

---

# Modellierung und Simulation entlang der gesamten Vliesstoff-Prozesskette

---



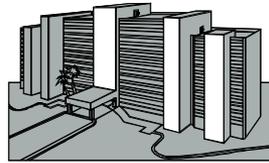
**Dr. Christian Leithäuser**  
**Dr. Simone Gramsch**  
**Dr. Dietmar Hietel**  
**Dr. Raimund Wegener**

**Fraunhofer-Institut für Techno-  
und Wirtschaftsmathematik ITWM,  
Kaiserslautern**  
**06. November 2013**

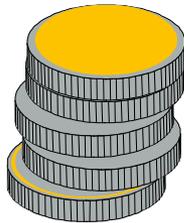
# Fraunhofer-Gesellschaft Profil 2013



22 000  
Mitarbeiter



66 Institute



1,9 Milliarden €  
Budget

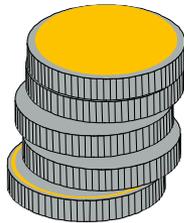
**Fraunhofer Motto:**  
Brückenschlag von akademischer  
zu industrieller Forschung.



# Fraunhofer ITWM Profil 2013



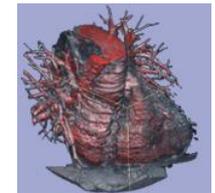
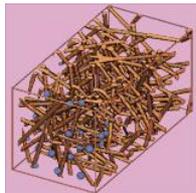
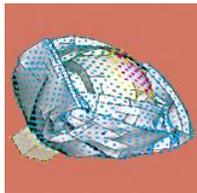
250  
Mitarbeiter



22 Millionen €  
Budget



**ITWM Motto: Mathematik ist Technologie**



# Gruppe Flexible Strukturen und Strömung in der Abteilung Transportvorgänge



Dr. Raimund Wegener  
(Abteilungsleiter)



Dr. Dietmar Hietel  
(Stellv. Abteilungsleiter)



