Gl. 3.5})$$

Der Kompressionsmodul ist unabhängig von der Raumrichtung und ergibt sich zu  $K = E_{100}/(3(1-2\nu_{12}))$ . Der Schubmodul  $G$  ist gleich dem Eintrag  $C_{44}$  der Steifigkeitsmatrix [RG01].

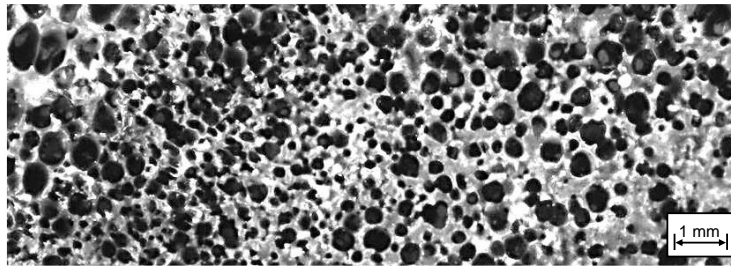
Beim Shulmeistermodell wird mit einer Voronoi-Tessellation eine Schaumstruktur erzeugt, deren Zellkerne entweder in einem kubisch-raumzentrierten (bcc) oder in einem kubisch-flächenzentrierten (fcc) Gitter angeordnet sind. Durch diese Anordnungen ergeben sich für die Schaumzellen Tetradekaeder (bcc) und rhombische Dodekaeder (fcc). Um die Verteilung der Einzelzellen zu randomisieren und trotzdem symmetrische Grenzflächen zu erhalten, werden die Zellkerne auf dem Gitter der Einheitszelle entweder nach dem bcc- oder fcc-Vorbild angeordnet. Die Belegung des Gitterkernes wird zufällig gewählt. Mit dem nach dieser Methode modellierten Schaum wird eine FEM-Simulation durchgeführt, die eine Vorhersage über die Eigenschaften des Schaumes ermöglicht [Shu00].

Das Van der Burg-Modell modelliert den Schaum über eine Voronoi-Tessellation. Die Einheitszelle ist dabei mindestens eine Größenordnung größer als die auftretenden

Zellsteglängen. Die Grenzflächen der Einheitszelle werden als Symmetrieebene des Schaumes modelliert. Die Einheitszellen können entweder als bcc oder fcc modelliert werden. Daraus entstehen Zellen mit der Form Tetradekaeder (bcc) oder rhombisches Dodekaeder (fcc). Bei der Modellierung der Einheitszelle werden die Zellkeime bcc oder fcc angeordnet. Die einzelnen Zellkeime werden dann zufällig in alle drei Raumrichtungen um den Vektor  $(\delta_x, \delta_y, \delta_z)$  verschoben. Die Verschiebung eines jeden Zellkeimes wird mittels einer Gleichverteilung mit der Breite  $[-\delta_{\max}; \delta_{\max}]$  bestimmt. Nach dieser Verschiebung wird über initiiertes Zellwachstum der Voronoi-Schaum gebildet. Die so generierte Einheitszelle wird genutzt, um mit Hilfe einer FEM-Simulation die Eigenschaften des Schaumes vorherzusagen [BS97].

Bei der Voronoi-Tessellation nach *Zhu et al.* wird ein Würfel als Wiederholungseinheit angenommen. In diesem Würfel werden gleichzeitig Zellen nukleiert, deren Verteilung über Zufallszahlen für die drei Raumkoordinaten bestimmt wird. Zwischen zwei Zellkeimen besteht ein Mindestabstand. Die entstehenden Zellen wachsen mit einer linearen Rate an. Beim Zusammentreffen zweier Zellen wird das Wachstum an dieser Stelle gestoppt. So wird ein Voronoi-Schaum gebildet, der aus tetradekaedrischen Zellen zusammengesetzt ist. Dieser so generierte Schaumwürfel wird als Wiederholungseinheit für die Modellierung eines unendlich ausgedehnten periodischen Schaums genutzt. Auf Basis einer FE- Simulation mittels ABAQUS konnten empirische Zusammenhänge für E-Modul, Schubmodul, Poisson-Zahl und Kompressionsmodul ermittelt werden. Die Eigenschaften des Schaumes sind dabei annähernd isotrop [ZHW00].

Wie aus Bild 3.2 hervorgeht, unterliegen sowohl Zellgröße als auch die Zellstegbreite einer Verteilung. Diese Größen sind im Allgemeinen nicht normalverteilt und weisen eine Richtungsabhängigkeit auf [BFD+05]. Durch das Nutzen von Mittelwerten für diese Größen wird ein Fehler in der Berechnung der Eigenschaften erzeugt. Aus diesem Grund ist es notwendig, die Verteilung und die daraus resultierende Gewichtung bei der Berechnung der Eigenschaften zu berücksichtigen. In den oben genannten Modellen werden die Eigenschaften des Schaumes durch die Nichtberücksichtigung der Unregelmäßigkeiten der Schaumstruktur und der damit einhergehenden Fehlerbilder um 10 % überschätzt [RG01, SS14]. Die so erzielbare Genauigkeit ist nicht ausreichend, um die Fertigungstoleranzen bei der Bauteilherstellung abzubilden und somit als verlässliche Vorhersage für die Bauteileigenschaften genutzt zu werden.



*Bild 3.2* Makroskopische Aufnahme eines Polyurethan-Elastomerschaums

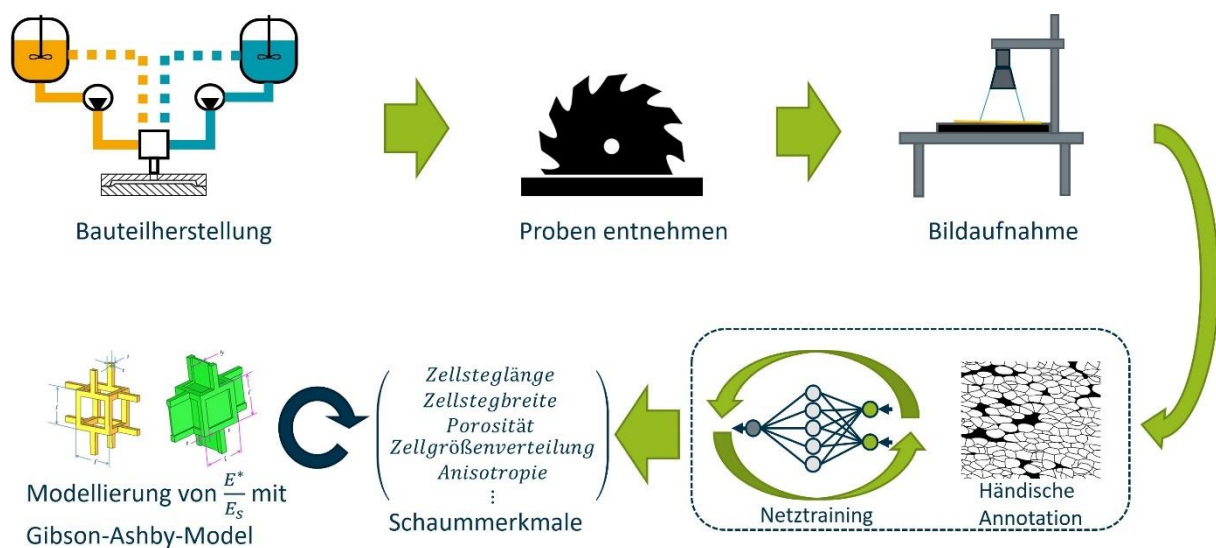
Auch wenn bereits kommerzielle Simulationsprogramme wie ABAQUS oder LS-DYNA die Möglichkeit bieten, Eigenschaften von Polymerschäumen zu berechnen, sind Modelle zur Beschreibung der Schaumstrukturen noch immer als Gegenstand der Forschung zu bewerten [SS14]. Der Fortschritt der verfügbaren Rechenkapazitäten ermöglicht bereits die Vorhersage von Bauteileigenschaften, aber nur auf Basis von ganzheitlichen Simulationen. Hier wird vom Formfüllvorgang im Werkzeug ausgehend, unter der Berücksichtigung der lokalen Reaktionskinetik, die zu erwartende Schaummorphologie simuliert und darauf aufbauend eine Eigenschaftsvorhersage getroffen [WS18]. Als Basis für eine solche Simulation muss eine Vielzahl an Eigenschaften des Materials bekannt sein, wie bspw. die zeitlich veränderlichen rheologischen Eigenschaften des Reaktionsgemisches, die Reaktionskinetik und die mechanischen Eigenschaften des Matrixmaterials [ABI07].

Zusammenfassend existieren eine Vielzahl von Modellen, die mechanische Eigenschaften von Schäumen vorhersagen können, jedoch beziehen diese die reale Schaummorphologie nicht in ihre Berechnungen ein. Reguläre Modelle versuchen anhand von mathematischen Beschreibungen mittels Einheitszellen die Eigenschaften vorherzusagen, während irreguläre Modelle eine Schaumstruktur modellieren. Das Gibson-Ashby Modell ermöglicht es, die Eigenschaften von Schäumen, wie den Kompressionsmodul und den Elastizitätsmodul, sowohl für offenzellige als auch für geschlossenzellige Schäume vorherzusagen. Aus den genannten Gründen wird in diesem Forschungsvorhaben die Verwendung des Gibson-Ashby Modells in Kombination mit der direkt an den Produktionsprozess angeschlossenen ermittelten Schaummorphologie und der Segmentierung des Querschnittes angestrebt. Zur Eigenschaftsvorhersage werden morphologische Charakteristika, wie die Zellgrößenverteilung und die Zellstegbreitenverteilung, mit Hilfe von Bildverarbeitungsmethoden erhoben. Ebenso müssen zur Eigenschaftsvorhersage die Werkstoffeigenschaften des Matrixmaterials bekannt sein.

## 4 FORSCHUNGSZIEL UND LÖSUNGSWEG

Mit Hilfe des Gibson-Ashby Modelles wird auf der Basis des Standes der Technik eine Methodik entwickelt, die es durch die Berücksichtigung der realen Schaummorphologie ermöglicht, die Eigenschaften von Matrixmaterial und dem geschäumten Bauteil zu verknüpfen. Durch die Verknüpfung der realen Morphologie mit einem bestehenden Materialmodell soll ein Vorteil gegenüber bestehenden Vorhersagemöglichkeiten generiert und dadurch eine objektive Qualitätssicherungsmethode geschaffen werden.

Hierfür werden zunächst sowohl kompakte als auch unterschiedlich geschäumte Platten aus einem Polyurethan-Weichschaumsystem hergestellt. Anhand von entnommenen Probekörpern werden die Dichte, Querkontraktionszahl und die mechanischen Eigenschaften bestimmt, die als Eingangsparameter für das Materialmodell dienen. Zur Bestimmung der realen Schaummorphologie werden von der Schaumstruktur Bilder aufgenommen und anschließend mittels digitaler Bildverarbeitung sowie eines künstlichen neuronalen Netzes ausgewertet. Die gewonnenen Materialinformationen werden ebenfalls als Eingangsparameter an das Materialmodell übertragen (siehe Bild 4.1). Zuletzt wird das Materialmodell anhand von mechanischen Zugversuchen validiert.



