

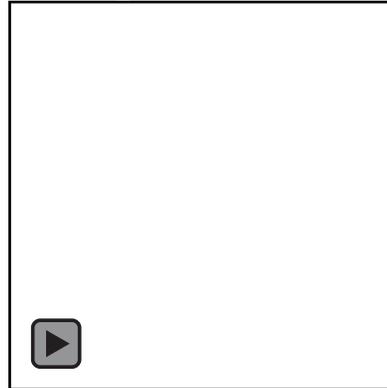
# ENTWICKLUNG NEUER LEICHTBAUWERKSTOFFE IM DIGITALEN MATERIALLABOR

Martina Hümbert, Aaron Widera, Erik Glatt, Constantin Bauer

## Einzigartige Einblicke ins Material

### Mikromechanik mit plastischer Verformung und Schädigung

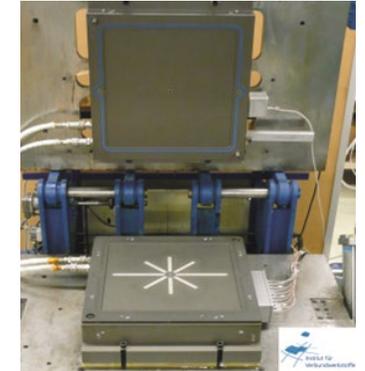
- ✓ Simulation
- ✗ Experiment



## Reduktion des experimentellen Aufwands

### Weniger zeitaufwendige Versuche

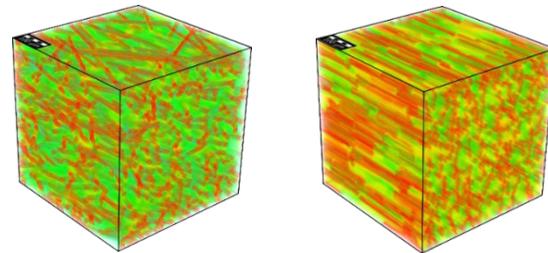
- Vorhersage physikalischer und mechanischer Eigenschaften
- Parameterstudien



### Einzelparameterstudien

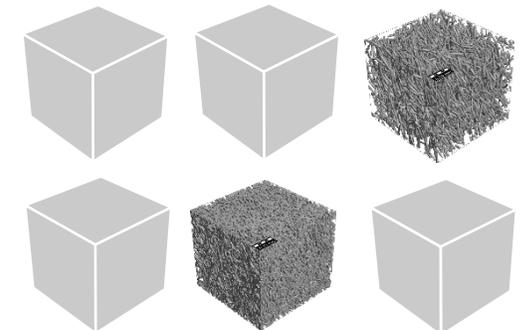
z. B. Variation der Faserorientierung ohne Änderung des Fasertyps

- ✓ Simulation
- ✗ Experiment



### Konzentration auf vielversprechendste Prototypen

- Erzeugung einer Vielzahl digitaler Prototypen
- Identifikation der vielversprechendsten Prototypen durch Simulation

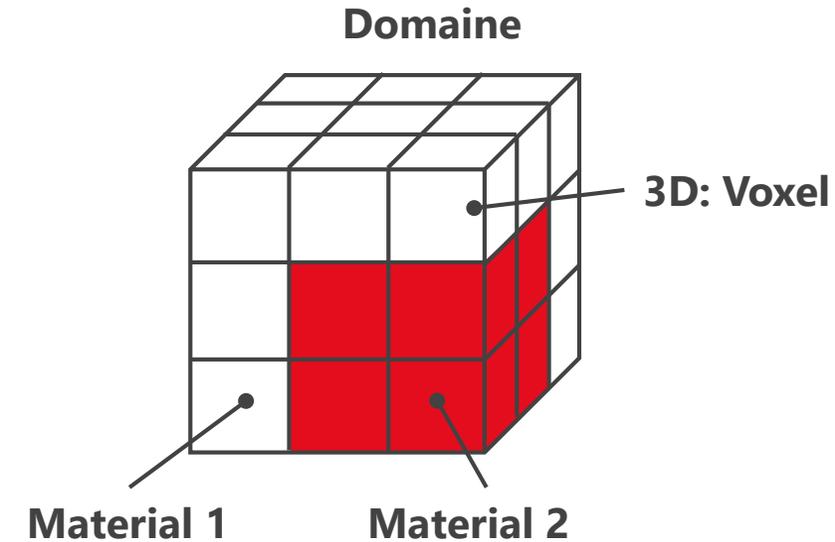


# WAS IST VOXELBASIERTE FEM?

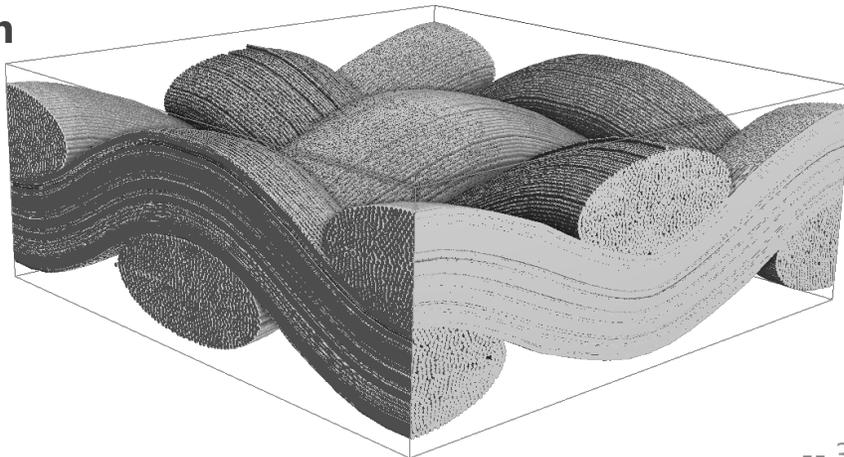
- Die Struktur besteht aus Voxeln (3D-Pixel) statt aus Elementen
- Die gesamte Domäne besteht aus einem Voxelgitter

## Vorteile von Voxeln

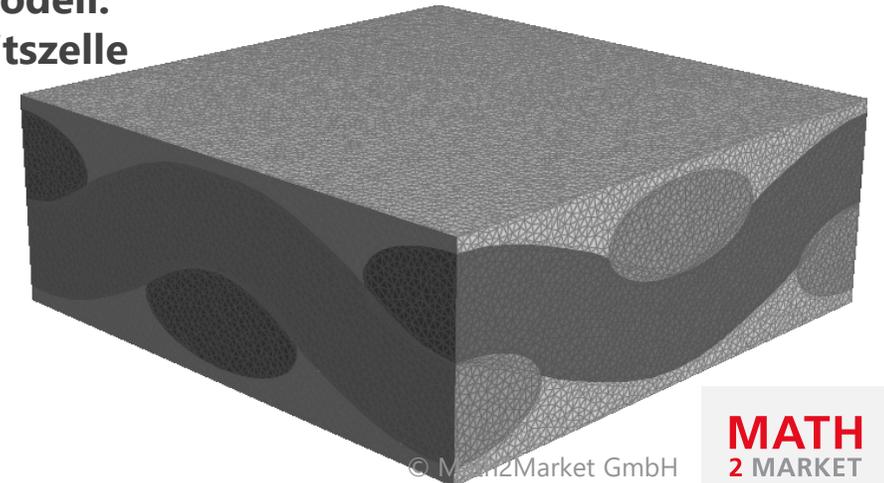
- $\mu$ CT-Voxel werden direkt in Mikrostruktur-Voxel umgewandelt
- Kein Vernetzen notwendig
- Modelle  $> 1\,000\,000\,000$  Voxel können auf einem PC gerechnet werden
- Gut parallelisierbar
- Filigrane Strukturen können aus Voxeln modelliert werden



