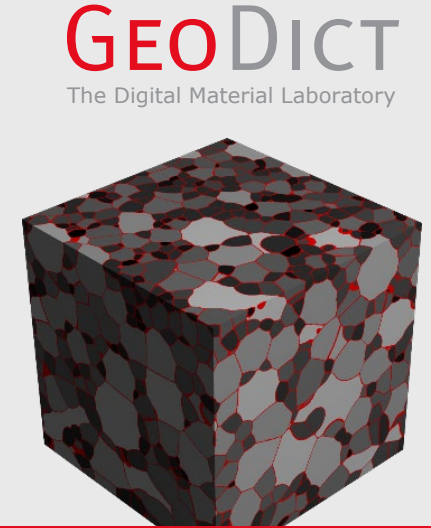
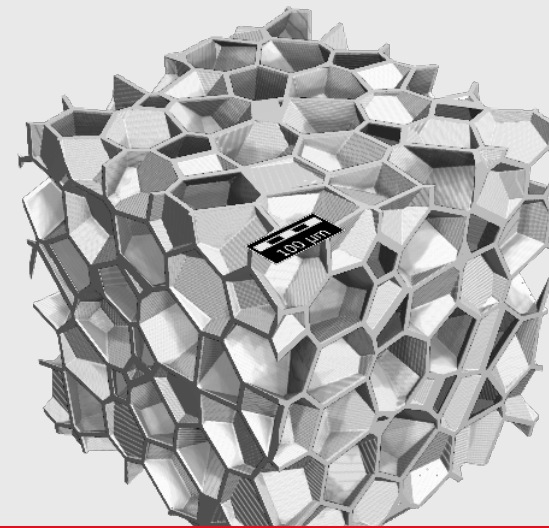
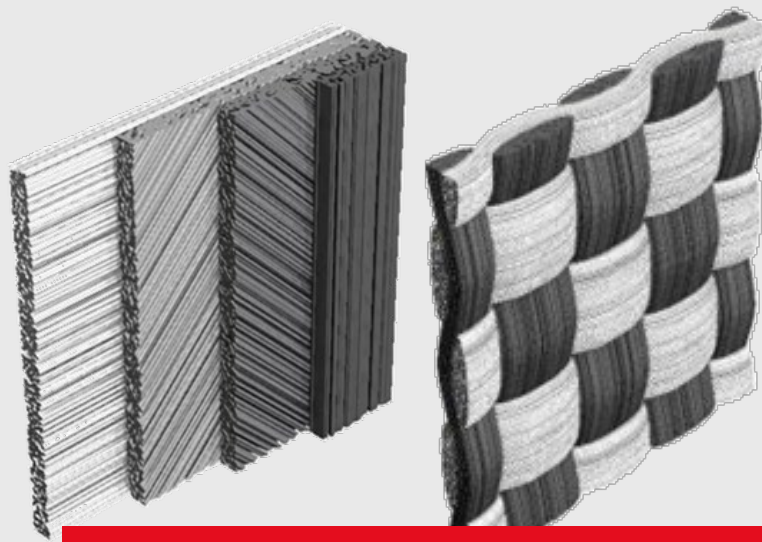
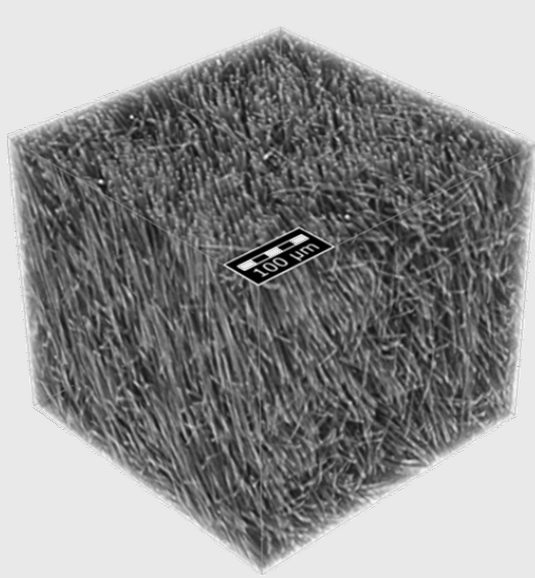




DIGITALER REPRÄSENTANT VON VERBUNDWERKSTOFFEN ZUR REDUKTION DES EXPERIMENTELLEN AUFWANDES

Effizientere Bauteilentwicklung im Liquid Composite Molding

Math2Market GmbH:

A. Widera, M. Hümbert

Institut für Verbundwerkstoffe: T. Schmidt, O. Rimmel, F. Schimmer, D. May, N. Motsch

01

Motivation

02

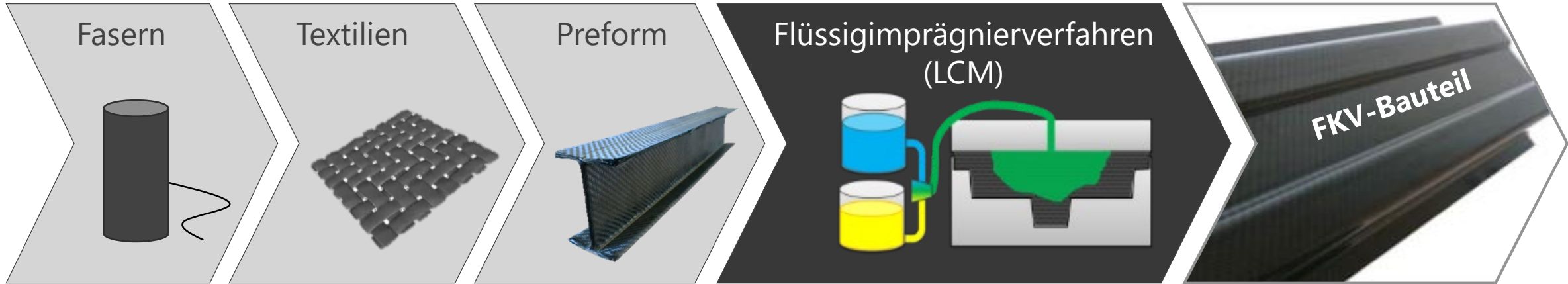
Forschungsprojekt Math2Composites

03

Kalibrierung und Validierung von digitalen Zwillingen

04

Zusammenfassung



➤ Der LCM-Prozess ist ein bedeutendes Verfahren im FKV-Bereich

Automotive



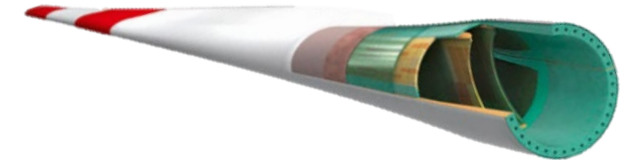
Luftfahrt



Schiffbau

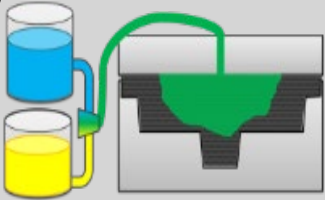
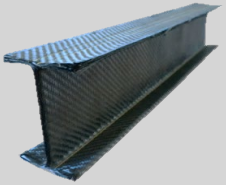
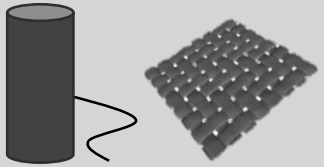


Energiewirtschaft



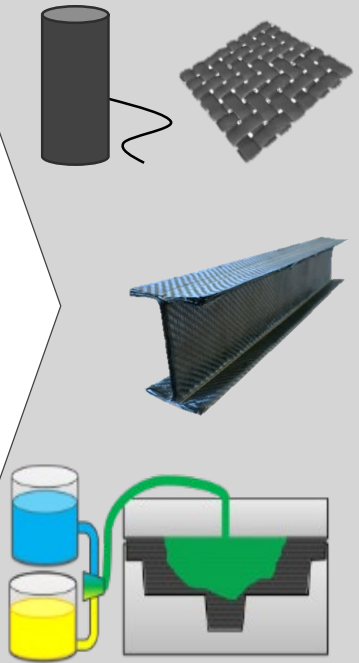
LIQUID COMPOSITE MOLDING – BAUTEIL ENTWICKLUNG

Probe herstellen

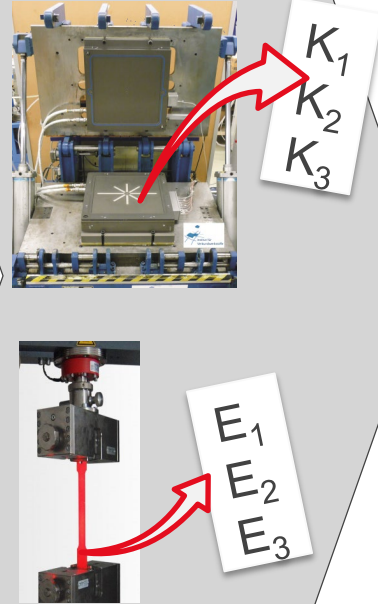


LIQUID COMPOSITE MOLDING – BAUTEIL ENTWICKLUNG

Probe herstellen

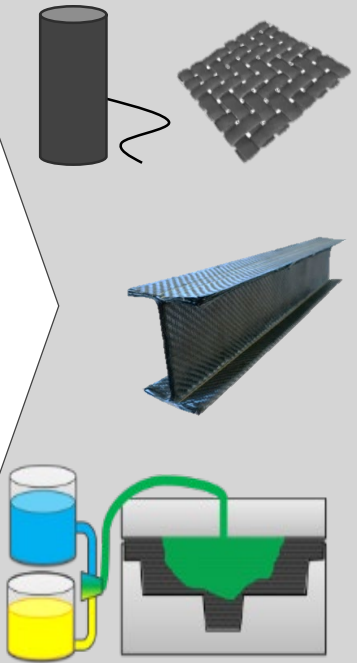


Probe messen

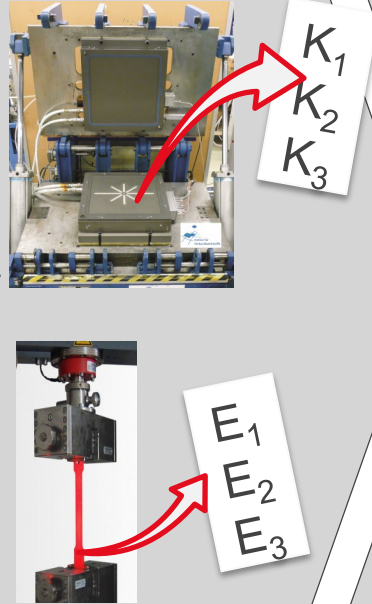


LIQUID COMPOSITE MOLDING – BAUTEIL ENTWICKLUNG

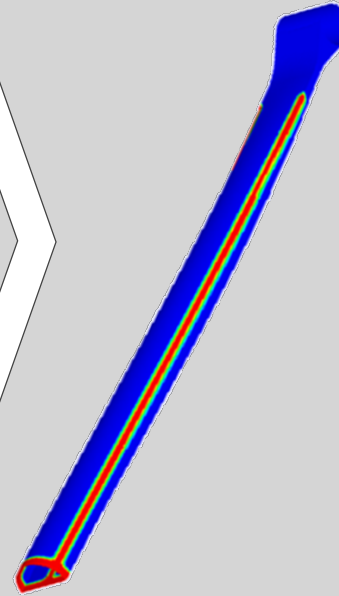
Probe herstellen



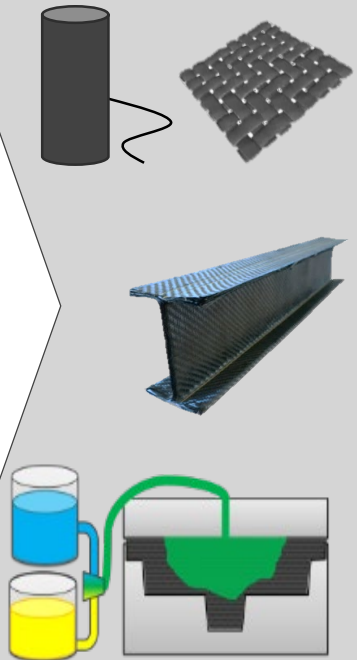
Probe messen



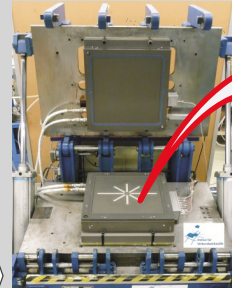
Bauteilsimulation auf Makroebene



Probe herstellen



Probe messen

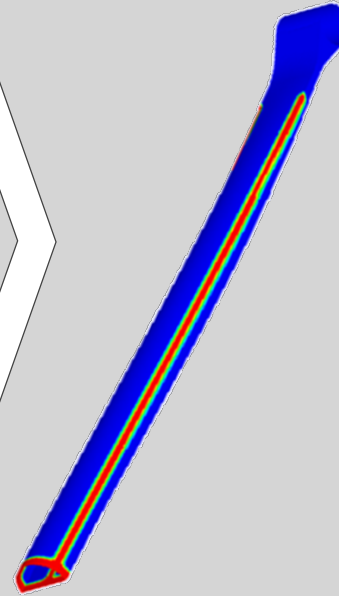


K_1
 K_2
 K_3



E_1
 E_2
 E_3

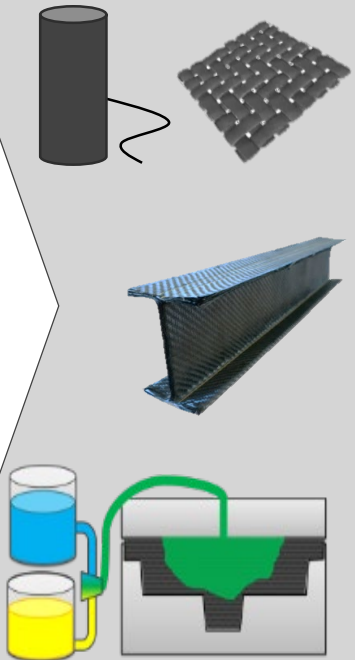
Bauteilsimulation auf Makroebene



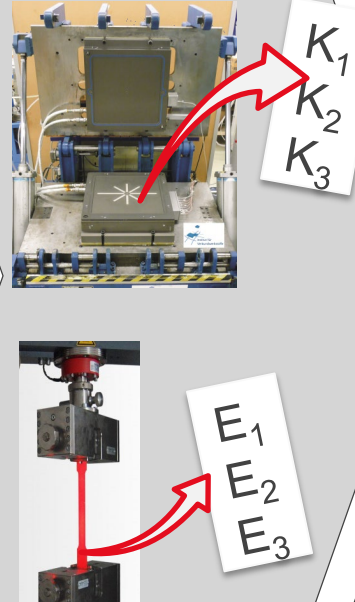
Charakterisiertes Bauteil

A:
Eigenschaften
wie gewünscht

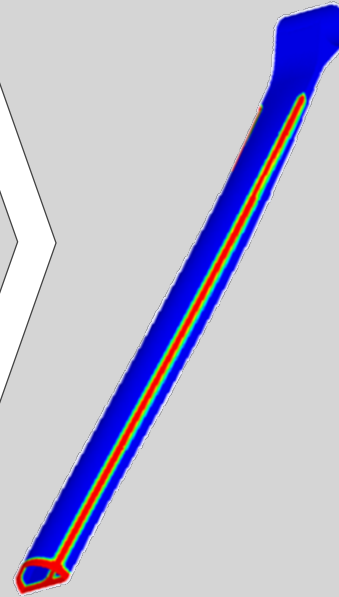
Probe herstellen



Probe messen



Bauteilsimulation auf Makroebene



Charakterisiertes Bauteil

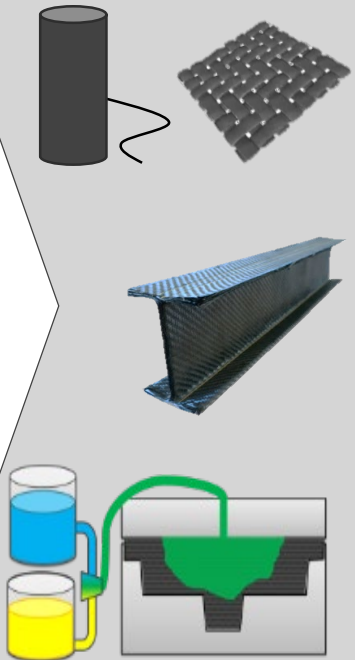
A:
Eigenschaften
wie gewünscht

Bauteil Produktion

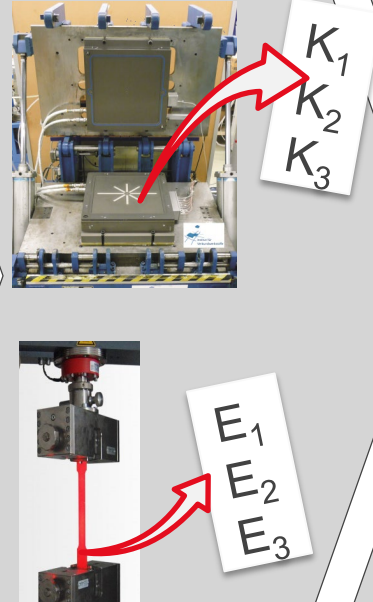


Quelle: Sintex plastics

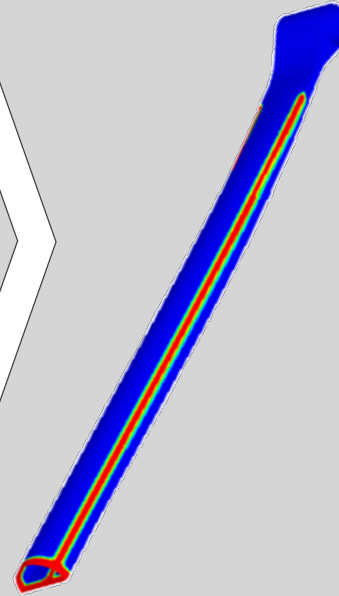
Probe herstellen



Probe messen



Bauteilsimulation auf Makroebene



Charakterisiertes Bauteil

A:
Eigenschaften
wie gewünscht

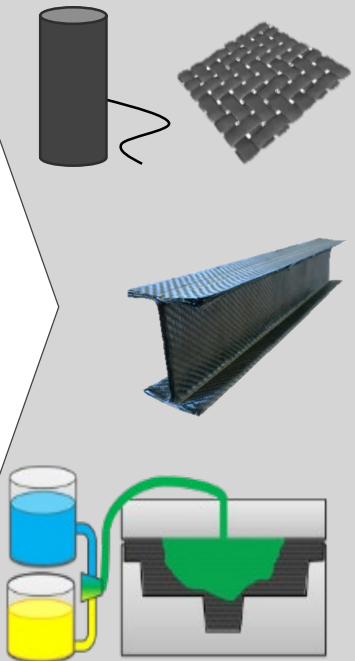
B:
Eigenschaften
verbesserungs-
bedürftig