*Bild 4.1 Vorgehen zur Vorhersage der Schaumeigenschaften unter Berücksichtigung der realen Schaummorphologie*

## **5 ANALYSE MORPHOLOGISCHER UND MECHANISCHER EIGENSCHAFTEN VON PUR-SCHÄUMEN**

Zur Analyse morphologischer und mechanischer Eigenschaften von PUR-Schäumen wurden nach einer Materialauswahl (Kapitel 5.1) für ein PUR-System zunächst kompakte als auch unterschiedlich geschäumte Platten hergestellt sowie daraus Probekörper entnommen (Kapitel 5.2). Die mechanischen Eigenschaften wurden anschließend durch Zugversuche bestimmt. Zur Analyse der Schaumstrukturen wurden verschiedene Bildaufnahmeverfahren verglichen (Kapitel 5.3) und im Anschluss die morphologischen Eigenschaften der Probekörper mittels digitaler Bildverarbeitung sowie eines künstlichen neuronalen Netzes ausgewertet (Kapitel 5.4). In Kapitel 5.5 wurde ein Materialmodell mit der ermittelten realen Schaummorphologie verknüpft, anhand der Zugversuche validiert und auf diese Weise die Vorhersage der mechanischen Eigenschaften von geschäumten Polyurethanen ermöglicht.

### **5.1 Materialauswahl**

In enger Absprache mit den Mitgliedern des Projektbegleitenden Ausschusses (PA) wurde exemplarisch ein Polyurethan-Weichschaumsystem der Firma Covestro Deutschland AG, Leverkusen, Deutschland, dessen Komponenten aus einem Isocyanat und einer Polyolformulierung bestehen, untersucht.

Das Isocyanat mit dem Handelsnamen Desmodur VP.PU 3230 ist eine Mischung aus Diphenylmethan-4,4'-Diisocyanat (MDI) mit Isomeren und Homologen höherer Funktionalität. Es ist eine feuchteempfindliche bräunlich schwarze Flüssigkeit, die handelsüblich zur Herstellung eines flexiblen Polyurethan-Kaltschaumstoffs für Autositzanwendungen im Automobilssektor eingesetzt wird. Es weist bei 25 °C eine Dicht von 1,21 g/cm<sup>3</sup> sowie eine Viskosität von 15 bis 35 mPas auf. Bei dem Polyol handelt es sich um eine Standardformulierung, bestehend aus Polyetherpolyol Langketter, Vernetzer, Wasser, Stabilisator und Amin-Aktivator. Bei dem PUR-System wurde ein Mischungsverhältnis von 100 zu 48,5 eingestellt. Die Startzeit beträgt 22 Sekunden, die Abbindezeit 80 Sekunden sowie die Steigzeit 145 Sekunden.

### **5.2 Probekörperherstellung**

Zur Verarbeitung des PUR-Systems wurde eine 2K-Hochdruck (HD)-Dosieranlage des Typs Baseline HK65R/MX (A0100-1488) der Firma Hennecke GmbH Polyurethane Technology, Sankt Augustin, Deutschland, verwendet. Weiterhin kam ein Formträger des Typs FT-H.H.10.10.1000.0.0. der Firma KraussMaffei GmbH, München, Deutschland, mit einer

Schließkraft von 1.000 kN und einer Aufspannfläche von 1.000 x 1.000 mm<sup>2</sup> zum Einsatz (Bild 5.1).

Das eingesetzte Werkzeug besteht aus zwei Formhälften, deren Kavität eine Plattengeometrie mit einer Grundfläche von 200 x 300 mm<sup>2</sup> aufweist. Die untere Werkzeughälfte verfügt über eine mechanische Einstellmöglichkeit, sodass die Formteildicke zwischen 2 - 30 mm variiert werden kann.

Es wurden mit dem in Kapitel 5.1 erläuterten PUR-System sowohl kompakte als auch geschäumte Platten bei verschiedenen Prozesspunkten hergestellt.



*Bild 5.1 Eingesetztes Werkzeug, Dosieranlage und Formträger zur Probekörperherstellung*

Zur Ermittlung der mechanischen Eigenschaften des Matrixmaterials, wurden zunächst kompakte Platten bei einer Kavitätshöhe von 5 mm hergestellt. Das Werkzeug wurde zu Beginn teilweise geschlossen und vollständig mit PUR gefüllt, sodass die chemische Reaktion bzw. Volumenexpansion beginnt. Nach Abschluss der Steigzeit wurde das Werkzeug vollständig geschlossen. Die sich ausgebildeten Poren kollabieren, das ursprünglich enthaltene Gas entweicht und das Material wird vor Abschluss der Aushärtereaktion komprimiert. Auf diese Weise wurden durch das Crushen nahezu kompakte Platten hergestellt.

Anschließend wurden geschäumte PUR-Platten bei einer Kavitätshöhe von 10 mm hergestellt. Das Werkzeug wurde hierbei, wie sonst üblich, vollständig geschlossen und das Aufschäumen lediglich durch die Kavitätsgeometrie beschränkt. Um Probekörper mit unterschiedlichen morphologischen Eigenschaften zu erhalten, wurden die Prozessparameter Schusszeit und Dosiergeschwindigkeit bei verschiedenen Versuchspunkten variiert. Der genaue Versuchsplan mit den eingestellten Prozessparametern ist in Tabelle 5.1 dargestellt.

Versuchspunkt	Injektionsdauer [s]	Dosiergeschwindigkeit [g/s]	Materialtemperatur [°C]	Werkzeugtemperatur [°C]	Druck [bar]
Kompakt	1,84	90	40	60	130
Schaum 1	1,5	90	40	60	130
Schaum 2	2,0	90	40	60	130
Schaum 3	2,2	90	40	60	130
Schaum 4	1,8	30	40	60	130
Schaum 5	1,8	150	40	60	130

*Tabelle 5.1: Übersicht der Prozessparameter bei der PUR-Formschaumherstellung*

Auf Additive (z. B. Zellöffner, Nukleierungsmittel und Schaumstabilisatoren) zur gezielten Beeinflussung der Schaummorphologie wurde verzichtet, da durch diese chemische Modifikation ebenfalls die chemische Struktur des Gerüstmaterials beeinflusst wird. Um dies zu verhindern, wurde die Schaummorphologie lediglich durch eine Prozessmodifikation initiiert.

Sowohl aus den kompakten als auch geschäumten PUR-Platten wurden 1B-Zugstäbe nach DIN EN ISO 1798 ausgestanzt. Diese wurden genutzt, um die mechanischen Eigenschaften anhand des E-Moduls beim Kompaktmaterial bzw. bei dem jeweiligen Aufschäumungsgrad zu bestimmen. Zusätzlich wurden rechteckförmige Proben entnommen, um die morphologischen Eigenschaften der jeweiligen Platten mithilfe eines optischen Bildaufnahmeverfahrens und anschließender Auswertung eines neuronalen Netzes zu bestimmen.

### **5.3 Bildaufnahme der Schaumstrukturen**

Zur Analyse von Schaumstrukturen stehen in der Mikroskopie verschiedene Beleuchtungsarten bzw. Bildaufnahmeverfahren zur Auswahl. Untersuchungen am IKV zeigten, dass für PUR-Schäume nicht alle Bildaufnahmeverfahren gleich gut geeignet sind. Die Methoden der Auflichtmikroskopie, Durchlichtmikroskopie, Dunkelfeldaufnahme und Computertomographie wurden miteinander verglichen und einer Nutzwertanalyse anhand der Vergleichskriterien Arbeitsaufwand, Bildqualität, Automatisierbarkeit und Wirtschaftlichkeit unterzogen.

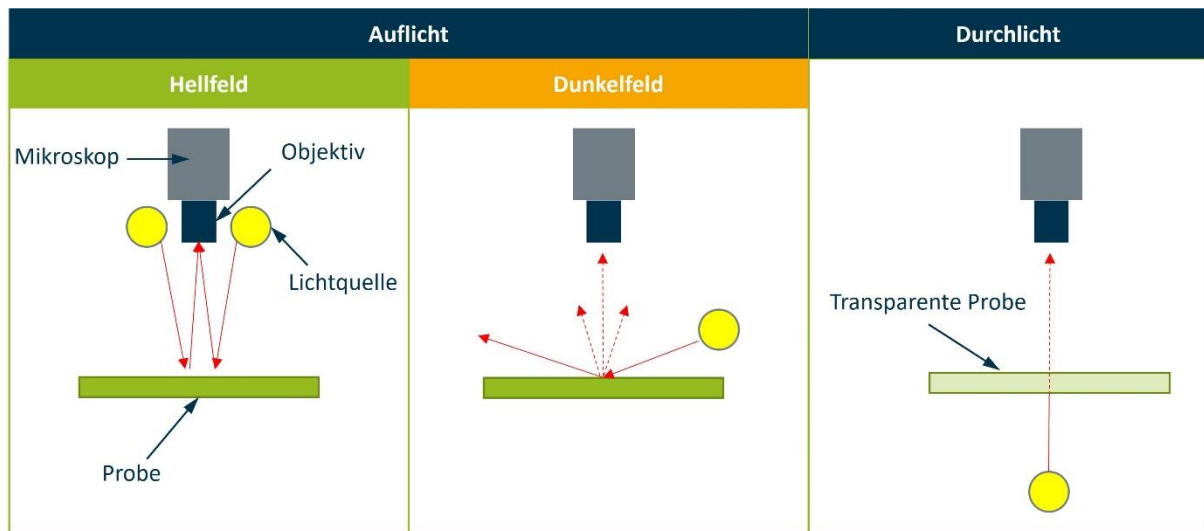


Bild 5.2 Beleuchtungsarten in der Mikroskopie

Bei der Hellfeldbeleuchtung sind Kamera und Beleuchtung so angeordnet, dass das an der glatten Probenoberfläche reflektierte Licht vom Objektiv eingefangen wird (Bild 5.2). Dadurch erscheinen glatte Oberflächenbereiche hell. Trifft das Licht auf Bereiche mit beispielsweise einer dunklen Beschriftung, die einen hohen Anteil des eintreffenden Lichts absorbiert, oder auf Poren, die das Licht in einem anderen Winkel reflektieren, erscheinen die jeweiligen Bereiche dunkler.

Bei der Dunkelfeldbeleuchtung ist die Lichtquelle so positioniert, dass das reflektierte Licht, das keine starke Streuung erfährt, nicht auf das Objektiv trifft. Eine strukturlose Glasplatte im Dunkelfeld erscheint daher zum Beispiel dunkel. Trifft das Licht auf Unebenheiten oder Kanten an der Oberfläche wird es jedoch diffus reflektiert, sodass die reflektierten Strahlen teilweise vom Objektiv eingefangen werden. So können Strukturen auf der Oberfläche von Objekten, wie zum Beispiel Poren, gut sichtbar gemacht werden. Als Lichtquelle dienen dazu häufig direkt an der Oberfläche des Objekts platzierte flache Ringlichter.

Für die Mikroskopie unter Durchlicht befindet sich die Lichtquelle auf der objektivabgewandten Seite des Objektes. Von dort durchleuchtet es die Probe, und nur die transmittierten Lichtstrahlen, welche vom Objekt weder reflektiert noch absorbiert werden, gelangen in das Objektiv, wodurch ein Schattenbild des Objektes erzeugt wird. Um eine ausreichende Durchleuchtung der Proben zu gewährleisten, werden für die Durchlichtmikroskopie transparente Proben oder dünne Schnitte und Schiffe der Proben verwendet.

Die Computertomographie beruht auf dem Wirkprinzip, dass kurzwellige, energiereiche Röntgenstrahlung Körper durchdringen kann und je nach durchstrahltem Material abgeschwächt wird. Anwendung fanden Röntgenverfahren nach der Entdeckung der Röntgenstrahlung im Jahre 1895 durch Wilhelm Conrad Röntgen zuerst in der Medizin, da so

erstmals das Innere des menschlichen Körpers ohne operativen Eingriff sichtbar gemacht werden konnte. Inzwischen zählt die Computertomographie zu den etablierten technischen Mess- und Prüfverfahren zur Analyse der Morphologie von Schaumstoffen.

