

## Institut für Textil- und Verfahrenstechnik

# „Nutzen der $\mu$ -CT für den faserbasierten Leichtbau“

Hermann Finckh

Bereich Automatisierung/Simulation

Bereichsleiter : Hansjürgen Horter





Institutsleiter: Prof. Dr.-Ing. Götz T. Gresser

**Control 2014 – Qualität | Prozesse | Organisation**

# Europas größte Textilforschungseinrichtung

Deutsche Institute für Textil- und Faserforschung Denkdorf (DITF)



- 1  Institut für Textilchemie und Chemiefasern
- 2  Institut für Textil- und Verfahrenstechnik
- 3  Zentrum für Management Research
- 4  ITV Denkdorf Produktservice GmbH

# Kompetenz in Textilforschung



Forschung vom Molekül bis zum Produkt entlang der gesamten textilen Produktionskette

Anwendungsorientierte Forschung mit industriellen Pilotanlagen

Fokus auf Technische Textilien und Life Science



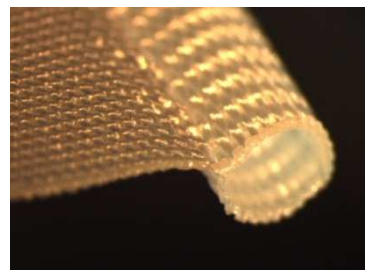
Technologietransferzentrum und Herstellung von Vorprodukten für die Industrie



Wissenstransfer in der gesamten textilen Wertschöpfungskette:  
„Wissen produktiv machen“



Faser und Garn



Fläche



Funktionalisierung



Produkt



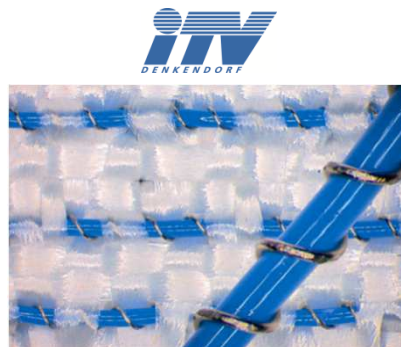
# Kenndaten

## Deutsche Institute für Textil- und Faserforschung Denkendorf (DITF)

- Gegründet 1921
- Stiftung des öffentlichen Rechts
- ca. 310 Mitarbeiter (50% Wissenschaftler)
- Umsatz 29,5 Mio. Euro (2012)
- 75% anwendungsorientierte Forschung mit der Industrie, 25% Produktion
- über 450 Patente seit 1960, davon 70 laufende
- QM-Systeme nach DIN EN ISO 17025 (DAkkS) und DIN EN ISO 13485



© ITV Denkendorf



# Inhalt

1. Hochauflösende Computertomographie ( $\mu$ -CT)
2. Unterstützung der numerischen Simulation
3. Kennwertermittlung für Infusionssimulationen
4. CT als Hilfsmittel zur Compositeberechnung
5. CFK-Anwendungsbeispiel „Hutprofil“
6. Zusammenfassung und Ausblick

# 1. Hochauflösende Computertomographie (CT) μ-Computertomograph am ITV



μ-Computertomograph

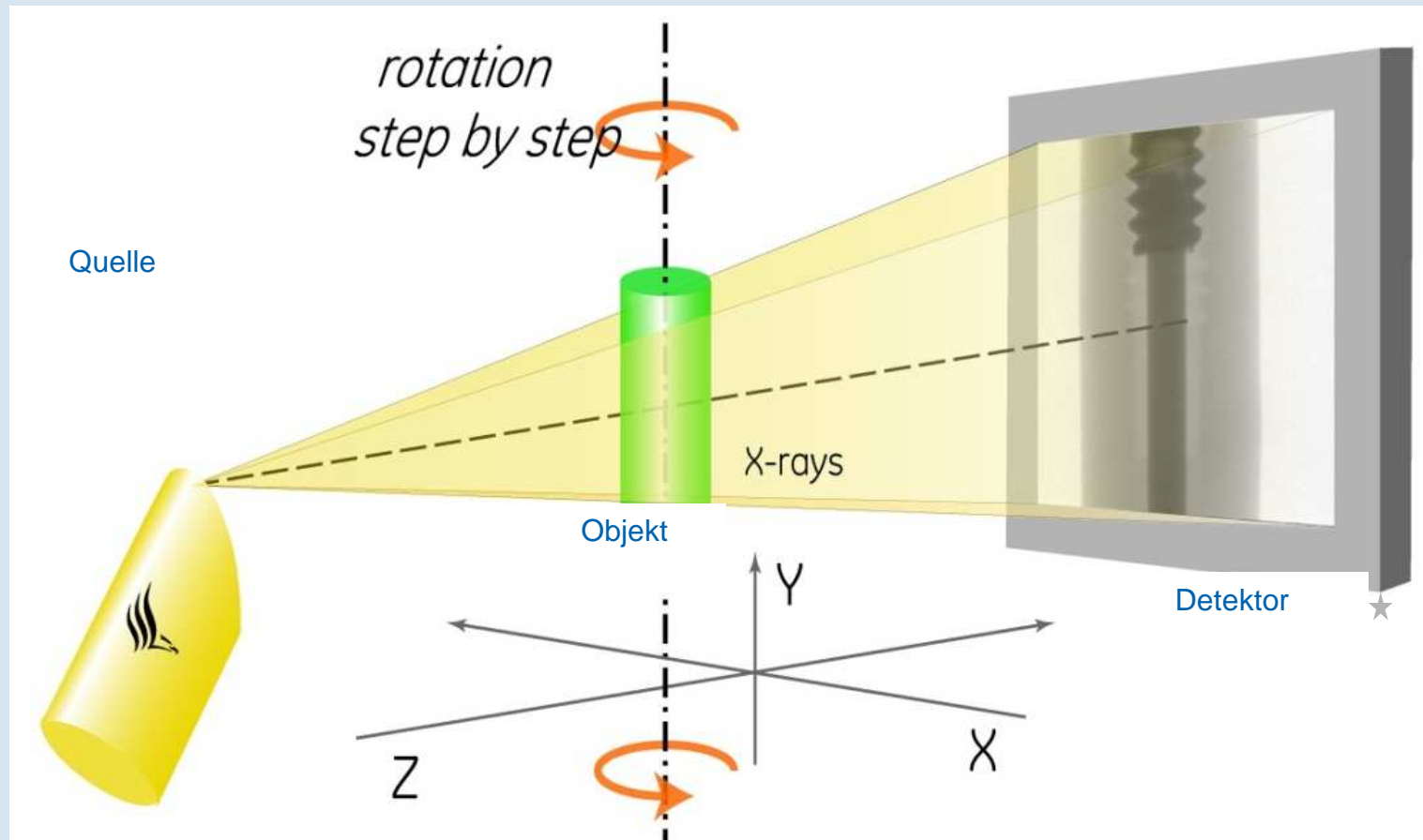
**nanotom m**

Phönix | X-Ray  
Fa. GE Sensing & Inspection  
Technologies GmbH

- 180kV/15W nanofocus-Röntgenröhre mit interner Röhrenkühlung
- Temperrastabilisierter digitaler Detektor:
  - DXR-Flächendetektor mit **3072 x 2400 Pixel**, Pixelgröße: **100 μm**
  - Minimale Voxelgröße von 300 nm
  - 14bit Detektordynamik ( $2^{14} = 16384$  Grauwerte)
- Granitbasierter 5-Axen Manipulator mit luftgelagerter Präzisionsdreheinheit
- Probendimensionen **250 mm x 240 mm**, Probengewicht max. 3 kg
- Einsatz der Analysesoftware VGStudio Max
- **Optimal geeignet für textil- und kunststoffbasierte Werkstoffe**

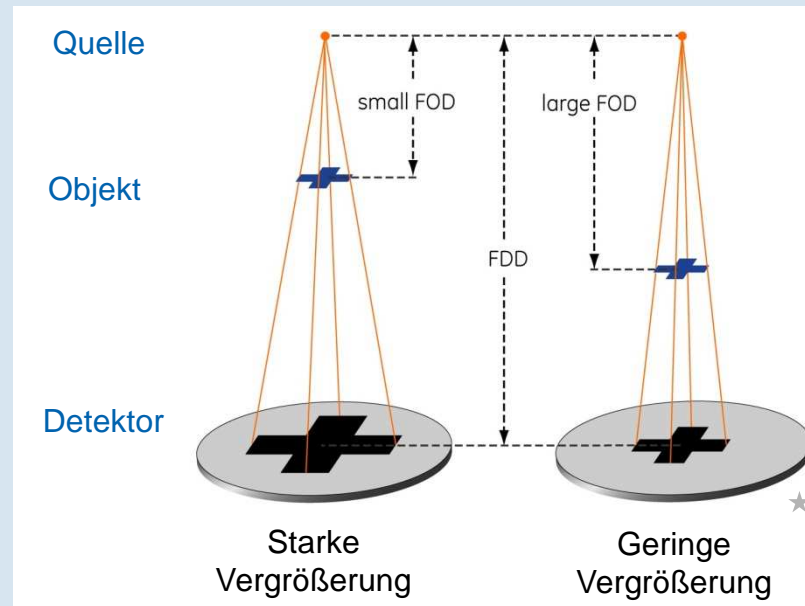
# 1. Hochauflösende Computertomographie (CT)

## Grundlagen 3D-CT: Generierung von Voxelmolellen

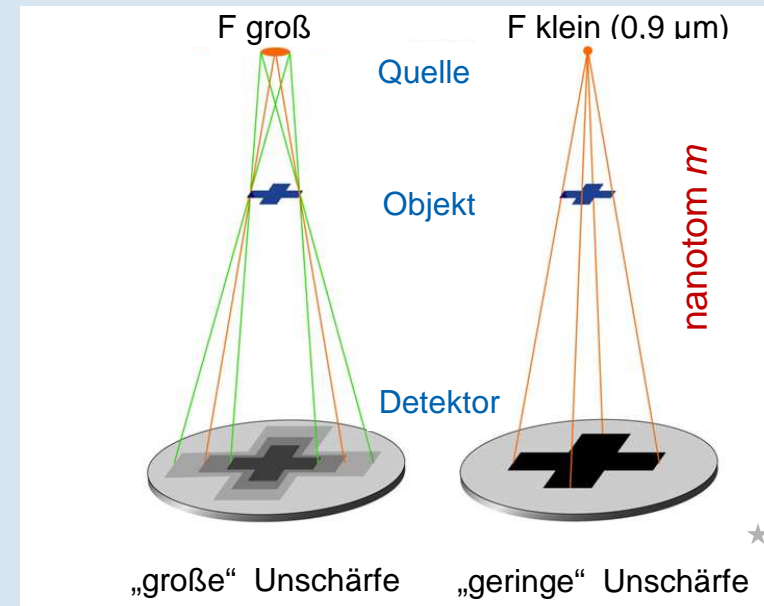


# 1. Computertomographie (CT)

## Vergrößerung und Unschärfe



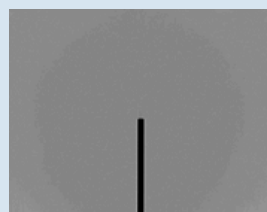
Geometrische Vergrößerung  $M = FDD/FOD$



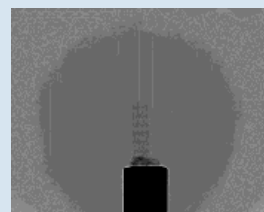
Geometrische Unschärfe durch Brennfleckgröße F



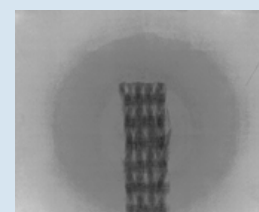
Gewebe  
probe



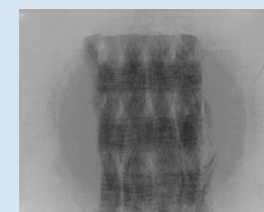
FOD = 400mm  
Voxel:  $66^3 \mu\text{m}^3$



FOD = 50mm  
Voxel:  $8,3^3 \mu\text{m}^3$



FOD = 20mm  
Voxel:  $3,3^3 \mu\text{m}^3$



FOD = 8mm  
Voxel:  $1,3^3 \mu\text{m}^3$



FOD = 4mm  
Voxel:  $0,66^3 \mu\text{m}^3$



# 1. Hochauflösende Computertomographie (CT)

## Einsatzbereich Numerische Berechnung (FEM)

Hochaufgelöste CT-Aufnahmen ermöglichen:

- Exakte Analyse der tatsächliche Struktur
- detaillierte Faserinformationen
- Qualitätskontrolle