Bauteil Produktion

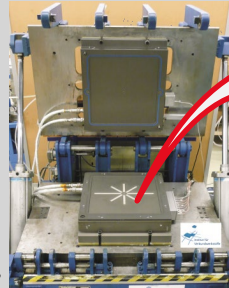


Quelle: Sintex plastics

Probe herstellen



Probe messen

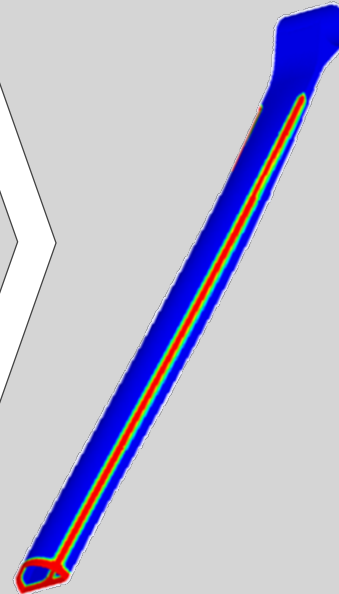


K_1
 K_2
 K_3



E_1
 E_2
 E_3

Bauteilsimulation auf Makroebene



Charakterisiertes Bauteil

A:
Eigenschaften
wie gewünscht

B:
Eigenschaften
verbesserungs-
bedürftig

Bauteil Produktion



Quelle: Sintex plastics

Anpassung der
Probenzusammensetzung

01

Motivation

02

Forschungsprojekt Math2Composites

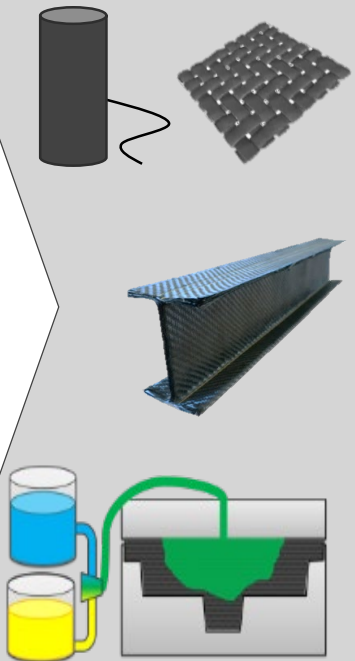
03

Kalibrierung und Validierung von digitalen Zwillingen

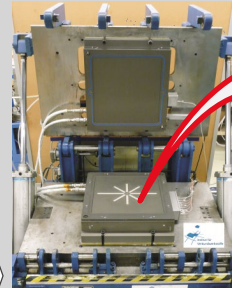
04

Zusammenfassung

Probe herstellen



Probe messen

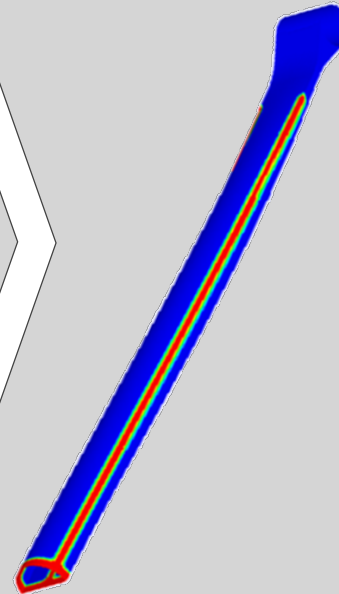


K_1
 K_2
 K_3



E_1
 E_2
 E_3

Bauteilsimulation auf Makroebene



Charakterisiertes Bauteil

A:
Eigenschaften
wie gewünscht

B:
Eigenschaften
verbesserungs-
bedürftig

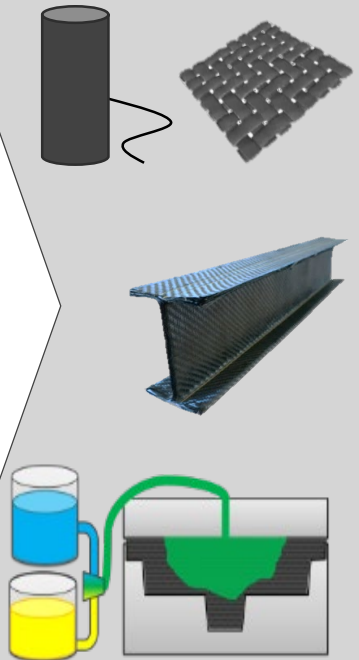
Bauteil Produktion



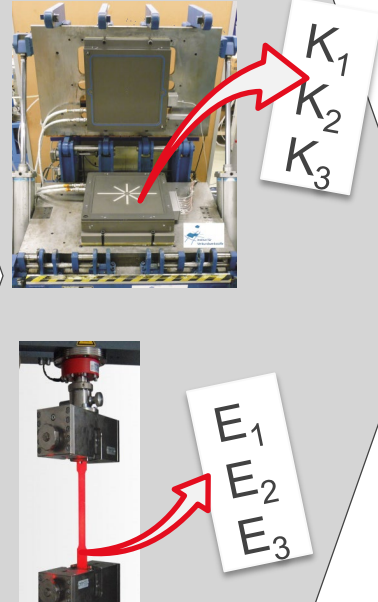
Quelle: Sintex plastics

Anpassung der
Probenzusammensetzung

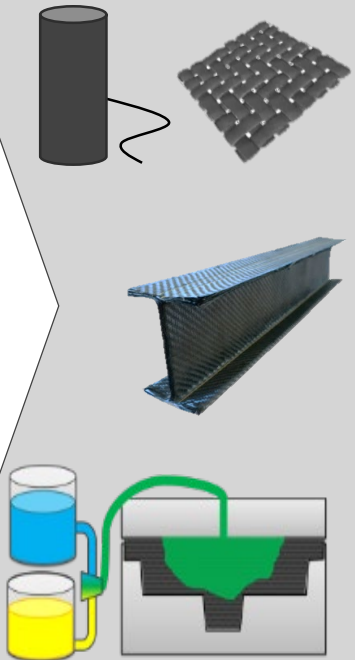
Probe herstellen



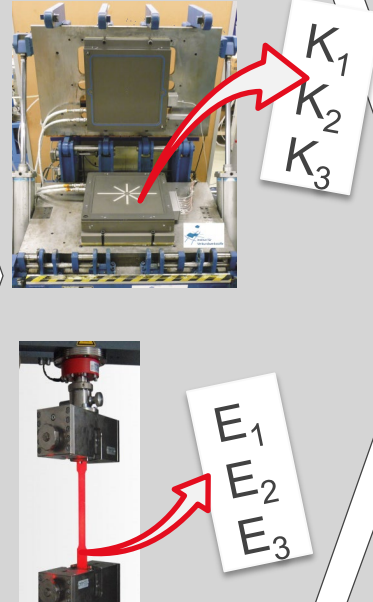
Probe messen



Probe herstellen

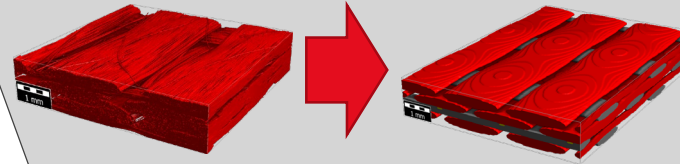


Probe messen

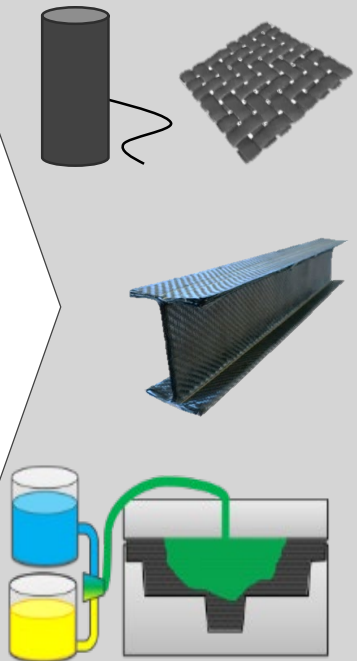


Probe digitalisieren

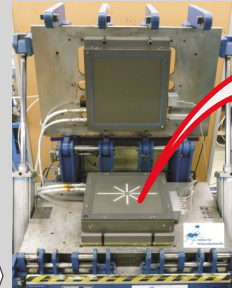
Parametrisierung:



Probe herstellen



Probe messen



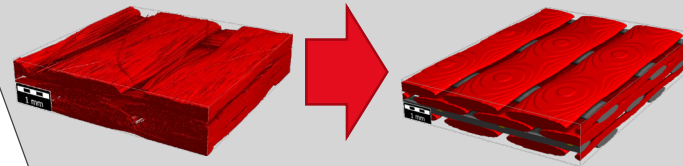
K_1
 K_2
 K_3



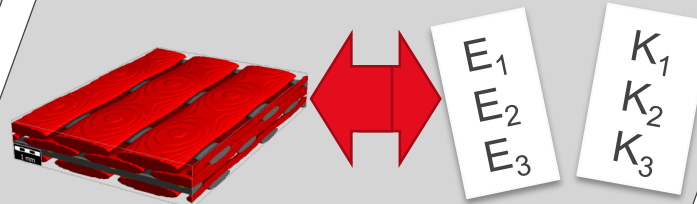
E_1
 E_2
 E_3

Probe digitalisieren

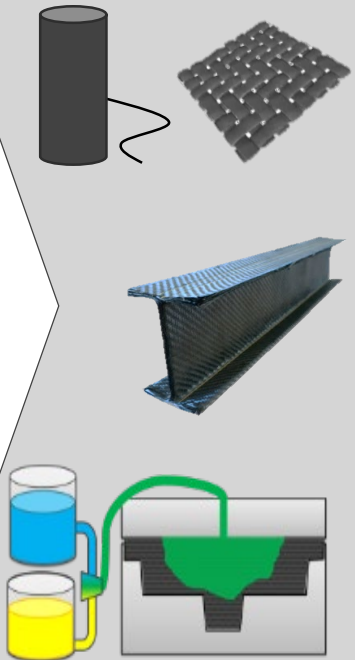
Parametrisierung:



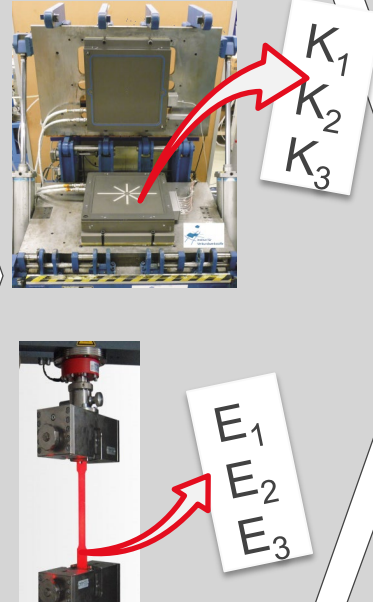
Kalibrierung:



Probe herstellen

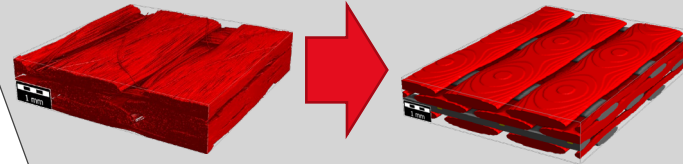


Probe messen

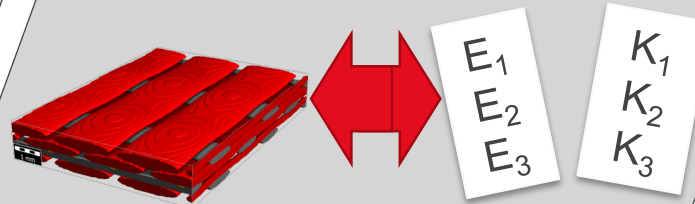


Probe digitalisieren

Parametrisierung:



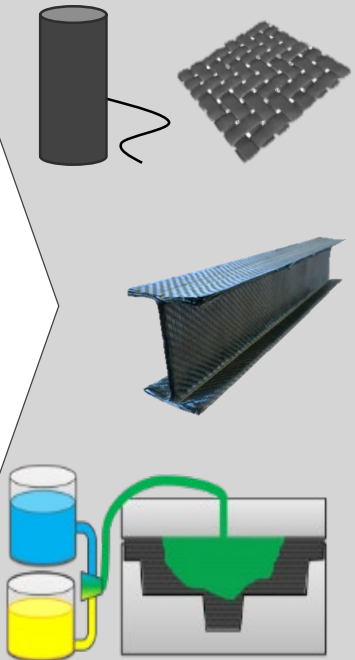
Kalibrierung:



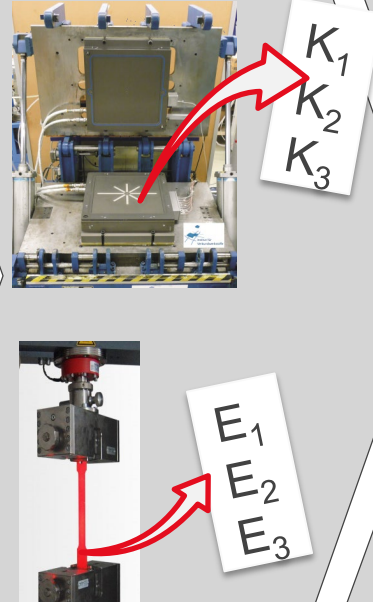
Probe digital messen



Probe herstellen

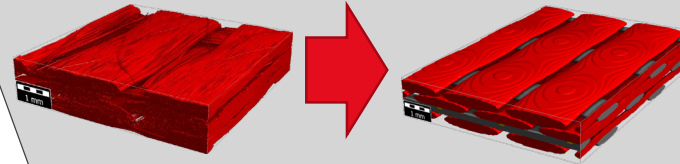


Probe messen

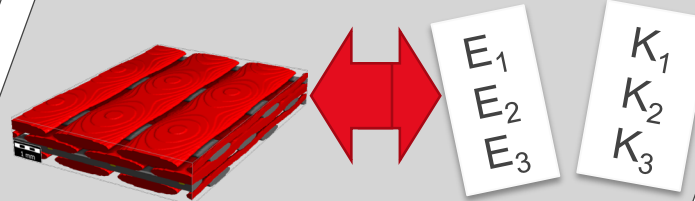


Probe digitalisieren

Parametrisierung:



Kalibrierung:

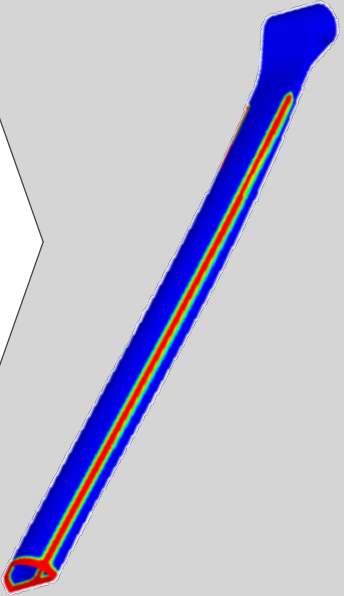


Probe digital messen

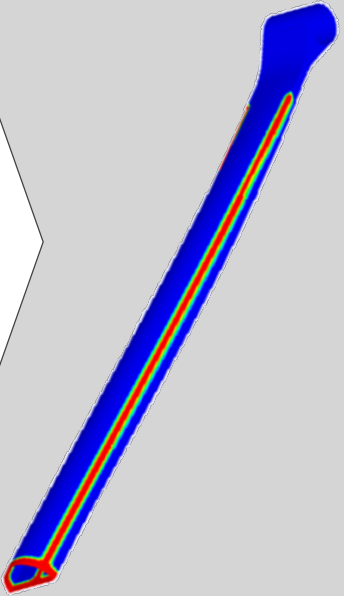


➤ Digitale Experimente zur Proben Charakterisierung

**Bauteilsimulation
auf Makroebene**



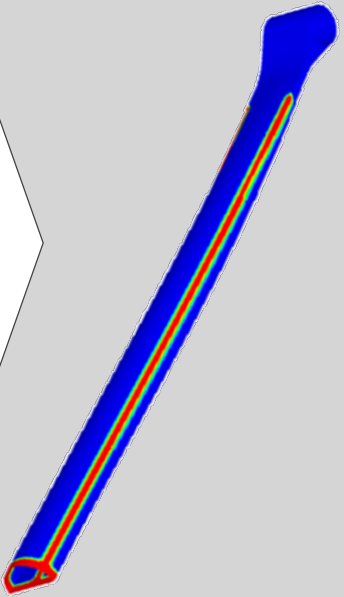
**Bauteilsimulation
auf Makroebene**



**Charakterisiertes
Bauteil**

A:
Akzeptable
Eigenschaften

**Bauteilsimulation
auf Makroebene**



**Charakterisiertes
Bauteil**

A:
Akzeptable
Eigenschaften

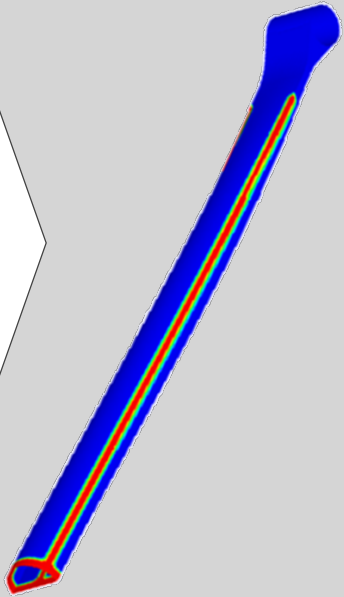


Bauteil Produktion



Quelle: Sintex plastics

Bauteilsimulation auf Makroebene



Charakterisiertes Bauteil

A:
Akzeptable
Eigenschaften

B:
Eigenschaften
verbesserungs-
bedürftig

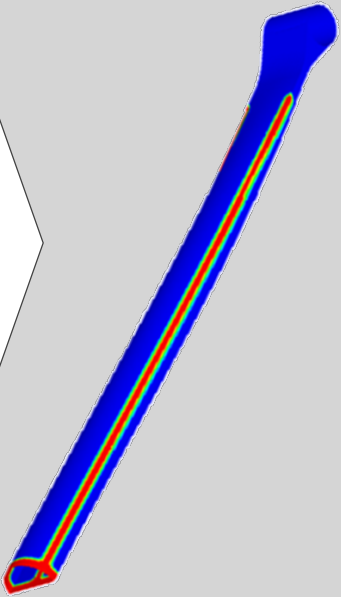


Bauteil Produktion



Quelle: Sintex plastics

Bauteilsimulation auf Makroebene

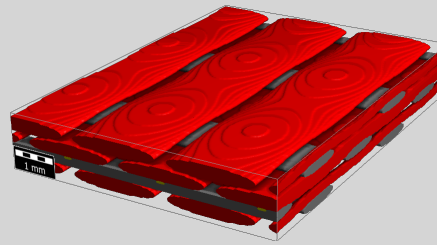


Charakterisiertes Bauteil

A:
Akzeptable
Eigenschaften

B:
Eigenschaften
verbesserungs-
bedürftig

Probe digital anpassen



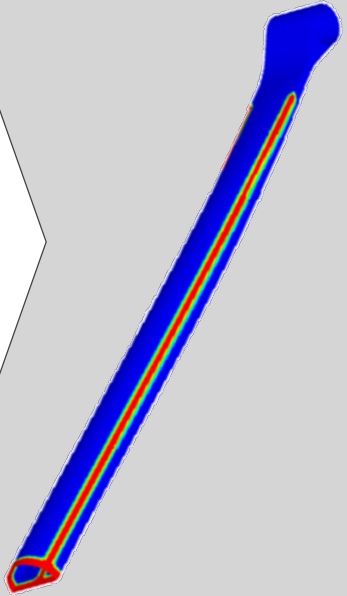
Digitale
Parametervariation

Bauteil Produktion



Quelle: Sintex plastics

Bauteilsimulation auf Makroebene

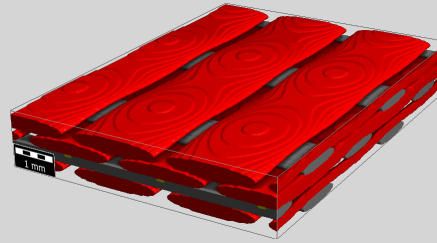


Charakterisiertes Bauteil

A:
Akzeptable
Eigenschaften

B:
Eigenschaften
verbesserungs-
bedürftig

Probe digital anpassen

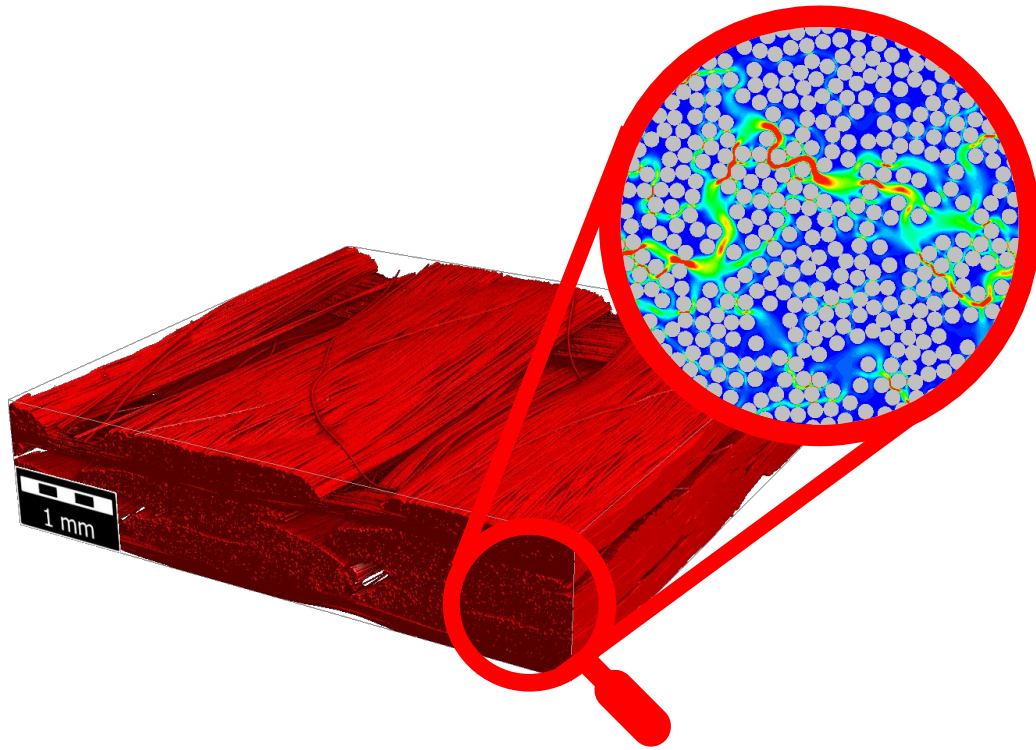


Digitale
Parametervariation

Bauteil Produktion



Quelle: Sintex plastics



CT-Scan bei 3 μm Auflösung

1760x1760x385 Voxel

Je 3 Längs-und Quer-rovings und 4 Lagen

Einzelfillamentauflösung des Modells:

- Höchste Nähe zur Realität

aber:

- Modelle benötigen hohe Auflösung

- Für statistische Repräsentation

- Mindestzahl von Längs-und Querrovings (ca. 5)

- Mindestzahl von Lagen(ca. 8)

- Sehr große Struktur (ca. 4000x4000x900) Voxel und damit hohe Rechenzeiten

Daher Multiskalen Ansatz:

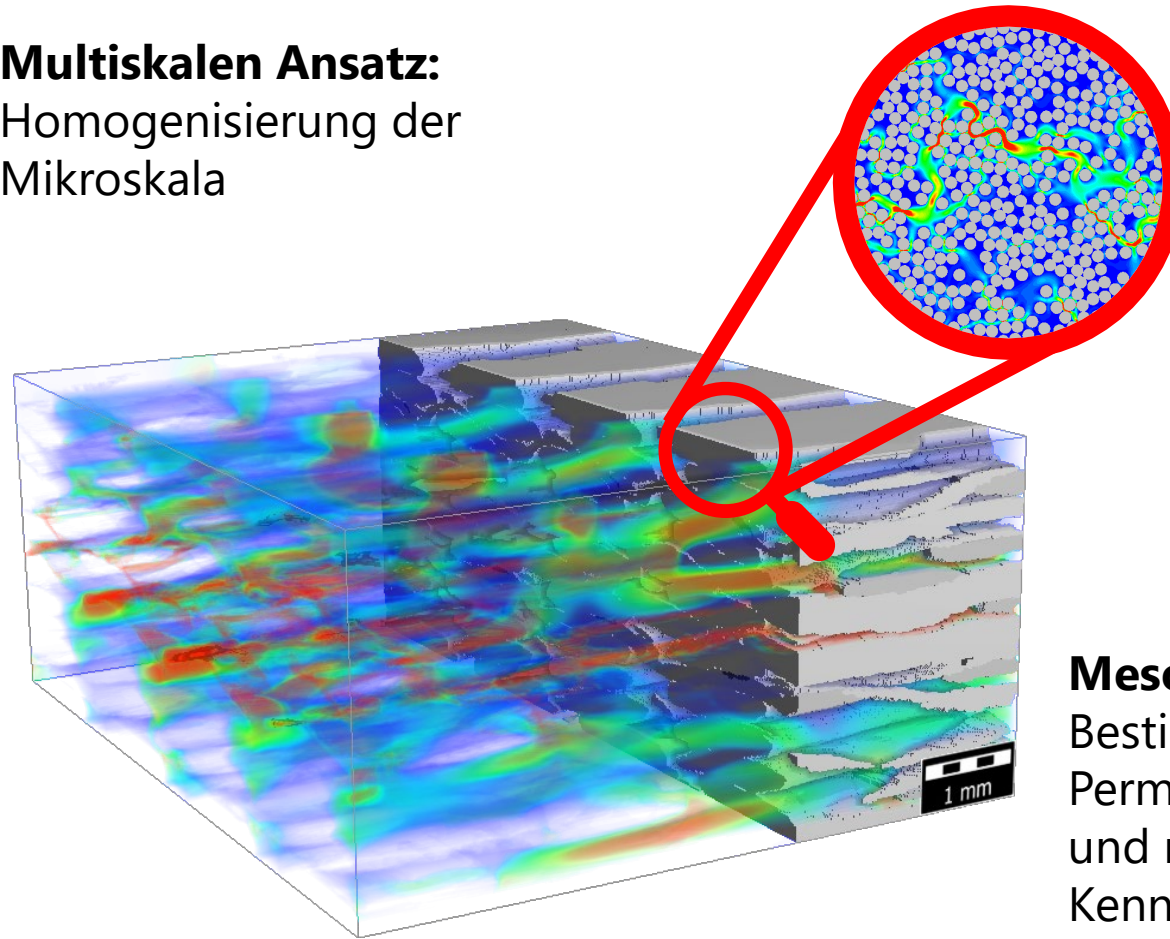
- Simulation der Einzelfilamente
- Homogenisierung der Ergebnisse
- Simulation auf "soliden" Rovings

Strukturgröße:

1500x1500x600 Voxel bei 10µm Auflösung

Je 5 Längs- und Quer-rovings und 8 Lagen

Multiskalen Ansatz:
Homogenisierung der Mikroskala



Mikroskala:
Bestimmung der Permeabilität und des mechanischen Verhaltens

Mesoskala:
Bestimmung der Permeabilität des Textiles und mechanische Kennwerte des Bauteils

Input

- 01 Motivation
- 02 Forschungsprojekt Math2Composites
- 03 Kalibrierung und Validierung von digitalen Zwillingen**
- 04 Zusammenfassung

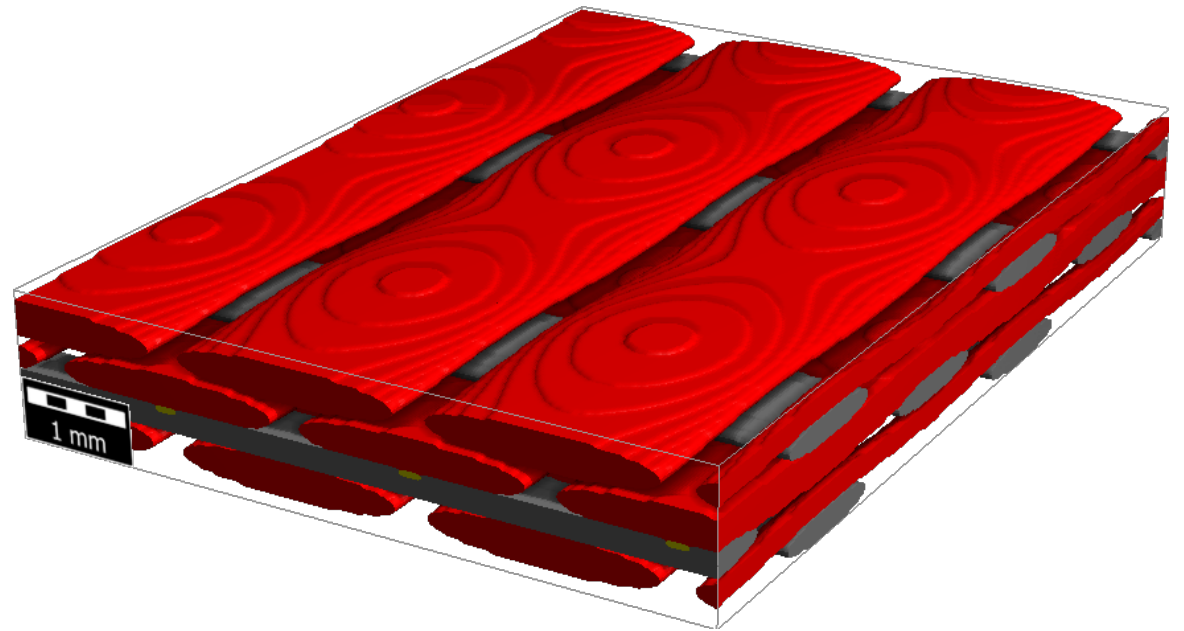
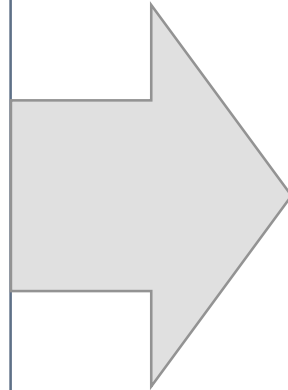
Quellen für die
Parameterwahl

Daten-
Blatt

Bezeichnung	Hacotech G300U – 1270 mm
Textilart	Multiaxiales Gelege (0°/90°), E-Glas
Nominalgewicht	373 g/m ²
Schussfaden (0°)	600 tex, 10 µm Filament, 300 g/m ²
Kettfaden (90°)	295 tex, 10 µm Filament, 60 g/m ²
Verwirkung	PES-Garn, 11 tex, 13 g/m ² Flächengewicht

Quellen für die
Parameterwahl

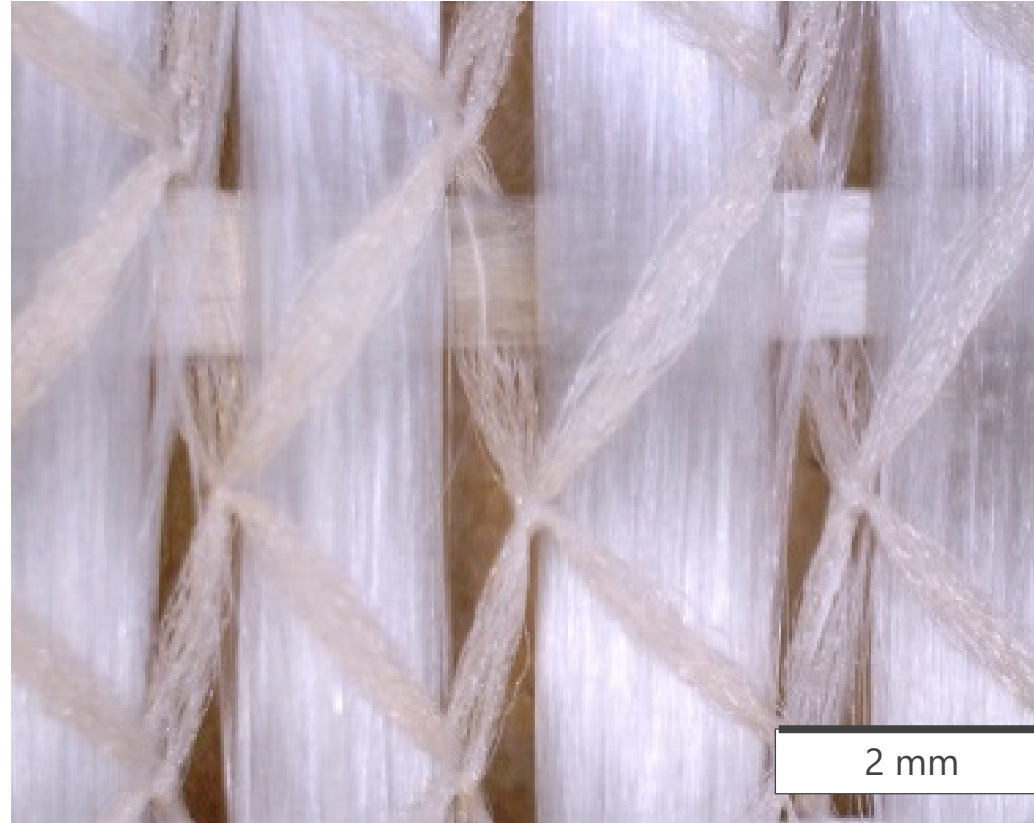
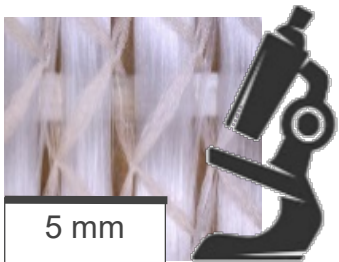
Daten-
Blatt



Quellen für die
Parameterwahl

Daten-
Blatt

Mikroskopie

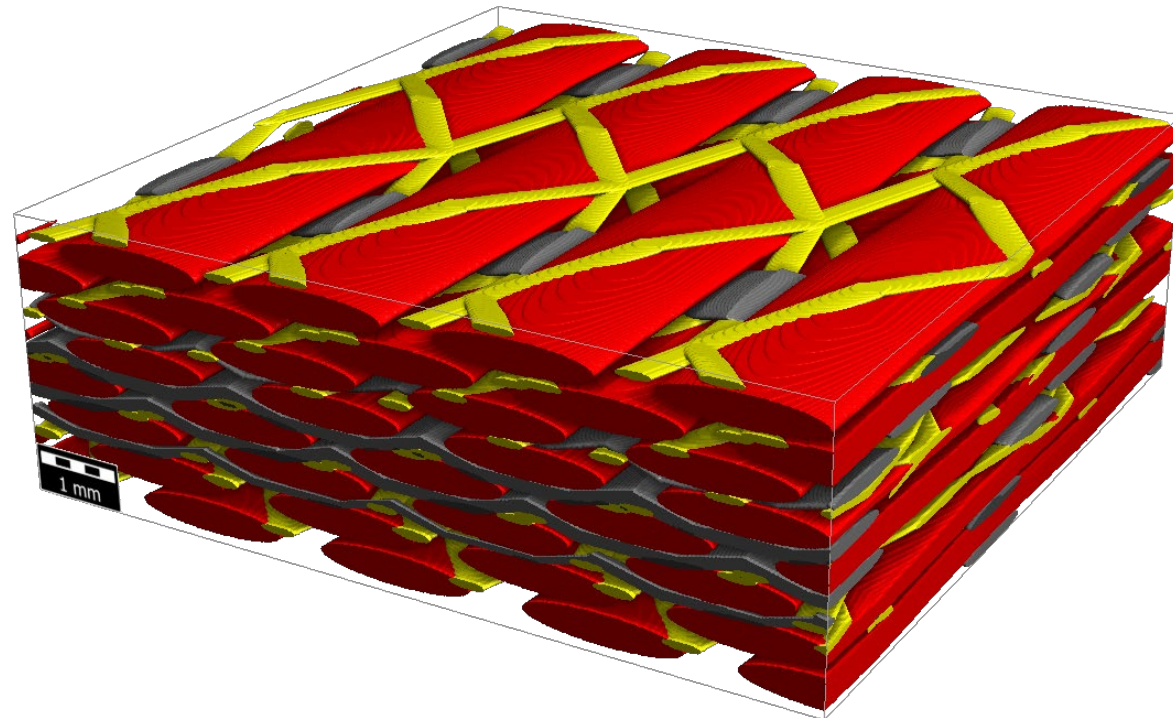
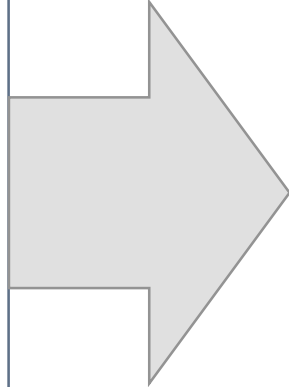
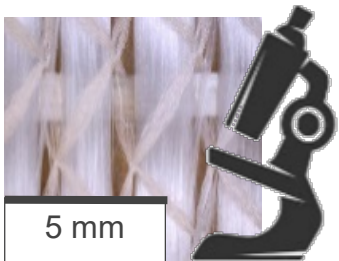


- Ondulation (Wellung) der Rovings
- Vernähung der Rovings
- Ungleichmäßigkeiten in Durchmesser und Abständen der Rovings