Dr. Simone Gramsch



Dr. Robert Feßler



Johannes Schnebele



Sergey Antonov



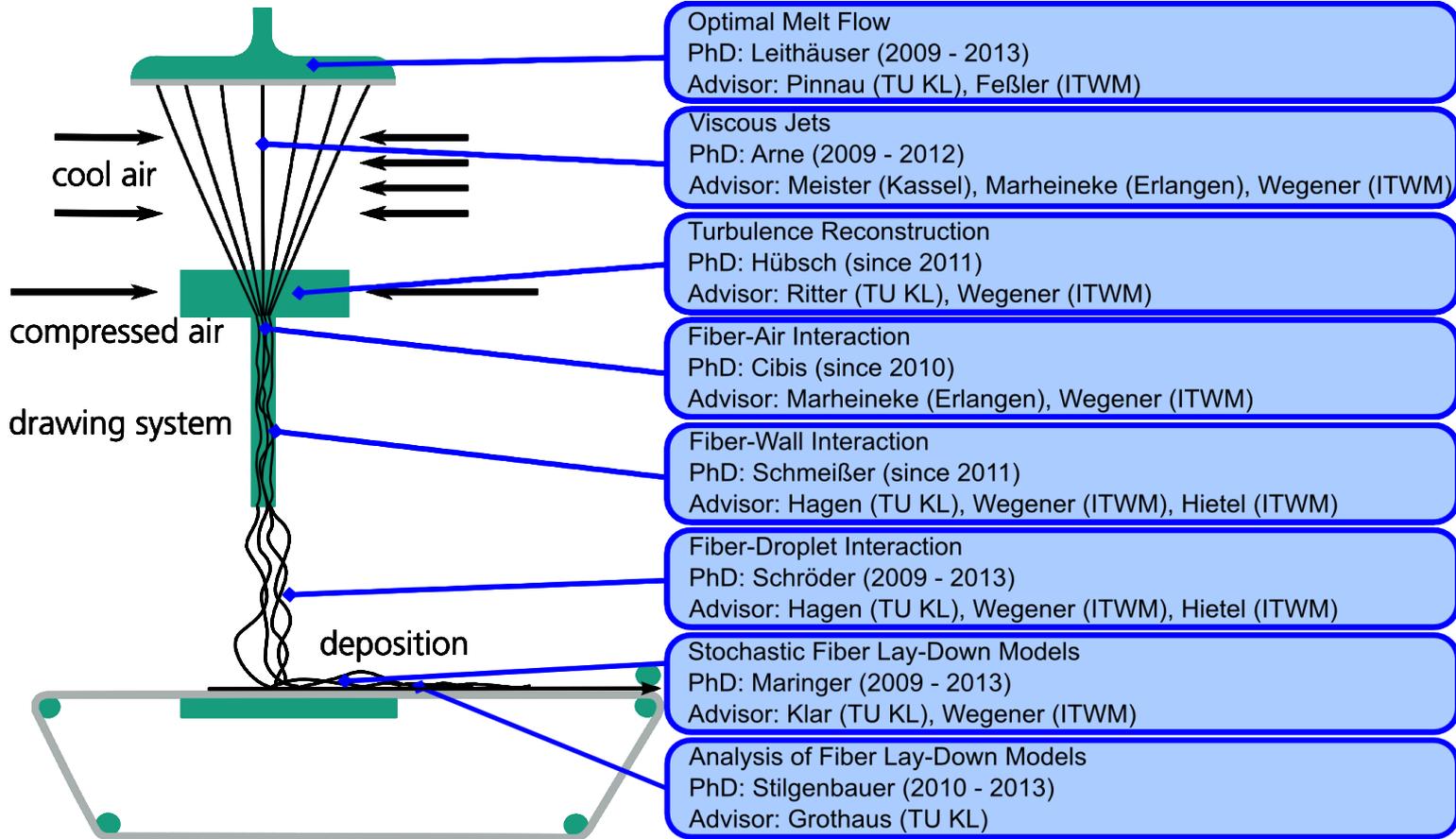
Dr. Walter Arne



Dr. Christian Leithäuser

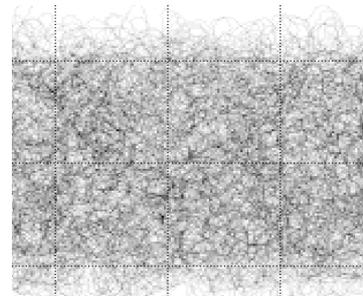
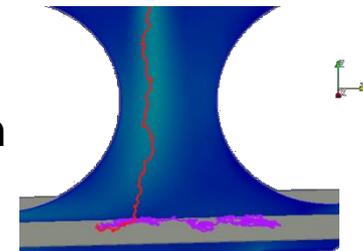
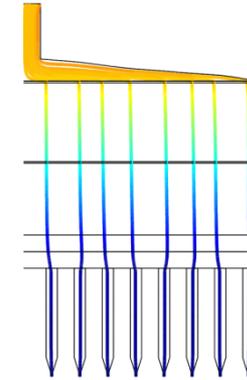
# Vliesstoff-Forschungsoffensive

- 8 Doktorarbeiten zur detaillierten Untersuchung unterschiedlicher Aspekte entlang der Vliesstoff-Prozesskette



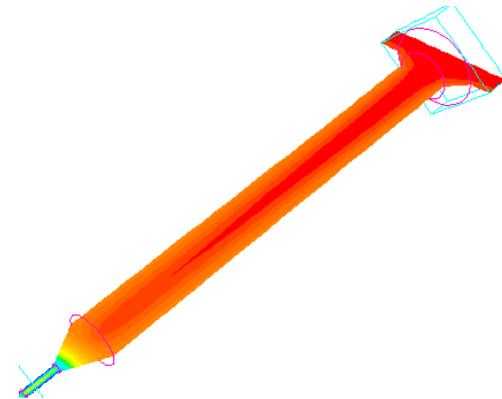
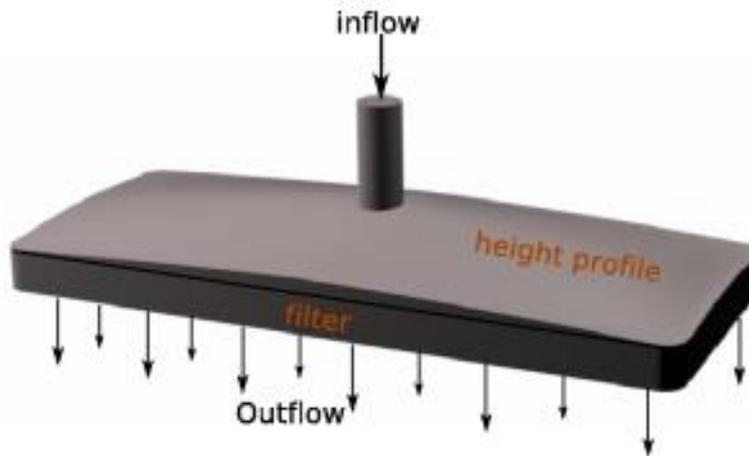
# Inhalt