**Voxel-Modell: Gewebe-Einheitszelle mit 1000 Filamenten pro Roving**



**Standard FE-Modell: Gewebe-Einheitszelle**

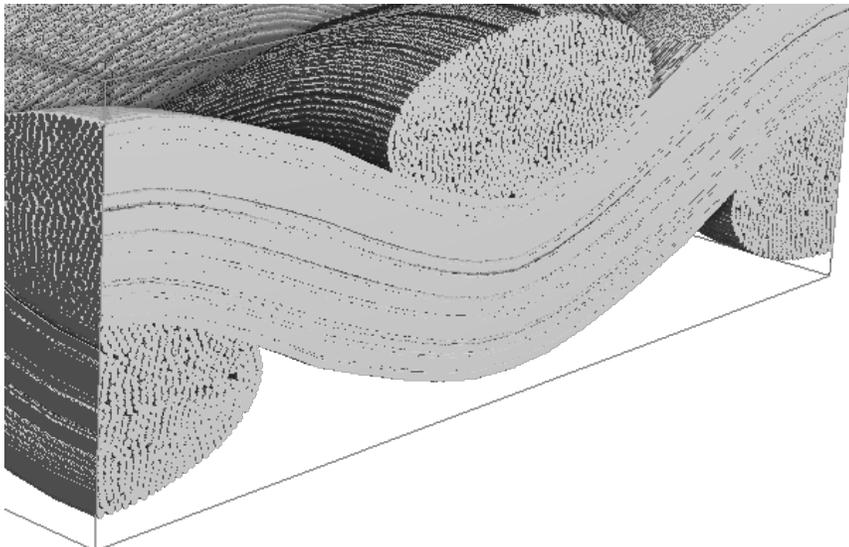


# WAS IST VOXELBASIERTE FEM?

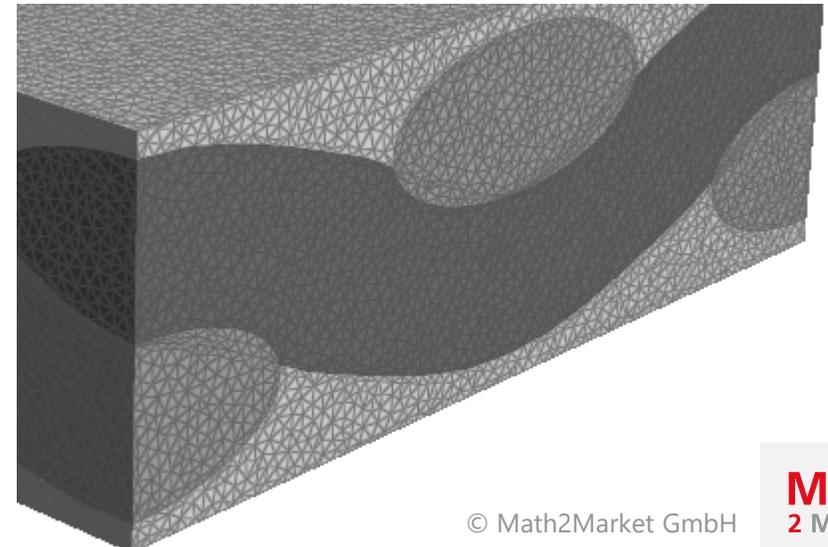
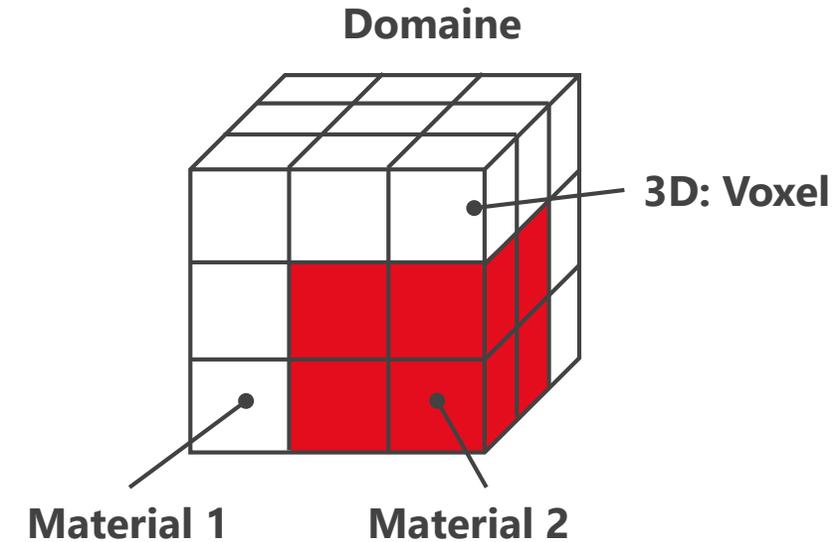
- Die Struktur besteht aus Voxeln (3D-Pixel) statt aus Elementen
- Die gesamte Domäne besteht aus einem Voxelgitter

## Vorteile von Voxeln

- $\mu$ CT-Voxel werden direkt in Mikrostruktur-Voxel umgewandelt
- Kein Vernetzen notwendig
- Modelle  $> 1\,000\,000\,000$  Voxel können auf einem PC gerechnet werden
- Gut parallelisierbar
- Filigrane Strukturen können aus Voxeln modelliert werden



GEO DICT



1. IMPORT



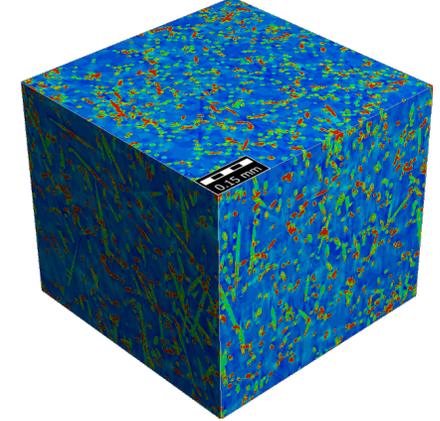
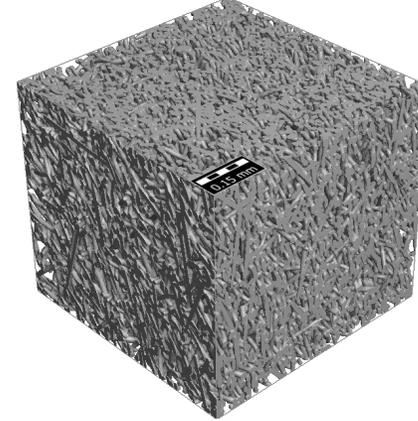
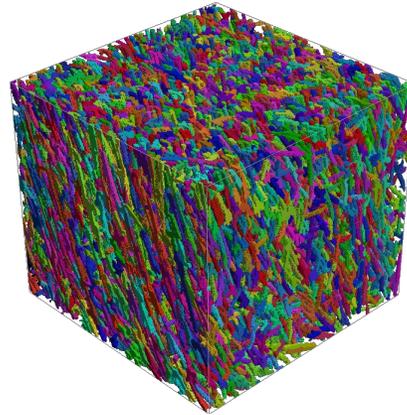
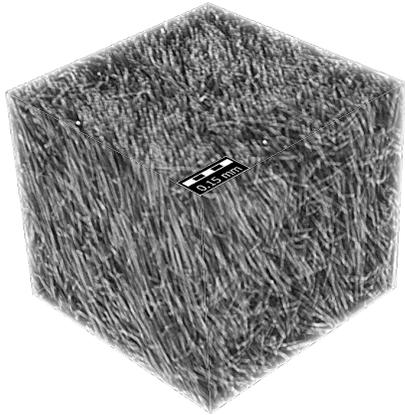
2. ANALYSE