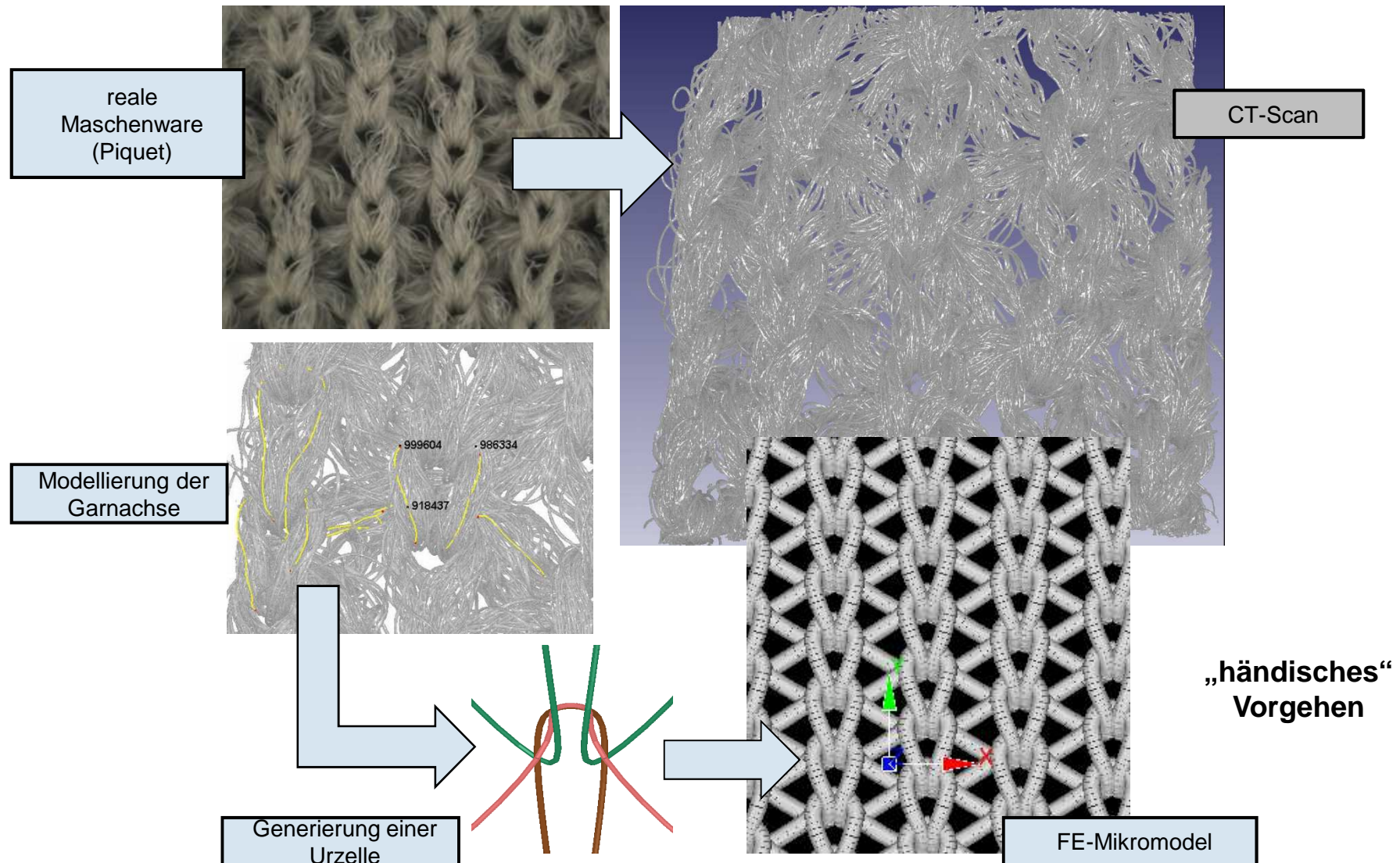
Nutzen für die numerische Berechnung:

- genaue realitätsnahe Modellgenerierung
- bessere Ersatzmodelle zur Bauteilberechnung
- Verifizierung der Simulationsmodelle
- Proben-Charakterisierung vor der mechanischer Prüfung zur verlässlichen Kennwertbeurteilung

Großer Anwendungsbereich zur Eigenschaftsberechnung für:

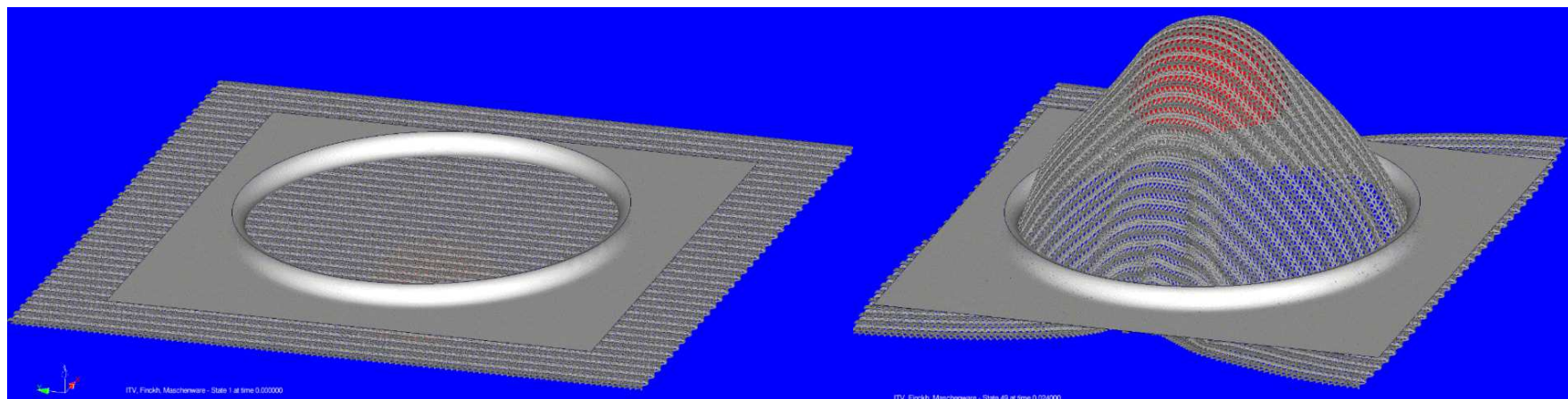
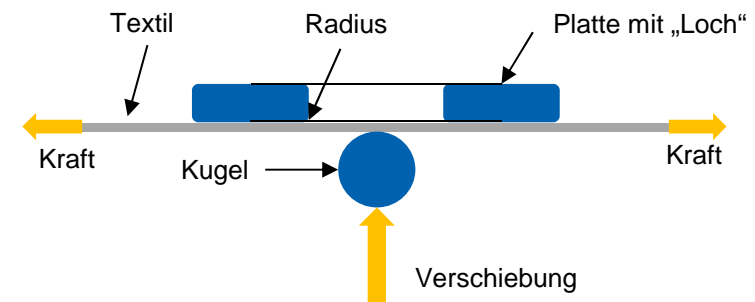
- VerStärkungstextilien (Gewebe, Gewirke, Vliese, UD-Aufbau ...)
- **Faserbasierter Leichtbau**

## 2. Unterstützung der numerischen Simulation Generierung realitätsnaher FE-Modelle



## 2. Unterstützung der numerischen Simulation Generierung realitätsnaher FE-Modelle - Nutzen

- Drapiersimulation von einer Maschenware (Piqué) mittels einer Kugel (15 mm Ø)
- Experimentelle Drapierprüfung mit definiert vorgespanntem Textil, Kugel und Lochplatte (30 mm Ø)
- Vergleich Simulation mit der experimentellen Prüfung

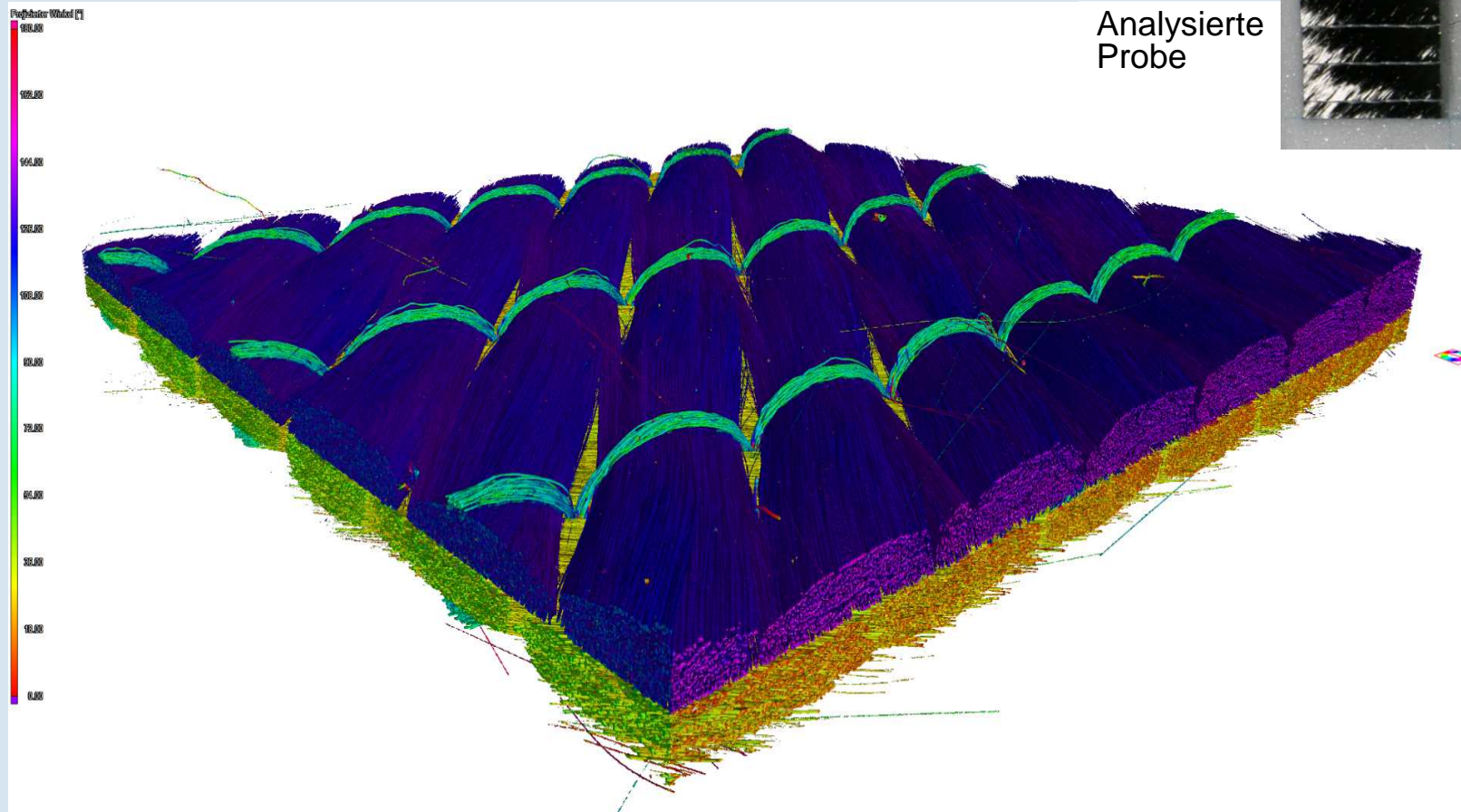
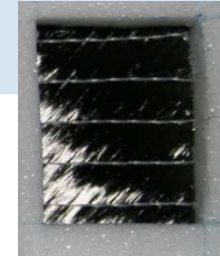




## 2. Unterstützung der numerischen Simulation FE-Modelle von Verstärkungstextilien

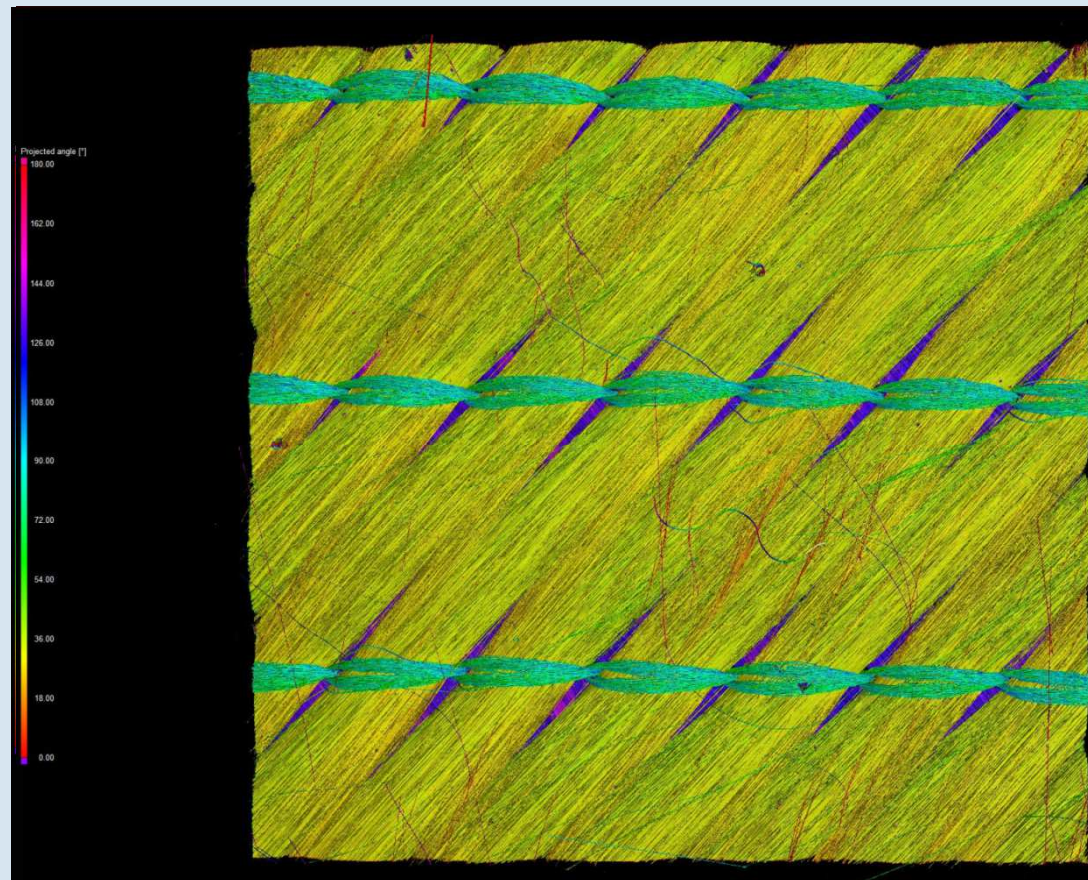
Multiaxialgelege 610 g/m<sup>2</sup>: Carbon 50K/50K, vernäht, +/-45°