- **Schmelzen:** Schmelzeströmung im Spinnpaket
- **Spinnen:** Kapillaraustritt und Spinnprozess
- **Verwirbeln:** Fäden in turbulenten Luftströmungen
- **Ablegen:** Virtuelle Vliesbildung



# Optimierung der Schmelzeströmung im Spinnpaket

- Gravierende Unterschiede in der Polymerverweilzeit zwischen Extruder und Kapillaraustritt können zu inhomogenen Materialeigenschaften der Filamente führen.
- Auslegungsziel Spinnpaket:  
“Die Verweilzeit zwischen Eintritt in das Spinnpaket und Austritt aus den Kapillaren soll für alle Kapillaren möglichst gleich sein.”



# Berechnung der optimalen Geometrie für Freiräume

- Modellierung der Schmelzeströmung durch Strömungsgleichungen
- Die Grenzschichtdicke wird durch die Wandschubspannung quantifiziert
- Optimierungsziel ist das Erreichen eines gleichmäßigen Wandschubspannungs-Profiles:

$$\text{minimize } J(\Omega) = \int_{\Gamma^w} (\mu |\nabla \times \mathbf{u}| - \sigma_{Ziel})^2 ds$$

$$\text{subject to } -\mu \Delta \mathbf{u} + \nabla p = 0 \quad \text{in } \Omega$$

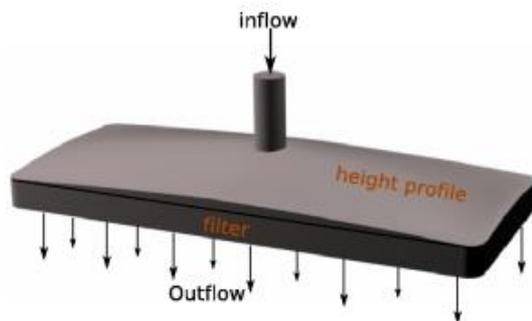
$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad \text{in } \Omega$$

$$\mathbf{u} = \mathbf{n}u_0 \quad \text{auf } \Gamma^{in}$$

$$\mathbf{u} = 0 \quad \text{auf } \Gamma^w$$

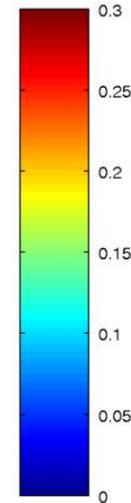
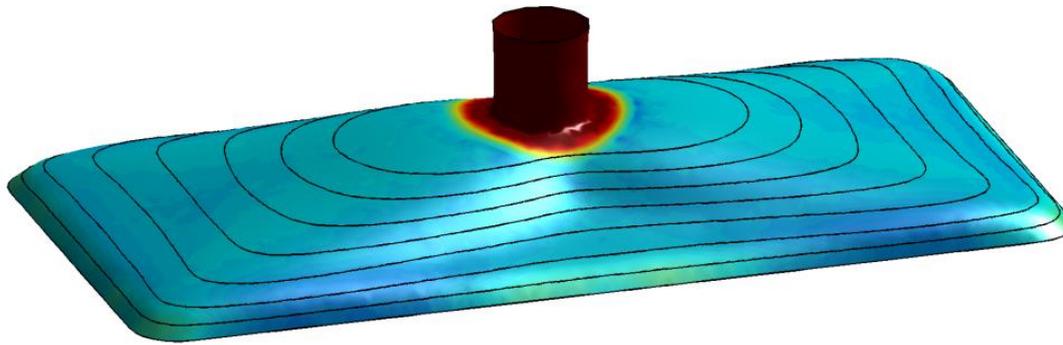
$$(\mathbf{n} \cdot \mathbf{u}) \frac{a}{A} = -\frac{k}{\mu} \frac{p - p_0}{L} \quad \text{auf } \Gamma^{out}$$