Quellen für die
Parameterwahl

Daten-
Blatt

Mikroskopie

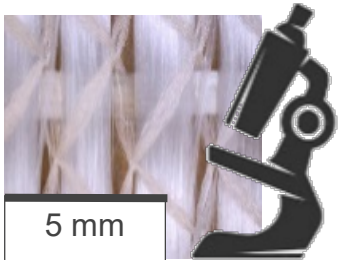


DIGITALISIERUNG DER PROBE: PARAMETRISIERUNG

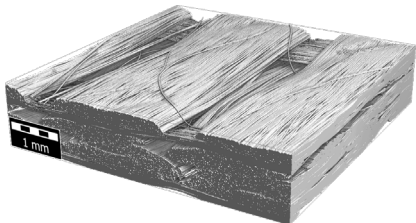
Quellen für die
Parameterwahl

Daten-
Blatt

Mikroskopie

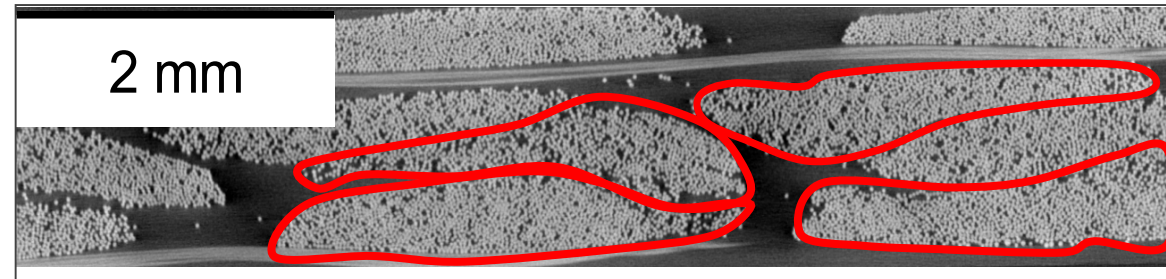


CT-Scan

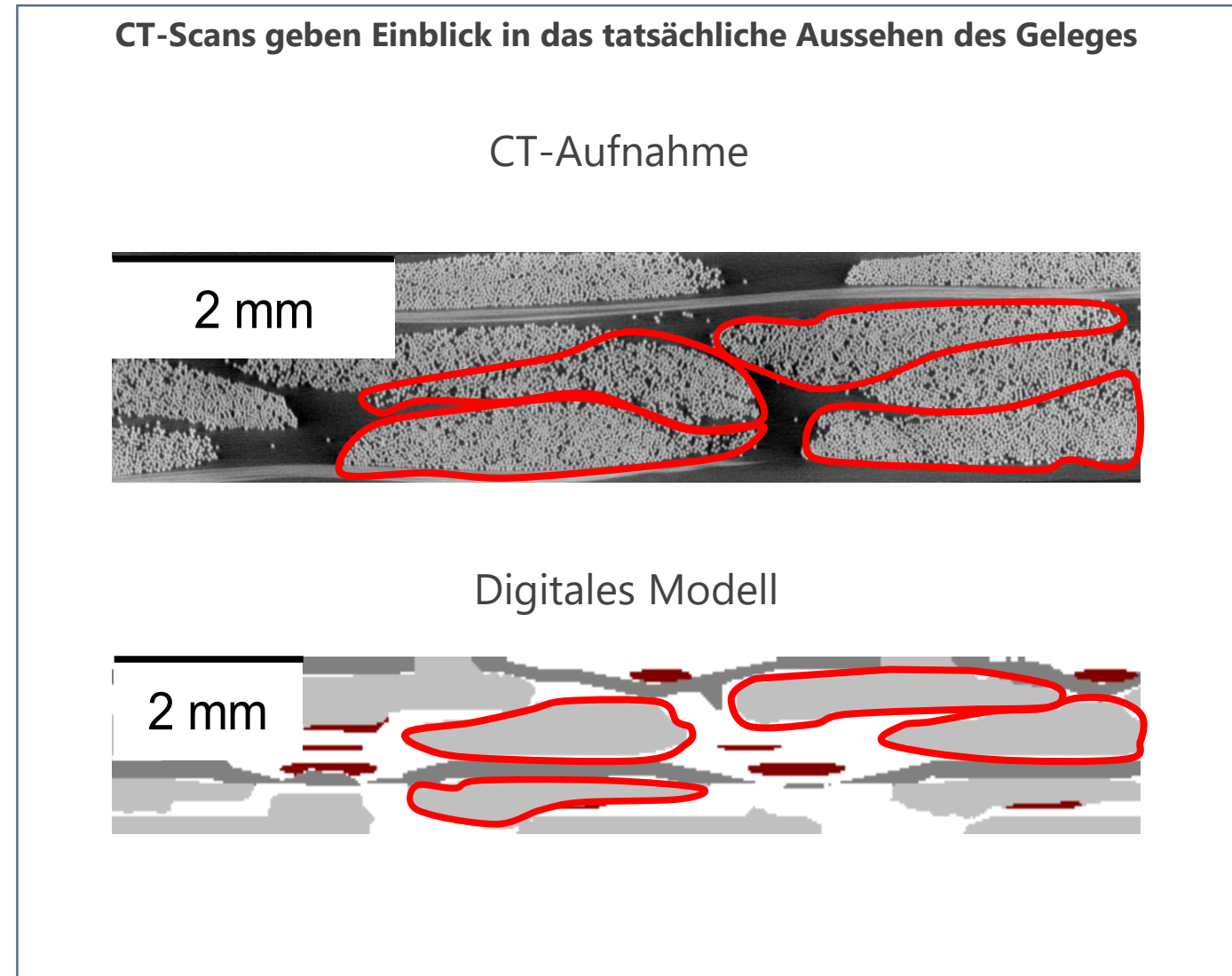
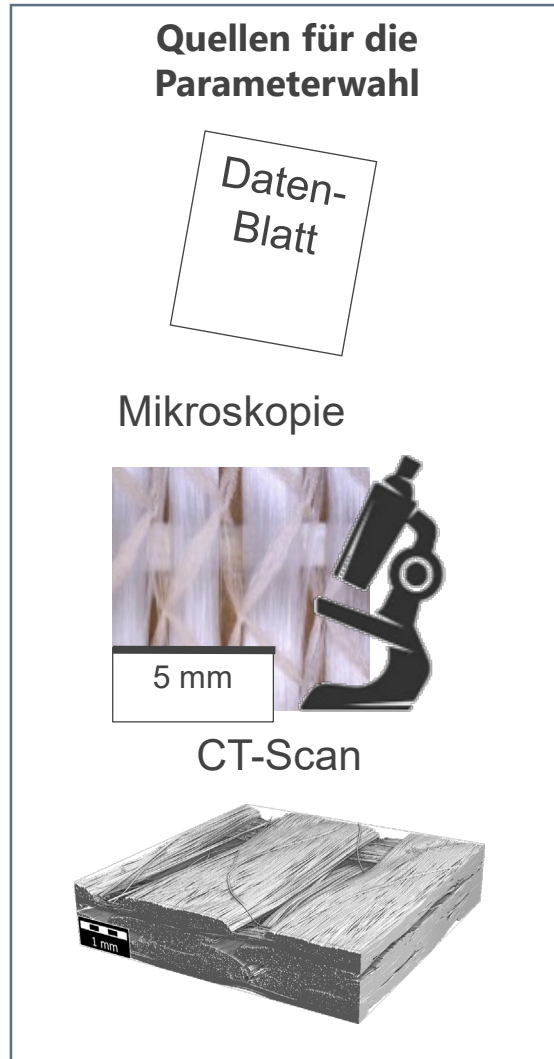


CT-Scans geben Einblick in das tatsächliche Aussehen des Geleges

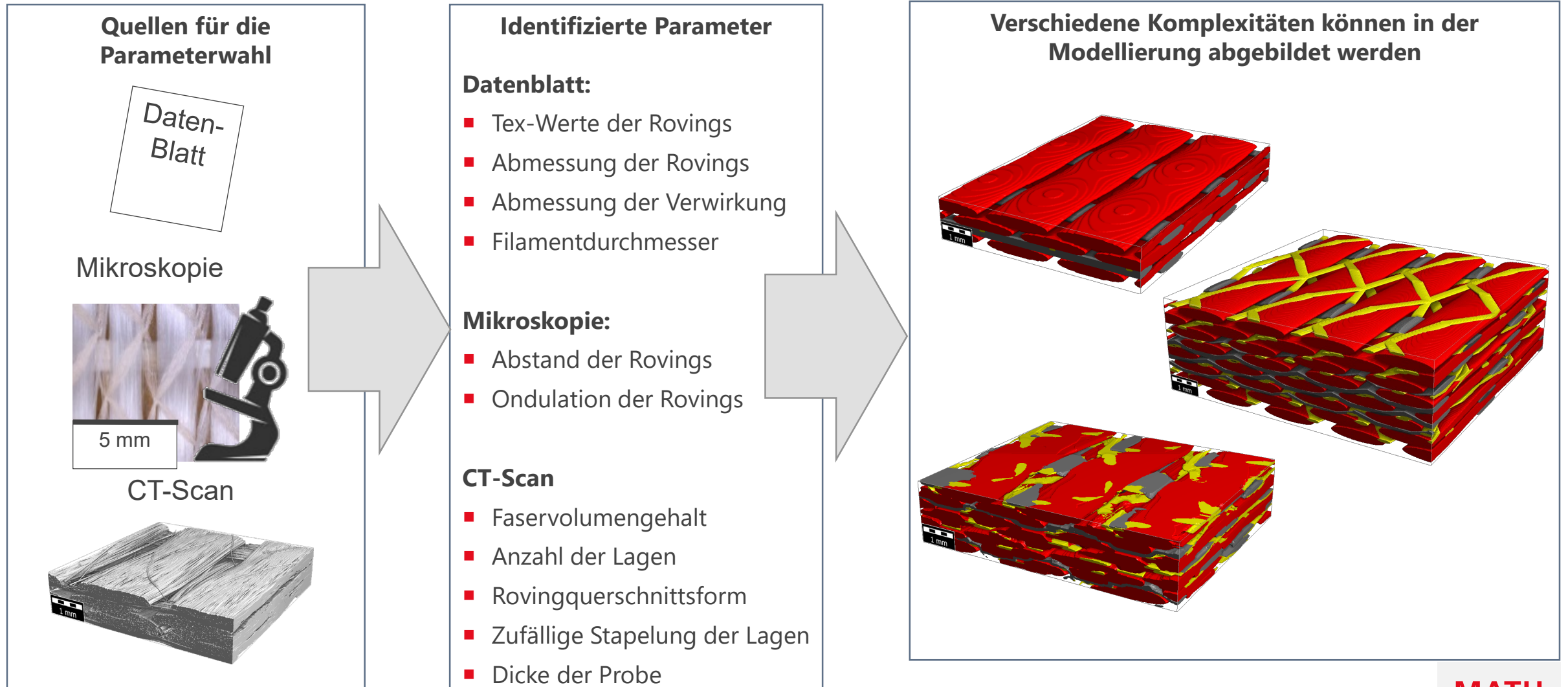
CT-Aufnahme



DIGITALISIERUNG DER PROBE: PARAMETRISIERUNG

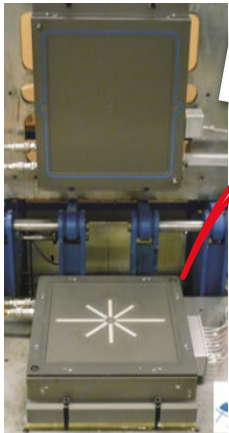


DIGITALISIERUNG DER PROBE: PARAMETRISIERUNG



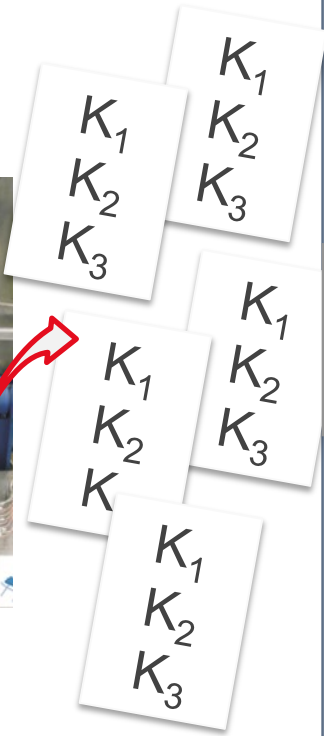
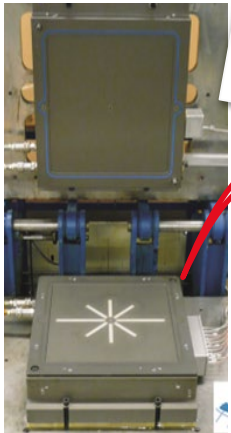
DIGITALISIERUNG DER PROBE: KALIBRIERUNG

Messung 5 verschiedener
Proben

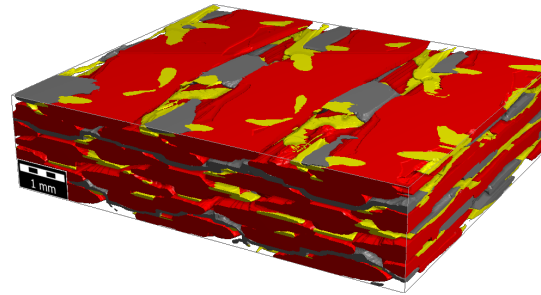


DIGITALISIERUNG DER PROBE: KALIBRIERUNG

Messung 5 verschiedener
Proben

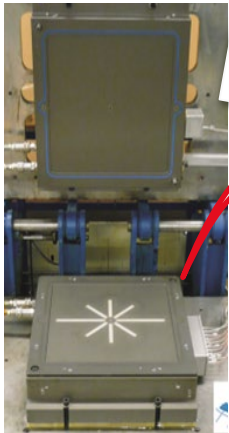


Optimierungsroutine über die Parametrisierung

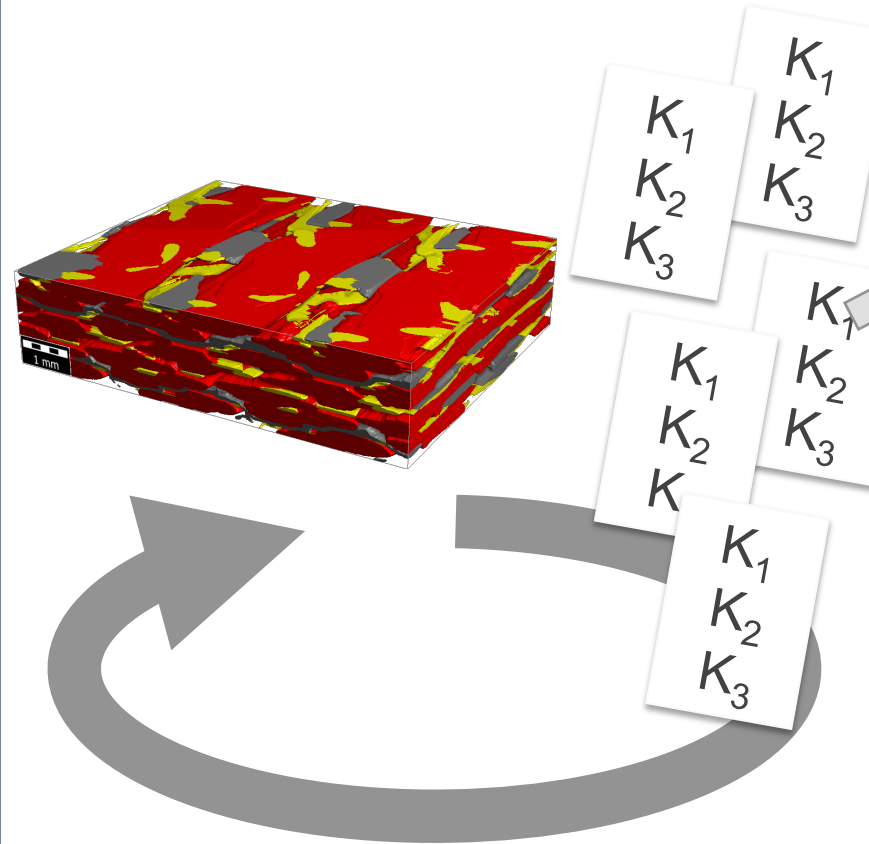


DIGITALISIERUNG DER PROBE: KALIBRIERUNG

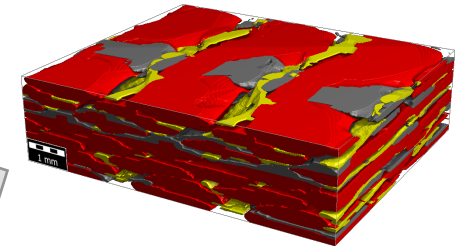
Messung 5 verschiedener
Proben



Optimierungsroutine über die Parametrisierung

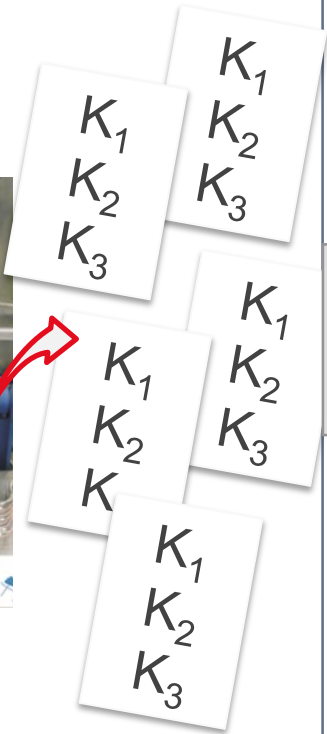
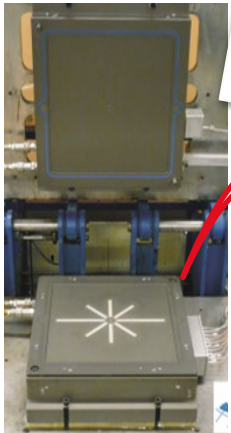