Analysierte  
Probe



Ergebnis der Faserorientierungs-Analyse von VGStudio Max (Volume Graphics GmbH)

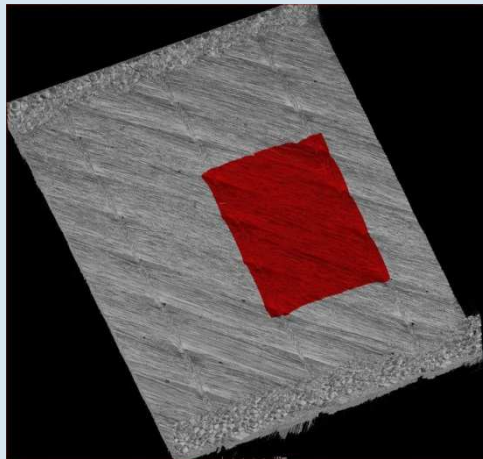
## 2. Unterstützung der numerischen Simulation FE-Modelle von Verstärkungstextilien



Multiaxialgelege 610 g/m<sup>2</sup>: Carbon 50K/50K, vernäht, +/-45°

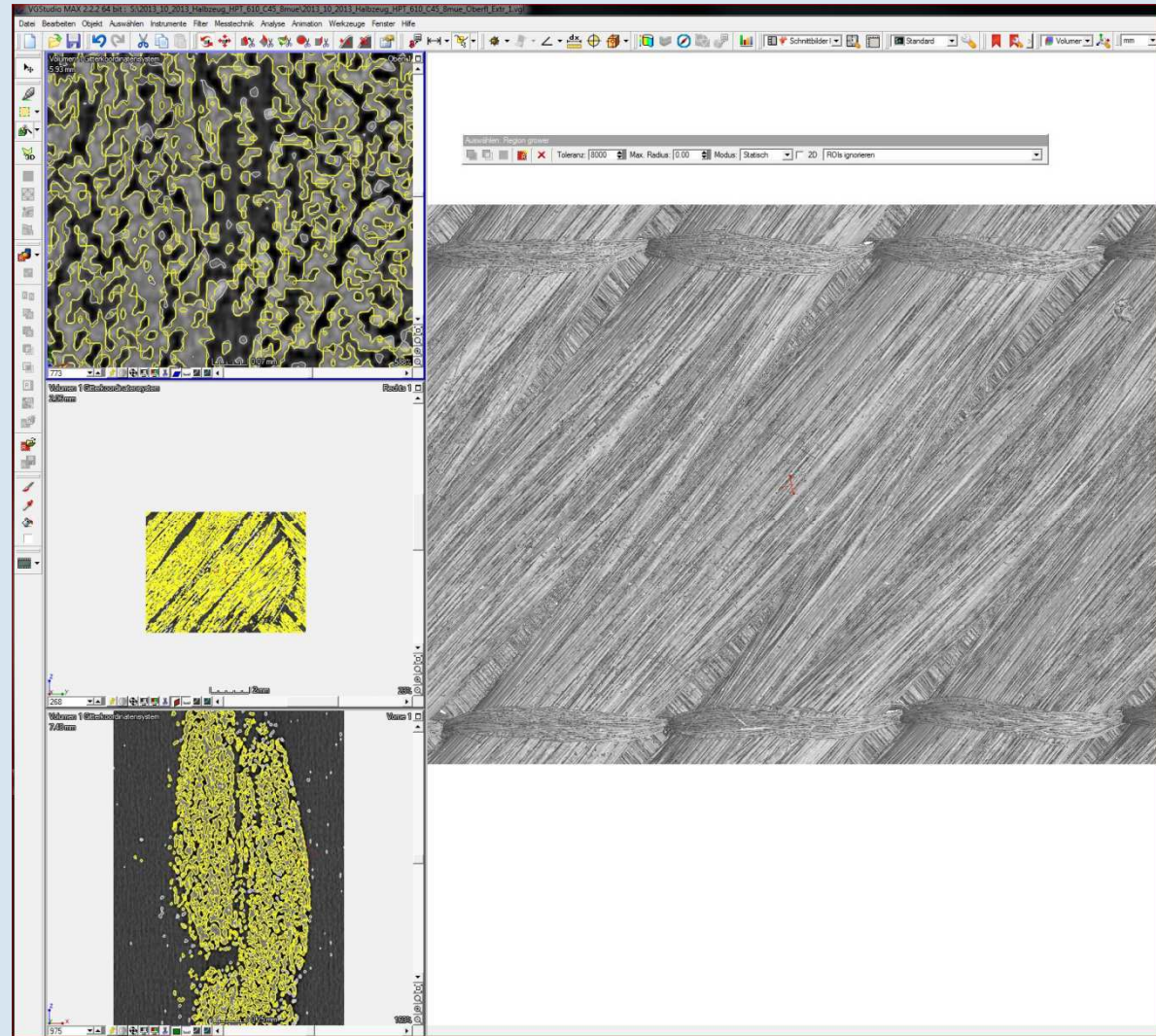


## 2. Unterstützung der numerischen Simulation FE-Modelle von Verstärkungstextilien



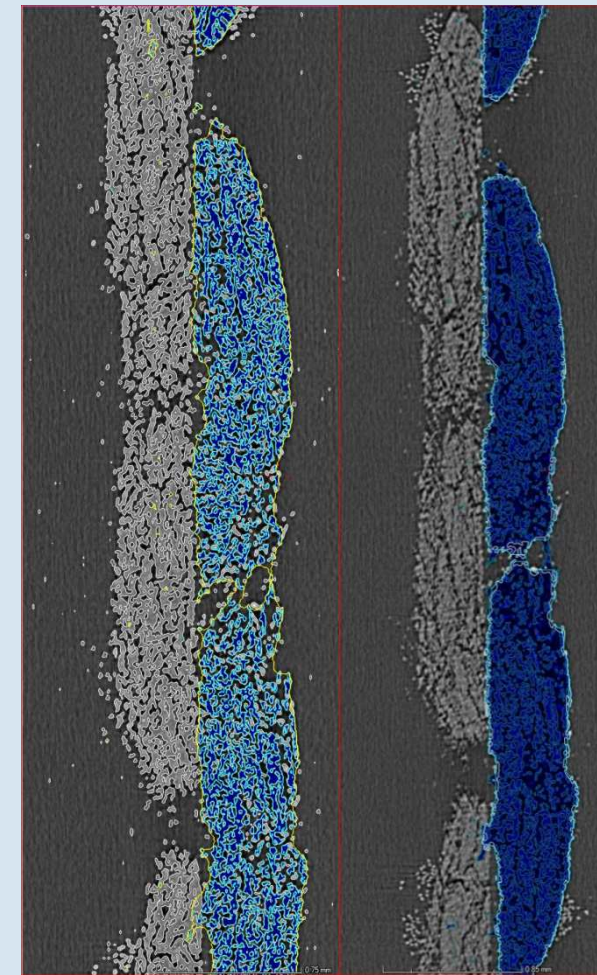
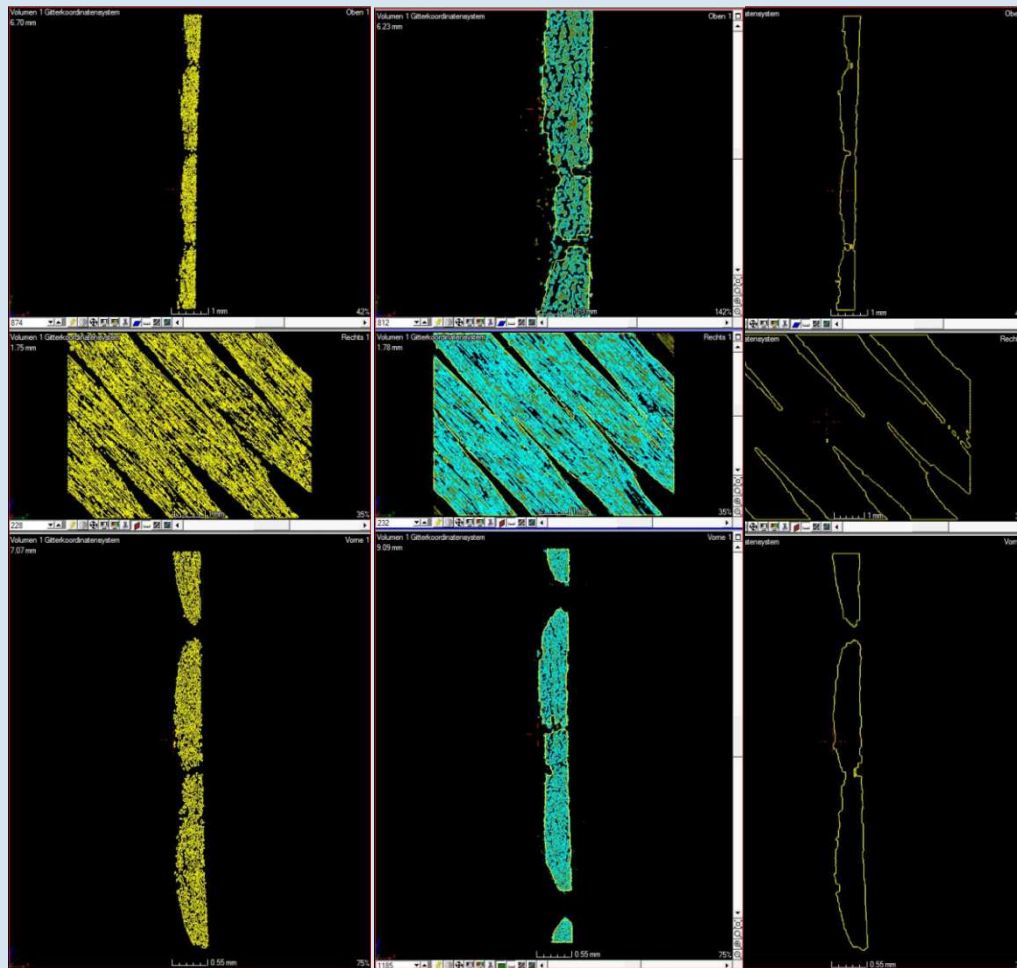
Virtuell ausgeschnittener  
Bereich: Urzelle