$$\mathbf{n} \times \mathbf{u} = 0 \quad \text{auf } \Gamma^{out}$$



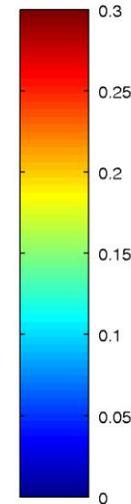
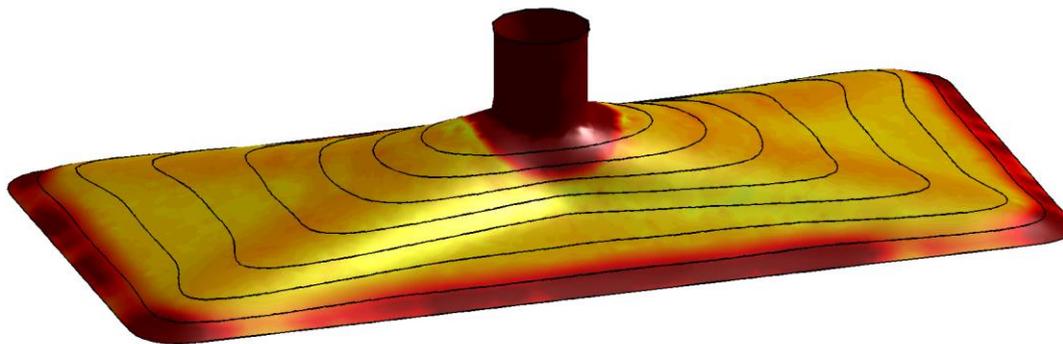
# Auslegung homogener Schmelzeverteiler