Digitaler Zwilling für die
Permeabilität

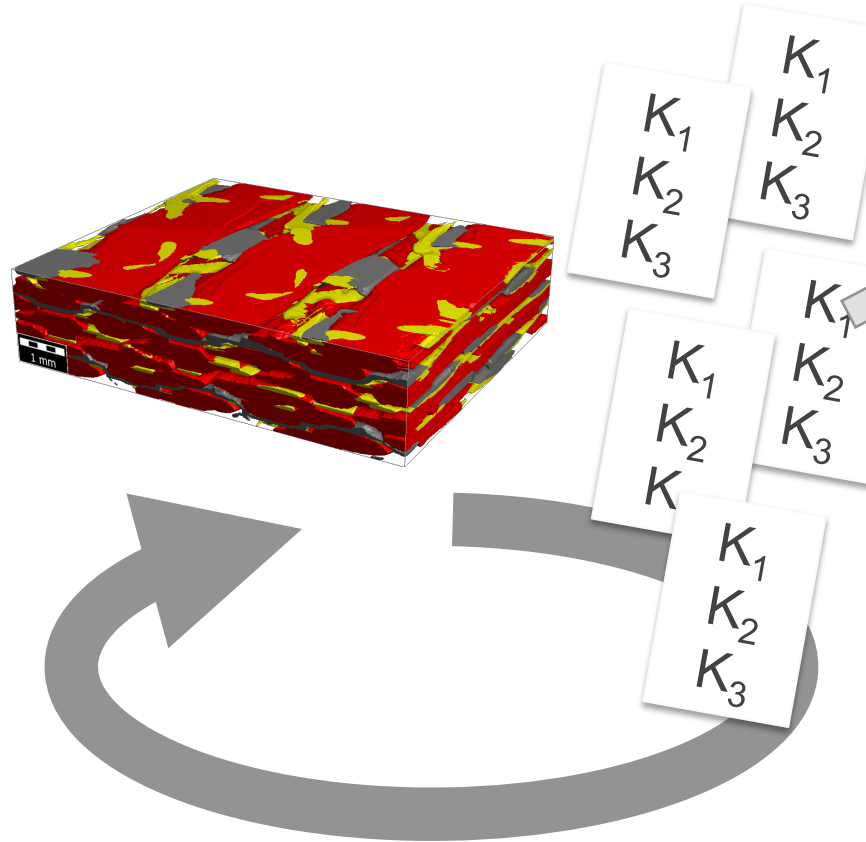


DIGITALISIERUNG DER PROBE: KALIBRIERUNG

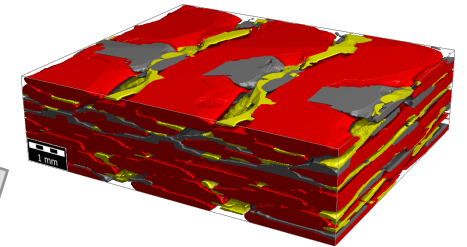
Messung 5 verschiedener
Proben



Optimierungsroutine über die Parametrisierung

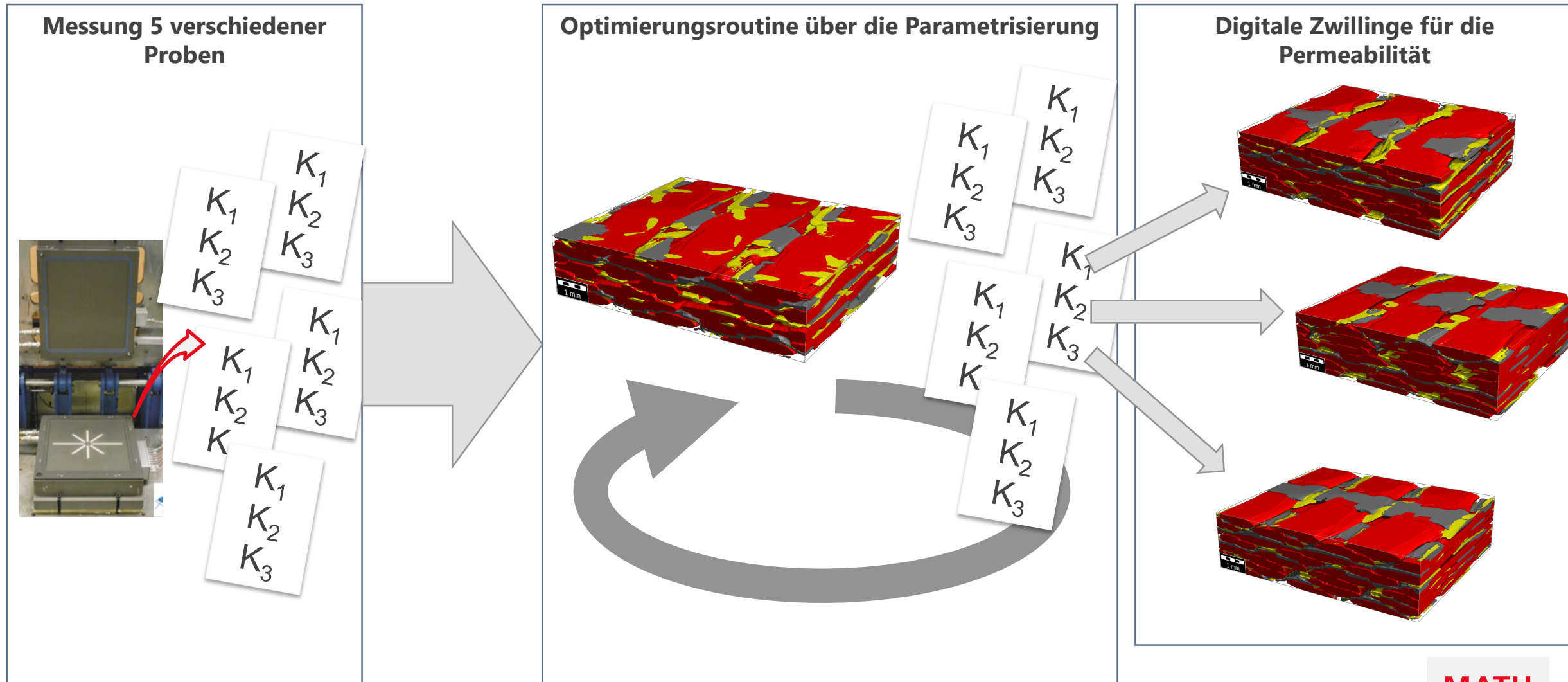


Digitaler Zwilling für die
Permeabilität



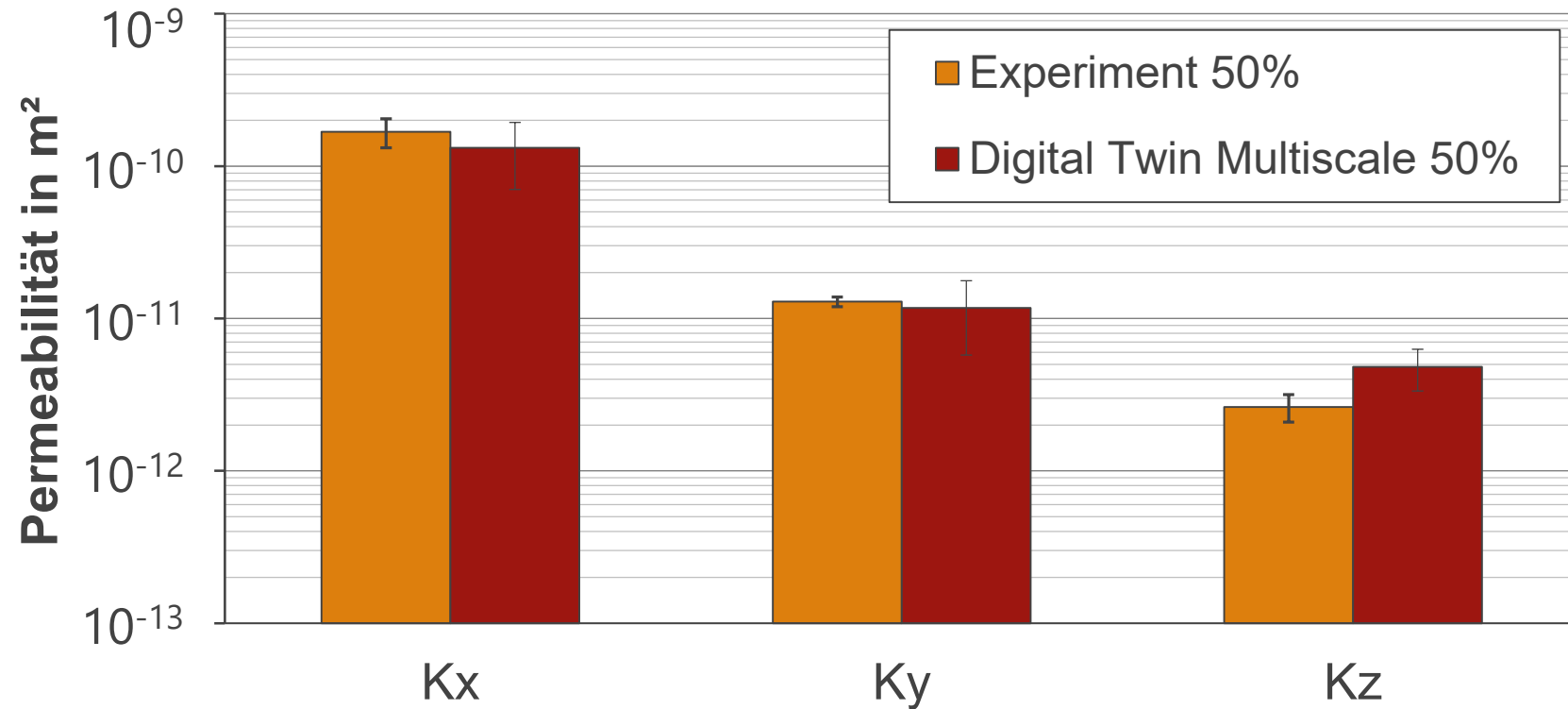
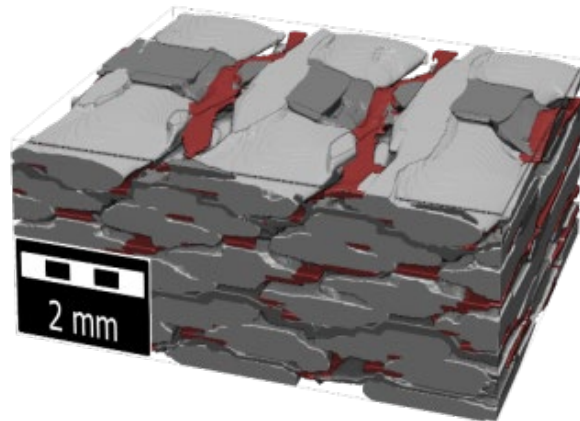
- Gleiche statistischen Parameter
- Andere Zufallszahlen

DIGITALISIERUNG DER PROBE: KALIBRIERUNG



DIGITALISIERUNG DER PROBE: KALIBRIERUNG BEI 50% FVG

Kalibrierung des Modells
an den experimentellen
Ergebnissen bei 50% FVG



➤ Die Kalibrierungsmethodik auf ein Modell mit 50 % FVG erfolgreich angewendet

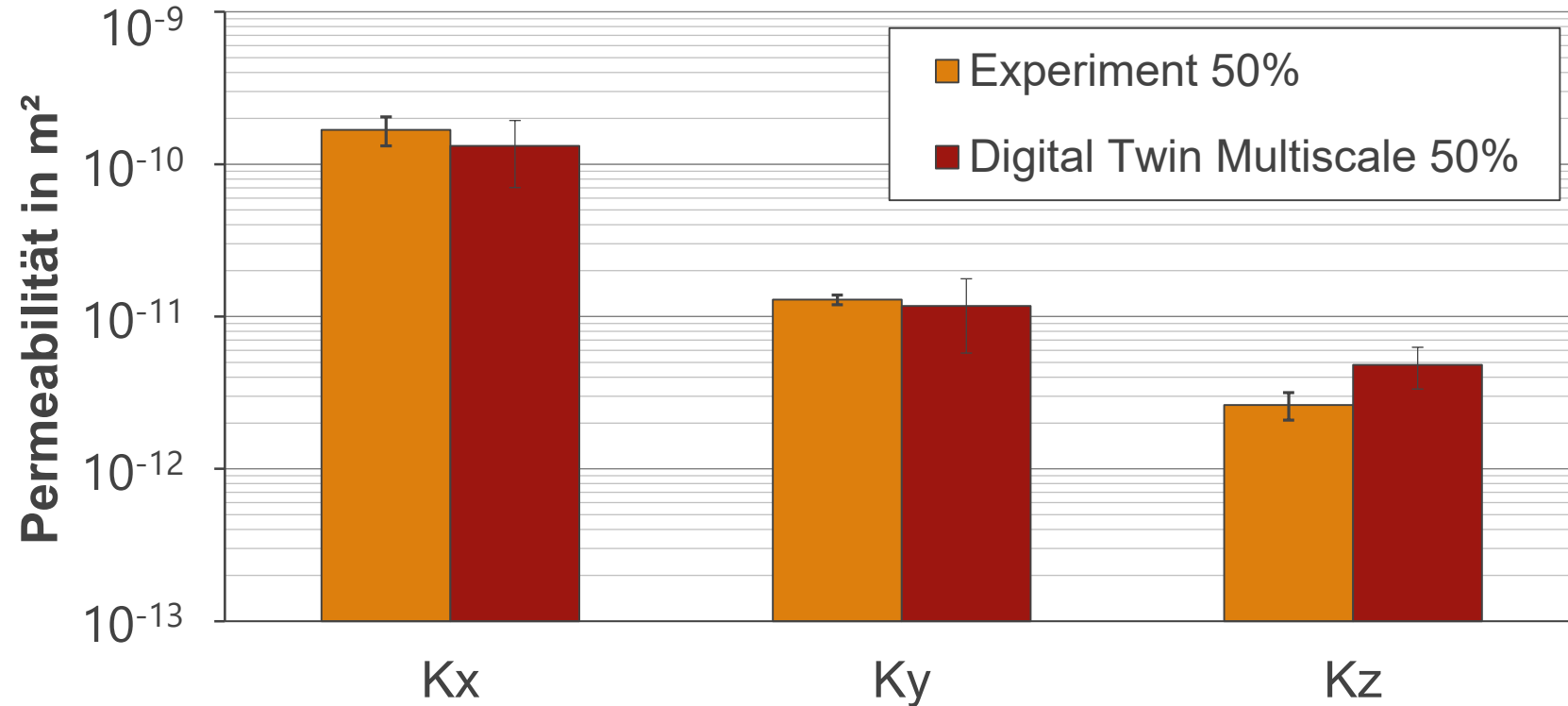
DIGITALISIERUNG DER PROBE: PERMEABILITÄTS VALIDIERUNG

- Kalibriertes Modell spiegelt die Probe bei 50% Faser Volumengehalt wieder
- Digitale Modellierung höherer FVG (55% und 60%)
- Experimentelle Validierung der digitalen Modelle
 - Zur allgemeinen Validierung des Workflows



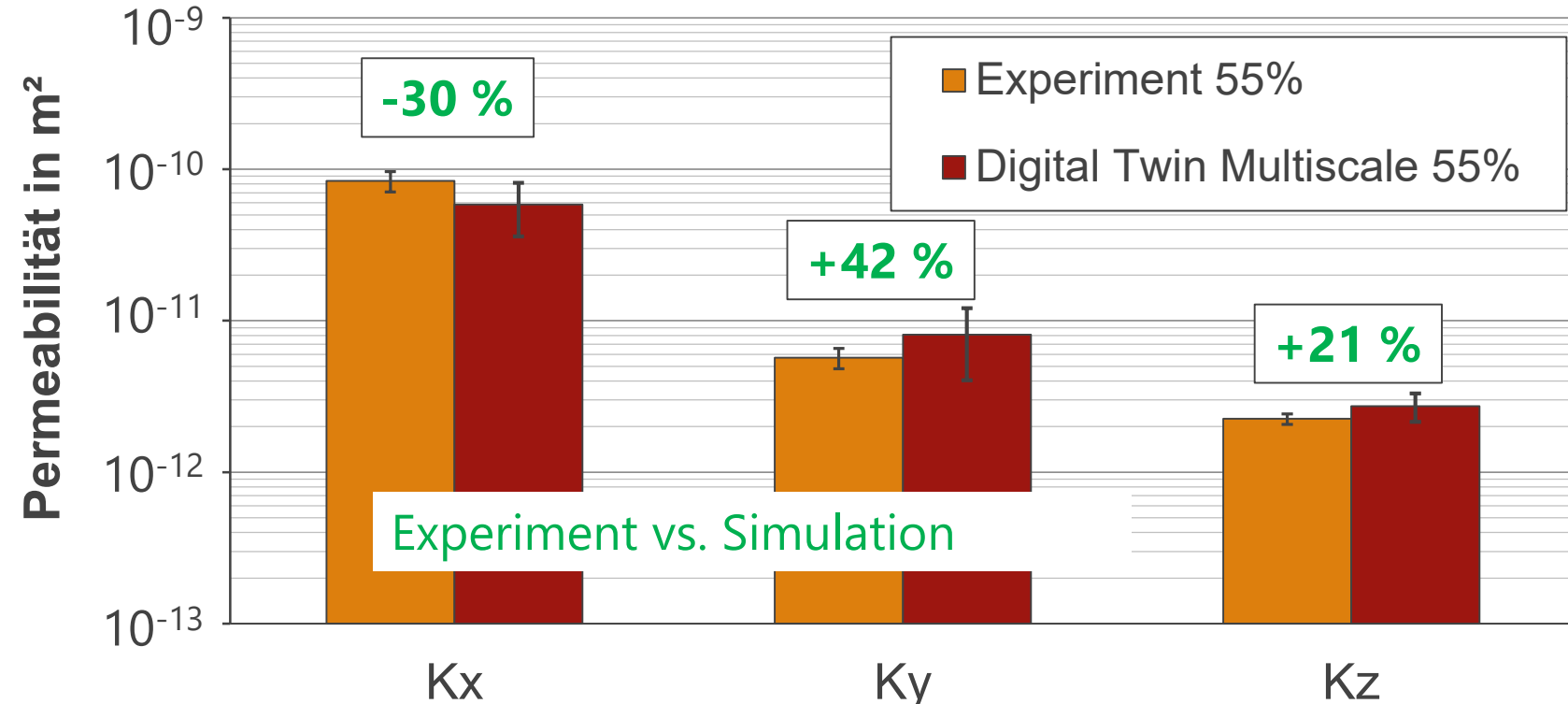
DIGITALISIERUNG DER PROBE: KALIBRIERUNG BEI 50% FVG

Kalibrierung des Modells
an den experimentellen
Ergebnissen bei 50% FVG



DIGITALISIERUNG DER PROBE: VALIDIERUNG BEI 55% FVG

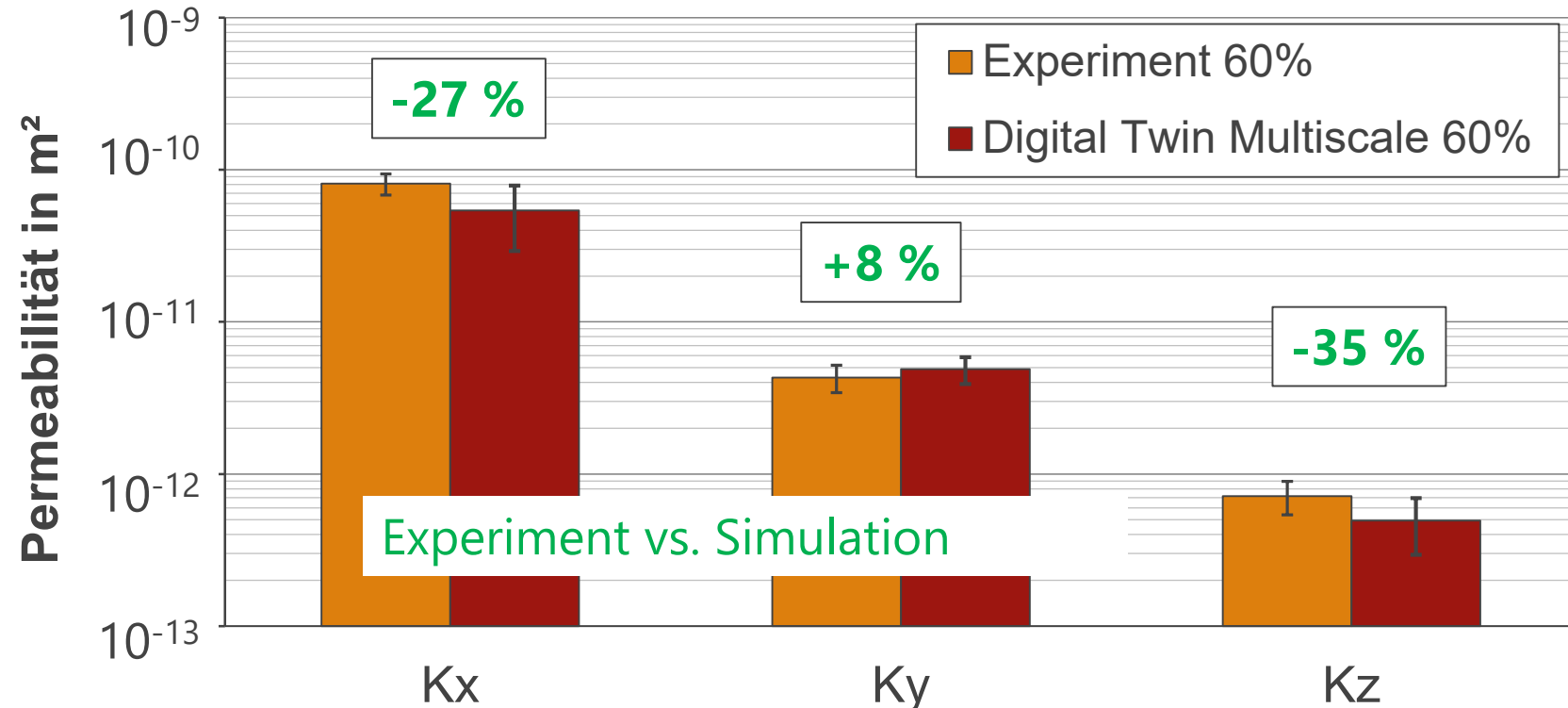
Extrapolation auf 55% FVG
und Vergleich mit
experimentellen
Ergebnissen.



➤ Erfolgreiche Übertragung und Validierung des kalibrierten Modells bei 55% FVG

DIGITALISIERUNG DER PROBE: VALIDIERUNG BEI 60% FVG

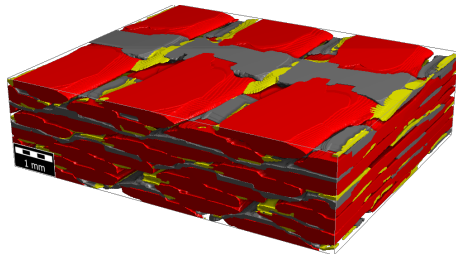
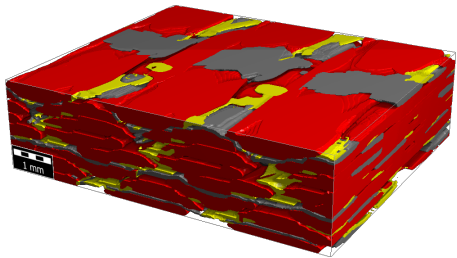
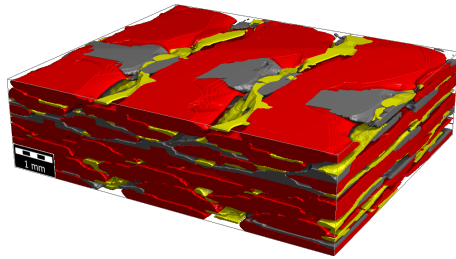
Extrapolation auf 60% FVG
und Vergleich mit
experimentellen
Ergebnissen.