3. MODELLIERUNG



4. DESIGN



Import von 3D-Bilddateien,  
z. B. eines  $\mu$ CT-Scans



Digitales Materialmodell

Analyse des erzeugten  
digitalen Materialmodells



Statistische Eigenschaften

Digitales Materialdesign auf  
Basis der statistischen  
Eigenschaften



Digitaler Zwilling

Parameterstudien durch  
Abwandlung des digitalen  
Zwillings



Digitale Prototypen

1. IMPORT



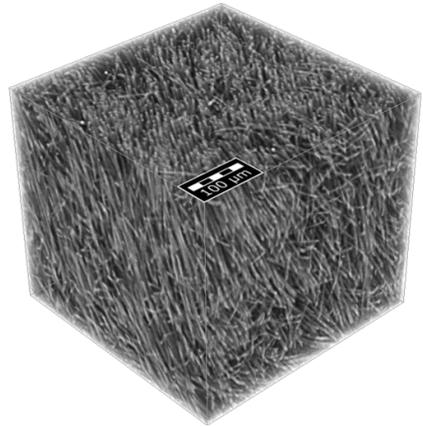
2. ANALYSE



3. MODELLIERUNG



4. DESIGN



- **Input:**  $\mu$ CT-Scan eines Ausschnitts eines Motortragers
  - Matrix: Polyamide 66,  $E=3100$  MPa (trocken)
  - Verstarkung: 30 Vol.-% Kurzglasfaser,  $E=72000$  MPa
  - Hergestellt im Spritzgussprozess
- Bearbeitung und Segmentierung der Grauwertbilder  
Beispiel: Non-Local-Means Filter



original



NLM, Patch Radius: 1vx  
Window Radius: 3vx  
Strength: 0.1



NLM, Patch Radius: 1vx  
Window Radius: 3vx  
Strength: 0.2



NLM, Patch Radius: 1vx  
Window Radius: 3vx  
Strength: 0.3



NLM, Patch Radius: 1vx  
Window Radius: 3vx  
Strength: 0.4

➤ **Ergebnis:** Geometrisches Modell des Materials



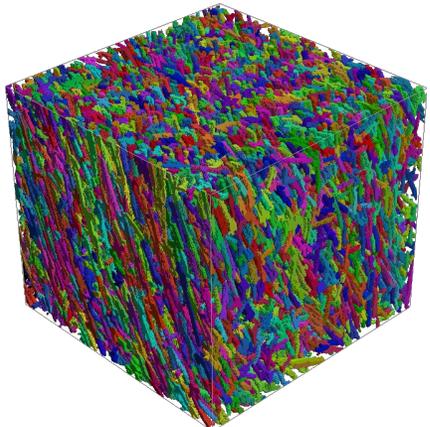
1. | 2. ANALYSE

» 3. MODELLIERUNG

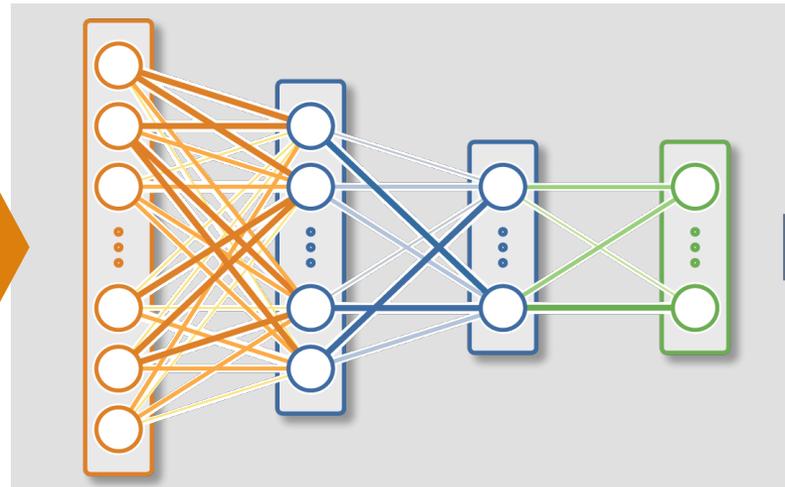
» 4. DESIGN

»

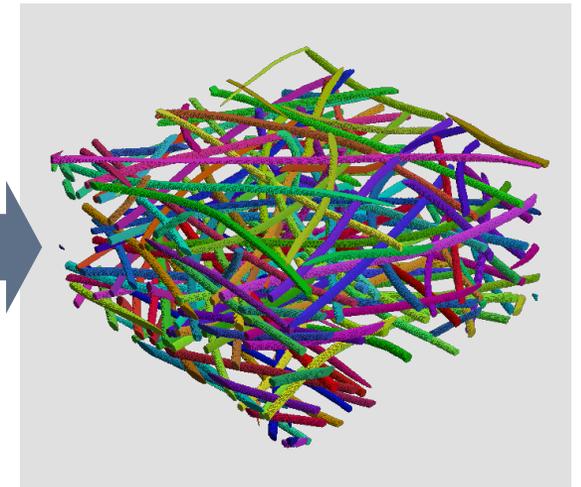
## Identifikation aller Einzelfasern mit Hilfe künstlicher Intelligenz (FiberFind AI)



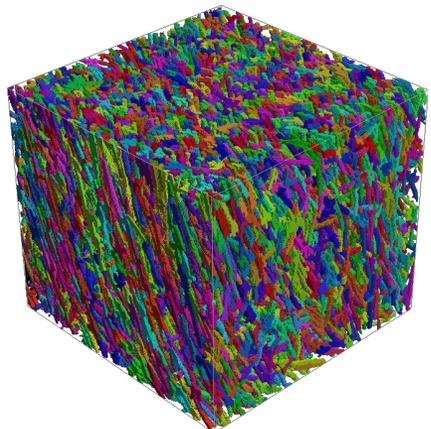
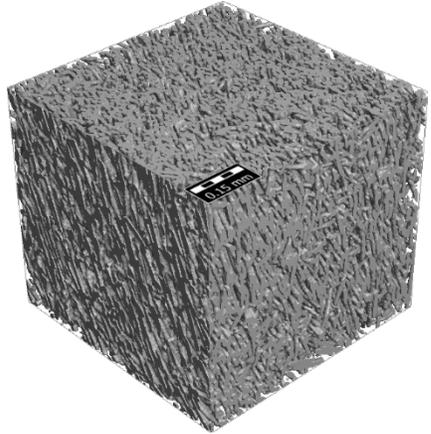
Segmentierter  $\mu$ CT-Scan



Neuronales Netz



Identifizierte Fasern

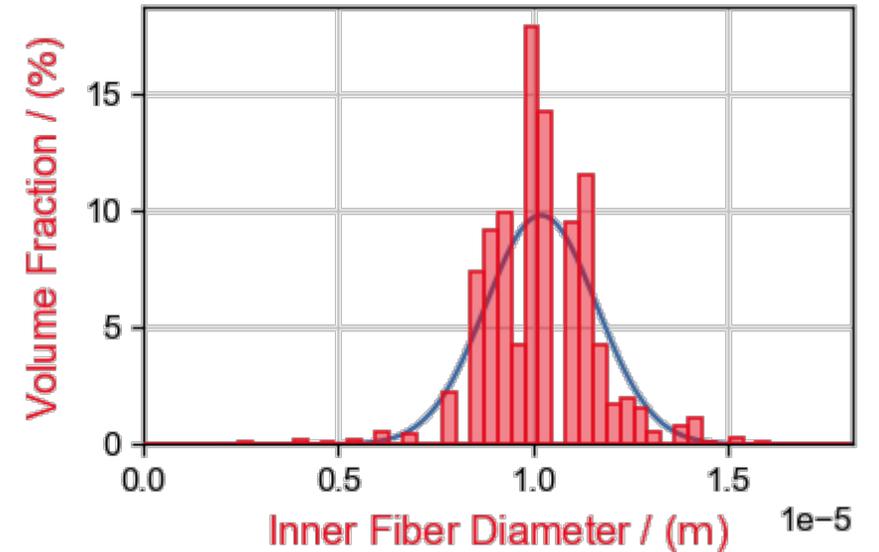


- Analyse der Faserdurchmesser
  - Mittlerer Durchmesser 10.22  $\mu\text{m}$
  - Standardabweichung 1.43  $\mu\text{m}$

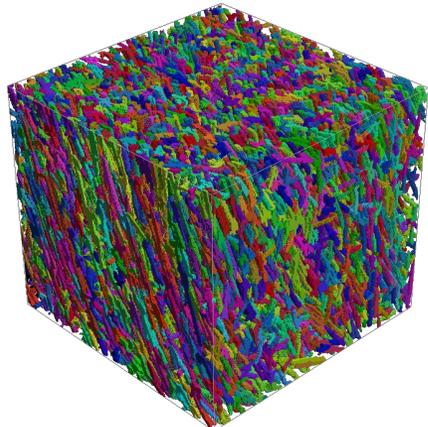
- Faservolumengehalt: 31.63%

- Faserorientierung:

0.166223	-0.016301	-0.052239
-	0.28979	0.154429
-	-	0.543987

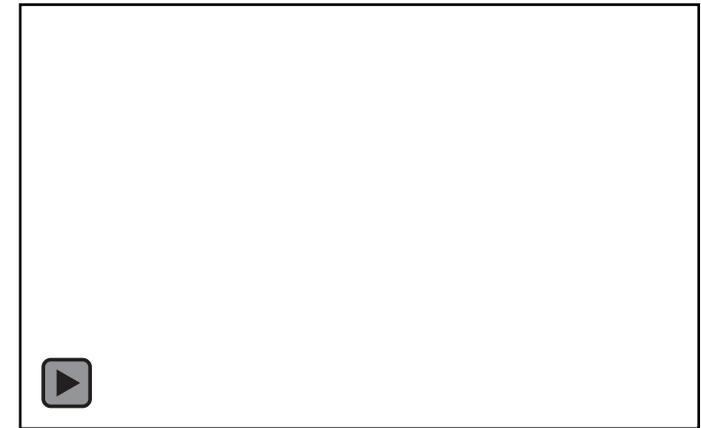


> **Ergebnis:** Statistische Eigenschaften des Materialmodells



■ Analyse der mechanischen Eigenschaften

Orthotropic Approximation			
	Strain Equivalence	Energy Equivalence	Mean Value
Young's Modulus $E_1$ / (GPa)	7.1211	7.1213	7.1212 + 0.0001
Young's Modulus $E_2$ / (GPa)	7.9283	7.9285	7.9284 + 0.0001
Young's Modulus $E_3$ / (GPa)	11.3851	11.3852	11.3852 + 0.0000
Poisson Ratio $\nu_{12}$	0.3547	0.3547	0.3547 + 0.0000
Poisson Ratio $\nu_{13}$	0.2160	0.2160	0.2160 + 0.0000
Poisson Ratio $\nu_{23}$	0.2517	0.2517	0.2517 + 0.0000
Poisson Ratio $\nu_{21}$	0.3949	0.3949	0.3949 + 0.0000
Poisson Ratio $\nu_{31}$	0.3454	0.3454	0.3454 + 0.0000
Poisson Ratio $\nu_{32}$	0.3614	0.3614	0.3614 + 0.0000
Shear Modulus $G_{12}$ / (GPa)	2.7558	2.7557	2.7558 + 0.0001
Shear Modulus $G_{13}$ / (GPa)	3.0113	3.0111	3.0112 + 0.0001
Shear Modulus $G_{23}$ / (GPa)	3.8636	3.8635	3.8636 + 0.0001

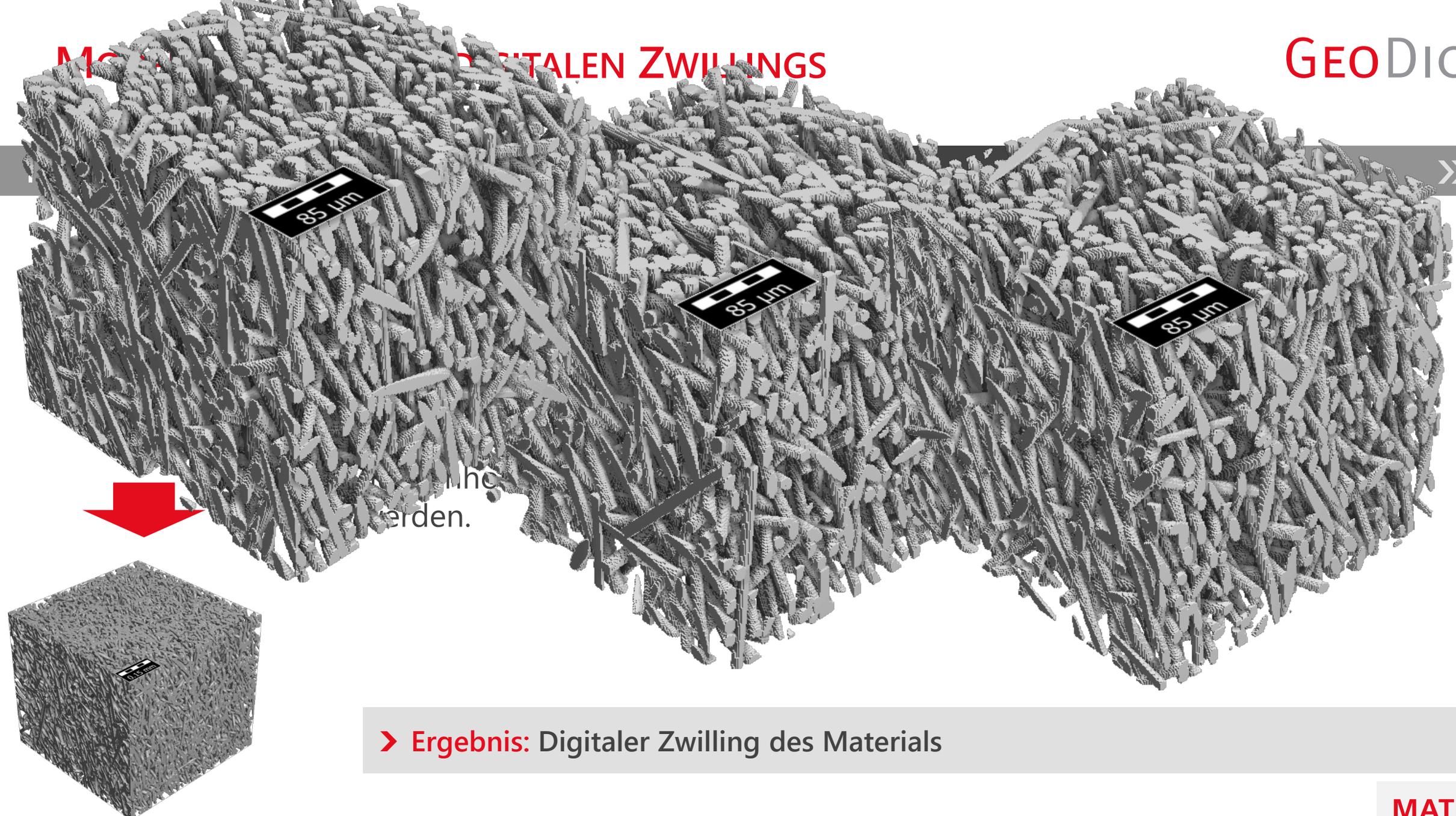


----- Anisotropic Elasticity Tensor -----

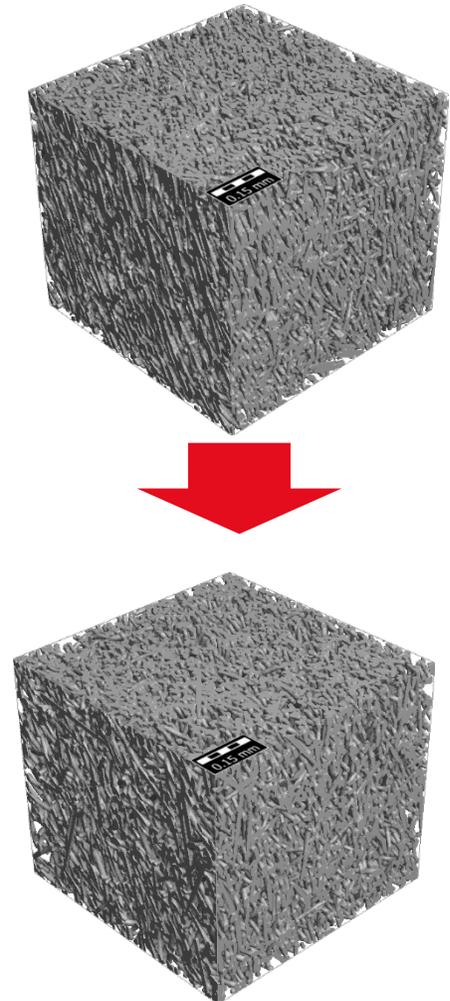
Stiffness Formulation for Strain Equivalence / (GPa)