Ziel-Wandschubspannung: 0,1

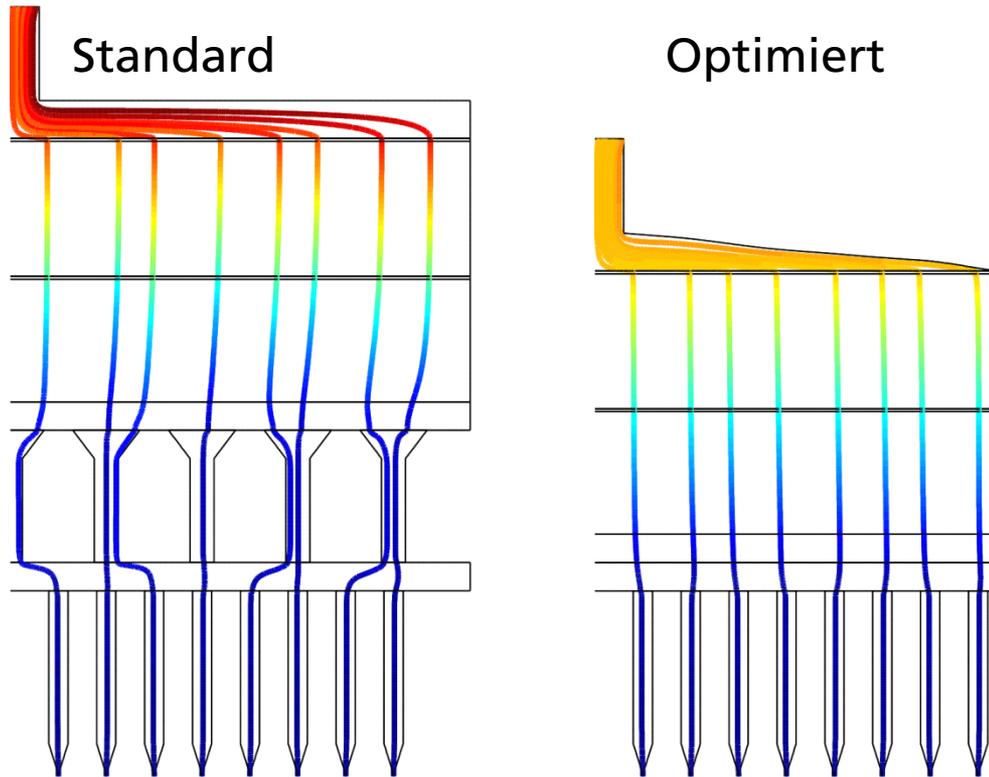


Wandschubspannung

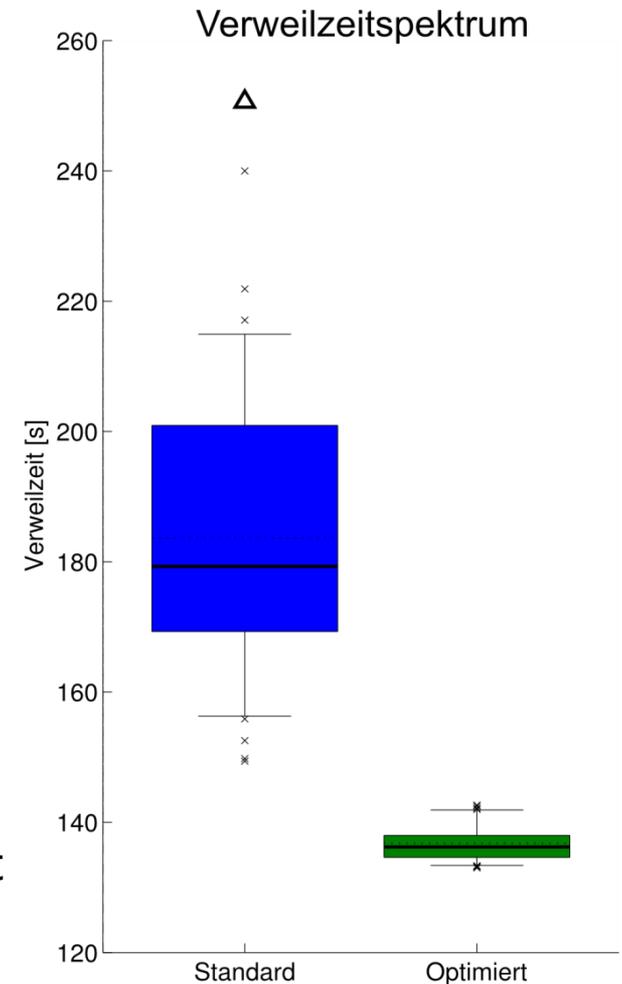
Ziel-Wandschubspannung: 0,2



# Vergleich der Verweilzeiten



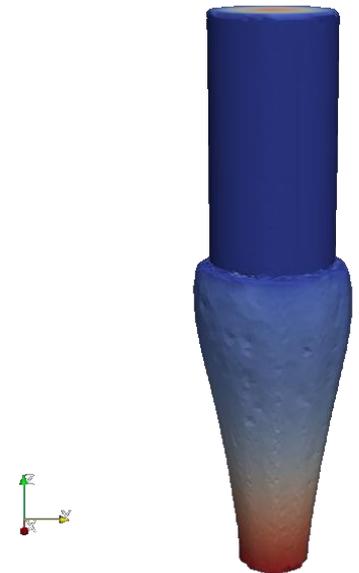
- Die Auslegung von Spinnpaketen nach strömungsdynamischen Gesichtspunkten führt zu einer erheblichen Vergleichmäßigung.



AiF-Projekt „AUTOPOS“: Kooperation zwischen Fraunhofer ITWM, Institut für Textiltechnik(Aachen) und Industriepartnern