Ergebnis der  
exakten  
Oberflächen-  
bestimmung des  
Urzellenbereichs



## 2. Unterstützung der numerischen Simulation FE-Modelle von Verstärkungstextilien

### Roving-Oberflächendetektion durch mehrfache Separationsvorgänge



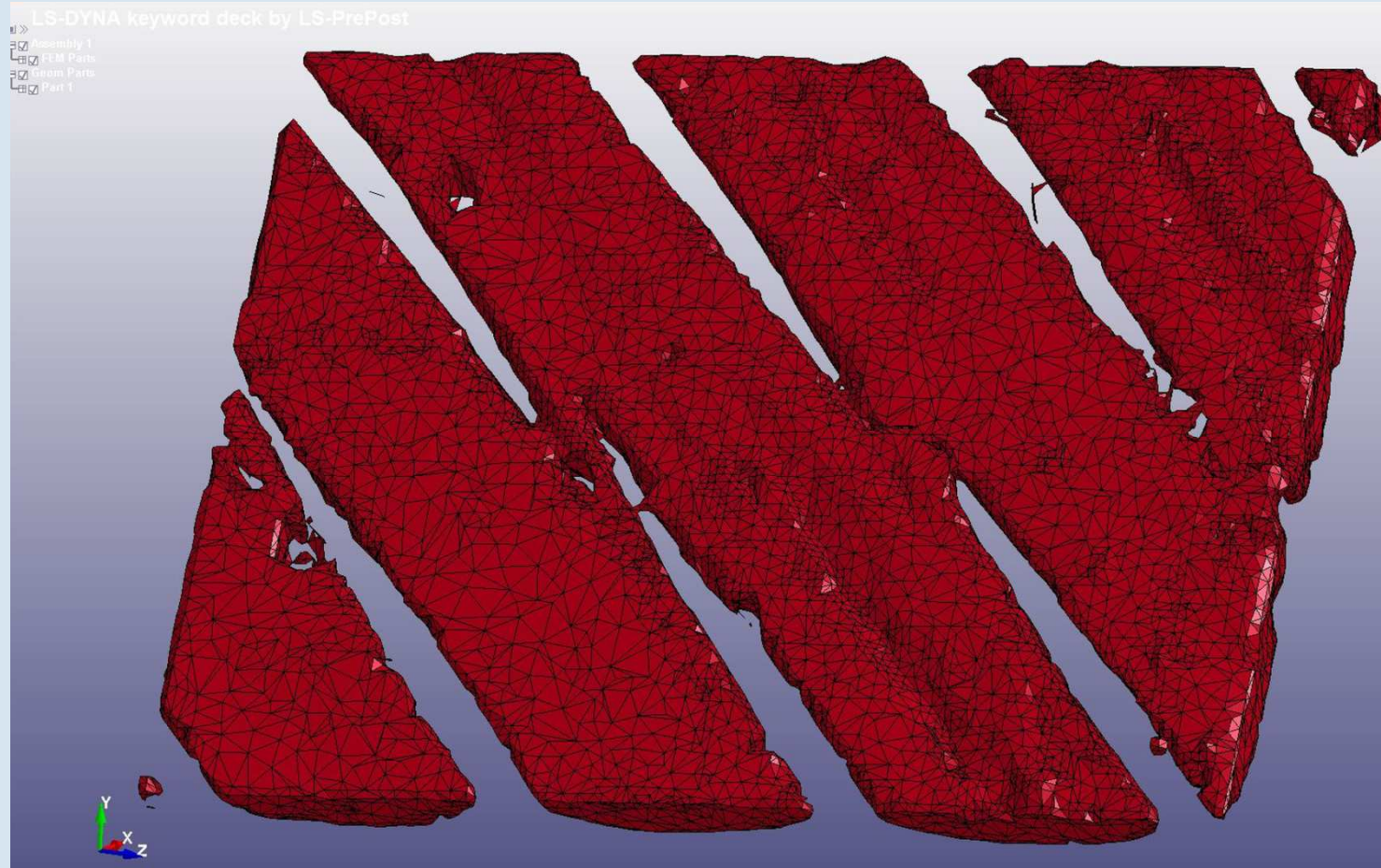


## 2. Unterstützung der numerischen Simulation FE-Modelle von Verstärkungstextilien



Oberfläche der -45 Grad Lage

## 2. Unterstützung der numerischen Simulation FE-Modelle von Verstärkungstextilien



Grobes Oberflächennetz der -45 Grad Lage



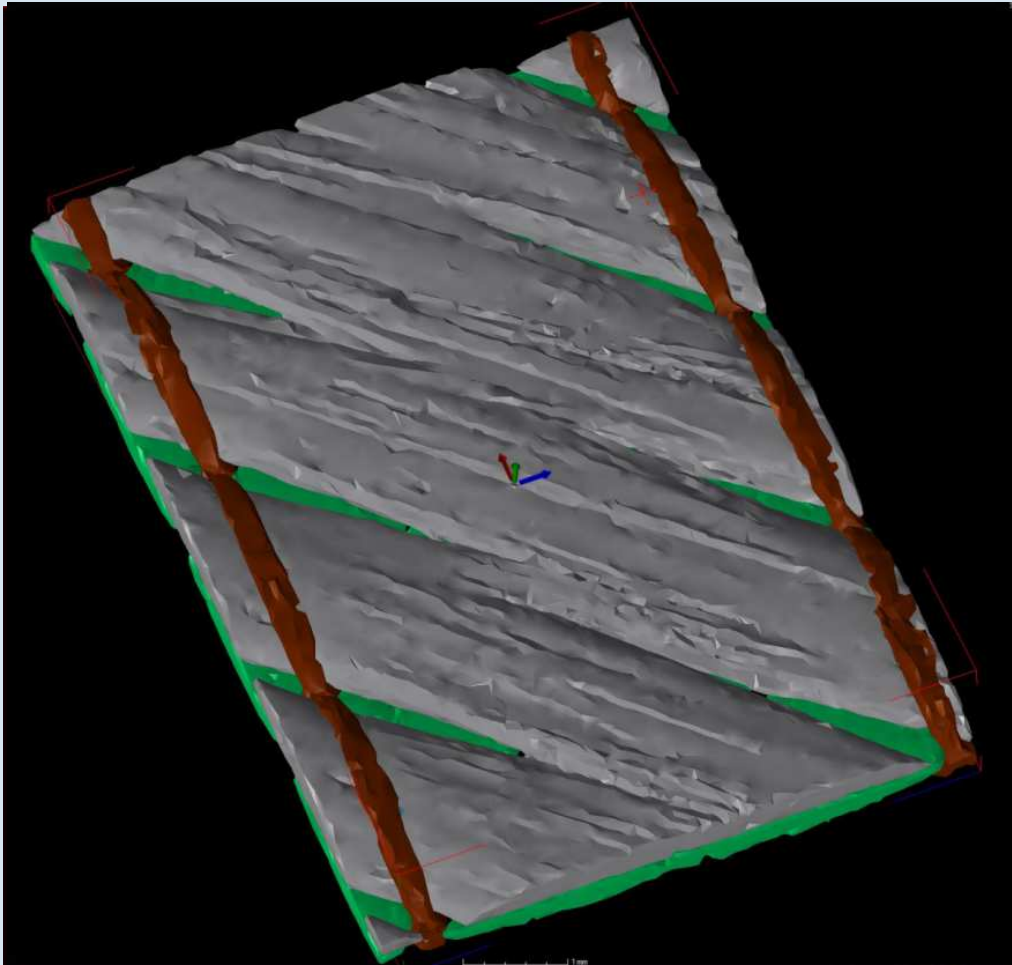
## 2. Unterstützung der numerischen Simulation FE-Modelle von Verstärkungstextilien



Feines Oberflächennetz der -45 Grad Lage



## 2. Unterstützung der numerischen Simulation FE-Modelle von Verstärkungstextilien



Extraktion der Faserlagen  
und der Nähfäden mittels  
Faserorientierungsanalyse:

- Generierung von  
genauen FE-  
Berechnungsmodellen
- Basis für  
Compositemodell
- Ermöglicht genaue  
Simulationsmodelle für  
Infusionsberechnungen

### 3. Kennwertermittlung für Infusionssimulationen Permeabilitätswerte von Verstärkungstextilien

#### **Permeabilität:**

- Durchlässigkeit bzgl. Fluide:
- Wichtige Kenngröße für numerische Strömungssimulationen zur Werkzeugauslegung und Prozessentwicklung:
- Experimentell nur schwierig und nur für ebene Flächengebilde ermittelbar, simulative Verfahren werden daher angewandt.
- Hochaufgelöste CT-Scans enthalten bereits alle wichtigen Struktur- und Faserinformationen zur Durchführung einer Simulation zur Bestimmung der Permeabilität.

#### **Neues Softwaremodul der CT-Analysesoftware von Fa. Volume Graphics GmbH VGStudio MAX 2.3 (Pre-Release):**

- Berechnung des Stationärer Flusses einer inkompressiblen Flüssigkeit durch „Lücken“ eines „porösen“ Materials:
- Durchströmung erfolgt durch Definition einer Druckdifferenz zwischen zwei parallelen Ebenen.
- Randbedingungen sind entweder „Closed“ oder „Constant Gradient“

### 3. Kennwertermittlung für Infusionssimulationen Permeabilitätswerte von Verstärkungstextilien

Properties of Permeability Experiment: Analysis 1 of Volume 1

Settings | Results | Colors for Pressure | Colors for Velocity | Velocity Plot | Porosity Plot | Total Transport Plot | Streamline View | Report

1st Plane of Fixed Pressure

Plane Coordinates X: 0.000 Y: 1.000 Z: 0.000 Offset [mm]: 1.51 Choose...

Pressure 1 [Pa] 0

Plane Color Doubleclick to change

2nd Plane of Fixed Pressure

Plane Coordinates X: 0.000 Y: 1.000 Z: 0.000 Offset [mm]: 0.05 Choose...