<b>10.232</b>	<b>5.4243</b>	<b>5.4948</b>	0.025524	-0.010267	0.14141
<b>5.4244</b>	<b>11.597</b>	<b>6.0651</b>	0.80216	-0.08876	0.12121
<b>5.4949</b>	<b>6.0652</b>	<b>15.475</b>	1.5932	-0.28255	-0.12848
0.025595	0.80212	1.5932	<b>3.8636</b>	-0.24775	-0.17071
-0.010275	-0.088766	-0.28258	-0.24774	<b>3.0113</b>	0.091551
0.14133	0.12119	-0.12859	-0.17072	0.091522	<b>2.7558</b>

➤ **Ergebnis:** Steifigkeitstensor des Materials



➤ Ergebnis: Digitaler Zwilling des Materials



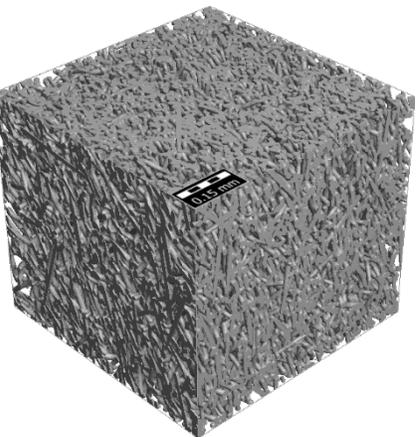
$\mu$ CT-Scan



Digitaler Zwilling



➤ **Ergebnis:** Digitaler Zwilling des Materials



μCT-scan

----- Anisotropic Elasticity Tensor -----

Stiffness Formulation for Strain Equivalence / (GPa)

<b>10.405</b>	<b>5.4866</b>	<b>5.5588</b>	0.025517	-0.0074332	0.14772
<b>5.4868</b>	<b>11.81</b>	<b>6.1351</b>	0.81964	-0.090349	0.12928
<b>5.5589</b>	<b>6.1351</b>	<b>15.751</b>	1.6225	-0.28408	-0.13027
0.025594	0.81961	1.6225	<b>3.9555</b>	-0.2533	-0.17534
-0.00744	-0.090347	-0.28409	-0.25329	<b>3.0865</b>	0.093201
0.14764	0.12925	-0.13039	-0.17535	0.093172	<b>2.8257</b>

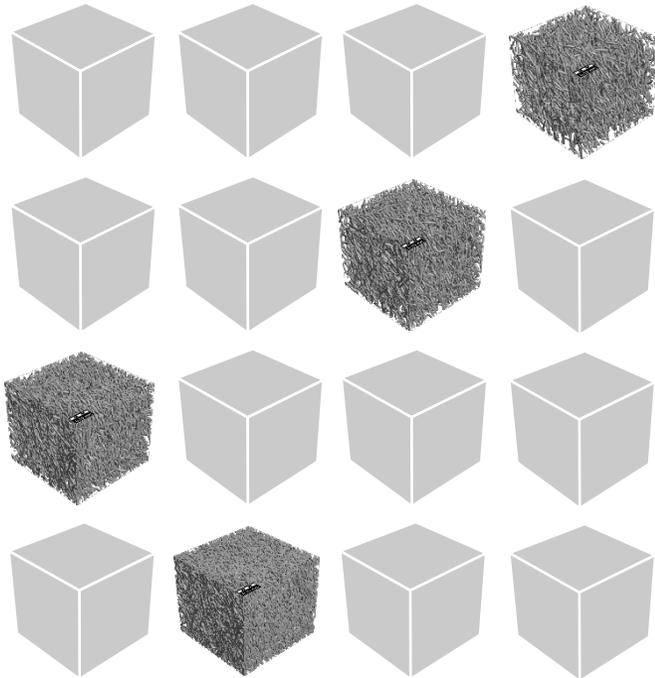
Digital Twin

----- Anisotropic Elasticity Tensor -----

Stiffness Formulation for Strain Equivalence / (GPa)

<b>10.909</b>	<b>5.5252</b>	<b>5.6398</b>	0.057904	0.068145	0.15958
<b>5.5252</b>	<b>11.831</b>	<b>6.106</b>	0.79423	-0.072242	0.16073
<b>5.6399</b>	<b>6.106</b>	<b>14.554</b>	1.1876	-0.03067	-0.058962
0.057985	0.79426	1.1876	<b>3.7372</b>	-0.16444	-0.11694
0.068255	-0.072082	-0.030633	-0.16446	<b>3.2274</b>	0.07959
0.15962	0.16077	-0.058969	-0.11694	0.0796	<b>2.985</b>

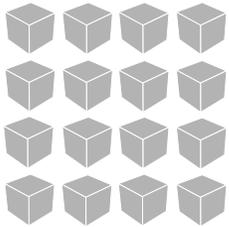
> **Ergebnis** : Verifizierter digitaler Zwilling des Materials



## Parameterstudien an digitalen Prototypen

- Variation des Materialmodells, hier des Faservolumengehalts
  - Variation der Materialeigenschaften, hier des Polymers
  - Variation des Materials, z. B. Austausch der Matrix
- ➔ Viele digitale Prototypen können virtuell analysiert werden
- ➔ Nur vielversprechendste Materialien werden hergestellt und im Labor geprüft

➤ **Ergebnis:** Auswahl der vielversprechendsten Materialien



## Beispiel: Orthotrope Näherung bei verschiedenen Faservolumengehalten (FVG)

DIGITALE PROTOTYPEN

Steifigkeitstensor

Große Verformungen

Permeabilität

Elekt. Leitfähigkeit

Therm. Leitfähigkeit

SIMULATION 

### 10 % FVG

#### Orthotropic Approximation

	Strain Equivalence
Young's Modulus $E_1$ / (GPa)	3.8926
Young's Modulus $E_2$ / (GPa)	4.0125
Young's Modulus $E_3$ / (GPa)	4.6619
Poisson Ratio $\nu_{12}$	0.3869
Poisson Ratio $\nu_{13}$	0.3117
Poisson Ratio $\nu_{23}$	0.3351
Poisson Ratio $\nu_{21}$	0.3988
Poisson Ratio $\nu_{31}$	0.3733
Poisson Ratio $\nu_{32}$	0.3893
Shear Modulus $G_{12}$ / (GPa)	1.4225
Shear Modulus $G_{13}$ / (GPa)	1.4857
Shear Modulus $G_{23}$ / (GPa)	1.6705

### 15 % FVG

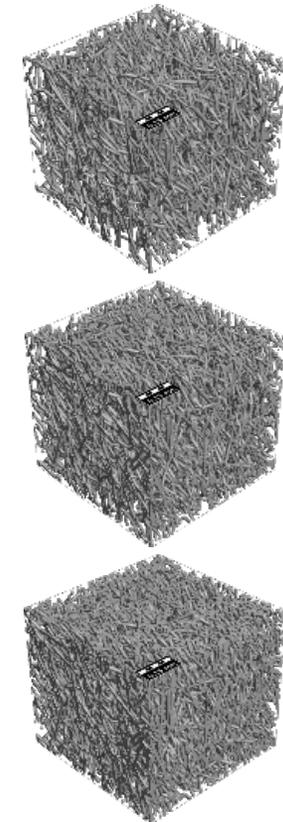
#### Orthotropic Approximation

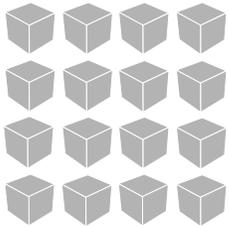
	Strain Equivalence
Young's Modulus $E_1$ / (GPa)	4.5348
Young's Modulus $E_2$ / (GPa)	4.7538
Young's Modulus $E_3$ / (GPa)	5.7528
Poisson Ratio $\nu_{12}$	0.3770
Poisson Ratio $\nu_{13}$	0.2886
Poisson Ratio $\nu_{23}$	0.3176
Poisson Ratio $\nu_{21}$	0.3952
Poisson Ratio $\nu_{31}$	0.3662
Poisson Ratio $\nu_{32}$	0.3842
Shear Modulus $G_{12}$ / (GPa)	1.6791
Shear Modulus $G_{13}$ / (GPa)	1.7769
Shear Modulus $G_{23}$ / (GPa)	2.0546