Der Prüfaufbau beim klassischen Röntgenverfahren besteht aus einer Röntgenröhre, in der die Strahlung erzeugt, einem Objekt, welches durchstrahlt wird und einem Röntgenfilm. Am Röntgenfilm lassen sich Bereiche, an denen die Strahlung stärker absorbiert wird, als dunkel erkennen. Die moderne Computertomographie optimiert dieses Verfahren, indem sie aus einer Reihe an Einzelbildern die dreidimensionale Struktur des durchstrahlten Körpers wiedergibt.

Das Prinzip der Computertomographie ist in Bild 5.3 dargestellt. Das durchstrahlte Objekt wird in einzelne kubische Volumenelemente zerlegt. Jedes dieser Volumenelemente besitzt einen fest zugewiesenen Schwächungskoeffizienten  $\mu_{i,j}$ , der die Absorption eines Röntgenstrahles in diesem Volumenelement beschreibt.

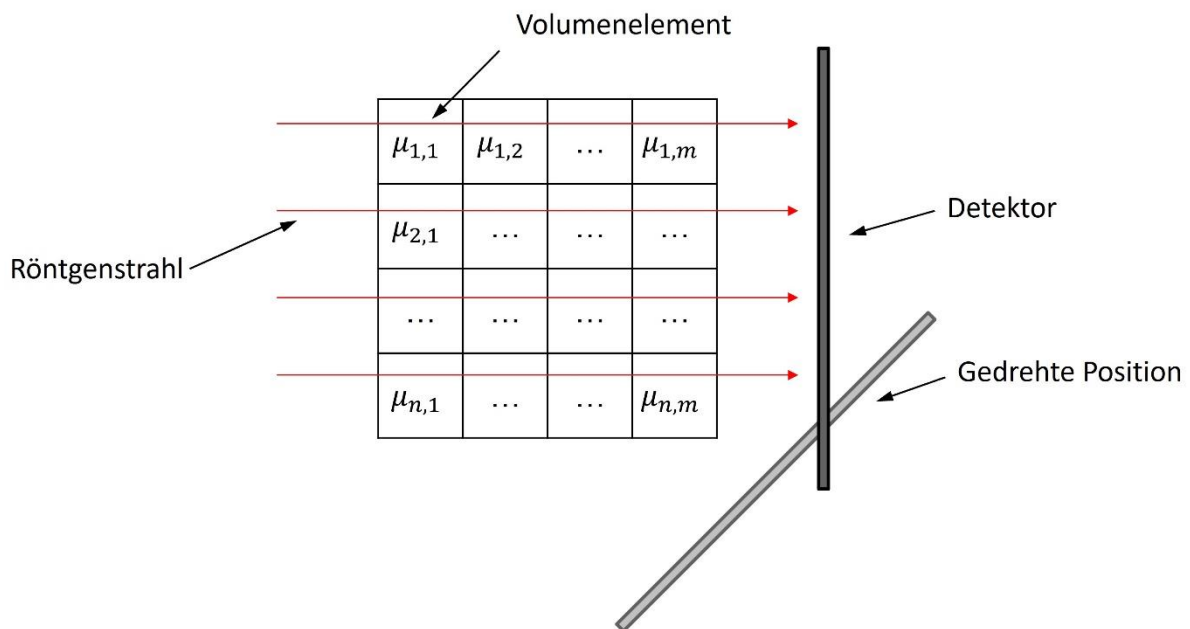


Bild 5.3 Prinzip der Computertomographie

An jedem einzelnen Element gilt, dass die Intensität  $I$  des Röntgenstrahles nach dem Durchstrahlen des Volumenelements sich über die eingestrahlte Intensität  $I_0$  berechnet, zu:

$$I = I_0 \cdot \exp(-\mu_{i,j} \cdot \delta_r) \quad (\text{Gl. 5.1})$$

Durchläuft der Röntgenstrahl das gesamte Objekt, wird seine Intensität von jedem durchstrahlten Volumenelement abgeschwächt. Die Intensität des Röntgenstrahles am Röntgendetektor berechnet sich demnach wie folgt:

$$\ln\left(\frac{I}{I_0}\right) = \delta_r \cdot - \sum_{k=1}^n (\mu_{i_k, j_k}) \quad (\text{Gl. 5.2})$$

Das Objekt wird in der betrachteten Ebene von parallelen Strahlen durchstrahlt, und die transmittierte Intensität jedes einzelnen Strahles wird detektiert. Anschließend wird die Apparatur gedreht und erneut die Intensität bestimmt. So ergibt sich mit einer ausreichenden Anzahl an Messungen ein Gleichungssystem, aus dem alle Schwächungskoeffizienten berechnet werden können.

Exemplarische Aufnahme der Methoden der Auflichtmikroskopie, Durchlichtmikroskopie, Dunkelfeldaufnahme und Computertomographie sowie eine Bewertung bezüglich der Vergleichskriterien Arbeitsaufwand, Bildqualität, Automatisierbarkeit und Wirtschaftlichkeit sind in Bild 5.4 dargestellt.

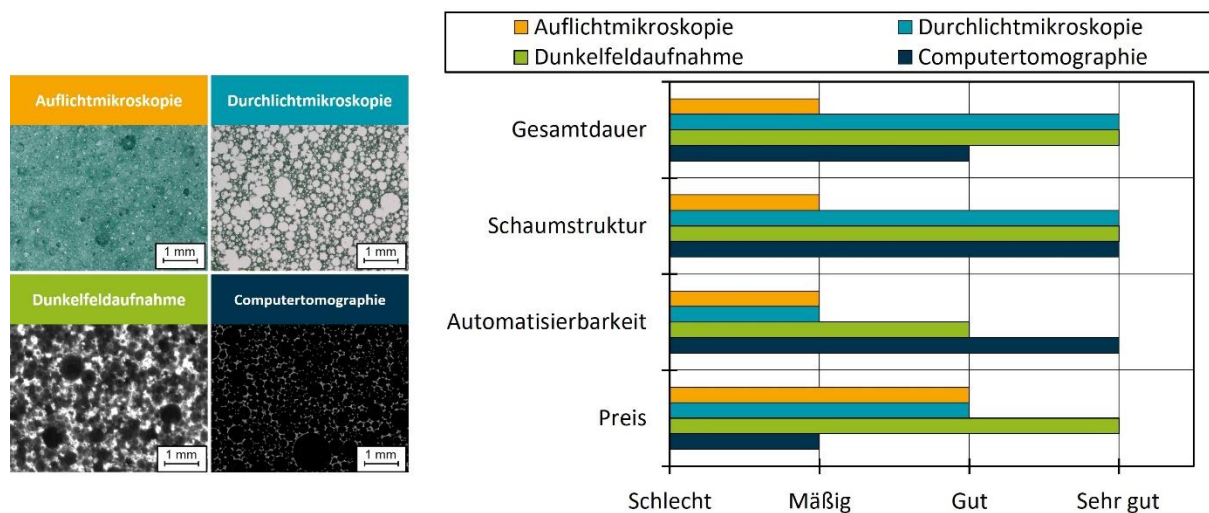
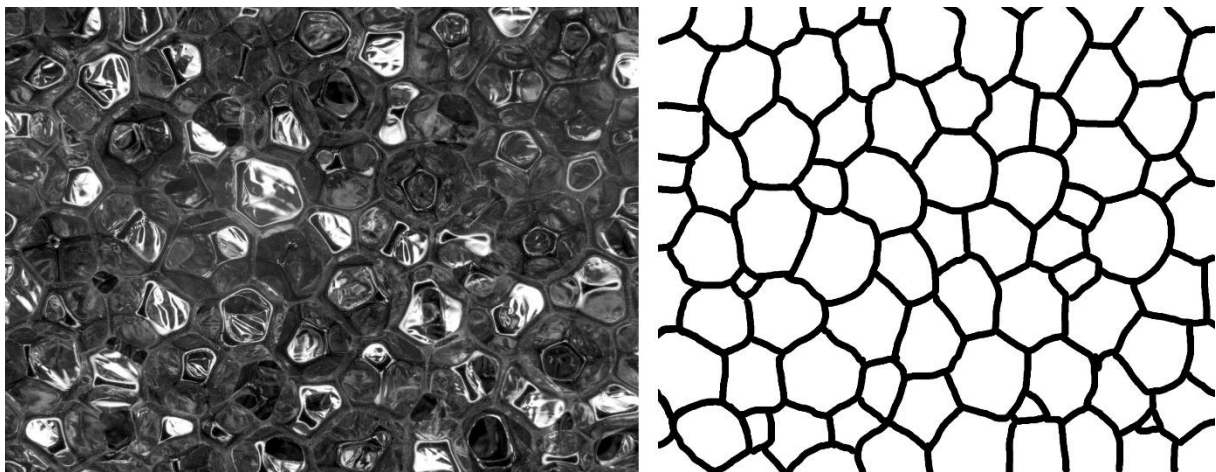


Bild 5.4 Vergleich der Beleuchtungsarten zur Analyse von PUR-Schäumen

Bei der Auflichtmikroskopie ist keine klare Unterscheidung zwischen Poren und PUR-Material möglich. Außerdem beträgt die Probenpräparations- sowie Durchführungsdauer über 24 Stunden, sodass die Auflichtmikroskopie als geeignetes Verfahren ausgeschlossen werden kann. Mithilfe der Computertomographie lässt sich die Schaumstruktur am besten abbilden, jedoch liegen die Anschaffungskosten der Geräte bei 200.00 bis 400.000 €, was insbesondere KMU vor Herausforderungen stellt. Sowohl bei der Durchlichtmikroskopie als auch bei der Dunkelfeldaufnahme ist die Gesamtdauer sehr niedrig und auch die Schaumstruktur ist gut erkennbar. Da die Anschaffungskosten bei der Dunkelfeldaufnahme lediglich bei etwa 800 € liegen, eignet sich diese am besten und wird im Folgenden zur Bildaufnahme der PUR-Schaumstruktur genutzt.

#### 5.4 Schaumstrukturanalyse mittels neuronaler Netze

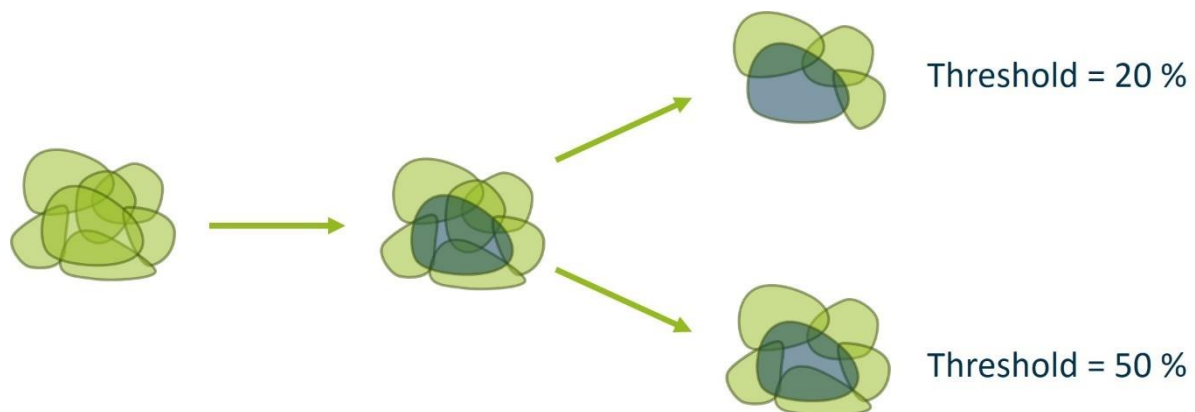
Ein Teil der in Kapitel 5.3 beschriebenen generierten Bilder wird als Trainingsbasis für ein künstliches neuronales Netz genutzt. Das Training neuronaler Netze zur Segmentierung der unterschiedlichen Schaumstrukturbilder erfordert eine umfangreiche Trainingsdatenbasis. Zur Erstellung dieser Trainingsdatenbasis wurden ausgewählte Bilder mit Hilfe der kostenfreien open-source Software GIMP händisch annotiert. Hierbei wurde auf die Originalaufnahmen eine Maske gelegt und die erkennbaren Zellen manuell segmentiert. Im Anschluss lag ein Paar aus Originalbild und Segmentierung vor, welches später im supervised-learning Ansatz für das Netztraining der automatischen Segmentierung verwendet werden konnte. Die händisch erstellten Segmentierungsbilder besaßen darüber hinaus die gleiche Auflösung und das gleiche Seitenverhältnis wie die Originalbilder. In Bild 5.5 ist exemplarisch ein Bildpaar dargestellt, das durch die händische Annotation erstellt wurde. Die schwarzen Pixel repräsentieren die Zellstegbereiche, während die weißen Pixel Zellen darstellen.