Pressure 2 [Pa] 1.00

Plane Color Doubleclick to change

Display Planes in 3D View ☒

Physical Parameters

Boundary Conditions Closed

Dynamic Viscosity of Fluid [Pa·s] 0.00100

Simulation Parameters

Simulation Cell Size in Voxel Multiples [%] 100.00

Object Smoothing Kernel Width 0.500

Convergence Error 0.0000100

Max. Number of Iterations 10000

Analysisregion Ratio 0.800

Final Computation ☐

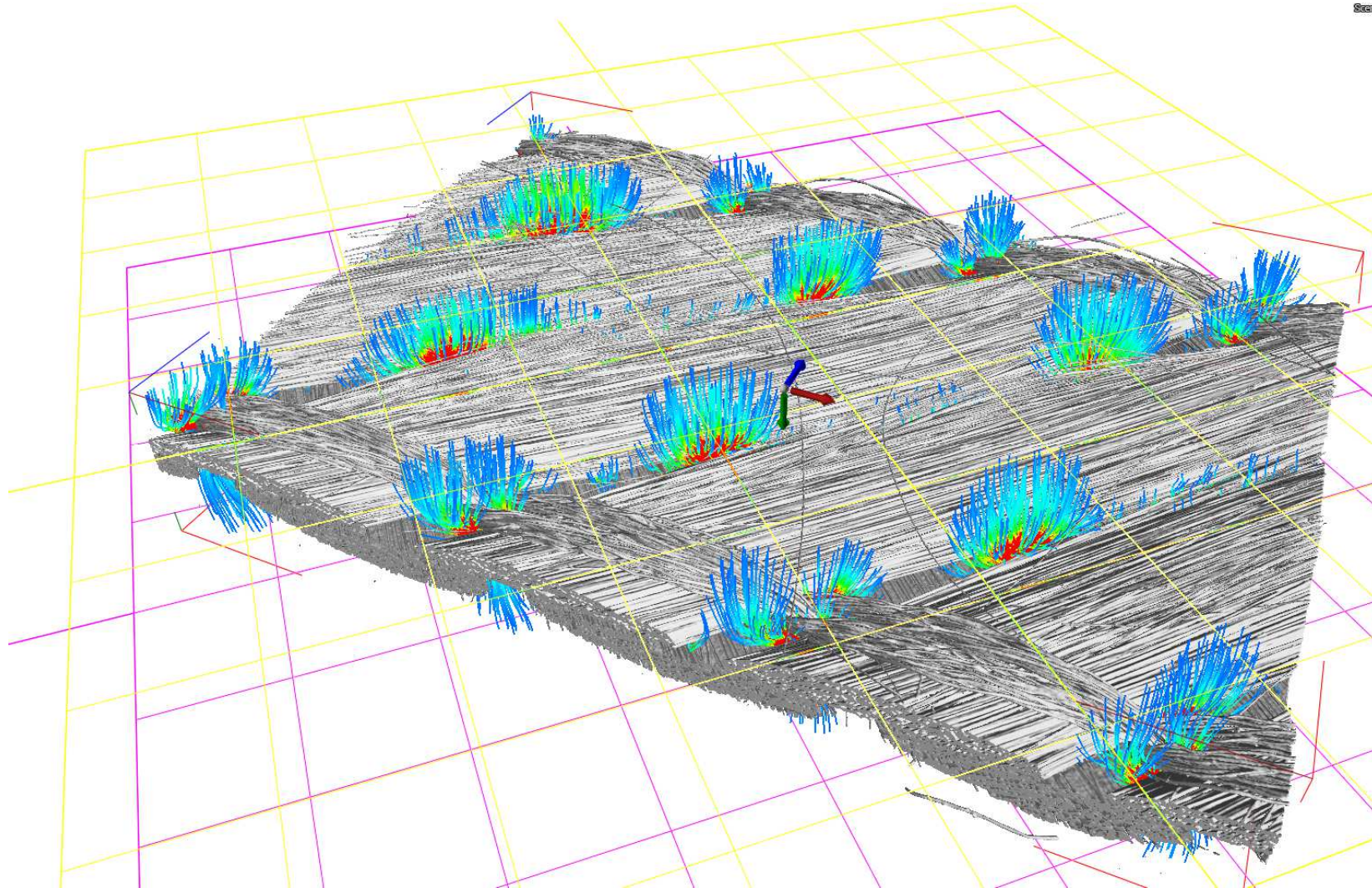
result is up to date

Calculate Close

VGStudio MAX 2.3 Pre-Release

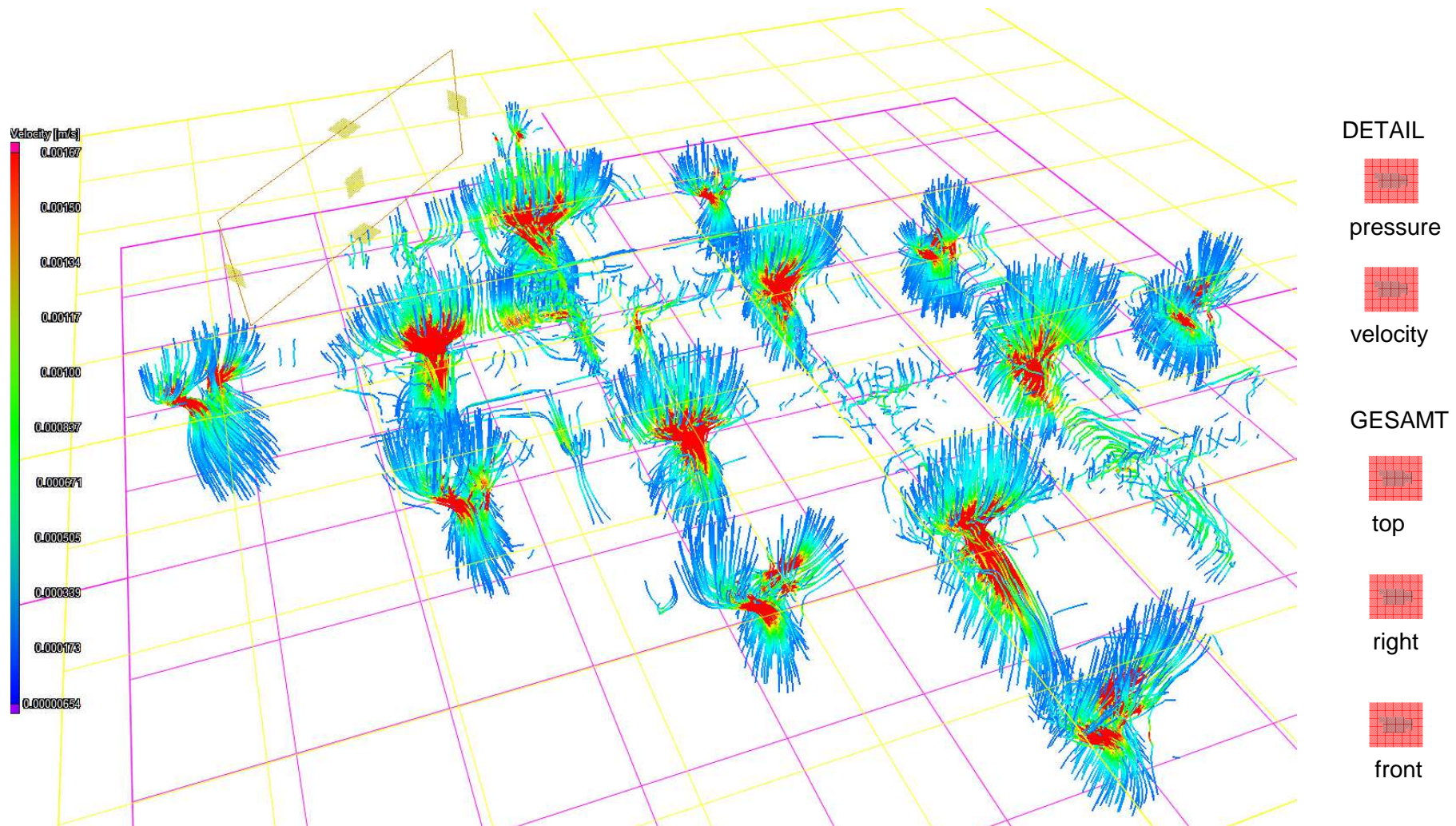


### 3. Kennwertermittlung für Infusionssimulationen Permeabilitätswerte von Verstärkungstextilien



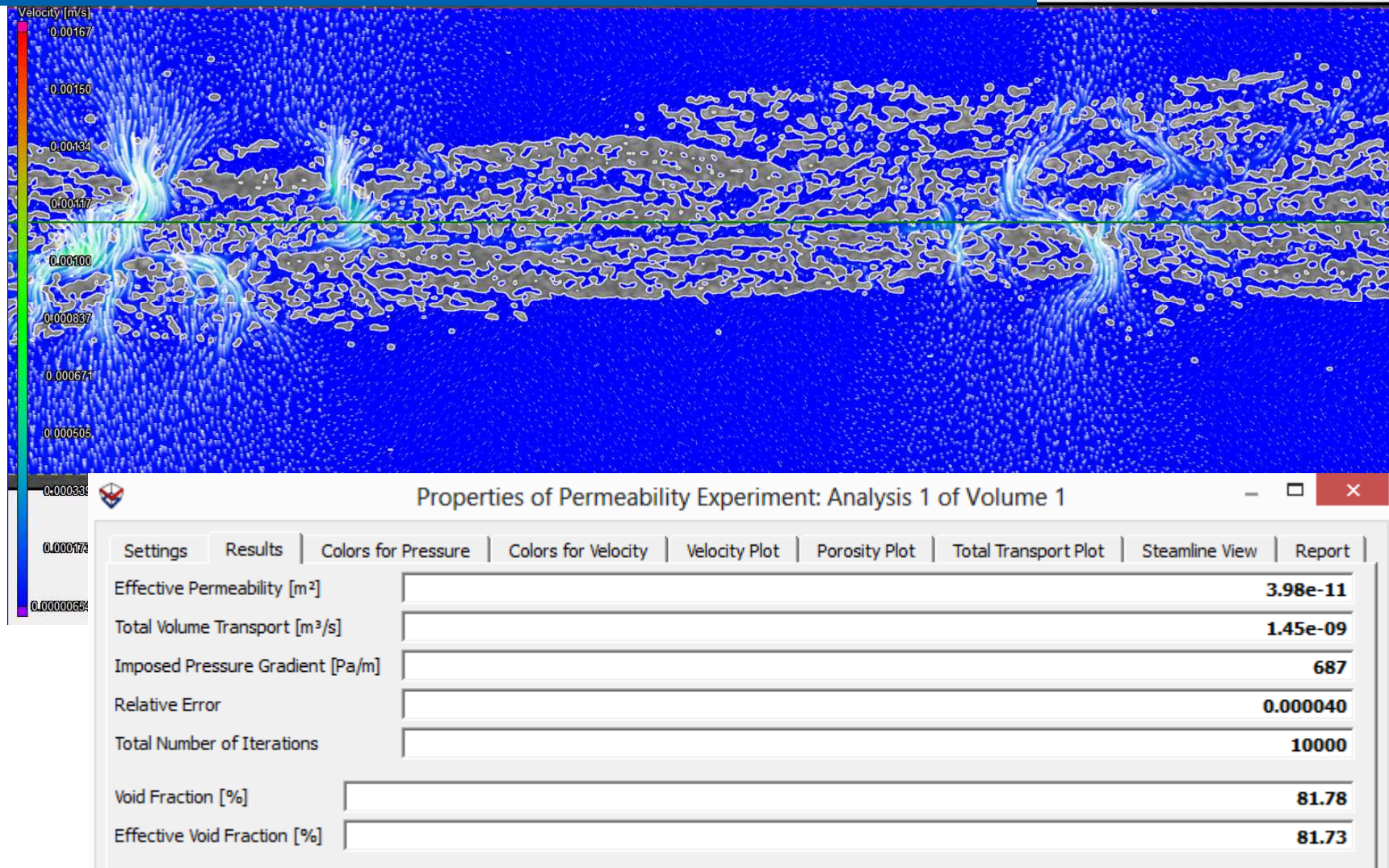


### 3. Kennwertermittlung für Infusionssimulationen Permeabilitätswerte von Verstärkungstextilien





### 3. Kennwertermittlung für Infusionssimulationen Permeabilitätswerte von Verstärkungstextilien



### 3. Kennwertermittlung für Infusionssimulationen Permeabilitätswerte von Verstärkungstextilien

- Permeabilitäts-Kennwerte können aus hochaufgelöste CT-Scans für ausgewählte Bereiche mittels VGStudio Max bestimmt werden.
- Die Permeabilität kann auch für konsolidierte Faserverbundteile bestimmt werden (z.B. Verifizierung).
- Systematische Untersuchungen an Verstärkungsstrukturen
  - Lagenaufbau und
  - Belastungseinflüsse (Drapierung, Kompaktierung, Scherung).
- Verifizierung der aus CT-Daten bestimmten Permeabilitätswerte für Verstärkungsstrukturen mit experimentellen Daten ist geplant.



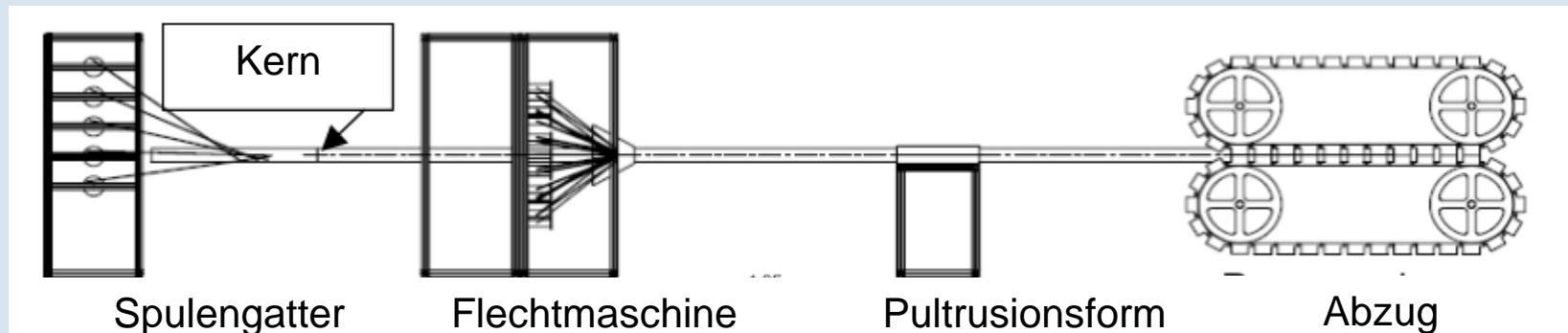
## 4. CT als Hilfsmittel zur Composite-Berechnung Modelltechniken / Prozesssimulation / Verifizierung

### BMBF-Projekt T-Pult:

*Energieeffizientes Pultrusionsverfahren zur  
Herstellung von Faserverstärkten  
Kunststoffkomponenten mit thermoplastischer  
Matrix in der Serienproduktion.*



## 4. CT als Hilfsmittel zur Compositeberechnung Bsp. flechtpultrudiertes GFK-Rohr (T-Pult)



Mehrlagig flechtpultrudiertes Rohr  
aus 3 Lagen Glasfasern :

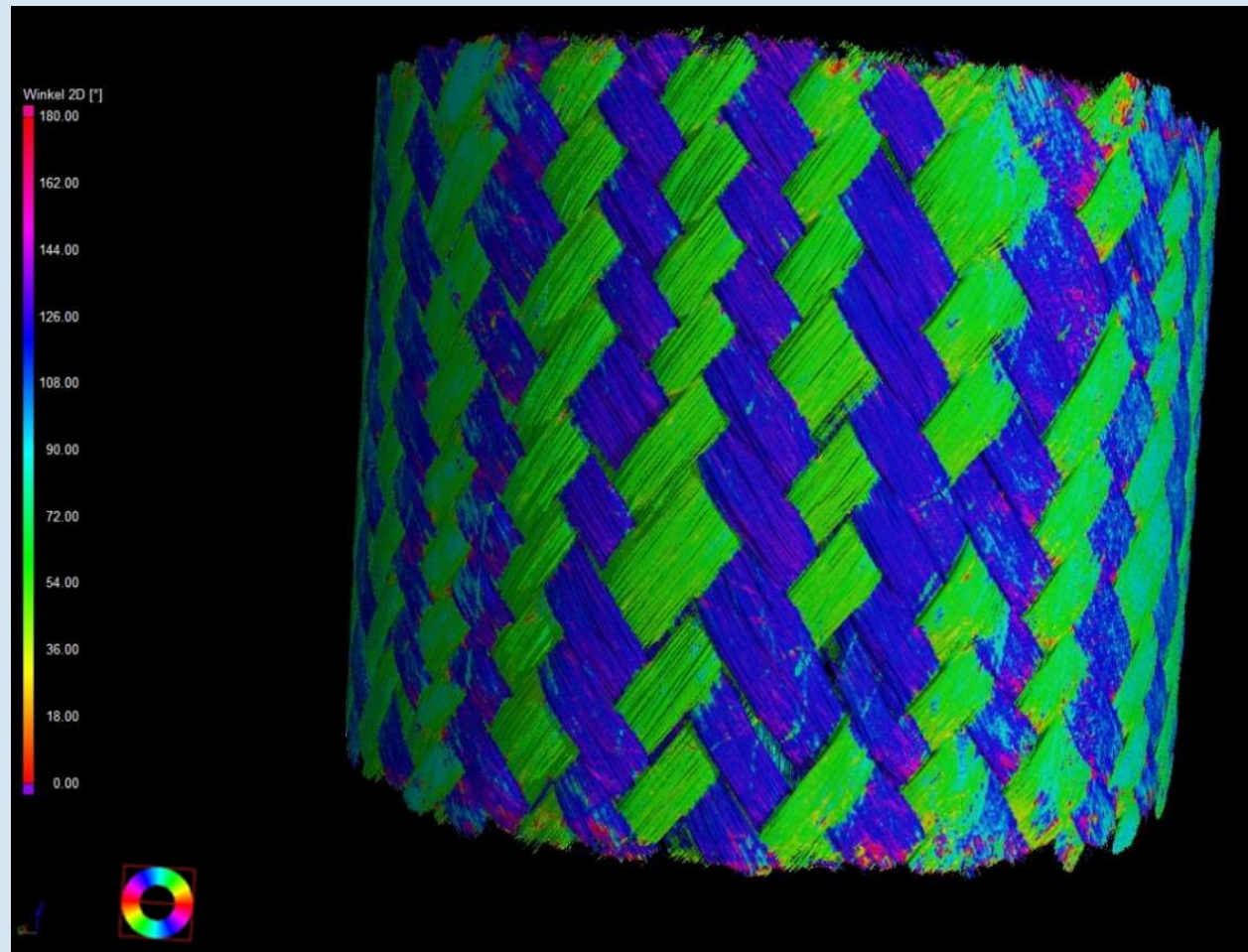
1. Lage: Geflecht mit Flechtwinkel 1
2. Lage: unidirektionale Verstärkungsfäden
3. Lage: Geflecht mit Flechtwinkel 2



(Dichte Matrix: EP 1,2 g/cm<sup>3</sup>, Dichte Glasfaser: 2,6 g/cm<sup>3</sup>)

- Gut geeignet für „TPult“ Entwicklungsarbeiten Faserorientierung / FE-Simulation / Abstraktion
- Glasfasern/Matrix/Geometrie führen auch bei „kurzen“ 4 h CT-Scans zu guten Ergebnissen
- Probe mit unregelmäßig verteilten unidirektionalen Verstärkungsfäden

## 4. CT als Hilfsmittel zur Composite-Berechnung Bsp. flechtpultrudiertes GFK-Rohr (T-Pult)



3 lagiges, flechtpultrudiertes GFK-Rohr:

Extraktion und Darstellung der Faserorientierung (Winkel relativ zur Bildebene dargestellt)

- Einsatz des vom Projektpartner Volume Graphics GmbH entwickelten Softwaremoduls „Fibre Composite Material Analysis“