➤ Erfolgreiche Übertragung und Validierung des kalibrierten Modells bei 60% FVG

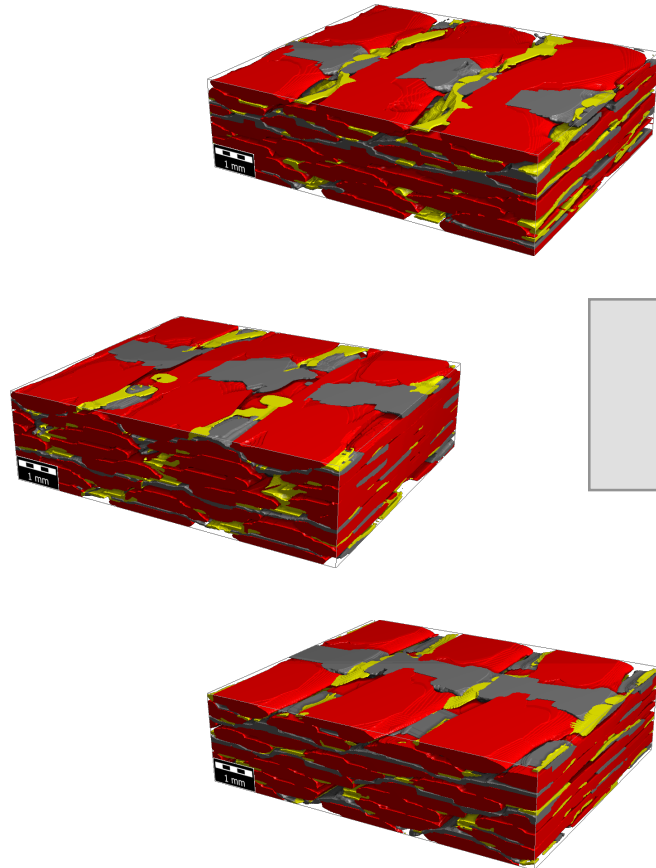
DIGITALISIERUNG DER PROBE: MECHANISCHE VALIDIERUNG

Digitale Zwillinge für die
Permeabilität

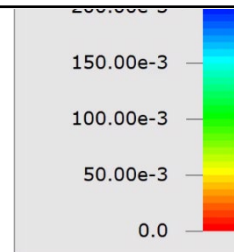


DIGITALISIERUNG DER PROBE: MECHANISCHE VALIDIERUNG

Digitale Zwillinge für die
Permeabilität

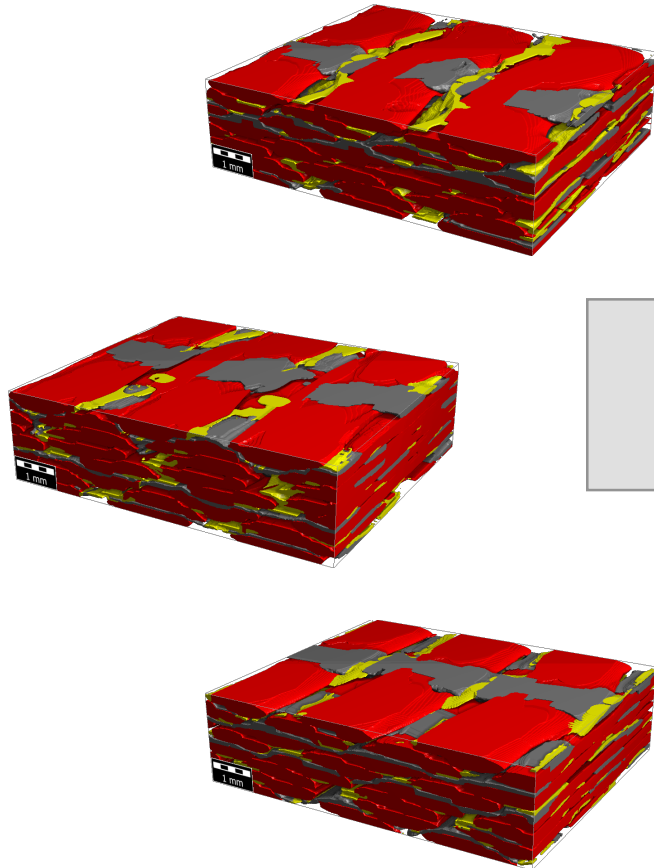


Simulation des mechanischen
Materialverhaltens

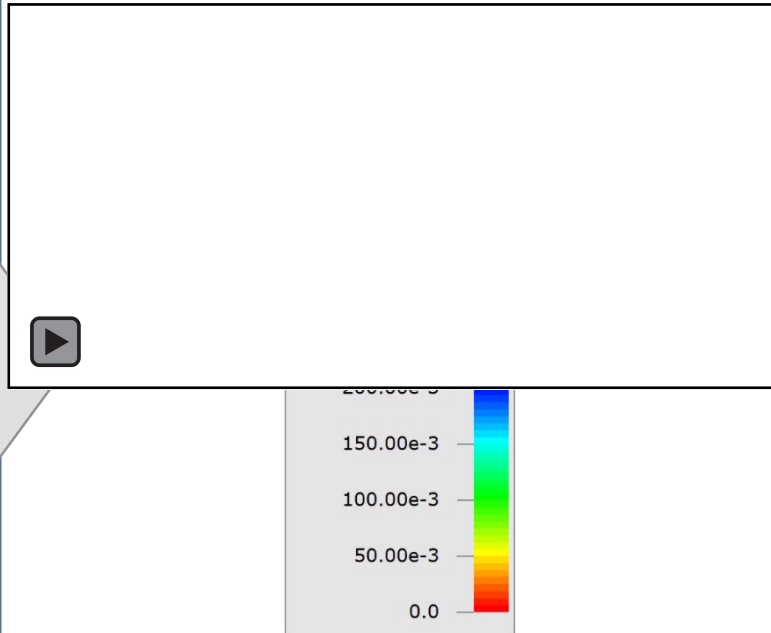


DIGITALISIERUNG DER PROBE: MECHANISCHE VALIDIERUNG

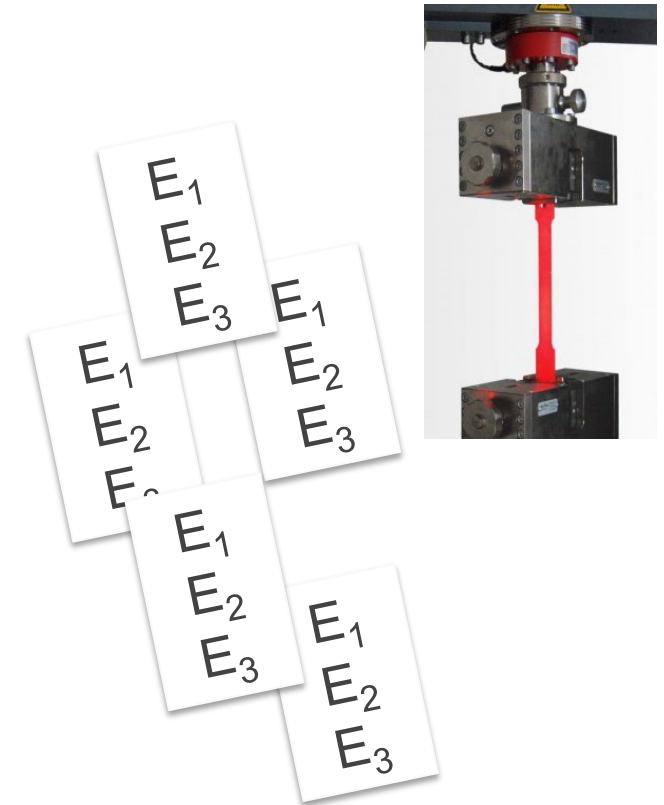
Digitale Zwillinge für die
Permeabilität



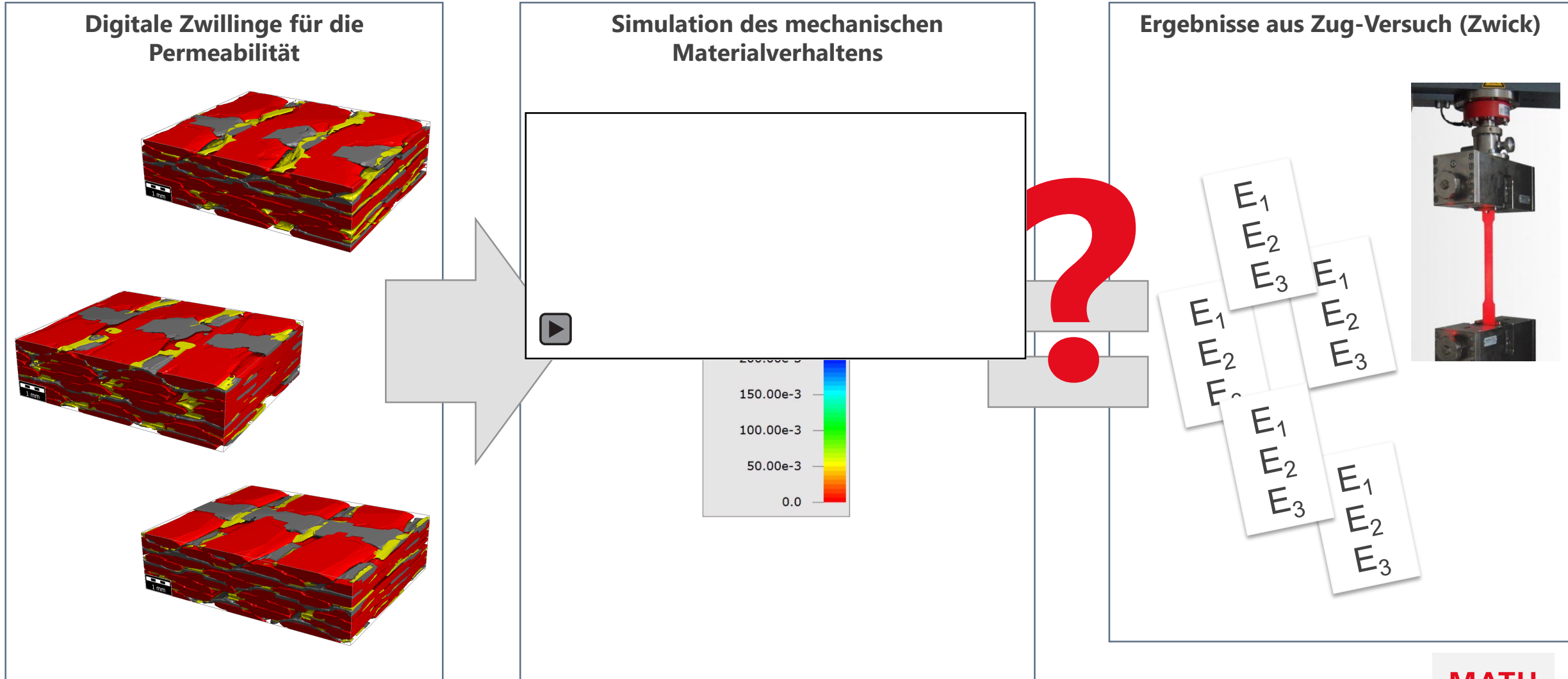
Simulation des mechanischen
Materialverhaltens



Ergebnisse aus Zug-Versuch (Zwick)

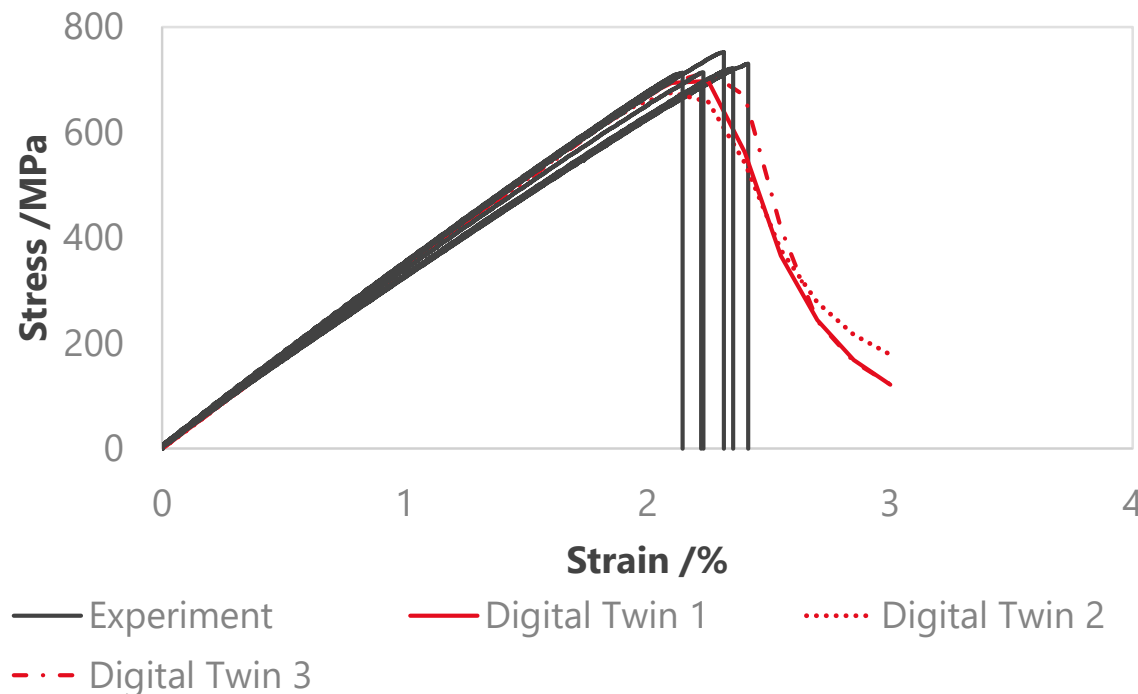


DIGITALISIERUNG DER PROBE: MECHANISCHE VALIDIERUNG

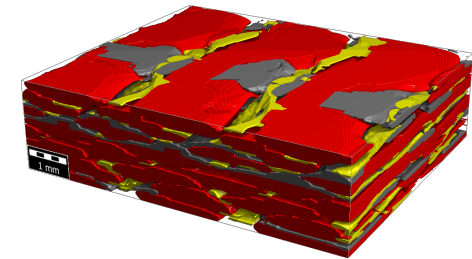


ERGEBNISSE DER MECHANISCHEN VALIDIERUNG DES MULTISKALEN ANSATZES

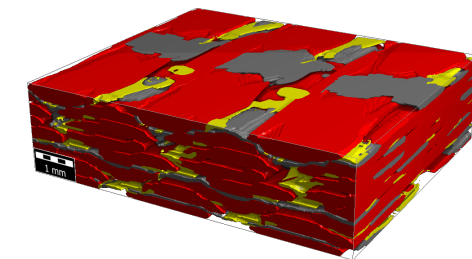
- Digitaler Zugversuch auf den drei digitalen Zwillingen
- Die digitalen Zwillinge haben die gleichen statistischen Eigenschaften
- Vergleich mit Zugversuch in Richtung der 0° Rovings



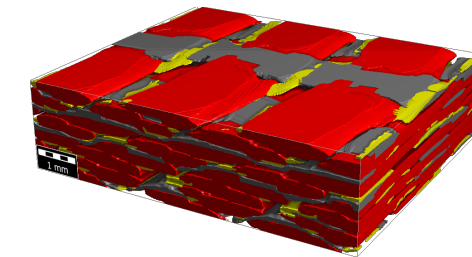
Digitaler Zwilling 1



Digitaler Zwilling 2



Digitaler Zwilling 3



01

Motivation

02

Forschungsprojekt Math2Composites

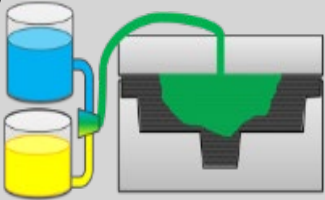
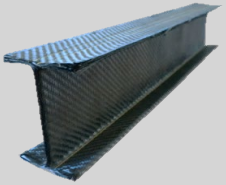
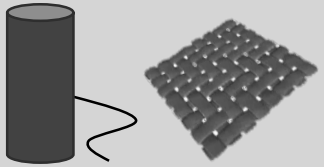
03

Kalibrierung und Validierung von digitalen Zwillingen

04

Zusammenfassung

Probe herstellen

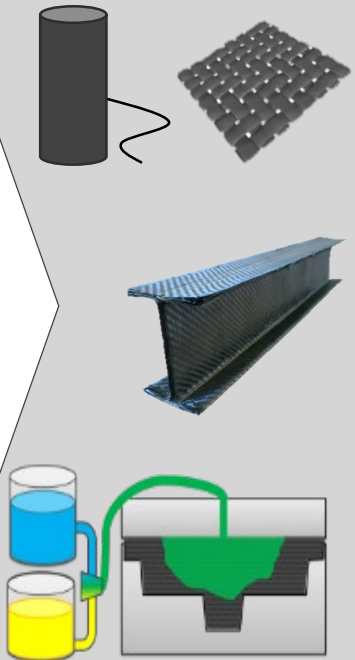


Fertigung von ca. 5 Proben
um die statistische Varianz
abzubilden

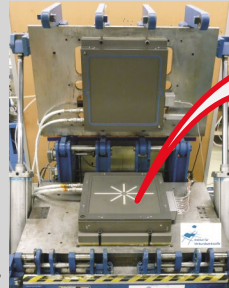
EFFIZIENZ DER EXPERIMENTELLE BAUTEIL ENTWICKLUNG

ca. 5 Proben

Probe herstellen



Probe messen

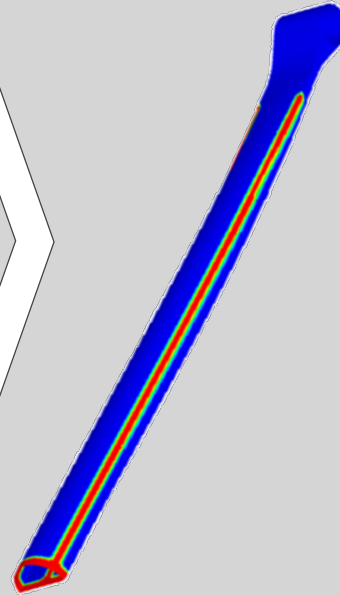


K_1
 K_2
 K_3



E_1
 E_2
 E_3

Bauteilsimulation auf Makroebene



Charakterisiertes Bauteil

A:
Akzeptable
Eigenschaften

B:
Eigenschaften
verbesserungs-
bedürftig

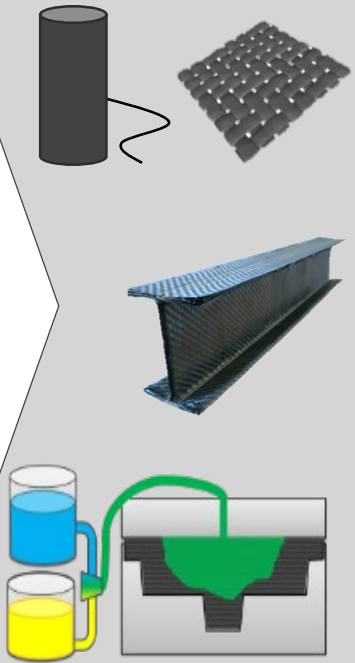
Ca. 5 Durchläufe bis
B: eintritt

Anpassung der
Probenzusammensetzung

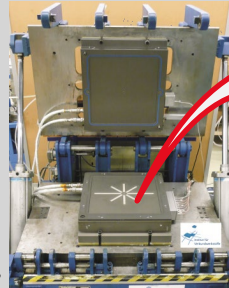
EFFIZIENZ DER EXPERIMENTELLE BAUTEIL ENTWICKLUNG

ca. 5 Proben

Probe herstellen



Probe messen

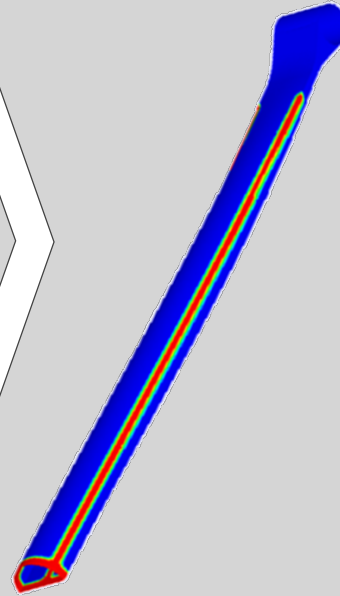


K_1
 K_2
 K_3



E_1
 E_2
 E_3

Bauteilsimulation auf Makroebene



Charakterisiertes Bauteil

A:
Akzeptable
Eigenschaften

B:
Eigenschaften
verbesserungs-
bedürftig

Ca. 5 Durchläufe bis
B: annähernd erfüllt

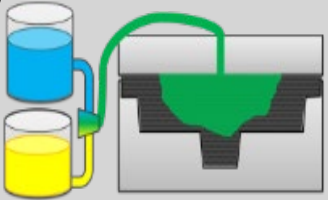
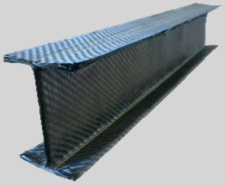
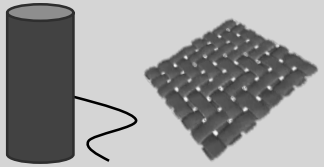


Anzahl gefertigter
Proben
Ca. 25

Anzahl geprüfter
Parametersätze
5

Anpassung der
Probenzusammensetzung

Probe herstellen

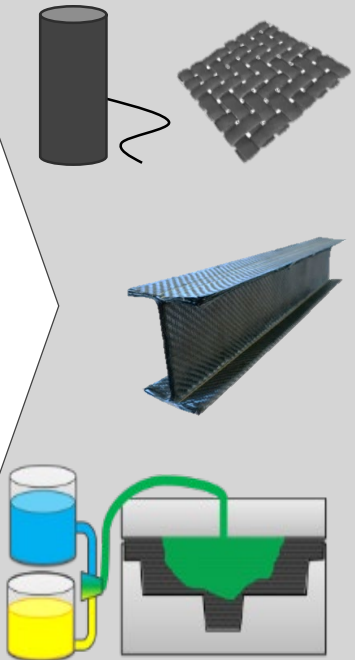


Fertigung von ca. 5 Proben
um die statistische Varianz
abzubilden

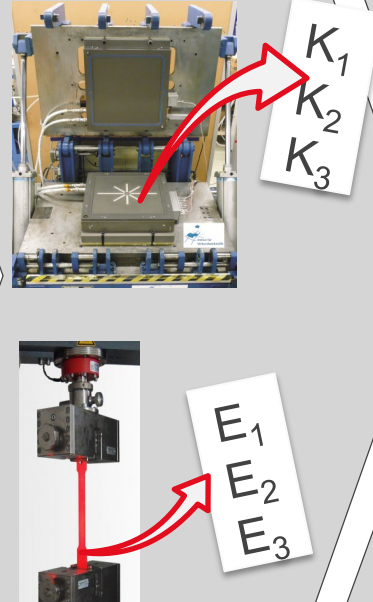
EFFIZIENZ DER SIMULATIVEN BAUTEIL ENTWICKLUNG

ca. 5 Proben

Probe herstellen

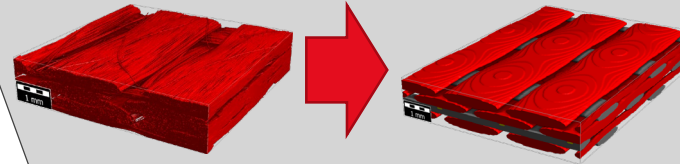


Probe messen

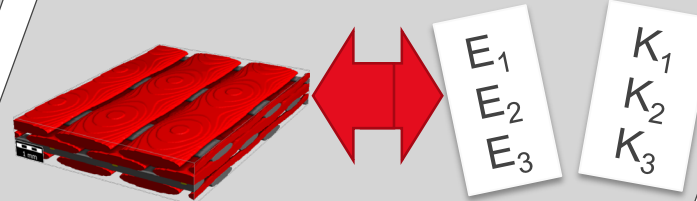


Probe digitalisieren

Parametrisierung:



Kalibrierung:

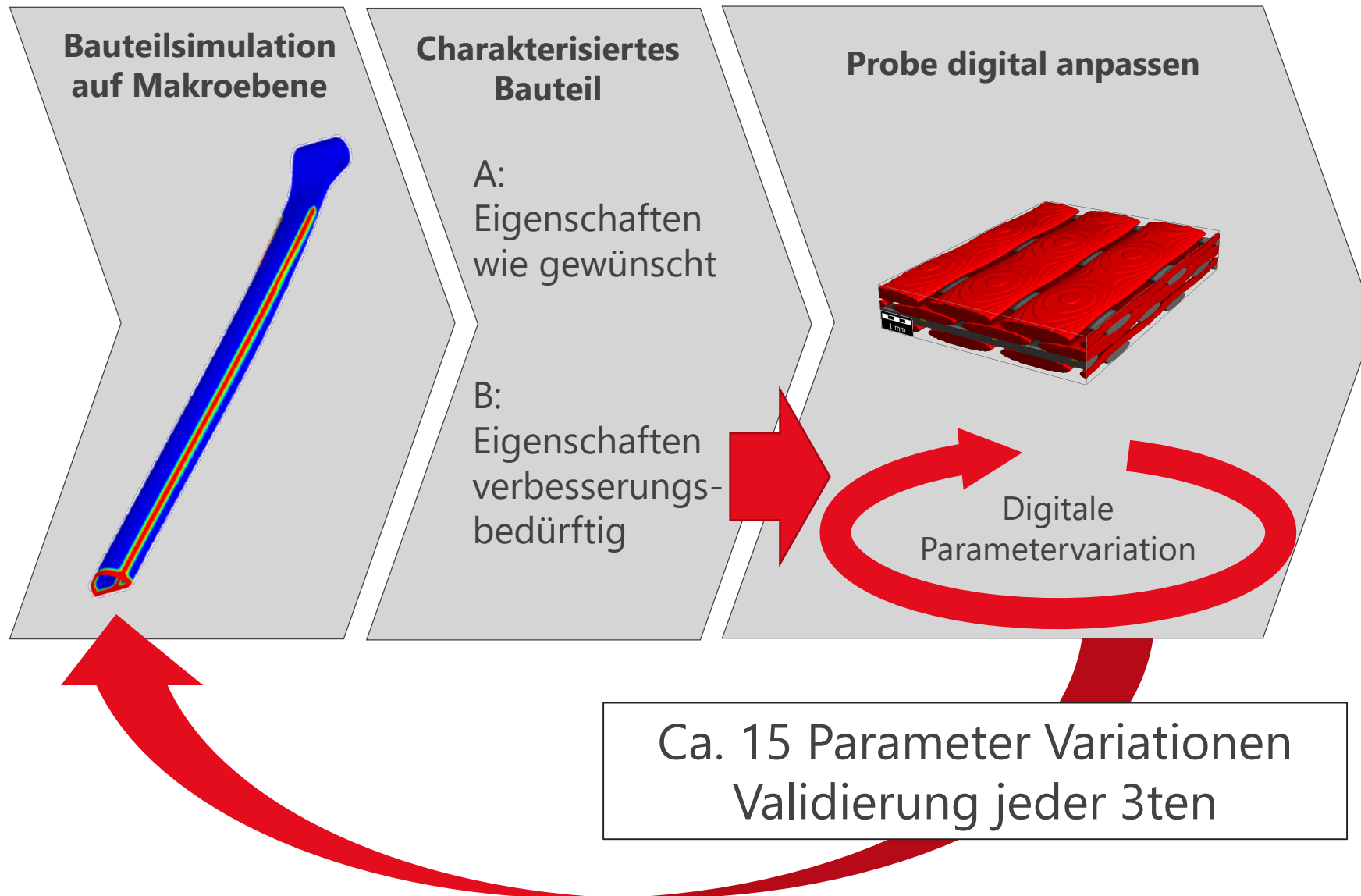


Probe digital messen



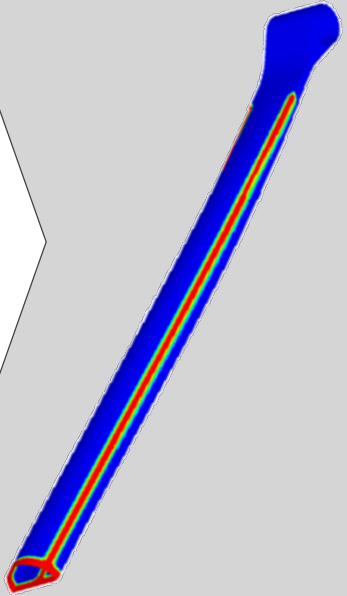
5 Proben für die Digitalisierung

EFFIZIENZ DER SIMULATIVEN BAUTEIL ENTWICKLUNG



EFFIZIENZ DER SIMULATIVEN BAUTEIL ENTWICKLUNG

**Bauteilsimulation
auf Makroebene**

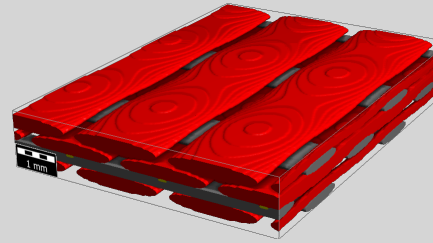


**Charakterisiertes
Bauteil**

A:
Eigenschaften
wie gewünscht

B:
Eigenschaften
verbesserungs-
bedürftig

Probe digital anpassen

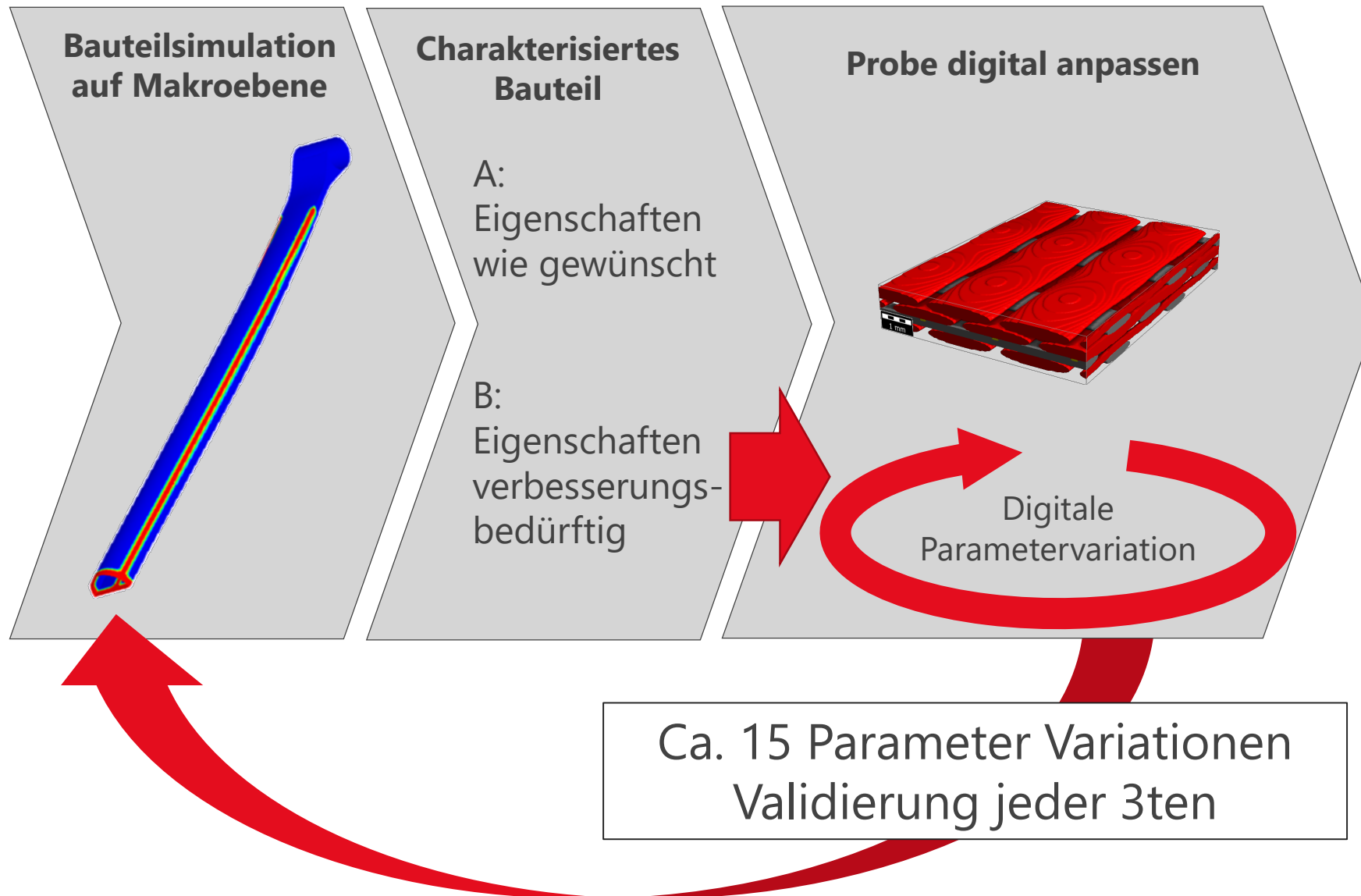


Digitale
Parametervariation

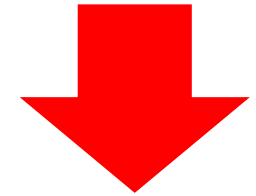
Ca. 15 Durchläufe
bis
B: optimales Design
gefunden ist

Ca. 15 Parameter Variationen
Validierung jeder 3ten

EFFIZIENZ DER SIMULATIVEN BAUTEIL ENTWICKLUNG



Ca. 15 Durchläufe
bis
B: optimales Design
gefunden ist



**Anzahl gefertigter
Proben
Ca. 10**

**Anzahl geprüfter
Parametersätze
15**

EXPERIMENTELLE UND SIMULATIV GESTÜTZTE ENTWICKLUNG

Rein experimentelle Entwicklung

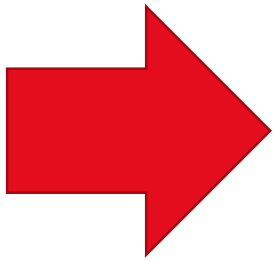
Anzahl gefertigter
Proben
ca. 25

Anzahl geprüfter
Parametersätze
5

Simulativ unterstützte Entwicklung

Anzahl gefertigter
Proben
ca. 10

Anzahl geprüfter
Parametersätze
15



Reduktion gefertigter Proben um

50% und weniger

Erhöhung des Durchsatzes geprüfter Parametersätze um **Faktor 3**

- Digitalisierung der Herstellung von Liquid Composite Molding
 - Entwicklung und Validierung eines simulationsgestützten Workflows
- Steigerung der Effizienz der Prüfstände
 - Reduktion der benötigten Messversuche
 - Erhöhung der geprüften Parametersätze
- Übertragung auf weitere Anwendungsgebiete:
 - Spritzgussfertigung
 - Sheet Molding Compound
 - Organobleche
 - ...

Das Forschungsprojekt "Math2Composites" wurde gefördert durch das ZIM
Programm des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi),
Fördernummer: ZF40523110EB6

Supported by:



on the basis of a decision
by the German Bundestag



Vielen Dank an das "Institut für Verbundwerkstoffe" für
die großartige und angenehme Zusammenarbeit



VIELEN DANK FÜR IHRE AUFMERKSAMKEIT

Besuchen Sie unseren Stand #45

Aaron Widera

Anwendungsingenieur Verbundwerkstoffe



aaron.widera@math2market.de



+49 631 205 605 - 32



www.math2market.de

FILTRATION

Für eine saubere Umwelt

ELEKTROCHEMIE

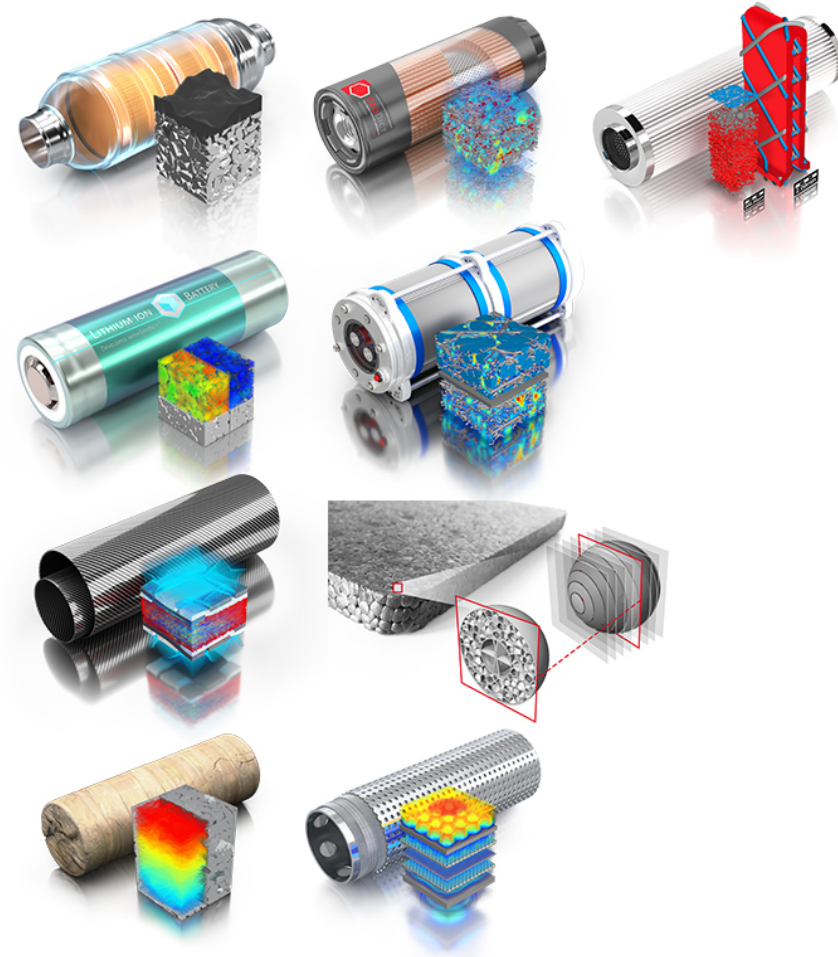
Zur Förderung der Elektromobilität

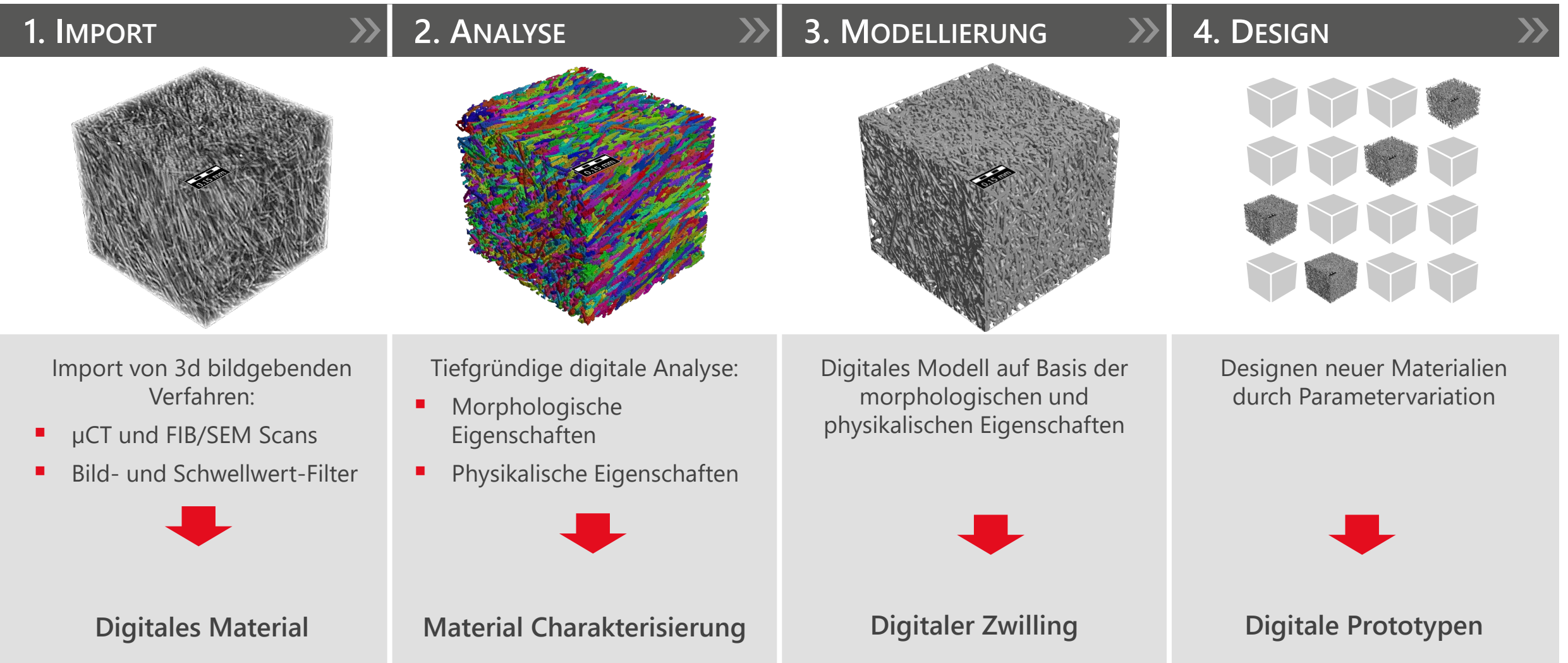
KONSTRUKTIONSWERKSTOFFE

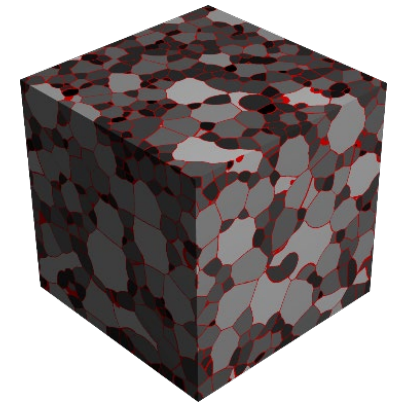
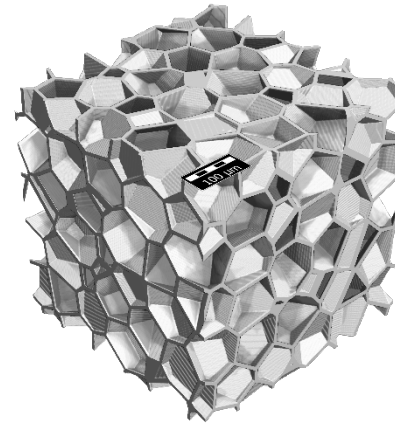
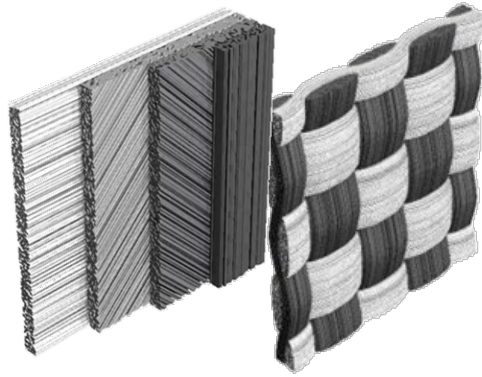
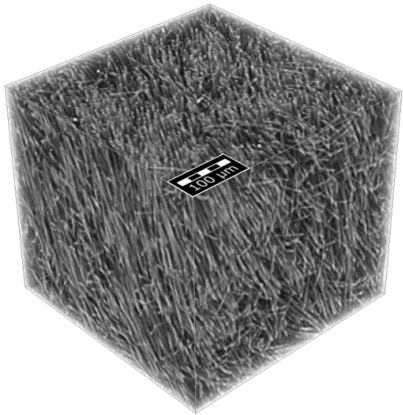
Für Leichtbaulösungen