*Bild 5.5 Erstellung von Trainingsdaten durch eine manuelle Annotation*

Oftmals war die Erkennbarkeit der Schaumzellen nicht vollkommen eindeutig, da sich mehrere Schaumzellen überlagerten. Daher wurden Annotationsregeln für eine reproduzierbare Annotation festgelegt. In Bild 5.6 sind die Besonderheiten der Annotation schematisch dargestellt. Wird ein Schwellenwert von beispielsweise 20 % eingestellt, werden alle Zellen, die zu mehr als 20 % von anderen Zellen im Hintergrund verdeckt werden, nicht annotiert. Wird der Schwellenwert zu niedrig gewählt, kann dies im späteren Netztraining dazu führen, dass Zellagglomerate bestehend aus mehreren größeren überlagernden Zellen als viele kleine Zellen erkannt werden und somit fehlerhafte Ergebnisse aus der Analyse der automatisierten Schaumstruktur gewonnen werden. Wird der Schwellenwert mit beispielsweise 50 % zu hoch gewählt, werden viele Zellen nicht annotiert, was erneut zu fehlerhaften Ergebnissen führt. In den weiteren Untersuchungen wurde der Schwellenwert auf

35 % gesetzt, da hiermit die Schaumzellen bei dem untersuchten Material am besten erkannt wurden.



*Bild 5.6 Annotationsregeln für eine Systematische Zellerkennung*

Zur Verbesserung der Zellsegmentierung gegenüber den schwarz-weiß annotierten Bildern, wurde eine Nachbearbeitung der annotierten Bilder mit der StarDist-Bibliothek durchgeführt. Diese Python-Bibliothek wurde vom Max-Planck-Institut für molekulare Zellbiologie und Genetik ursprünglich für die Detektion von biologischen Zellen in Gewebe entwickelt [SWBM18]. Die StarDist-Bibliothek verwendet sternförmig-konvexe Polygone zur Repräsentation der einzelnen Zellen. Hierbei kann die Anzahl der Kanten des Polygons frei gewählt werden, um die Darstellungsgenauigkeit auf Kosten der Auswertungsgeschwindigkeit anzupassen. Als Kompromiss zwischen hoher Detailtreue und einer schnellen Auswertung, wie sie für eine Inline-Anwendung der Schaumstrukturanalyse erforderlich wäre, wurden 16-Kanten-Polygone gewählt, die angewendet auf die annotierten Schaumbilder zu einer sehr guten Repräsentation der Schaumzellen führten.

Die Anpassung der Polygone an die individuellen Zellen erfolgt bei StarDist anhand von zwei verschiedenen Unterteilungen. Zunächst wird eine Wahrscheinlichkeitskarte aus den annotierten Bildern generiert. In dieser Wahrscheinlichkeitskarte wird jedem Pixel der Schaumbilder eine Wahrscheinlichkeit zugeordnet, ein Zellmittelpunkt der jeweiligen Schaumzellen zu sein ( $P(x)$ ). Ein Beispiel einer solchen Karte für eine Annotation eines Schaumbildes ist in Bild 5.7 dargestellt.

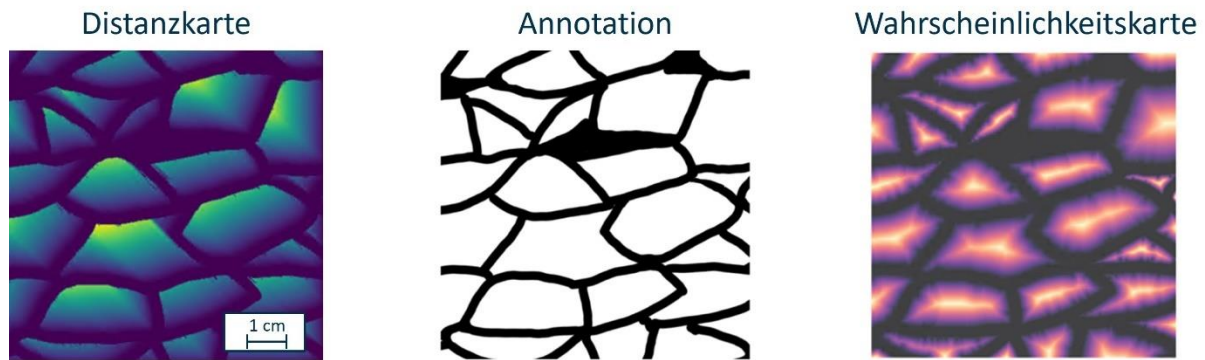
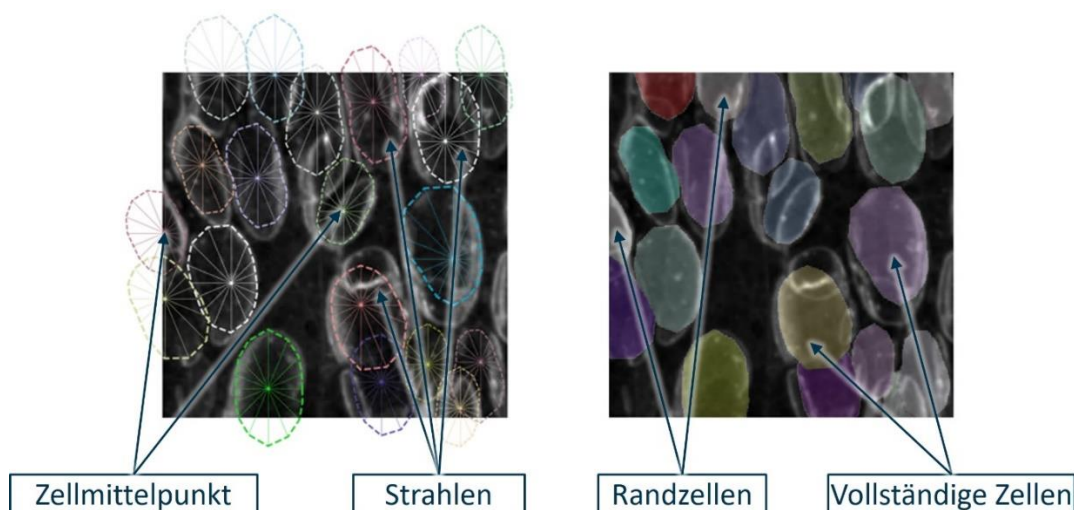


Bild 5.7 Exemplarische Distanz- und Wahrscheinlichkeitskarte für ein annotiertes Schaumbild bei Verwendung der StarDist-Bibliothek

Neben den Wahrscheinlichkeitsarten werden die Annotationen zusätzlich in mehrere Abstandskarten unterteilt. Da die Approximationen der Schaumzellen durch 16-Kanten-Polygone erfolgten, wurden für jede Annotation 16 einzelne Abstandskarten berechnet, in denen der Abstand  $D(x, \phi)$  jedes Pixels zum nächsten erwarteten Zellsteg in eine der Richtungen  $\phi = n \cdot \frac{360^\circ}{16}$ ,  $\forall n \in [0,15]$  vorhergesagt wird. Daher wird jeder Pixel auf jeder der 16 Abstandskarten mit einem speziellen Abstand dargestellt.

Auf die generierte Wahrscheinlichkeitskarte wurde daraufhin eine non-maximum-suppression angewendet, um eine Überlagerung mehrerer unterteilter Zellen zu unterdrücken. In Kombination mit den Distanzkarten konnten daraufhin für jede der unterteilten Zellen ein 16-Kanten-Polygon approximiert werden, um die Form und Größe der Zellen zu bestimmen. In Bild 5.8 ist exemplarisch für einen Schaumausschnitt die mit StarDist durchgeführte Unterteilung dargestellt. Auf der linken Seite sind die ausgewerteten stern-konvexen Polygone als Überlagerung mit der Originalaufnahme zu sehen, während auf der rechten Seite die für die nachfolgende Auswertung genutzten unterteilten Zellbereiche in verschiedenen Farben dargestellt werden.



*Bild 5.8 Approximation der Zellen als 16-Kanten-Polygone*

Die Zellen werden in Randzellen, die Kontakt mit dem Rand des ausgewerteten Bereichs haben, und in Zellen, die sich in der Mitte des Bildes (vollständige Zellen) befinden, unterteilt. Aus den unterteilten Zellen wurden in der Nachbearbeitung die in Tabelle 5.2 dargestellten Eigenschaften extrahiert.

Parameter	Einheit	Berechnungsweise
Zellanzahl	[-]	Anzahl der segmentierten Zellen im Bild
Anzahl vollständiger Zellen	[-]	Anzahl der segmentierten Zellen im Bild, die nicht mit dem Bildrand kollidieren
Mittlere Zellfläche	[mm <sup>2</sup> ]	Mittelwert der Fläche pro vollständige Zelle
Mittlere Exzentrizität	[mm]	Mittelwert der Wurzel aus der quadratischen Hauptachsenlänge minus der quadratischen Nebenachsenlänge
Mittlere Anisotropie	[-]	Mittelwert des Quotienten aus Hauptachsenlänge und Nebenachsenlänge

*Tabelle 5.2: Auswerteparameter bei der Analyse der Schaummorphologie*

Für eine automatisierte Schaumstrukturanalyse ist es erforderlich, dass der händische Annotationsprozess durch ein neuronales Netz ersetzt wird. Dafür wurde ein neuronales Netz trainiert, das die diskutierten 16 Distanzkarten sowie die Wahrscheinlichkeitskarte direkt auf Basis der Originalbilder berechnen kann. Dieses neuronale Netz wurde in der Programmiersprache Python und unter Verwendung der Stardist-Bibliothek sowie dem Keras-Modul der Open-Source-Plattform Tensorflow für maschinelles Lernen implementiert. Als Architektur des neuronalen Netzes wurde eine Autoencoder-Struktur gewählt. In dieser wird das eingehende Rohbild zunächst stufenweise auf die Kernmerkmale heruntergebrochen und anschließend zu den 16 Distanz- und der Wahrscheinlichkeitskarte aufgebaut.