## 4. CT als Hilfsmittel zur Composite-Berechnung

### Bsp. flechtpultrudiertes GFK-Rohr (T-Pult)



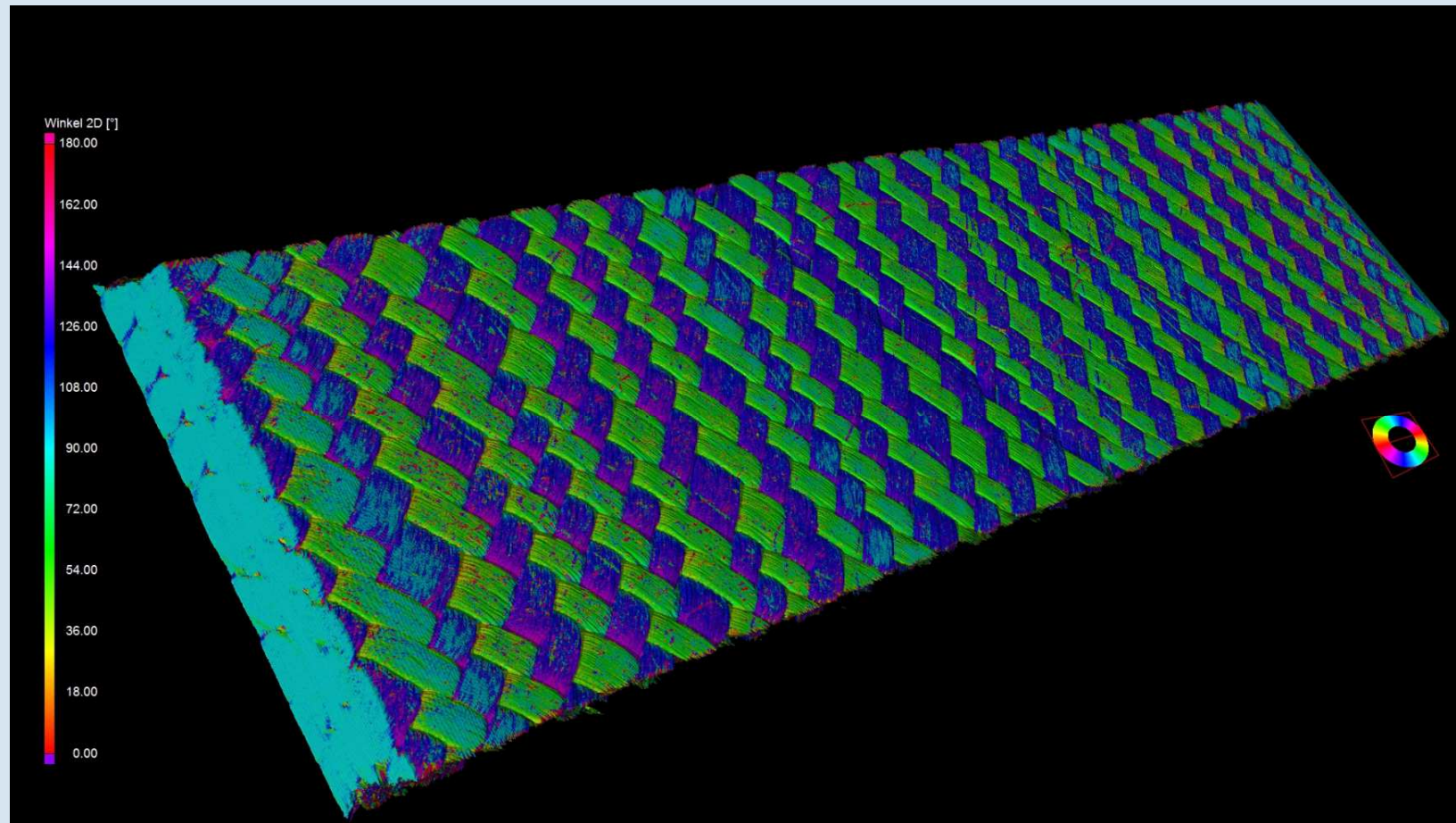
Erste Lage

Zweite Lage

unregelmäßig  
verteilte  
uniaxiale  
Verstärkungs-  
fäden

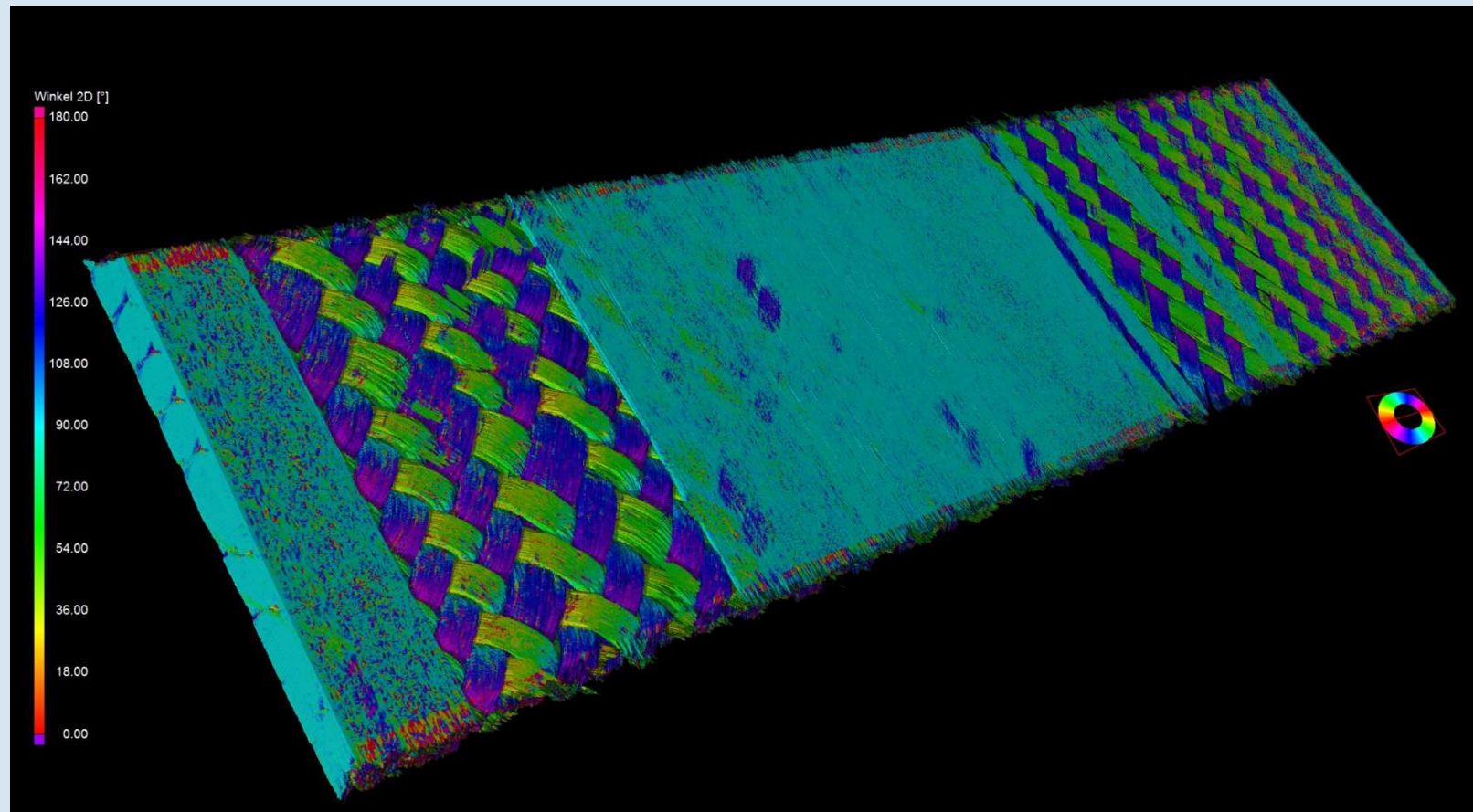
Abwicklung des GFK-Rohrs

## 4. CT als Hilfsmittel zur Composite-Berechnung Bsp. flechtpultrudiertes GFK-Rohr (T-Pult)



Analyse der Faserorientierung  
Erste Lage: Abwicklung des GFK-Rohrs

## 4. CT als Hilfsmittel zur Composite-Berechnung Bsp. flechtpultrudiertes GFK-Rohr (T-Pult)

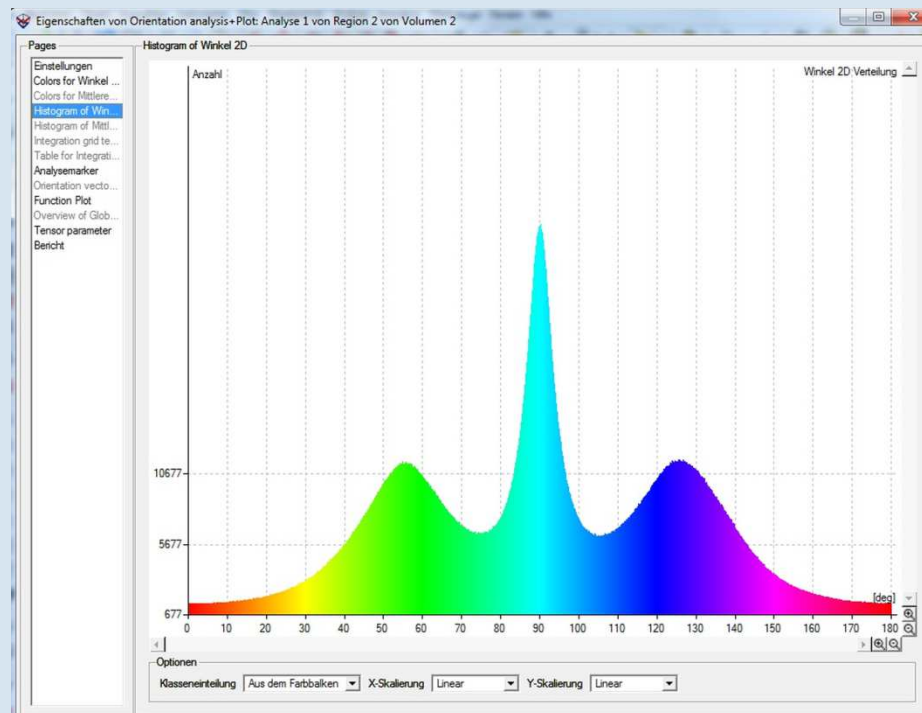


Analyse der Faserorientierung  
Zweite Lage: Abwicklung des GFK-Rohrs

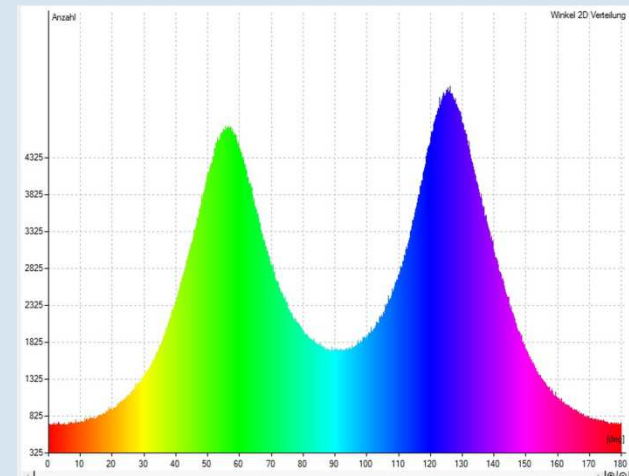


## 4. CT als Hilfsmittel zur Composite-Berechnung

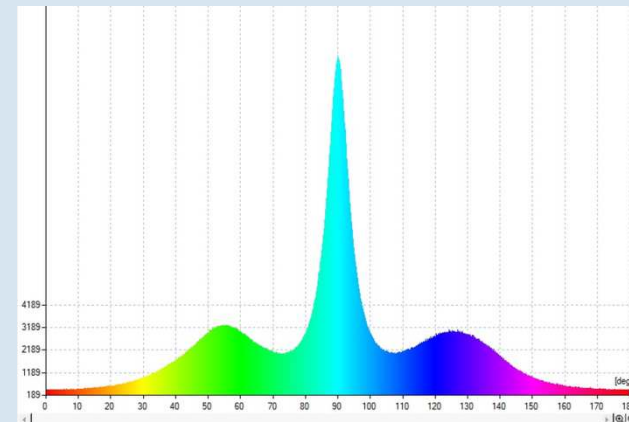
### Bsp. flechtpultrudiertes GFK-Rohr (T-Pult)



Histogramm für das gesamte  
flechtpultrudierte 3lagige CFK-Rohr



Erste Lage

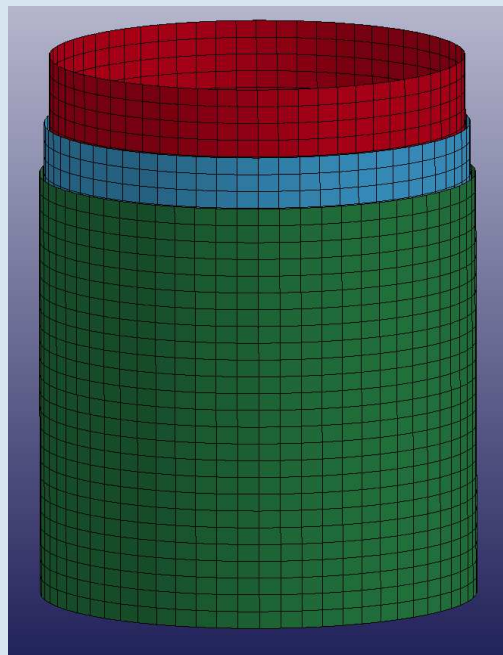


Zweite Lage mit unregelmäßig verteilten  
uniaxialen Verstärkungsfäden

## 4. CT als Hilfsmittel zur Composite-Berechnung Bsp. flechtpultrudiertes GFK-Rohr (T-Pult)

### Entwicklung Homogenisierungsstrategie:

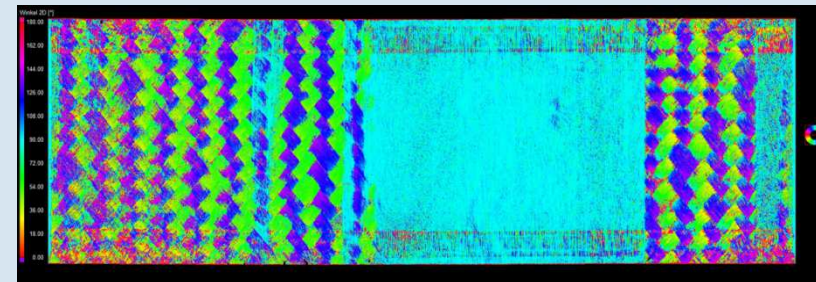
- Abstraktion der exakten Faserinformationen auf FE-Ersatzmodelle
- Zur Berechnung großer Bauteildimensionen