### 20 % FVG

#### Orthotropic Approximation

	Strain Equivalence
Young's Modulus $E_1$ / (GPa)	5.3382
Young's Modulus $E_2$ / (GPa)	5.6200
Young's Modulus $E_3$ / (GPa)	6.9867
Poisson Ratio $\nu_{12}$	0.3667
Poisson Ratio $\nu_{13}$	0.2715
Poisson Ratio $\nu_{23}$	0.3047
Poisson Ratio $\nu_{21}$	0.3860
Poisson Ratio $\nu_{31}$	0.3554
Poisson Ratio $\nu_{32}$	0.3788
Shear Modulus $G_{12}$ / (GPa)	2.0087
Shear Modulus $G_{13}$ / (GPa)	2.1412
Shear Modulus $G_{23}$ / (GPa)	2.4962





DIGITALE PROTOTYPEN



Steifigkeitstensor

Große Verformungen

Permeabilität

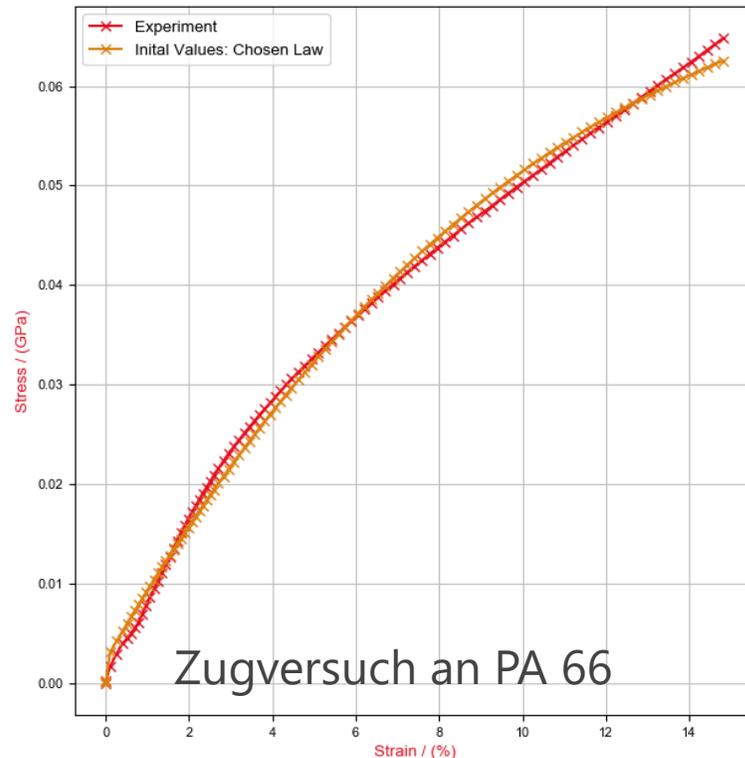
Elekt. Leitfähigkeit

Therm. Leitfähigkeit

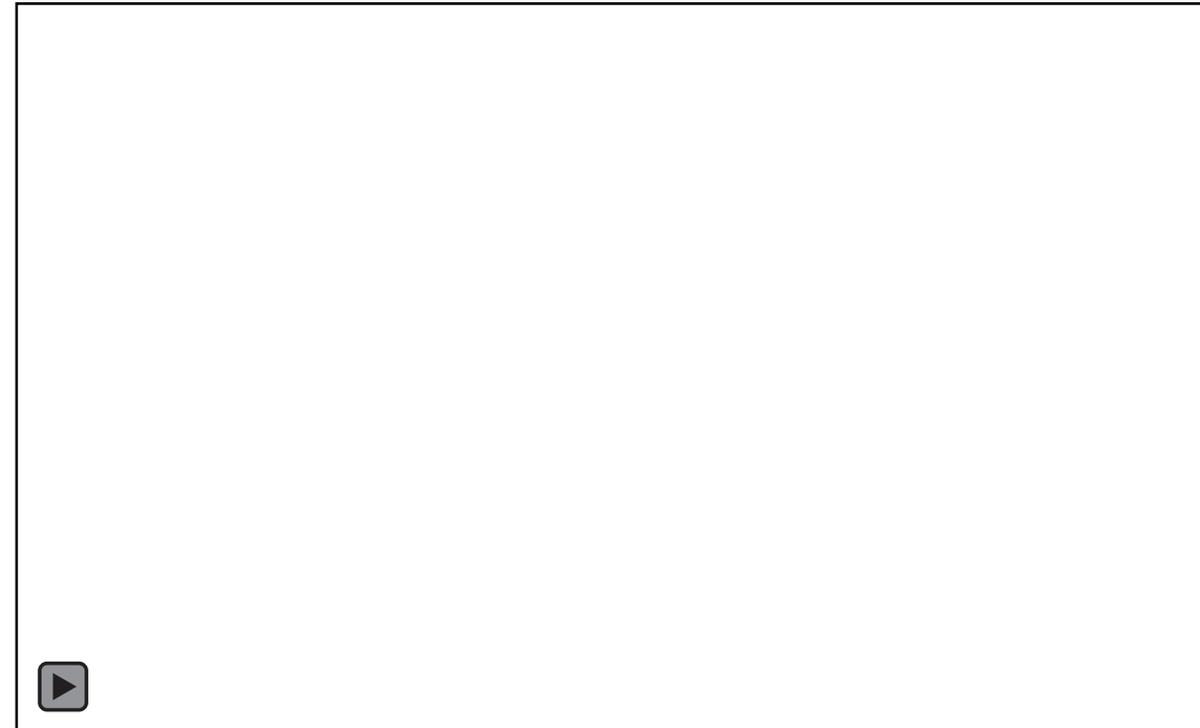
SIMULATION

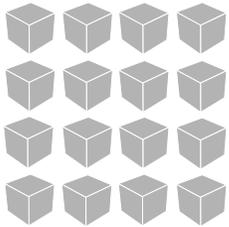
**Beispiel:** Virtueller Zugversuch des dig. Zwillinges mit plastischer Verformung des Polymers