Für eine zusätzliche Verbesserung und synthetische Erweiterung der Trainingsdaten werden in jeder Trainingsiteration zufällig Bildaugmentierungen durchgeführt. Durch die Anwendung von z. B. Streckungen, Spiegelungen, Rotationen oder Kontrastanpassungen auf die Bildpaare wird das künstliche neuronale Netz robuster hinsichtlich der Eingangsdaten und ein sogenanntes Overfitting, welches zu einer sehr guten Performance des Netzes für die Trainingsdaten, aber schlechten Performance für neue Bilder führen würde, wird vermieden (Bild 5.9).

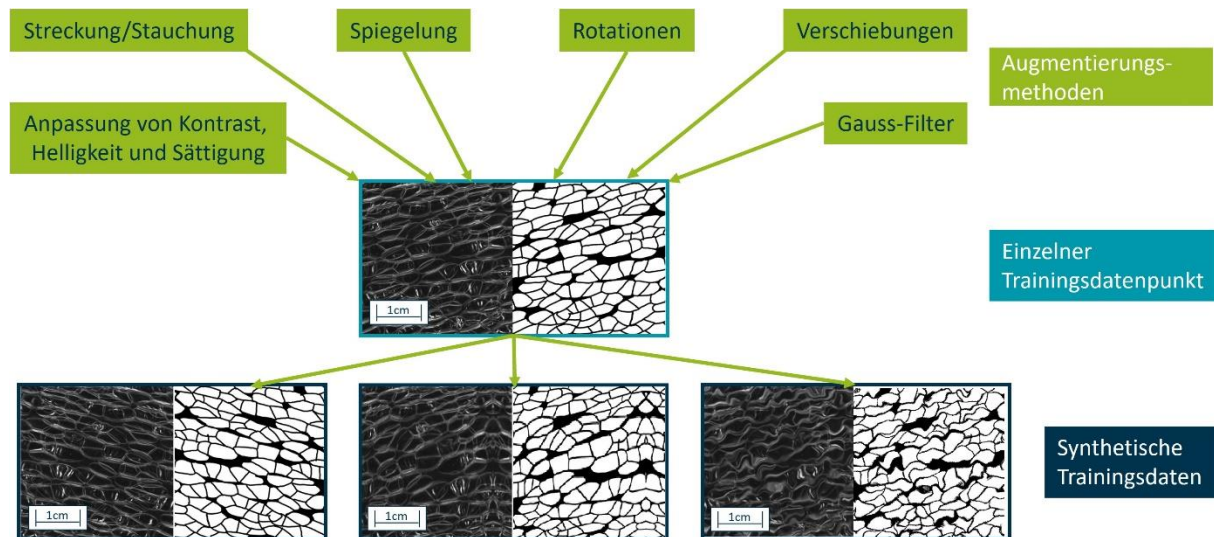


Bild 5.9 Bildaugmentierung während des Trainings

Nach vollständigem Abschluss des Trainings ist das künstliche neuronale Netz in der Lage Schaumstrukturen anhand von aufgenommenen Bildern vollkommen automatisch zu analysieren (Bild 5.10).

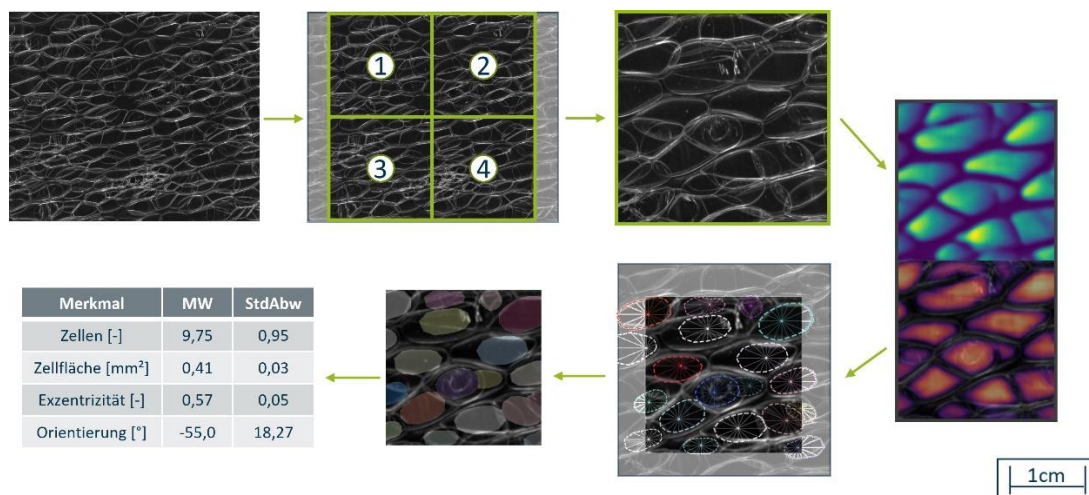


Bild 5.10 Auswertungsprozess der Schaummorphologie

Innerhalb von wenigen Sekunden wird das Originalbild in quadratische Segmente unterteilt, die Wahrscheinlichkeit von vorliegenden Zellen an den jeweiligen Positionen bestimmt und Schaumeigenschaften wie beispielsweise die Porosität, Zellgrößenverteilung und Orientierungen automatisch bestimmt (Tabelle 5.3). Die gewonnenen Informationen werden anschließend an das Materialmodell übertragen.

Versuchspunkt [-]	Zellanzahl [-]	Mittlere Zellfläche [mm <sup>2</sup> ]	Mittlere Exzentrizität [mm]	Mittlere Anisotropie [-]
Schaum 1	97	0,0904	0,0959	1,3577
Schaum 2	436	0,0300	0,1307	1,5576
Schaum 3	732	0,0204	0,1392	1,6047
Schaum 4	908	0,0170	0,1233	1,6526
Schaum 5	984	0,0187	0,1452	1,6744

Tabelle 5.2: Exemplarische Ergebnisse nach der Analyse durch das neuronale Netz

### 5.5 Verknüpfung eines Materialmodells mit der realen Schaummorphologie

Zur Vorhersage der mechanischen Eigenschaften von geschäumten Polyurethanen wurde das reguläre halbempirische Gibson-Ashby-Modell eingesetzt, das einen Zusammenhang zwischen dem Elastizitätsmodul des Schaumes  $E^*$  und dem Elastizitätsmodul der Matrix  $E_s$  wiedergibt (Gleichung 5.3). Der Faktor  $\Phi$  bildet das Verhältnis zwischen der Gesamtmasse der Matrix und der Matrixmasse in den Zellstegen. Bei offenzelligen Schäumen gilt  $\Phi = 1$ , wodurch die beiden hinteren Terme entfallen. Zur Berechnung werden weiterhin noch die Dichte des Schaumes  $\rho^*$ , die Dichte des Matrixmaterials  $\rho_s$ , die Dichte des Gases in den Zellen  $\rho_0$  und die Querkontraktionszahl  $\nu^*$  des Schaumes benötigt.

$$\frac{E^*}{E_s} \approx \phi^2 \left( \frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^2 + (1 - \phi) \frac{\rho^*}{\rho_s} + \left( \frac{\rho_0}{E_s} \right) \frac{(1 - 2\nu^*)}{1 - \left( \frac{\rho^*}{\rho_s} \right)} \quad (\text{Gl. 5.3})$$

Das Gibson-Ashby-Modell wurde mit einer kubischen Einheitszelle modelliert und mithilfe des FEM-Programms ABAQUS der Firma Dassault Systèmes, Vélizy-Villacoublay, Frankreich, aufgebaut. Die zuvor bestimmten Parameter wie die Dichte, Querkontraktionszahl und die mechanischen Eigenschaften des kompakten Materials wurden dem Modell für die Matrix zur Verfügung gestellt. Zur Bestimmung der mechanischen Eigenschaften des geschäumten Materials wurden dem Modell zusätzlich die ermittelten Parameter der realen Schaummorphologie als Eingangsparameter übertragen. Diese wurden zuvor durch aufgenommene Bilder der Schaumstruktur, eine anschließende digitale Bildverarbeitung sowie eine Auswertung durch ein künstliches neuronales Netz ermittelt.

Zunächst wurde der in Kapitel 5.2 beschriebene 1B-Zugstab nach DIN EN ISO 1798 und seine Eigenschaften im Simulationsmodell definiert. In Anlehnung an tatsächliche Zugprüfungen wurde der Schulterzugstab an einer der beiden Einspannstellen fixiert und blieb an der anderen Einspannstelle beweglich (Bild 5.11). Anschließend wurde die Bauteilgeometrie in einzelne Segmente unterteilt und ein Referenzpunkt zur Krafteinleitung bzw. für eine Verschiebung angelegt.

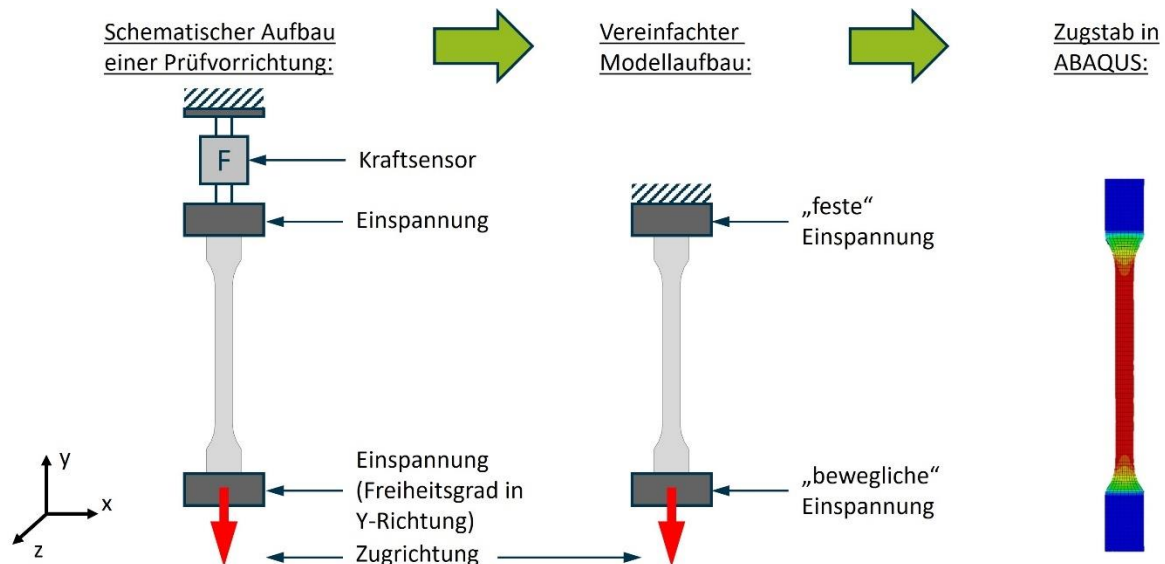


Bild 5.11 Struktur-Simulation in ABAQUS

Als Randbedingungen für das Simulationsmodell wurde vorgegeben, dass der Schulterzugstab am festen Ende vollständig im Raum fixiert ist und somit keine Freiheitsgrade mehr vorliegen. Am verfahrbaren Ende war der Schulterzugstab zwar ebenfalls eingespannt, blieb aber in y-Richtung frei beweglich. Beim Aufbringen einer definierten Zuglast bzw. alternativ einer Verschiebung am Referenzpunkt des beweglichen Endes wurde so gewährleistet, dass im prüfparallelen Bereich eine homogene Verformung vorliegt. Wie bei den durchgeführten Zugprüfungen wurde eine Verschiebung von 90 mm vorgegeben, was einer Dehnung von 75 % entspricht. Eine Temperaturabhängigkeit des Materialverhaltens wurde nicht berücksichtigt.