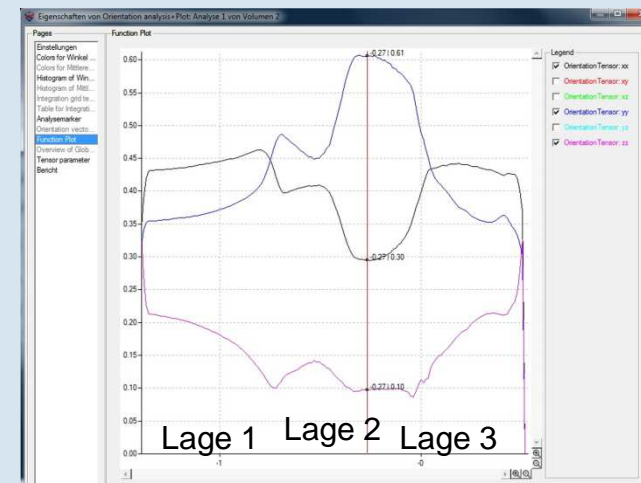
Eine Variante: Jede Lage wird mittels FE-Rohrmodell abgebildet (Composite- Flächenelemente)



Orientierungstensor wird auf FE-Netze (LS-DYNA) gemapped

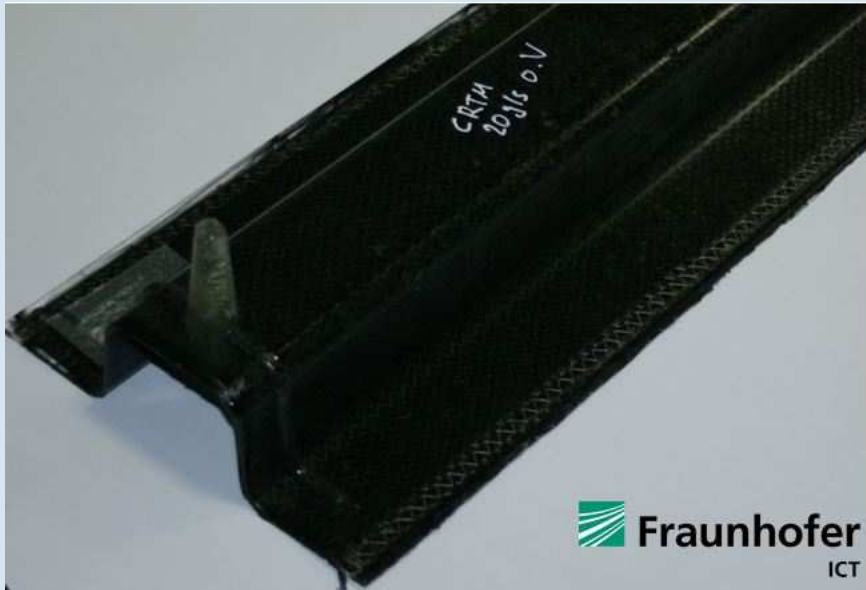


### Abgewickelte 2. Lage (rote Line im Diagramm)



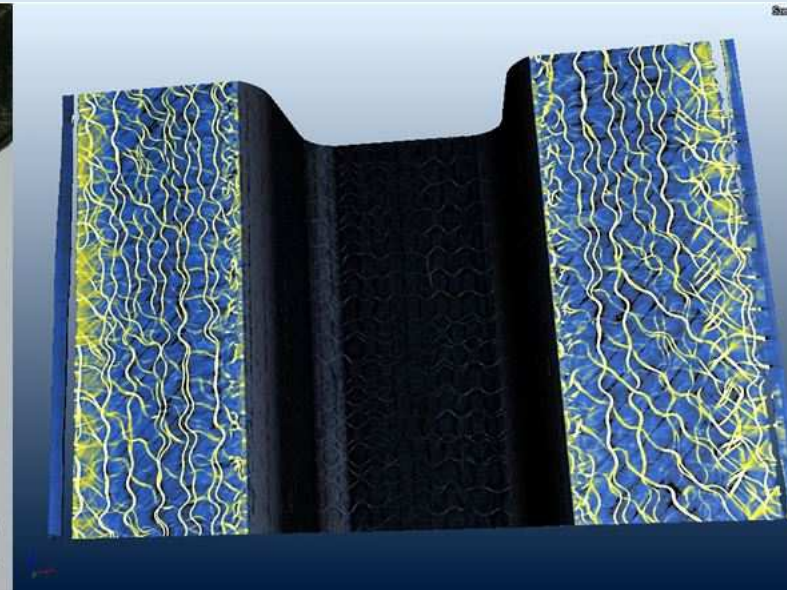
Faserorientierung in 3 Hauptrichtungen (x, y, z) über der Wanddicke

## 5. CFK Anwendungsbeispiel: Demonstrator „Hutprofil“, Übersichtsscan



Mittels HP-CRTM Prozess hergestellte Bauteil (ICT):

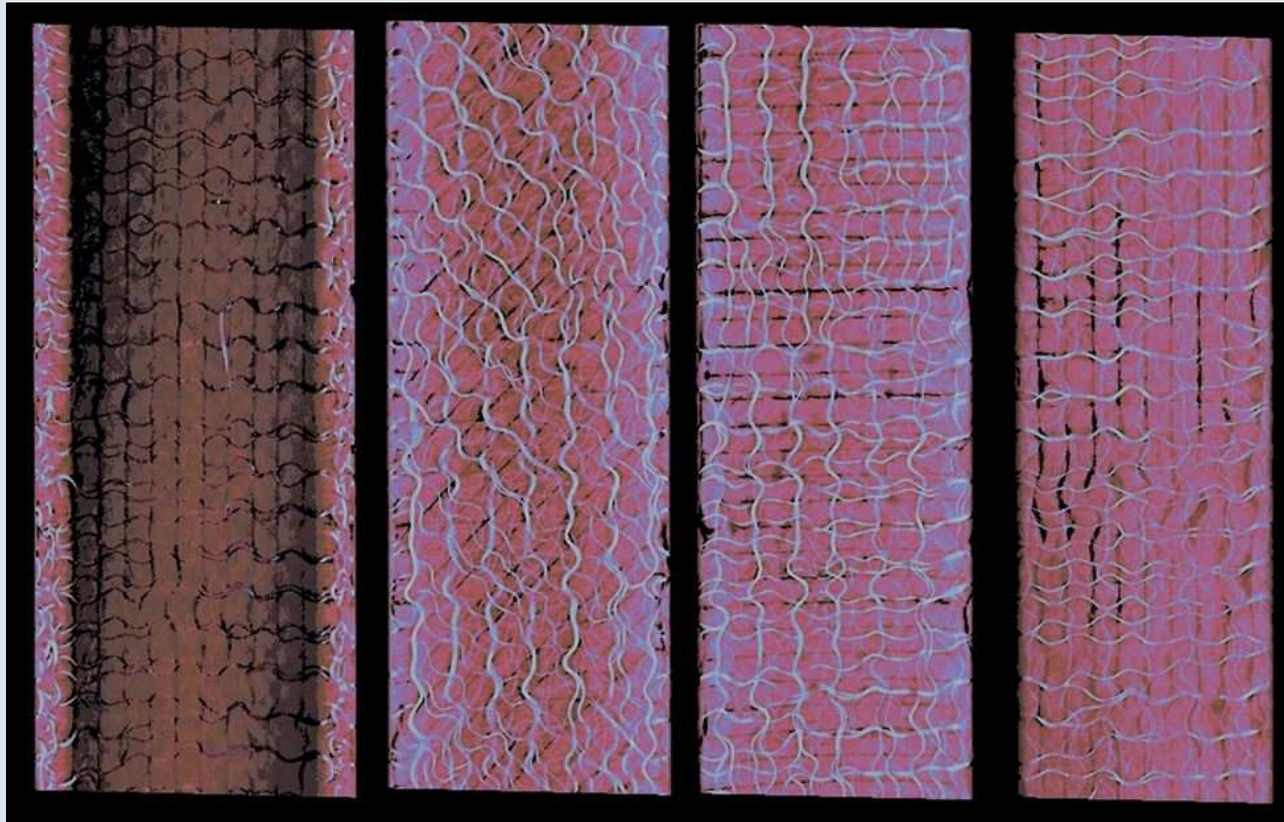
8 unidirektionale, quasiisotrop orientierte Lagen aus Kohlenstofffasergelege (24k-Rovings)



Übersichtsscan des gesamten  
Hutprofilquerschnittes  
(185mm x 160mm) mit der „grobe“  
Auflösung von 65µm



## 5. CFK Anwendungsbeispiel: Demonstrator „Hutprofil“, Übersichtsscan

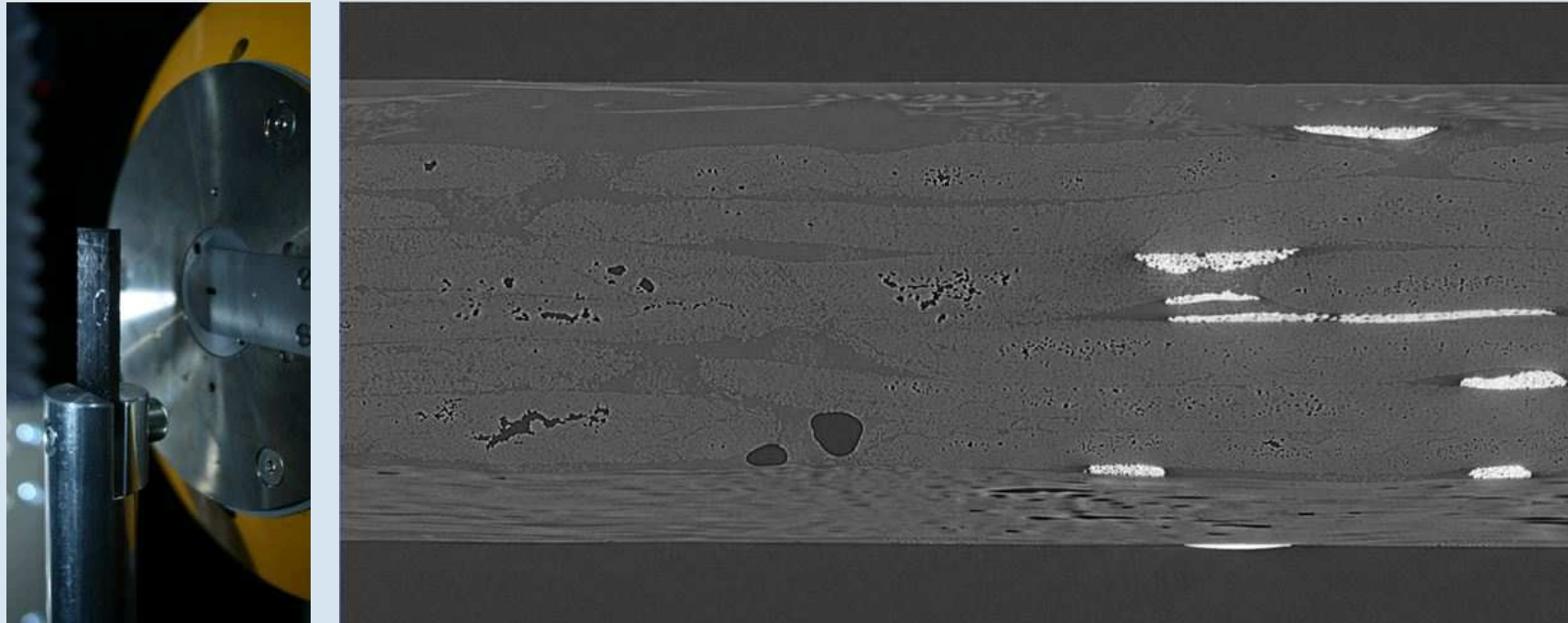


Das Ergebnis des  
Übersichtsscans:

virtuelle  
Durchwandern des  
Hutprofils zeigt die  
unterschiedlichen  
Orientierungen der  
UD-Gelege