Ableiten eines Materialgesetzes aus einem Experiment



Simulation eines Zugversuchs





DIGITALE PROTOTYPEN

Steifigkeitstensor

Große Verformungen

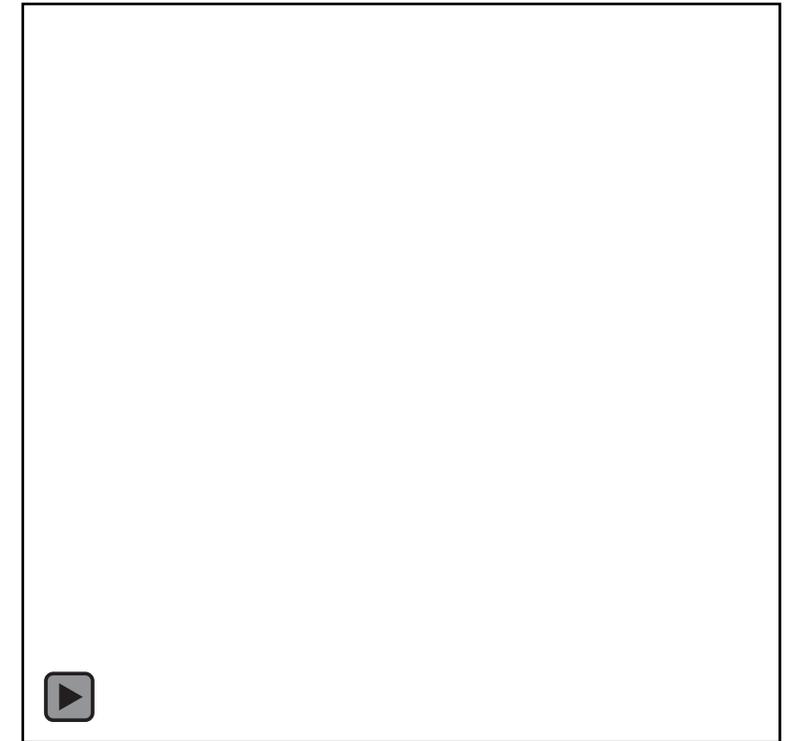
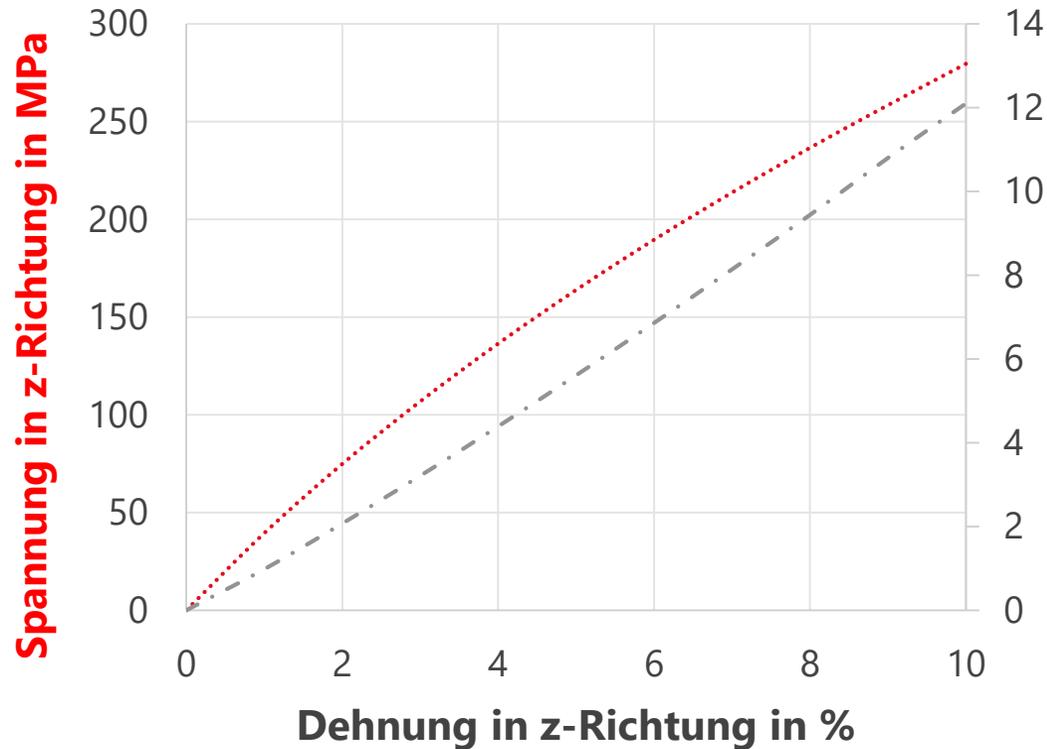
Permeabilität

Elekt. Leitfähigkeit

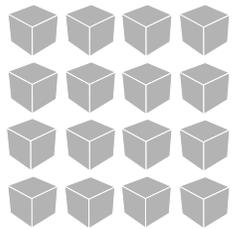
Therm. Leitfähigkeit

SIMULATION

**Beispiel:** Virtueller Zugversuch des dig. Zwillingss mit plastischer Verformung des Polymers



..... Stress in load direction    - · - Plastic deformation in polymer



DIGITALE PROTOTYPEN



Steifigkeitstensor

Große Verformungen

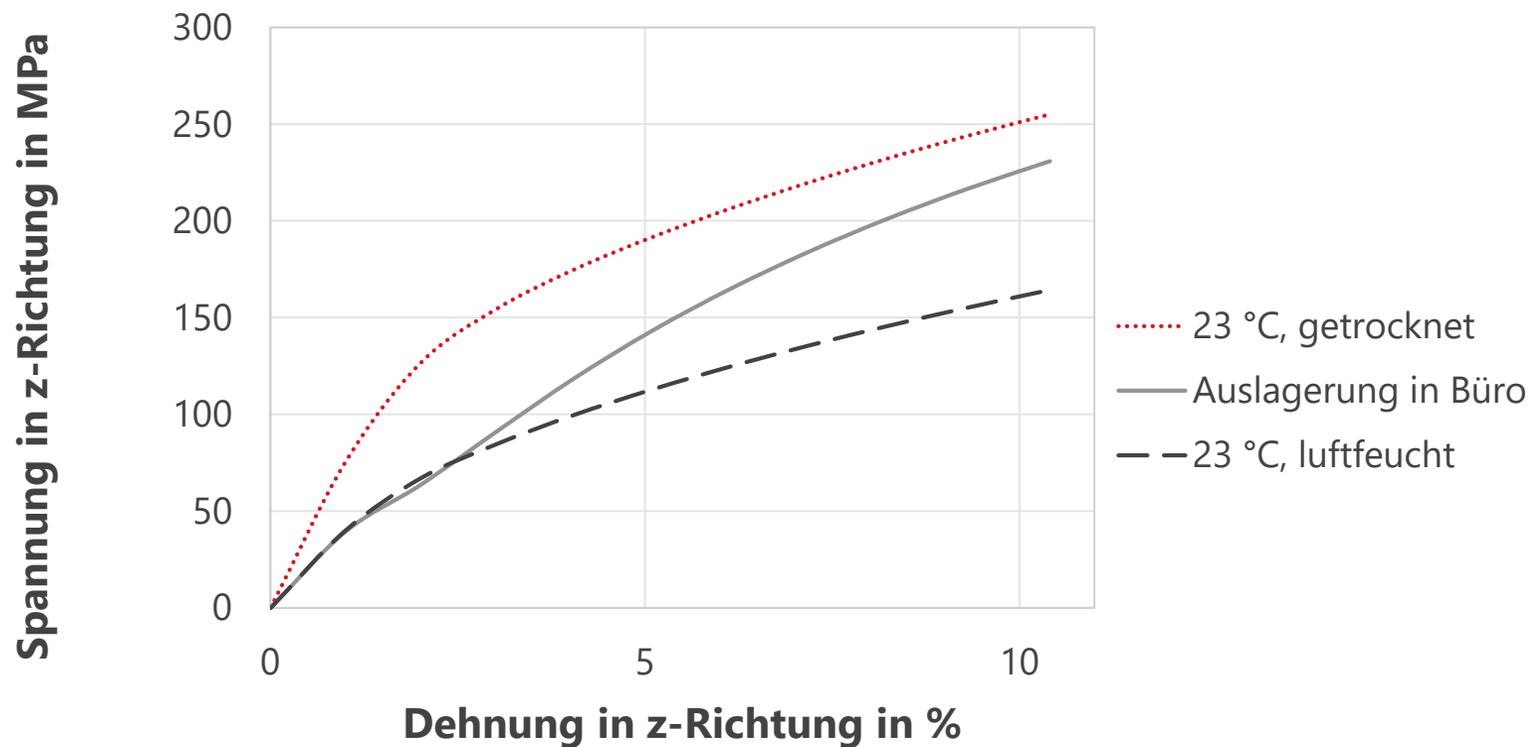
Permeabilität

Elekt. Leitfähigkeit

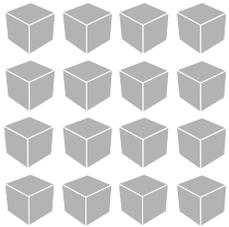
Therm. Leitfähigkeit

SIMULATION

## Beispiel: Vergleich verschiedener Konditionierungen des Polymers



Konditionierung nach DIN EN ISO 291 (mind. 88 h bei 23 °C und 50 % Luftfeuchtigkeit)