Anschließend wurde dem Schulterzugstab ein Mesh zugewiesen, sodass dieser in einzelne Elemente unterteilt wurde. Als Elementtyp wurde C3D8 (Hexagonal-Elemente mit 8 Integrationspunkten) gewählt. Die hexagonförmigen Elemente wiesen einen Querschnitt von 1 mm x 1 mm und eine Dicke von 0,2 mm auf.

In ABAQUS können neben dem Standardmodul eigene Funktionalitäten in Form von USER-Subroutinen hinzugefügt werden. Unter Beachtung der notwendigen Ein- und Ausgangsgrößen können diese individuell an die Situation und Problemstellung angepasst werden. Die Kommunikation erfolgt über die Programmiersprache FORTRAN.

Die USER-Subroutine UMAT stellt die allgemeine Form der Materialmodell-Implementierung in ABAQUS dar und ist für alle Materialien anwendbar. Sie ist für die vollständige Materialbeschreibung zuständig und ermöglicht somit die Implementierung beliebiger Materialmodelle. Neben der Definition des Spannungstensors, ist bei dieser USER-Subroutine außerdem die Definition der Jacobi-Matrix  $J = \det(C)$  gefordert.

Bevor das Materialmodell implementiert wurde, mussten die in Kapitel 5.4 durch das neuronale Netz ermittelten Schaumeigenschaften eingeladen werden. Das Resultat der Schaumauswertung war eine Text-Datei, die jedem Element des FEM-Netzes der Struktursimulation anhand der Elementnummer ihre individuellen Eigenschaften zuweist. Die USER-Subroutine UEXTERNALDB geht in der Text-Datei alle Zeilen der Reihe nach durch und liest die benötigten Informationen aus. Mittels der Variablen ELNUM (Elementnummer) wurden diese an die darauffolgende USER-Subroutine übergeben.

Da entscheidendes Ergebnis der Struktursimulation der E-Modul ist und dieser bei Zugprüfungen laut Norm im linear-elastischen Bereich zwischen 0,05 % und 0,25 % Dehnung bestimmt wird, wird auch im Simulationsmodell von linear-elastischem Materialverhalten ausgegangen. Plastische Verformungen, ein eventuell auftretender Bruch des Bauteils und ähnliches können nicht dargestellt werden. Es besteht jedoch die Möglichkeit, das Simulationsmodell mit diesen Optionen bei Notwendigkeit zu erweitern.

Nach den abgeschlossenen Berechnungen der Struktursimulation werden die Ergebnisse über den ODB field output ausgelesen. Hierfür wird als Position „Unique Nodal“ und anschließend die Reaction force in Längsrichtung des Schulterzugstabs ausgewählt. Am Referenzpunkt werden daraufhin die Ergebnisse geplottet und über die Funktion Report XY Data in eine rpt-Datei exportiert. Diese kann mit einem Texteditor geöffnet werden.

In Bild 5.12 ist ein Vergleich der Simulationsergebnisse mit realen Zugversuchen dargestellt. Die durchgezogenen Kurven stellen jeweils die Zugprüfungen dar. Die gestrichelten Kurven sind die dazugehörigen Simulationsergebnisse. Wie zu erwarten, werden die Kurvenverläufe des kompakten Materials durch die Simulationsergebnisse im elastischen Bereich sehr gut getroffen, da unter anderem die mechanischen Eigenschaften des kompakten Materials bereits als Eingangsparameter vorliegen (links). Im Diagramm auf der rechten Seite sind exemplarische Kurvenverläufe der geschäumten Proben dargestellt, die bei unterschiedlichen Prozesspunkten hergestellt wurden und entsprechend unterschiedliche morphologische sowie mechanische Eigenschaften aufweisen. Hier weichen die Simulationsergebnisse von den realen Messwerten deutlicher ab.

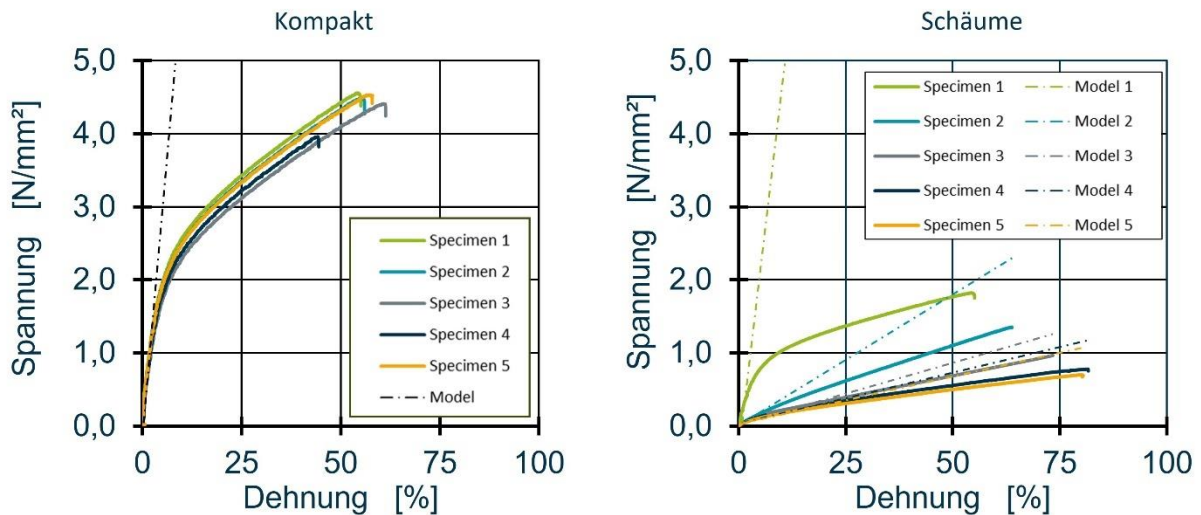


Bild 5.12 Vergleich der Simulationsergebnisse mit den Zugversuchen

Bei Betrachtung des geringen Dehnungsbereichs, da bisher nur der linear-elastische Bereich modelliert werden kann, nehmen die Kurven einen Verlauf wie in Bild 5.13 dargestellt an. Es ist zwar nach wie vor eine klare Tendenz erkennbar, jedoch weichen die Simulationsergebnisse von den realen Messwerten um bis zu 10 % ab. Dies variiert je nach Prozesspunkt.

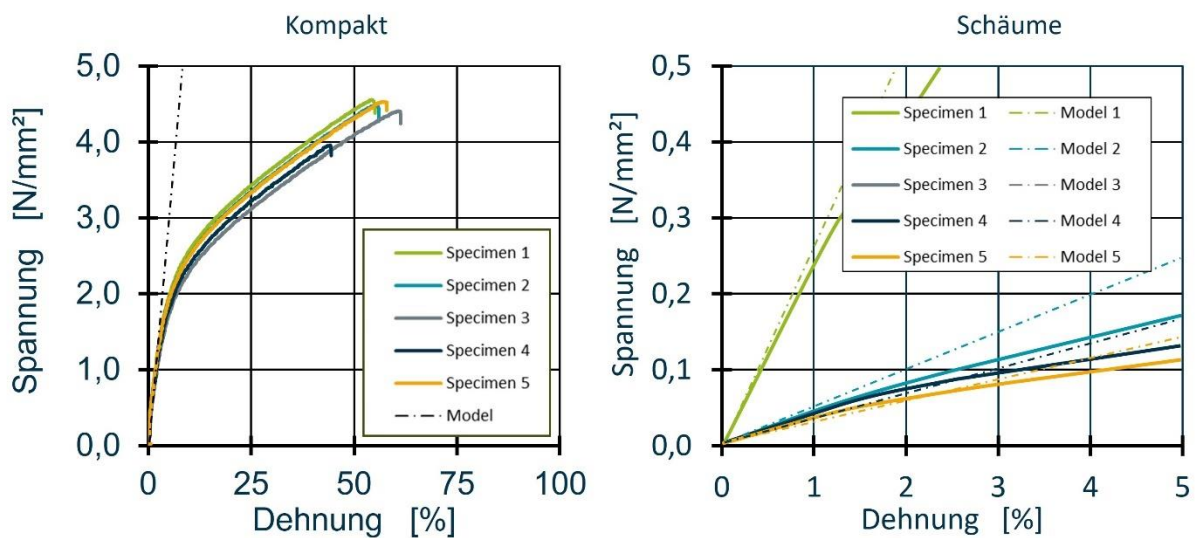


Bild 5.13 Vergleich der Simulationsergebnisse mit den Zugversuchen im Bereich der geringen Dehnungen

Grund hierfür könnte die nicht optimal eingestellte Segmentierung des Simulationsmodells sein. Der Querschnitt des untersuchten Zugstabs wird in Segmente aufgeteilt, für die die Eigenschaften des Schaums getrennt ermittelt werden. Dabei werden der Aufwand und die erzielbare Abbildungsgüte gegenübergestellt. Sind die Segmente zu klein eingestellt, sind mehr Einzelauswertungen notwendig und die Gesamtdauer erhöht sich zu sehr. Sind die Segmente hingegen zu groß eingestellt, kann die geforderte Abbildungsgüte nicht mehr erreicht werden. Die Größe der zu untersuchenden Segmente wird iterativ bestimmt, um die

geeignete Segmentgröße bei der jeweils vorliegenden Porengröße zu erhalten. Das Vorgehen der Segmentgrößenermittlung sollte in weitergehenden Untersuchungen weiter optimiert werden, um die Abweichungen der Simulationsergebnisse von den realen Messwerten weiter zu reduzieren.

## 6 FAZIT UND AUSBLICK

Es wurde im Rahmen des Forschungsvorhaben 21787 N auf Basis des Gibson-Ashby Modelles eine Systematik entwickelt, die es durch die Berücksichtigung der realen Schaummorphologie ermöglicht, die Eigenschaften von kompaktem Matrixmaterial und geschäumten Bauteilen zu verknüpfen. Durch die Verknüpfung der realen Morphologie mit einem bestehenden Materialmodell wird ein Vorteil gegenüber bestehenden Vorhersagemöglichkeiten generiert und dadurch eine objektive Qualitätssicherungsmethode geschaffen, statt sich auf subjektive Grenzmusterkataloge zu verlassen. Die Systematik beinhaltet nach Bestimmung der mechanischen Eigenschaften des Matrixmaterials eine Auswertung der Schaummorphologie mittels Dunkelfeldaufnahme, digitaler Bildverarbeitung sowie eines künstlichen neuronalen Netzes. Aktuell liegen bei Vergleich der Ergebnisse mit realen Versuchen noch Abweichungen vor, die auf eine zu grob eingestellte Segmentierung zurückzuführen sind.

Aufbauend auf den bisherigen Ergebnissen könnte in zukünftigen Forschungsvorhaben die Segmentgrößenermittlung weiter optimiert werden, um die Abweichungen der Simulationsergebnisse von den realen Messwerten weiter zu reduzieren. Bereits vor der Optimierung der Segmentgrößenermittlung ermöglicht die entwickelte Systematik Herstellern von geschäumten Polyurethanprodukten, eine effiziente und kostengünstige Qualitätssicherung in ihre Produktion zu integrieren. Diese Qualitätssicherungsmethode basiert auf objektiven Daten und verlässt sich nicht wie bisherige Qualitätssicherungsmethoden auf subjektive Kriterien.