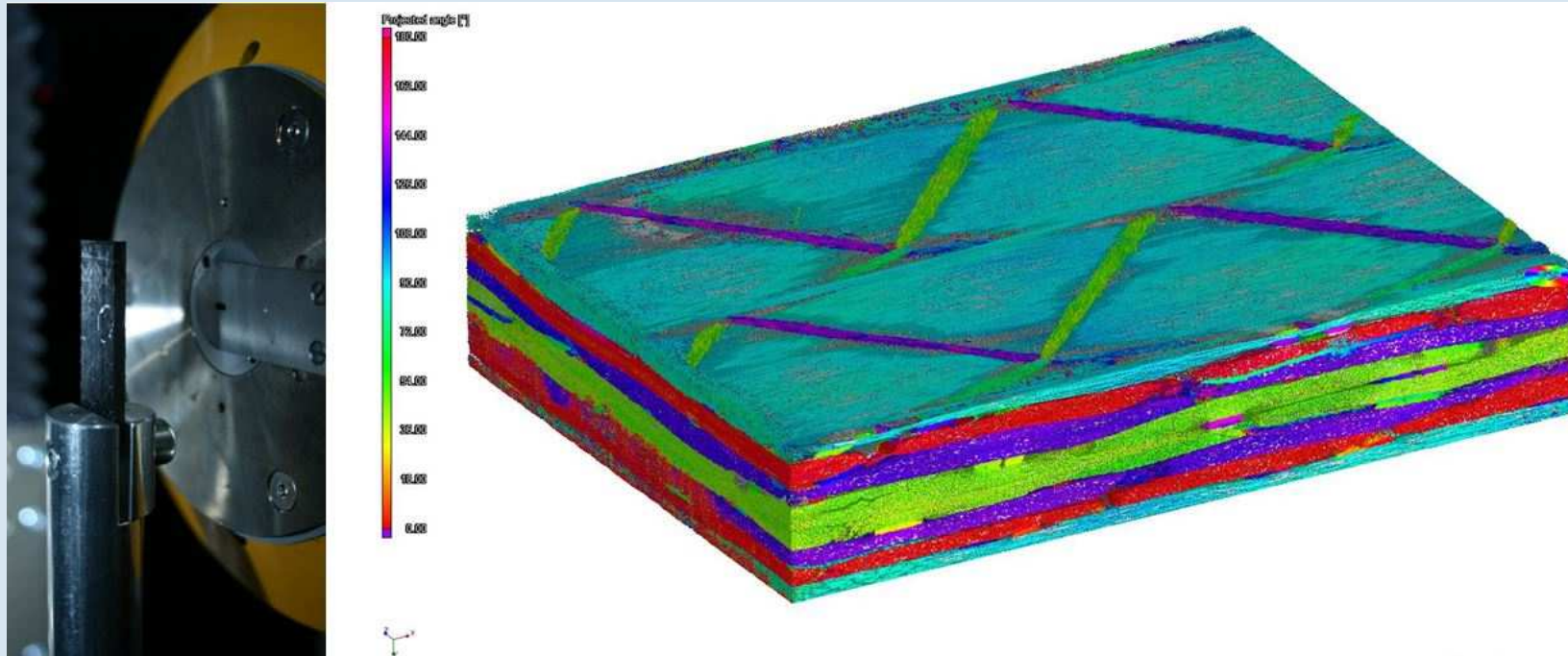
## 5. CFK Anwendungsbeispiel: Demonstrator „Hutprofil“, Detailscan



Herausgetrennte Detailprobe (14mm x 11mm) mit 5µm gescannt.

- Detailscan offenbart die komplette Struktur, Lagenaufbaus, Fehlerstellen und Lufteinschlüsse (Qualitätssicherung)
- ermöglicht die Extraktion aller relevanten Faserinformationen (Faserverteilung, Faserorientierung, Faservolumengehalt)

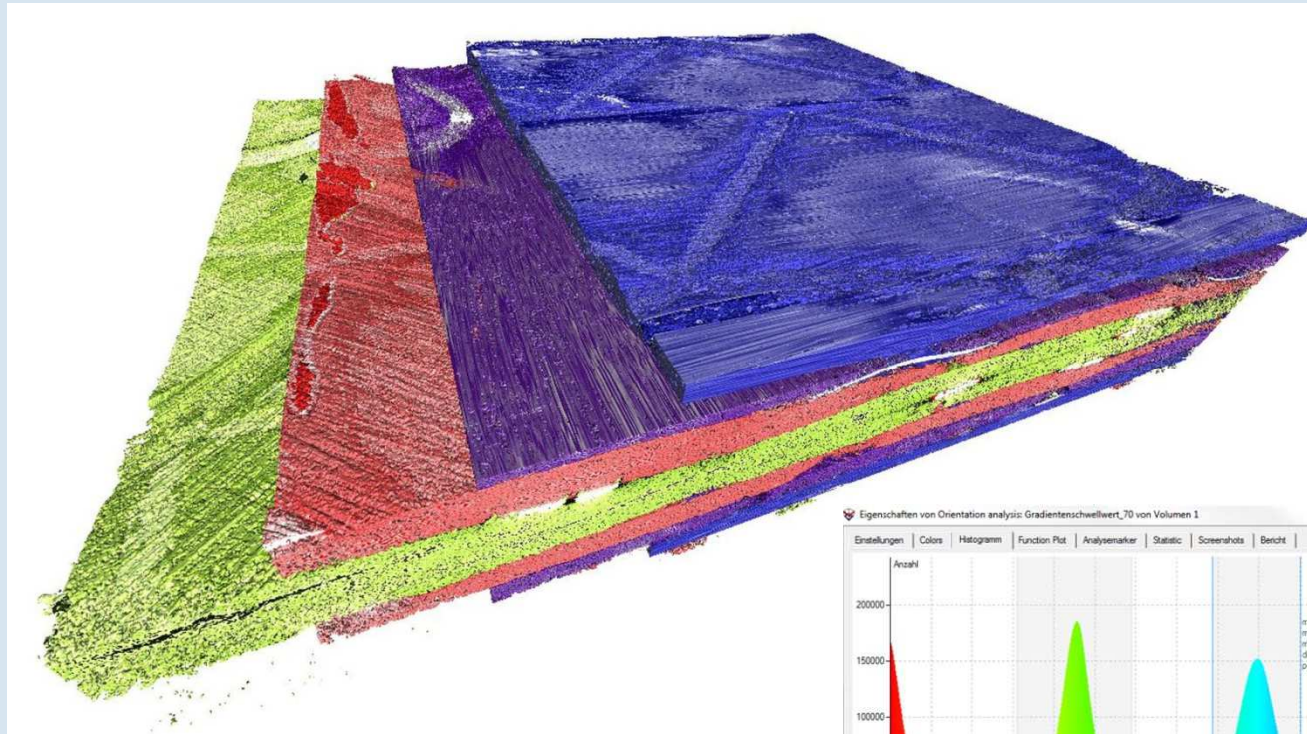
## 5. CFK Anwendungsbeispiel: Demonstrator „Hutprofil“, Detailscan



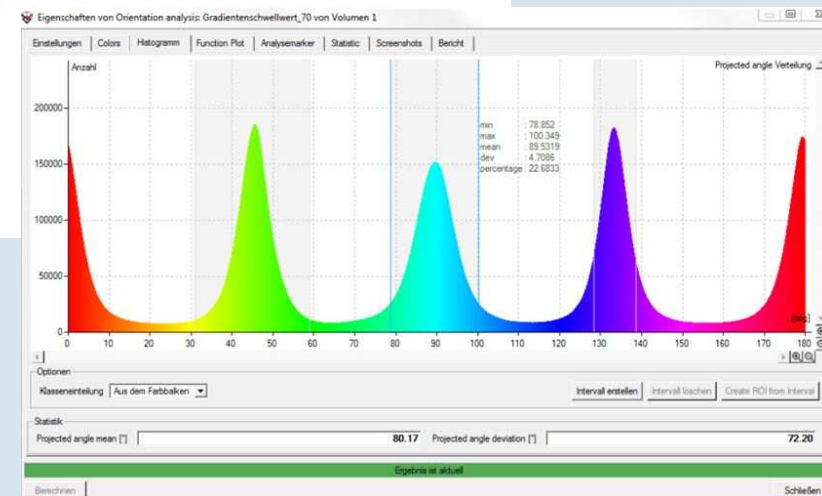
- Die Faserwinkeldarstellung zeigt den 8 lagigen Aufbau des unidirektionalen (UD)-Geleges mit 0/90/+45/-45/-45/+45/90/0 Grad Faserorientierung.
- Mittels Vorgabe von Faserwinkel können Faserbereiche selektiert und somit die einzelnen Faserlagen farblich dargestellt werden.



## 5. CFK Anwendungsbeispiel: Demonstrator „Hutprofil“, Detailscan



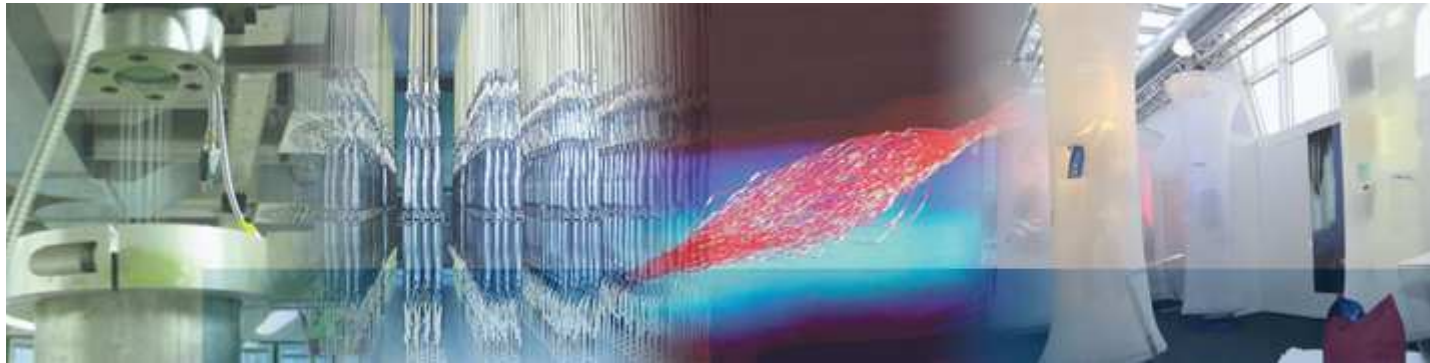
8 lagiger Aufbau des unidirektionalen  
(UD)-Geleges mit  
0/90/+45/-45/-45/+45/90/0 Grad  
Faserorientierung



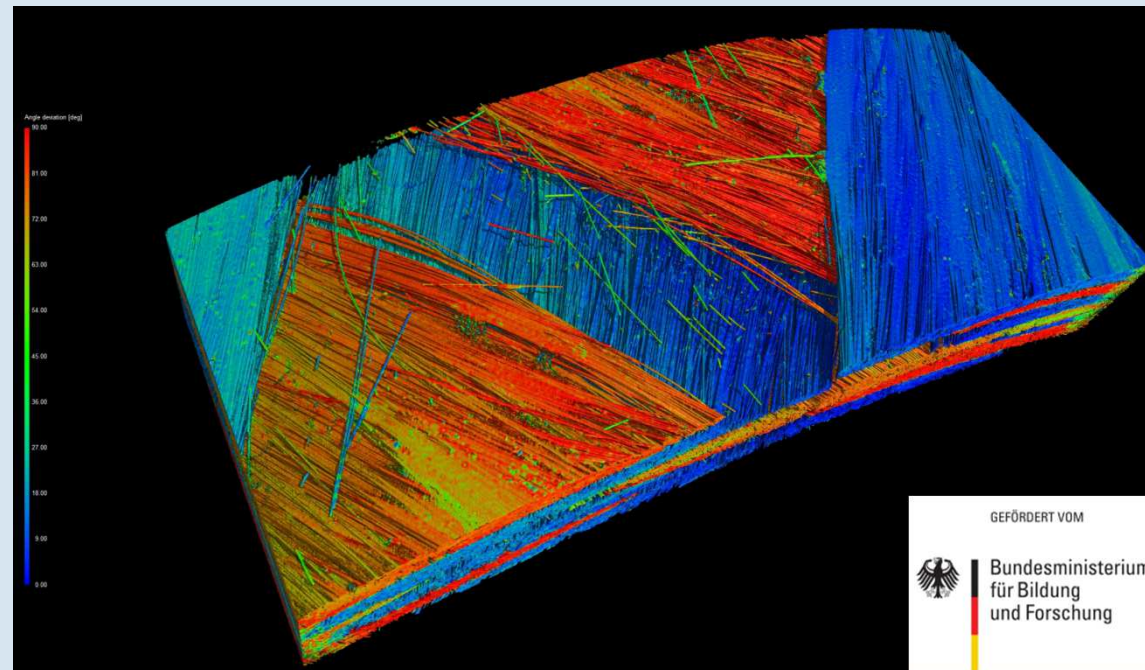
Histogramm der analysierten Faserwinkel

## 6. Zusammenfassung und Ausblick

- Neue Möglichkeiten durch qualitativ hochwertige (hoher Kontrast, geringes SNR) hochaufgelöste CT-Scans im  $\mu\text{m}$  Bereich. Jede Probe hat aufgrund ihres Materials und Aufbaus ihre eigenen optimalen Aufnahmeparameter.
- Sehr gut geeignet für Qualitätsanalyse von faserbasierten Werkstoffen/Leichtbau.
- Zusammenführung CT und numerische Berechnung:
  - Generierung und Verifizierung von FE-Simulationsmodellen.
  - Basis für genauere Ersatzmodelle für Composite-Bauteilberechnungen und somit bessere Vorhersagefähigkeit mechanischer Eigenschaften.
  - liefert wichtige Kenndaten für Infiltrationssimulationen.
- CT-Analyse ideal geeignet zur Unterstützung der F&E bei :
  - der Entwicklung textilbasierter High-Tech-Produkte der Optimierung von Fertigungsprozessen (textile Fertigungskette).
  - Belastungseinheit für Verstärkungsstrukturen im  $\mu\text{-CT}$  wird entwickelt/ beschafft.
- Wertvoller Einsatz im faserbasiertem Leichtbau.



# Vielen Dank !



Hermann Finckh  
Tel.: (0711) 9340-401  
Email: [hermann.finckh@itv-denkendorf.de](mailto:hermann.finckh@itv-denkendorf.de)

„Dieses Forschungs- und Entwicklungsprojekt T-Pult wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmenkonzept „Forschung für die Produktion von morgen“ (02PJ2180) gefördert und vom Projektträger Karlsruhe (PTKA) betreut. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.“