DIGITALE GESTEINSPHYSIK

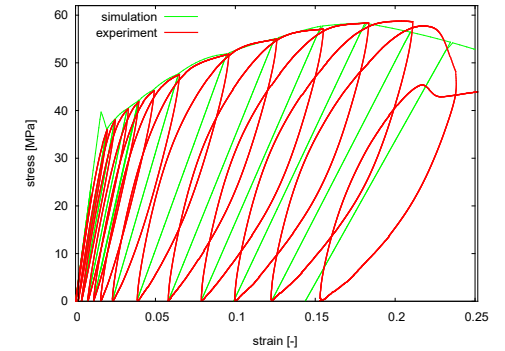
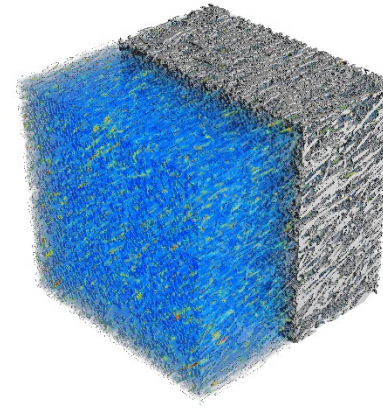
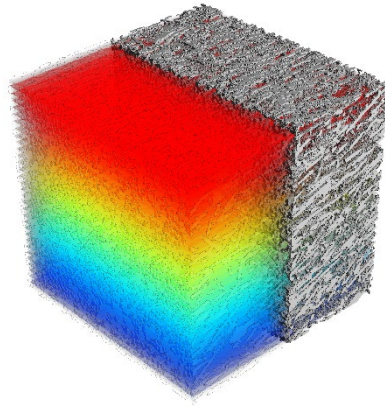
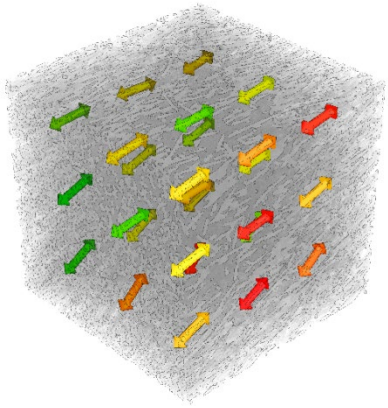
Für effiziente Energieerzeugung







Import von Bilddaten	Generierung von Composites	Generierung von Schäumen	Kristalline Materialien
■ Importiere Daten von μCT-scans, FIB-SEM, EBSD-Detektoren ■ Vielzahl an Bildfiltern: ■ Ringartefakt Entfernung ■ OTSU- Schwellwert Filter ■ Median, mean, non-local means, Gauss Filter ■ Benutzerdefinierte Filter	■ Gewebe wie: Leinwand-, Köper- und Atlas-bindung ■ Kurzfaserverstärkte Verbundwerkstoffe (Spritzguss) ■ Langfaserverstärkte Verbundwerkstoffe (LFT, GMT) ■ Gelege (NCF)	■ Zufällige- und Kelvin-Schäume ■ offen- und (teil)geschlossen-zellig ■ Benutzerdefinierte Porenverteilung ■ Komplexe Materialien (Schaumstoffperle)	■ Metalle und Keramiken ■ Faserverstärkte Keramiken und Metalle ■ Hybrid Materialien

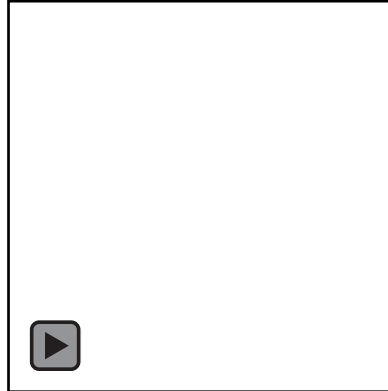


Geometrische Analysen	Strömungen und Leitfähigkeiten	Mechanische Eigenschaften	Große Verformungen, Schädigung und Versagen
■ Volumenanteile ■ Faser-Länge und -Durchmesser ■ Faser-/Korn-Orientierungen ■ Faser-, Korn- und Poren-Erkennung ■ Korngröße und Korngrößenverteilung	■ Absolute Permeabilität ■ Thermische Leitfähigkeit ■ Elektrische Leitfähigkeit ■ Tortuosität ■ Diffusivität	■ Elastische Module ■ Steifigkeitstensor ■ Volle Anisotropie ■ Thermische Ausdehnung	■ Hyperelastische Materialien ■ Plastische Verformungen ■ Viskose Effekte ■ Schaden und Versagen ■ Formänderung ■ Ermüdung ■ Riss-initiierung und -ausbreitung

Einzigartige Einblicke ins Material

Mikromechanik mit plastischer Verformung und Schädigung

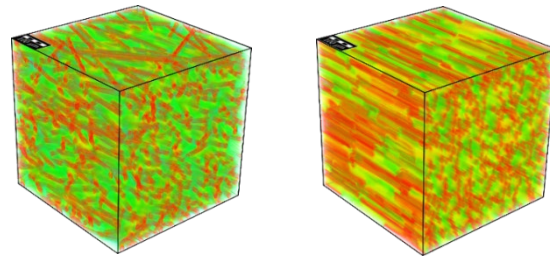
- + Simulation
- Experiment



Einzelparameterstudien

z. B. Variation der Faserorientierung ohne Änderung des Fasertyps

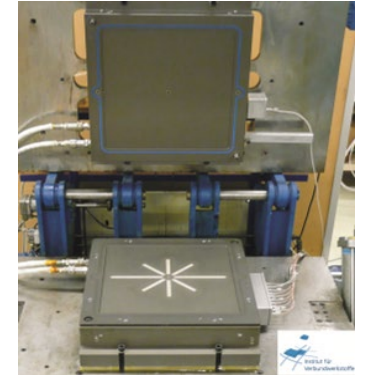
- + Simulation
- Experiment



Reduktion des experimentellen Aufwands

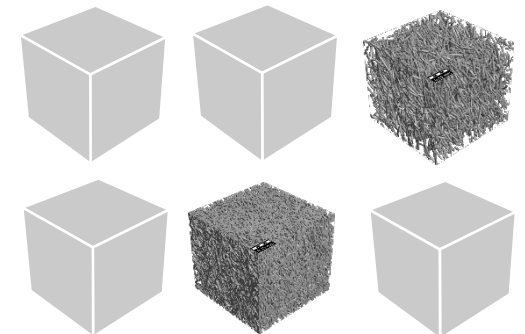
Weniger zeitaufwendige Versuche

- Vorhersage physikalischer und mechanischer Eigenschaften
- Parameterstudien



Konzentration auf vielversprechendste Prototypen

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

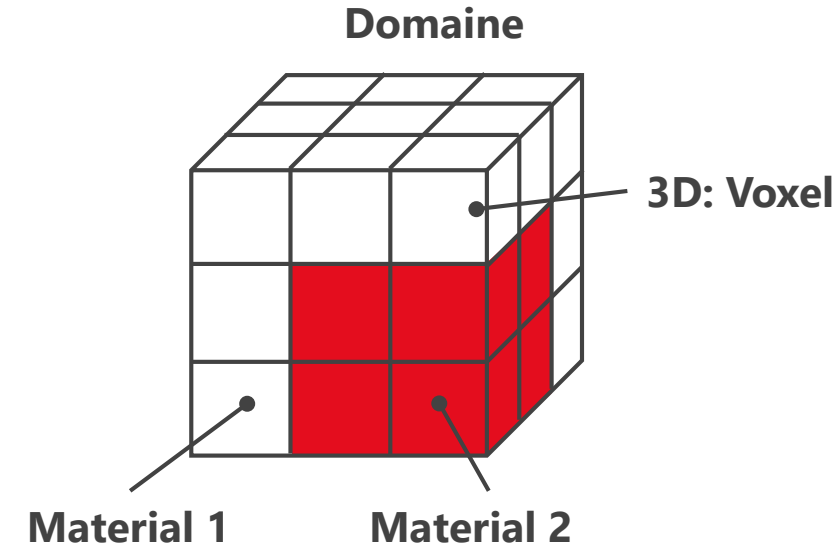


WAS IST VOXELBASIERTE FEM?

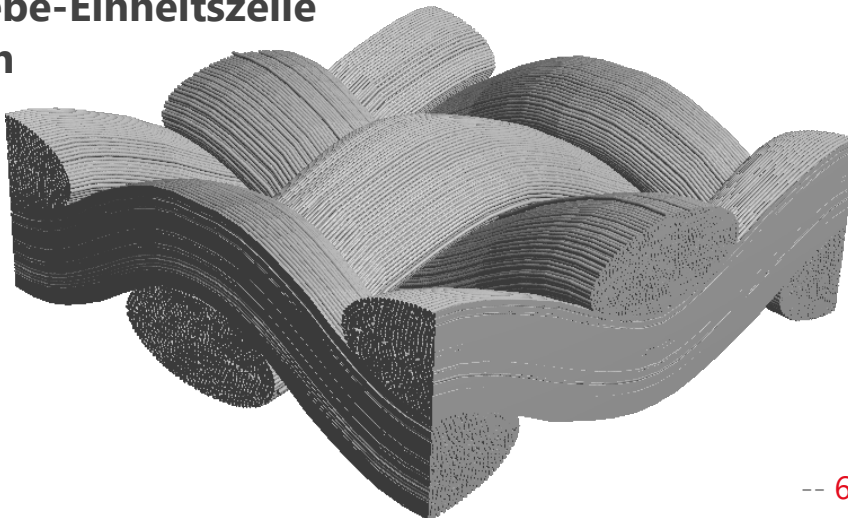
- Die Struktur besteht aus Voxeln (3D-Pixel) statt aus Elementen
- Die gesamte Domaine besteht aus einem Voxelgitter

Vorteile von Voxeln

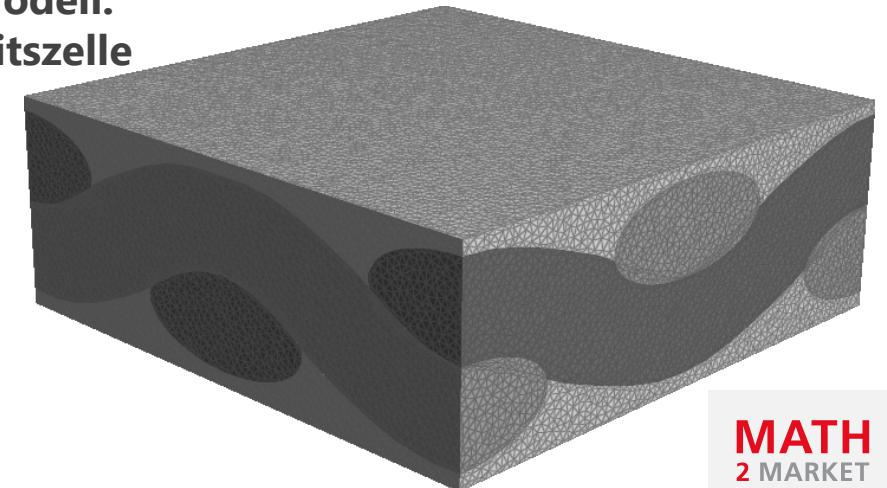
- μ CT-Voxel werden direkt in Mikrostruktur-Voxel umgewandelt
- Kein Vernetzen notwendig
- Modelle $> 1\,000\,000\,000$ Voxeln können auf deinem PC gerechnet werden
- Filigrane Strukturen können aus Voxeln modelliert werden



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



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

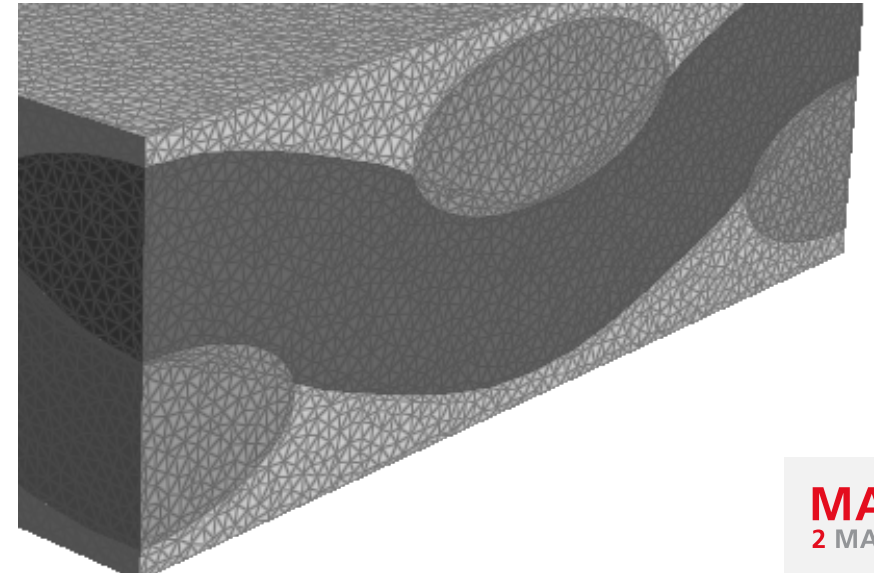
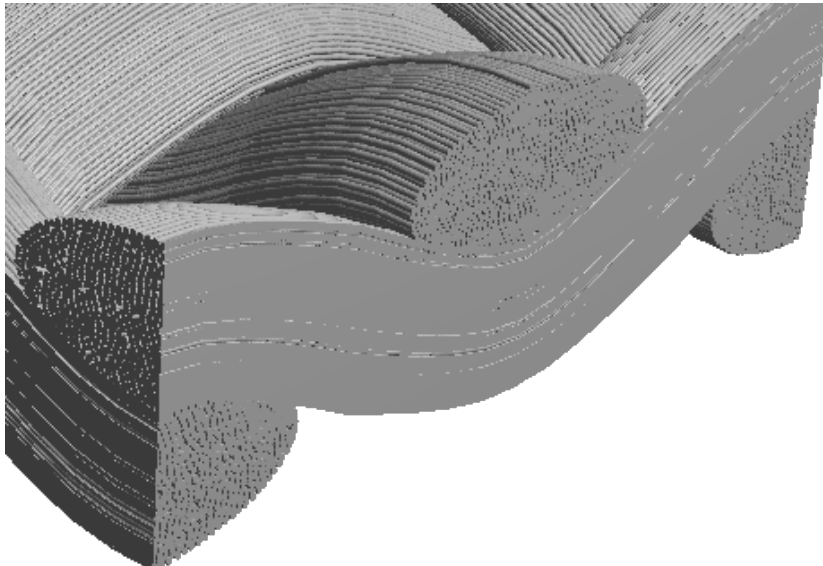
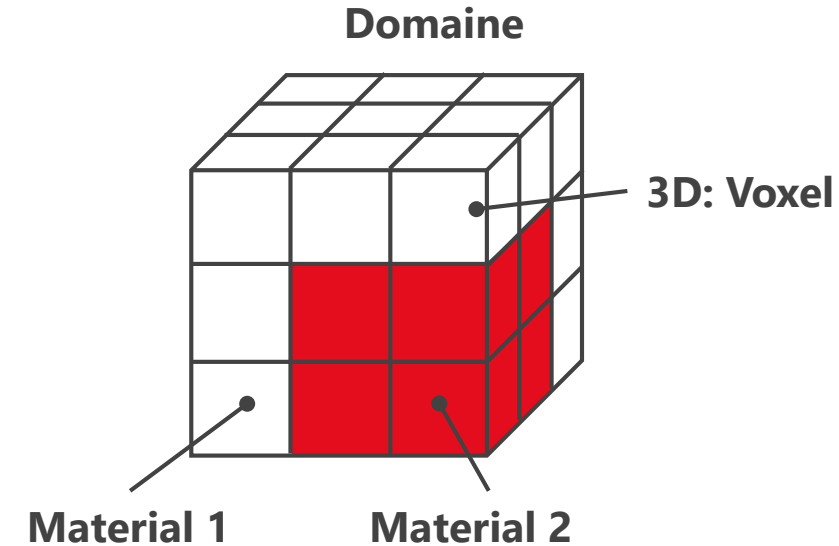


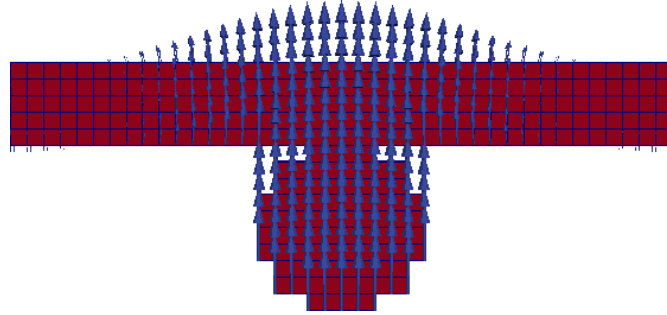
WAS IST VOXELBASIERTE FINITE ELEMENTE METHODE?

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

Vorteile von Voxeln

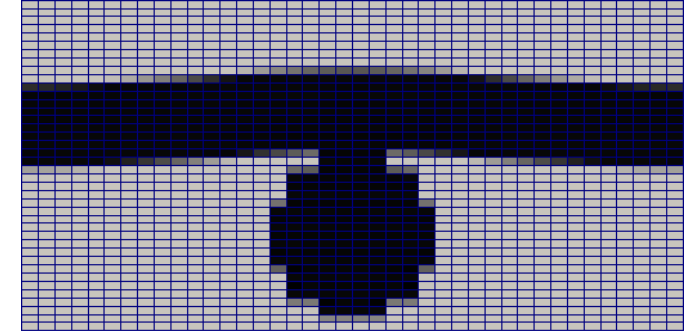
- μ CT-Voxel werden direkt in Mikrostruktur-Voxel umgewandelt
- Kein Vernetzen notwendig
- Modelle > 1 000 000 000 Voxeln können auf deinem PC gerechnet werden
- Filigrane Strukturen können aus Voxeln modelliert werden





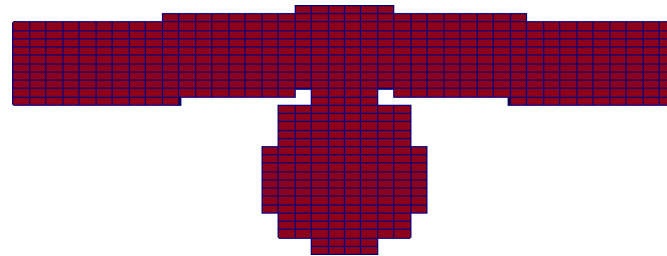
Schritt 1

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



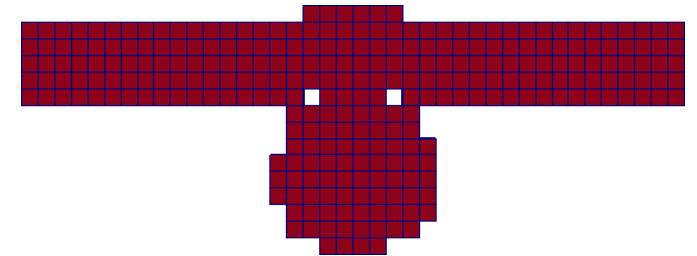
Schritt 2

- 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“-Bildes um Voxel-Bild (mit Originalauflösung) zu erhalten