## 7 WIRTSCHAFTLICHE BEDEUTUNG UND NUTZEN FÜR KMU

Polyurethane gehören zu den Massenkunststoffen. Mit einer Verbrauchsmenge von ca. 18,5 Mio. t weltweit im Jahr 2016 gehören sie mengenmäßig zu den fünf meisthergestellten Kunststoffen [AH17]. Bei einem Großteil der PUR-verarbeitenden Unternehmen handelt es sich um kleine und mittelständische Unternehmen (KMU). Diese KMU kommen aus verschiedenen Branchen, wie dem Transportsektor, dem Bauwesen (z.B. Isolationskomponenten), dem Sport- und Freizeitsektor, der Medizintechnik sowie dem technischen Gerätebau [LAB+17]. Die jährliche Steigerung der gesamten verarbeiteten Menge PUR wird auf etwa 5 % prognostiziert. Dadurch besteht ein erhebliches Wachstumspotenzial für die PUR-verarbeitende Branche [Aus17]. In Deutschland, einem der größten PUR-Absatzmärkte in Europa wurde im Jahr 2013 ein Umsatz von etwa 5,1 Mrd. € erwirtschaftet [NN18, Sch13].

Trotz der weiten Verbreitung von PUR gibt es bisher noch keine Möglichkeit unter Einbeziehung der real auftretenden Schaummorphologie mit Hilfe von Materialmodellen die Bauteileigenschaften vorherzusagen. Daher muss die Qualitätssicherung über nachgeschaltete Prozesse durchgeführt werden. Das abgeschlossene Forschungsprojekt ermöglicht erstmalig eine objektive Qualitätssicherung auf Basis der Schaummorphologie im direkten Anschluss an die Produktion. Bei anderen Qualitätssicherungsmethoden, wie mechanischen Prüfungen, müssen die Probekörper häufig bei Normklima konditioniert werden, um eine Vergleichbarkeit zu gewährleisten. Dieser Zwischenschritt entfällt und Ausschussbauteile können schnell detektiert, eventuelle Störgrößen in der Produktion identifiziert und somit die Weiterproduktion effizient unterbunden werden.

Die entwickelte Systematik kann ebenfalls in der Produktentwicklung genutzt werden. Anhand technischer Spezifikationen werden mechanische und physikalische Eigenschaften definiert. Auf Basis dieser Spezifikationen kann durch Nutzung des Materialmodells auf die erforderliche Schaummorphologie des Bauteils geschlossen werden. Mit Hilfe einer Schäumsimulation können diese Anforderungen überprüft werden. Dieses Vorgehen kann den Entwicklungsprozess beschleunigen sowie zeit- und kostenintensive Vorversuche verringern.

Die Materialentwicklung wird aktuell größtenteils von den Materialherstellern übernommen. KMU beziehen ihre Materialien von Systemhäusern oder von den großen Materialherstellern. Die Entwicklung von speziell für eine Anwendung benötigten Materialien ist durch die geringe Abnahmemenge für Materialhersteller oftmals nicht rentabel. Mit der angestrebten Systematik ist es möglich, eine effiziente Anpassung der Materialien auf Basis von bekannten Formulierungen durch gezielte Additivierung umzusetzen. Damit wird KMU ermöglicht, bestehende Produkte zu verbessern und so dauerhaft konkurrenzfähig zu bleiben. Insgesamt

ergeben sich bei Anwendung der in diesem Forschungsvorhaben entwickelten Systematik Einsparpotenziale für PUR-verarbeitende Unternehmen. Es wird eine zeit- und kosteneffiziente Möglichkeit zur Qualitätssicherung und Produktentwicklung in einer Vielzahl von Branchen geschaffen.

## 8 PLAN ZUM ERGEBNISTRANSFER IN DIE WIRTSCHAFT

Zahlreiche Maßnahmen zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft wurden bereits durchgeführt bzw. sind noch vorgesehen und im Folgenden tabellarisch zusammengestellt.

### 8.1 Während der Projektlaufzeit durchgeführte Transfermaßnahmen

<b>Maßnahme:</b> <b>Projektbegleitender Ausschuss</b>	<b>Zeitraumen:</b> Quartale 2, 9, 10 der Projektlaufzeit
<p>Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens ist ein intensiver Dialog mit den Teilnehmern des PA vorgesehen. Um eine breite Umsetzung der Projektergebnisse zu erzielen, spiegelt der Ausschuss den potenziellen Nutzerkreis wider. In diesem sind vom Rohstoffhersteller über Anlagenhersteller bis zum Anwender in der PUR-Verarbeitung Unternehmen vertreten, die einen repräsentativen Querschnitt innerhalb der Prozesskette darstellen und sich aktiv mit der Formschaumherstellung beschäftigen. Über die Projektlaufzeit sind drei Ausschusstreffen geplant, bei denen mit den Teilnehmern die Zielsetzung, die Zwischenergebnisse und Endergebnisse diskutiert werden. Auf Basis dieses Dialogs können die Firmen das erworbene Wissen in ihre betriebliche Praxis übernehmen.</p> <p><i>Durchgeführt:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 1. PA am 21.07.2021 (16 Teilnehmer (davon 11 KMU))</li> <li>- 2. PA am 28.04.2023 (16 Teilnehmer (davon 7 KMU))</li> <li>- 3. PA am 26.09.2023 (3 Teilnehmer (davon 1 KMU))</li> </ul>	
<b>Fachbeiratsgruppe</b>	Jährlich im November
<p>In den jährlich stattfindenden Fachbeiratsgruppen werden den Mitgliedern der Fördervereinigung des Instituts für Kunststoffverarbeitung die aktuellen Forschungsvorhaben vorgestellt und gemeinsam diskutiert. Der Teilnehmerkreis umfasst ca. 290 Mitgliedsfirmen, von denen der wesentliche Teil klein- und mittelständisch strukturiert ist. Somit wird der potenzielle Nutzerkreis des Vorhabens direkt angesprochen. Des Weiteren können über die intensive Diskussion in diesem Forum neue Aspekte im Forschungsprojekt berücksichtigt und somit die industrielle Relevanz des Forschungsvorhabens weiter akzentuiert werden.</p> <p><i>Durchgeführt:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Vorstellung auf der Fachbeiratsgruppensitzung PUR-Technologie am 09.11.2021 (28 Teilnehmer)</li> <li>- Vorstellung auf der Fachbeiratsgruppensitzung Composite am 10.11.2021 (20 Teilnehmer)</li> <li>- Vorstellung auf der Fachbeiratsgruppensitzung PUR-Technologie am 08.11.2022 (23 Teilnehmer)</li> <li>- Vorstellung auf der Fachbeiratsgruppensitzung Composite am 09.11.2022 (24 Teilnehmer)</li> <li>- Vorstellung auf der Fachbeiratsgruppensitzung PUR-Technologie am 07.11.2023 (26 Teilnehmer)</li> <li>- Vorstellung auf der Fachbeiratsgruppensitzung Composite am 08.11.2023 (26 Teilnehmer)</li> </ul>	
<b>Dialog mit Fachpersonal der Wirtschaft</b>	Kontinuierlich während der Laufzeit

<p>Die Ergebnisse des Forschungsprojekts werden mit Ingenieurbüros, Anlagenherstellern, Verarbeitern, Anwendern und Rohstoffherstellern im Dialog diskutiert. Dies erfolgt durch Besuch vor Ort oder durch turnusmäßig stattfindende Fachgespräche im Rahmen der jährlich durchgeführten Fachbeiratsgruppen, des zweijährig durchgeführten Internationalen Kunststofftechnischen Kolloquiums des IKV, Messen und der vom bzw. mit dem IKV durchgeführten Fachtagungen. Dabei werden Unternehmen, die zum potenziellen Nutzerkreis dieses Forschungsvorhabens gehören, gezielt angesprochen.</p> <p><i>Durchgeführt:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- <i>Präsentation des Projekts im Rahmen der internationalen Fachtagung des IKV „International Symposium: Polyurethanes – Trends in PU-Processing“ am 29.03.2023</i></li> <li>- <i>Präsentation des Projekts im Rahmen des internationalen Kolloquiums Kunststofftechnik des IKV am 28.02.2024</i></li> </ul>	
<b>Hinweise in der Fachpresse</b>	Kontinuierlich während der Laufzeit
<p>Über die IKV eigene Abteilung für Öffentlichkeitsarbeit wird das Projekt in Form von Pressemitteilungen und Fachartikeln einer breiten Öffentlichkeit bekannt gemacht. Derzeit umfasst der Verteiler über 40 Fachzeitschriften im Bereich der Kunststofftechnik und des Maschinenbaus.</p> <p><i>Durchgeführt:</i> HOPMANN, CH.; KREMER, E.; FOERGES, D.: KI-unterstützte Qualitätssicherung - Wie Eigenschaften von PU-Schäumen vorhersagbar werden. KGK Kautschuk Gummi Kunststoffe 76 (2023) 4, S. 40</p>	
<b>Information der Mitgliedsunternehmen der Fördervereinigung des IKV</b>	IKV-Mitteilungen: Vierteljährlich während der Projektlaufzeit Jahresbericht: 1. Quartal
<p>Neben der wiederholten Vorstellung der Ergebnisse auf den jährlichen Fachbeiratsgruppen des IKV (s. o.) erfolgt weiterhin regelmäßig eine Vorstellung des Projekts und eine Dokumentation der abgeschlossenen wissenschaftlichen Arbeiten sowie ein Hinweis auf den Abschlussbericht in den vierteljährlich erscheinenden IKV-Mitteilungen, die an die ca. 290 Mitgliedsfirmen der Fördervereinigung des IKV verschickt werden sowie im Jahresbericht.</p> <p><i>Durchgeführt:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- <i>Veröffentlichung des Projektes im Mitglieder magazin „IKVinsight“</i></li> <li>- <i>Vorstellung auf der Webseite des IKV</i></li> <li>- <i>Vorstellung von Projektergebnissen im Jahresabschlussbericht 2022 des IKV</i></li> <li>- <i>Vorstellung von Projektergebnissen im Jahresabschlussbericht 2023 des IKV</i></li> </ul>	
<b>Forschungsbericht</b>	1. Quartal nach Abschluss des Forschungsvorhabens
<p>Die erzielten Ergebnisse sind in einem Zwischenbericht sowie in dem vorliegenden Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben zusammengefasst. Dieser Forschungsbericht steht interessierten Unternehmen zur Verfügung wodurch die erzielten Ergebnisse für die Öffentlichkeit zugänglich sind.</p>	

<b>Akademische Lehre / Personaltransfer</b>	Kontinuierlich während der Laufzeit
<p>Viele Untersuchungen, die im Rahmen des Forschungsprojekts durchgeführt wurden, sind durch die Unterstützung von Studenten durchgeführt worden. So konnten mehrere wissenschaftliche Arbeiten durch Studenten angefertigt werden. Darüber hinaus sind die erzielten Ergebnisse in die Ausbildung junger Ingenieure eingeflossen.</p> <p><u>Forschungslabor:</u></p> <p>SCHAFFELD, T.: <i>Untersuchungen der morphologischen Eigenschaften eines Polyurethanschaumes mittels neuronaler Netze</i>. Institut für Kunststoffverarbeitung, RWTH Aachen, unveröffentlichtes Forschungslabor, 2024 – Betreuer: E. Kremer</p> <p><u>Bachelorarbeit:</u></p> <p>BENLI, M.: <i>Aufbau einer Qualitätssicherungsstrategie zur Vorhersage von Bauteileigenschaften</i>. Institut für Kunststoffverarbeitung, RWTH Aachen, unveröffentlichte Bachelorarbeit, 2024 – Betreuer: E. Kremer</p>	