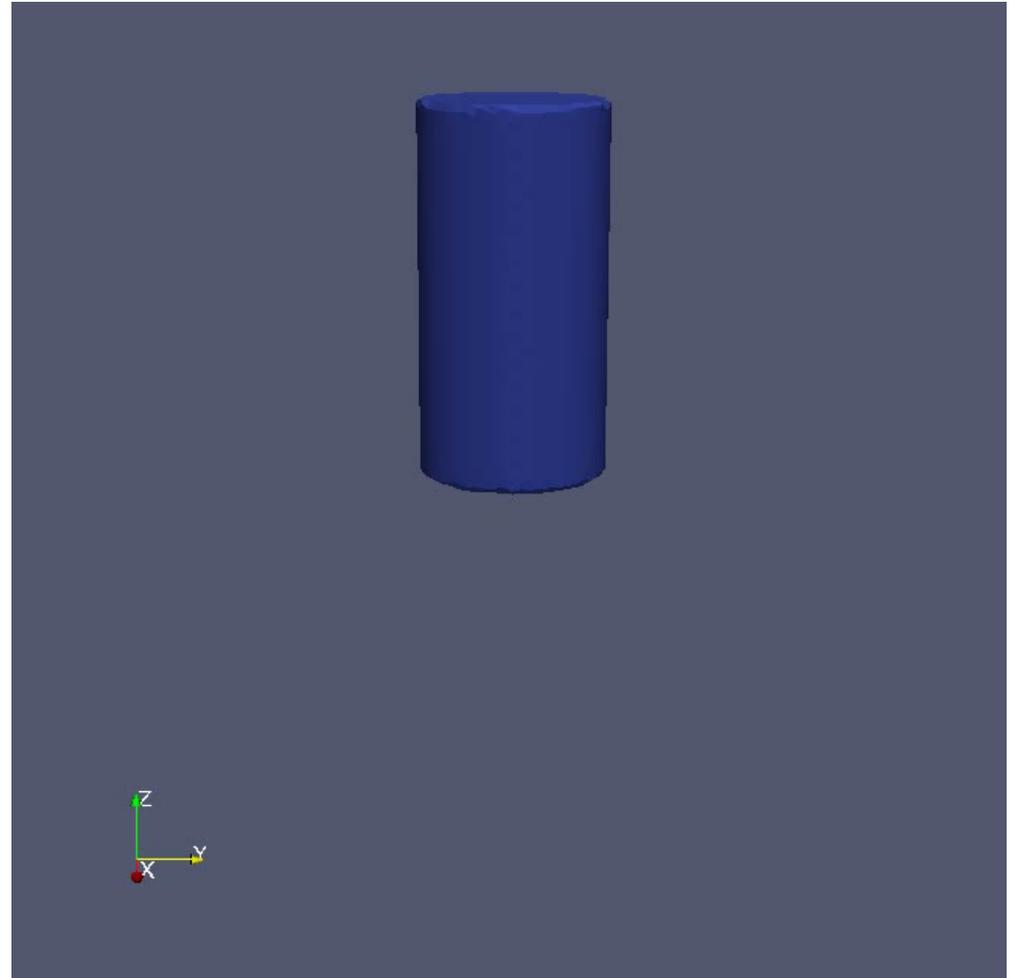
# Simulation des Kapillaraustritts

- Durch viskoelastische Effekte tritt am Kapillaraustritt eine Strangaufweitung ("die swell") auf.
- Aufwendige Simulation, da sich die Grenzfläche zwischen Polymer und Luft dynamisch einstellt ("freie Oberfläche").
- Gitterfreie Methoden sind prädestiniert Probleme dieser Art zu lösen.
- Wir verwenden die am Fraunhofer ITWM entwickelte gitterfreie Methode FPM (Finite Pointset Method).
- Simulation unter Berücksichtigung von:
  - Viskoelastischem Materialmodell
  - Scherverdünnung
  - Temperaturabhängigkeit
  - Oberflächenspannung



# Simulation des Kapillaraustritts

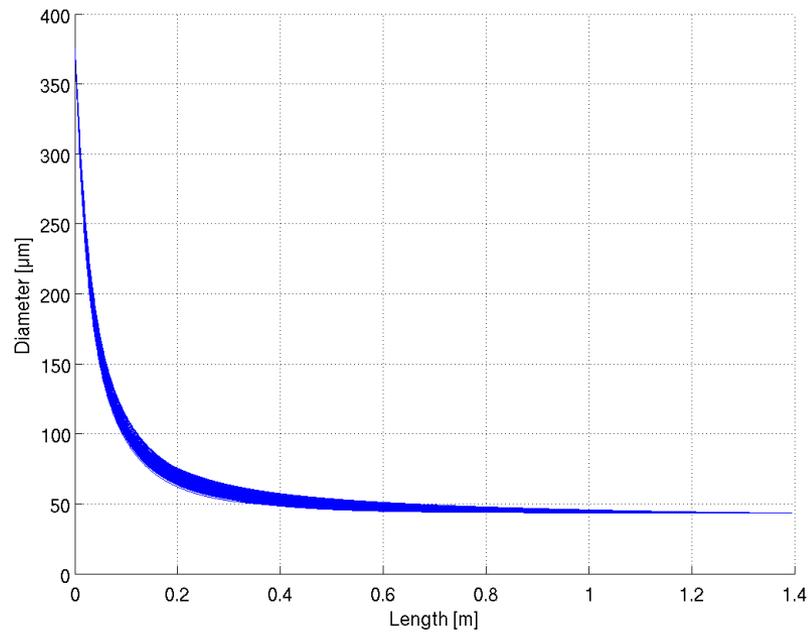
- 3D-Simulation des Kapillaraustritts mit viskoelastischen Effekten
- Transiente Simulation
- Kopplung mit 1D-Fadenmodell für den Spinnprozess möglich