DIGITALE PROTOTYPEN

Steifigkeitstensor

Große Verformungen

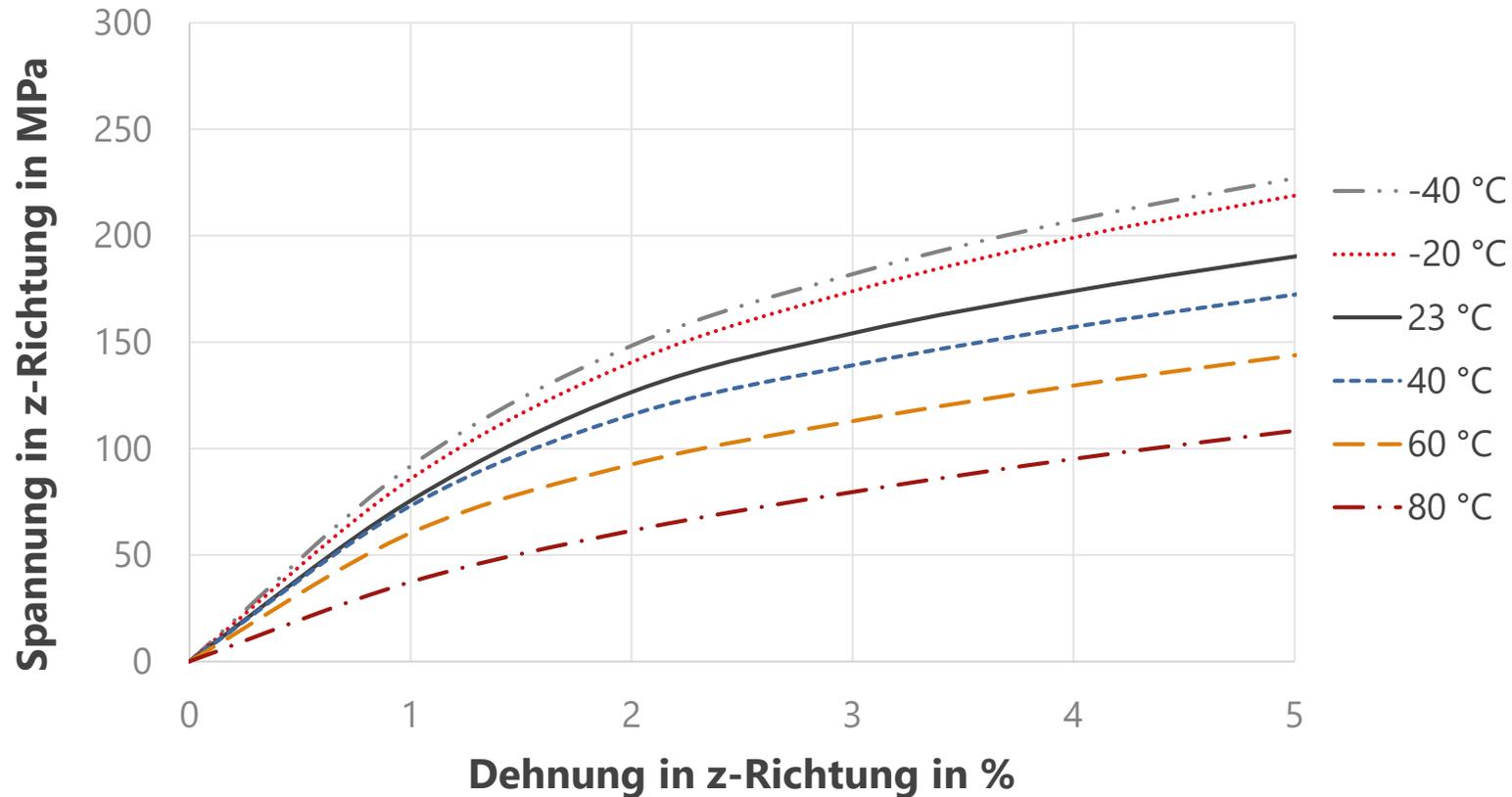
Permeabilität

Elekt. Leitfähigkeit

Therm. Leitfähigkeit

SIMULATION

## Beispiel: Vergleich verschiedener Konditionierungen des Polymers



- Mikrostruktursimulation eröffnet neue Möglichkeiten für die Werkstoffentwicklung
- Voxelbasierte FEM ermöglicht die Simulation detaillierter Modelle ohne Vernetzen
- Ein digitaler Zwilling kann die Anzahl der benötigten  $\mu$ CT-Scans drastisch reduzieren bzw. einen  $\mu$ CT-Scan ersetzen
- Digitale Prototypen können für mechanische Simulationen verwendet werden und so den experimentellen Aufwand deutlich verringern

# VIELEN DANK FÜR IHRE AUFMERKSAMKEIT

Besuchen Sie unseren Stand #45

---

**Dr. Martina Hümbert**

Geschäftsfeldleiterin Konstruktionswerkstoffe



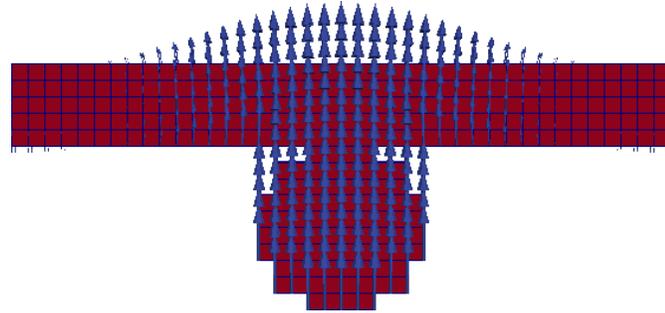
[martina.huembert@math2market.de](mailto:martina.huembert@math2market.de)



+49 631 205 605 - 28

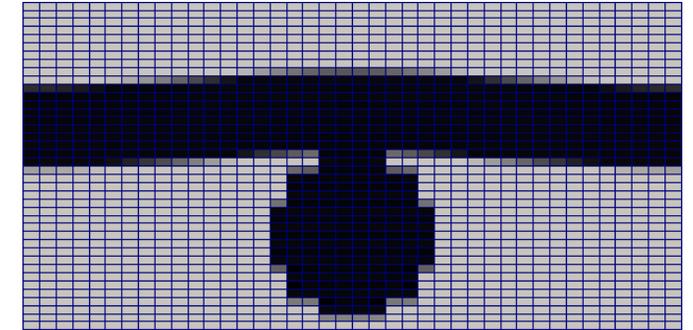


[www.math2market.de](http://www.math2market.de)



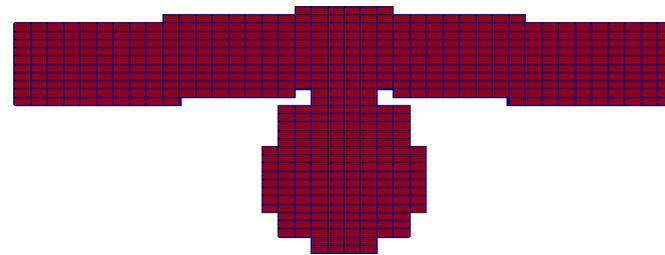
## Schritt 1

- Löse eine Iteration des mechanischen Problems
- Verschiebungsvektor-Feld auf der unverformten Geometrie durch Integrieren des Dehnungsfeldes



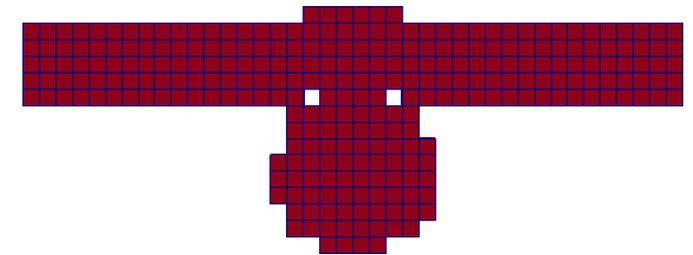
## Schritt 2

- Bewegung jedes Voxels entlang seines Verschiebungsvektors
- Abschneiden der Voxel am verformten Gitter



## Schritt 3

- Optimalen Schwellwert festlegen
- Segmentierung des Grauwertbildes
- Ergebnis: „Boxel“-Bild



## Schritt 4

- Resampling des „Boxel“-Bild um Voxel-Bild (mit Originalauflösung) zu erhalten