## 8.2 Nach der Projektlaufzeit durchgeführte Transfermaßnahmen

<b>Maßnahme:</b> <b>Wissenschaftliche Veröffentlichung</b>	<b>Zeitraumen:</b> Q1 2023
<p>Über die IKV eigene Abteilung für Öffentlichkeitsarbeit wird das Projekt in Form von Pressemitteilungen und Fachartikeln einer breiten Öffentlichkeit bekannt gemacht. Derzeit umfasst der Verteiler über 40 Fachzeitschriften im Bereich der Kunststofftechnik und des Maschinenbaus.</p> <p><i>Durchgeführt:</i>          KREMER, E.; FOERGES, D.; DAHLMANN, R.: Property prediction of polyurethane foams considering the real foam morphology. <i>32nd International Colloquium Plastics Technology</i> (2024)</p>	
<b>Beratung von Unternehmen</b>	Während der Laufzeit / nach Abschluss
<p>Zusätzlich zu den Maßnahmen, die bereits während der Projektlaufzeit ergriffen werden, ergibt sich für interessierte Unternehmen nach Abschluss des Forschungsvorhabens die Möglichkeit, die entwickelte Methodik auch für das eigene Unternehmen in bilateralen Projekten zu nutzen und so zeit- und kosteneffizient das aufgebaute Know-How in die jeweiligen Unternehmen zu transferieren.</p>	
<b>Forschungsbericht</b>	1. Quartal nach Abschluss des Forschungsvorhabens
<p>Die Ergebnisse des Forschungsprojekts werden in einem detaillierten und ausführlichen Forschungsbericht dokumentiert. Dieser Forschungsbericht wird interessierten Unternehmen zur Verfügung gestellt. Somit kann das erarbeitete Vorgehen und die gewonnenen Erkenntnisse von den Firmen in die betriebliche Praxis transferiert werden.</p>	
<b>Dissertation</b>	Nach Projektabschluss
<p>Für den bearbeitenden wissenschaftlichen Mitarbeiter der Forschungsstelle besteht die Möglichkeit zur Promotion auf dem beantragten Forschungsthema.</p>	

## **9 NOTWENDIGKEIT UND ANGEMESSENHEIT DER GELEISTETEN ARBEIT**

Die durchgeführten Arbeiten sind in ihrem Umfang angemessen und notwendig. Wie aus den Kapiteln 1 bis 8 hervorgeht, sind im Rahmen des Forschungsprojekts umfangreiche Untersuchungen und Entwicklungen durchgeführt worden. Die Vielzahl der durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass die geleistete Arbeit und der Einsatz der Ressourcen angemessen und notwendig waren.

Aufgrund der Verzögerungen durch die internationale Knappheit von Industrierohstoffen sowie einem zwischenzeitlichen Ausfall der PUR-Dosieranlagentechnik am IKV wurde das Projekt, entsprechend dem Verlängerungsantrag, kostenneutral um sechs Monate verlängert.

Das Ziel des Vorhabens wurde erreicht.

## **10 EINSCHÄTZUNG DER REALISIERBARKEIT DES VORGESCHLAGENEN UND AKTUALISIERTEN TRANSFERKONZEPTS**

Während der drei Sitzungen des projektbegleitenden Ausschusses, der Vorstellung der Ergebnisse auf Messen und Konferenzen (z. B. Fachbeiratsgruppensitzung des IKV, IKV-Kunststoffkolloquium) und im direkten Kontakt mit Fachpersonal aus der Industrie war es möglich, den Projektfortschritt und die Projektergebnisse kontinuierlich zu verbreiten. Vertretern interessierter Industrieunternehmen konnten die Inhalte dadurch kommuniziert werden, sodass eine Diskussion möglich war. Durch Hinweise in der Fachpresse und wissenschaftlichen Veröffentlichungen in der Fachzeitschrift „KGK Kautschuk Gummi Kunststoffe“ konnte darüber hinaus ein breites Fachpublikum angesprochen werden. Da die Ergebnisse als Teil der Lehre, aber auch als Basis für studentische Arbeiten und Inhalt von studentischen Hilfstätigkeiten als Ausbildung angehender Ingenieure eingeflossen sind, wurde Studierenden ein breites Wissen über die Qualitätssicherung von PUR-Schäumen sowie die KI-unterstützte Auswertung zuteil.

Dank des breit aufgestellten Konzepts zum Wissenstransfer in die Praxis konnte somit das Ziel erreicht werden, die erarbeiteten Erkenntnisse einem breiten industriellen Nutzerkreis vorzustellen und als Grundlage für Weiterentwicklungsarbeiten in der betrieblichen Praxis verfügbar zu machen. Durch die oben benannten weiteren Transfermaßnahmen wird sichergestellt, dass auch nach Beendigung des Forschungsvorhabens die neuen Erkenntnisse der Industrie und der Wissenschaft verfügbar gemacht werden.

## **11 EINSATZ VON GERÄTEN UND WISSENSCHAFTLICH-TECHNISCHEM PERSONAL**

Zur Durchführung des Forschungsprojekts wurden durch die Forschungsstelle (IKV) 24 Personalmonate für wissenschaftliches Personal über die gesamte Laufzeit verwendet. Zudem wurden studentische Hilfskräfte über die gesamte Laufzeit des Projektes eingesetzt.

Mit der Bearbeitung des Forschungsvorhabens waren wissenschaftliche Mitarbeiter sowie studentische Hilfskräfte über der Projektlaufzeit beschäftigt und wurden dem Arbeitsaufwand entsprechend eingesetzt. Die wissenschaftlichen Mitarbeiter waren erforderlich, um die wissenschaftliche Fragestellung zu erarbeiten, die Problemstellungen in Abstimmung mit Vertretern aus Wirtschaft und Industrie zu diskutieren und Studierende zu betreuen, die im Rahmen des Projekts wissenschaftliche Arbeiten durchführten.

## 12 ABKÜRZUNGEN

### 12.1 Abkürzungen

<b>Abkürzung</b>	<b>Bedeutung</b>
bcc	kubisch-raumzentriert
fcc	kubisch-flächenzentriert
HD	Hochdruck
KMU	Kleine und mittlere Unternehmen
MDI	Methylendiphenylisocyanat
PA	Projektbegleitender Ausschuss
PUR	Polyurethan
QS	Qualitätssicherung
RIM	Reaction-Injection-Moulding

### 12.2 Formelzeichen

<b>Formelzeichen</b>	<b>Einheit</b>	<b>Bedeutung</b>
$C_{ij}$	-	Steifigkeitstensor
$E$	N/mm <sup>2</sup>	Elastizitätsmodul
$E_s$	N/mm <sup>2</sup>	Elastizitätsmodul der Matrix
$E^*$	N/mm <sup>2</sup>	Elastizitätsmodul des Schaumes
$G$	N/mm <sup>2</sup>	Schubmodul
$I$	W/mm <sup>2</sup>	Intensität
$K$	N/mm <sup>2</sup>	Kompressionsmodul
$l$	mm	Zellsteglänge
$t$	mm	Zellstegbreite
$\mu_{i,j}$	-	Schwächungskoeffizienten
$\nu$	-	Querkontraktionszahl
$\nu^*$	-	Querkontraktionszahl des Schaumes
$\rho$	g/cm <sup>3</sup>	Dichte
$\rho_s$	g/cm <sup>3</sup>	Dichte des Matrixmaterials
$\rho_0$	g/cm <sup>3</sup>	Dichte des Gases in den Zellen
$\rho^*$	g/cm <sup>3</sup>	Dichte des Schaumes
$\phi$	-	Verhältnis zwischen der Gesamtmasse der Matrix und der Matrixmasse in den Zellstegen

## 13 LITERATUR

- [ABI07] AVALLE, M.; BELINGARDI, G.; IBBA, A.: Mechanical models of cellular solids: Parameters identification from experimental tests. *International Journal of Impact Engineering* 34 (2007), S. 3-27
- [AH17] AUSTIN, A.; HICKS, D. A.: A review of the global PU industry 2016 and outlook for 2017. *PU magazine international* 14 (2017) 1, S. 3-15
- [Aus17] AUSTIN, A.: Die weltweite PU-Industrie 2014/2015 – Rückschau und Ausblick. *PU Magazin* 17 (2017) 02, S. 92-102
- [BFD+05] BENOUALI, A.H.; FROYEN, L.; DILLARD, T.; FOREST, S.; N’GUYEN, F.: Investigation on the influence of cell shape anisotropy on the mechanical performance of closed cell aluminium foams using micro-computed tomography. *International Journal of Materials Science* 40 (2005), S. 5801-5811
- [BS97] VAN DER BURG, M.; SHULMEISTER, V.: On the linear elastic properties of regular and random open-cell foam models. *Journal of Cellular Plastics* 33 (1997), S. 31-54
- [EHE08] EYERER, P.; HIRTH, T.; ELSNER, P.: *Polymer Engineering*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2008
- [GA97] GIBSON, L. J.; ASHBY, M. F.: *Cellular solids – Structure and properties*. Cambridge: Cambridge university press, 1997
- [HM12] HOPMANN, CH.; MÜLDER, C.: Inline Prüfung von Polymerschaum – Kontinuierliche Überwachung. *QZ – Qualität und Zuverlässigkeit* 9 (2012), S. 46-49
- [LAB+17] LÖVENICH, C.; ALBERS, R.; BRASSAT, L.; CHRISOCHOOU, A.; EHBING, H.; HÄTTIG, J.: Polyurethane (PUR). *Kunststoffe* 107 (2017) 10, S. 98-105
- [Lep12] LEPPKES, R.: *Polyurethane: Ein vielseitiger Spezialkunststoff*. München: Süddeutscher Verlag, 2012
- [Lim14] LIMAN, U.: Polyurethane (PUR). *Kunststoffe* 104 (2014) 10, S. 108-117
- [Mai12] MAIRE, E.: X-Ray Tomography Applied to the Characterization of Highly Porous Materials. *Annual Review of Material Research* (2012) 42, S. 163-178
- [Mül17] MÜLDER, C.: *Tomografie von Kunststoffschäumen im sichtbaren Spektrum*. RWTH Aachen, Dissertation, 2017 – ISBN: 978-3-95886-182-4
- [NN18] N.N.: Neue Impulse durch innovative PU-Anwendungen. *PU-Magazin* 18 (2018) 04, S. 209
- [RG01] ROBERTS, A.; GARBOCZI, E.: Elastic moduli of model random here-dimensional closed-cell cellular solids. *Acta Materialia* 49 (2001) 21, S. 189-197
- [Rus70] RUSCH, K.C.: Load-Compression Behavior of Brittle Foams. *Journal of Applied Polymer Science* 14 (1970), S. 1263-1276
- [Sch13] SCHLOZ, H.-W.: *Polyurethan: Erfolgreich im Wettbewerb mit anderen Werkstoffen*. München, 2013

- [SR65] SKOCHDOPOLE, R.; RUBENS L.: Physical property modifications of low-density polyethylene foams. *Journal of Cellular Plastics* 1 (1965) 1, S. 91-96
- [SS14] SRIVASTAVA, V.; SRIVASTAVA, R.: On the polymeric foams: modeling and properties. *Journal of Materials Science* 49 (2014) 7, S. 2681-2692
- [SWBM18] SCHMIDT, U.; WEIGERT, M.; BROADDUS, C.; MYERS, G.; *Cell detection with star-convex polygons* In International Conference on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention (pp. 265-273). Springer, Cham., 2018
- [WS18] WOHLMUTH, M.; SCHIEBLER, B.: Von der virtuellen Schaumzelle zum fertigen Bauteil. *Kunststoffe* 108 (2018) 8, S. 77-80
- [ZHW00] ZHU, M.; HOBDELL, J.; WINDEL, A.: Effects of cell irregularity on the elastic properties of open-cell foams. *Acta Materialia* 48 (2000) 20, S. 4893-4900