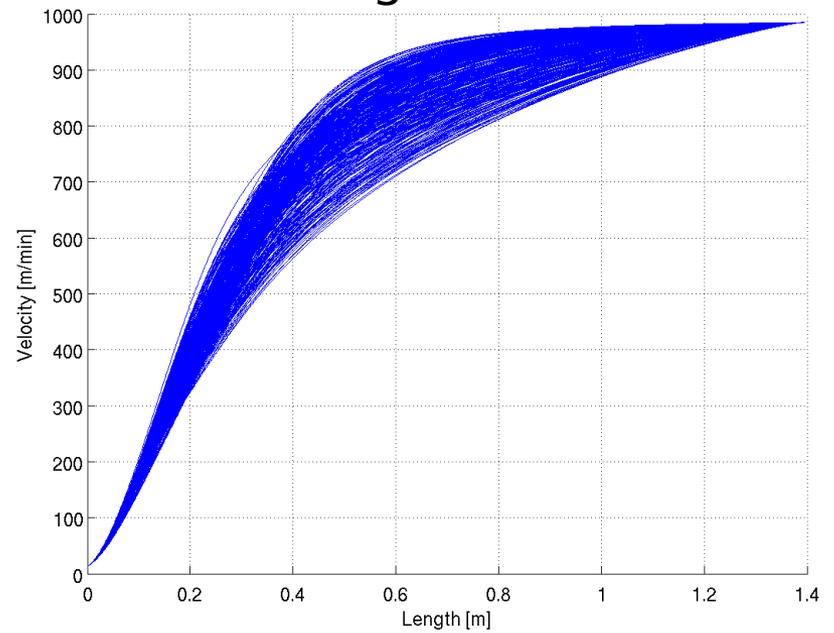
# Simulation des Spinnprozesses

- Im Anschluss an die detaillierte 3D-Simulation des Kapillaraustritts werden 1D-Fadenmodelle für den weiteren Spinnprozess verwendet.

## Filamentdurchmesser

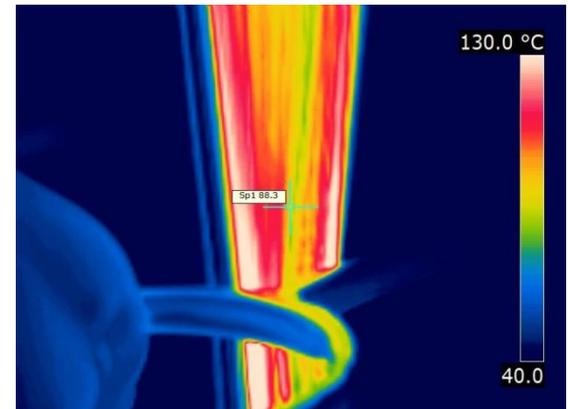
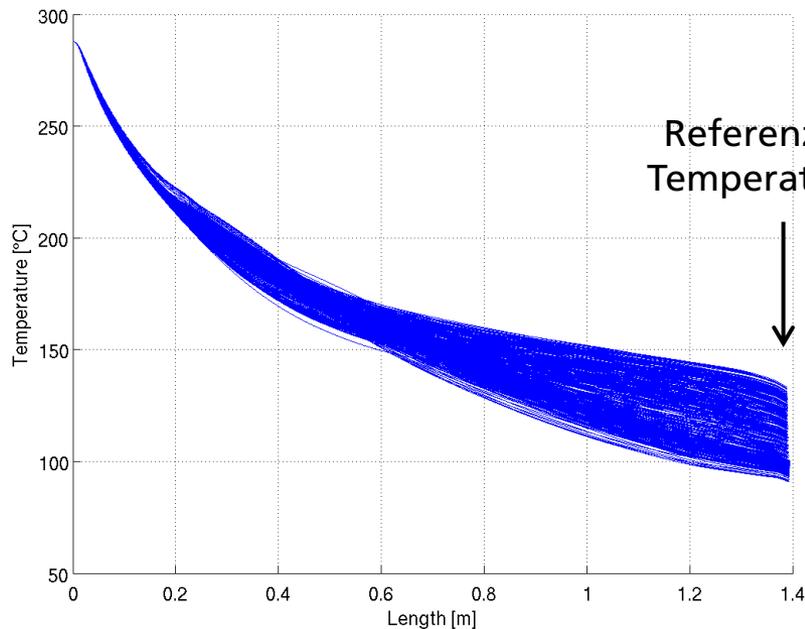


## Geschwindigkeit



# Simulation des Spinnprozesses

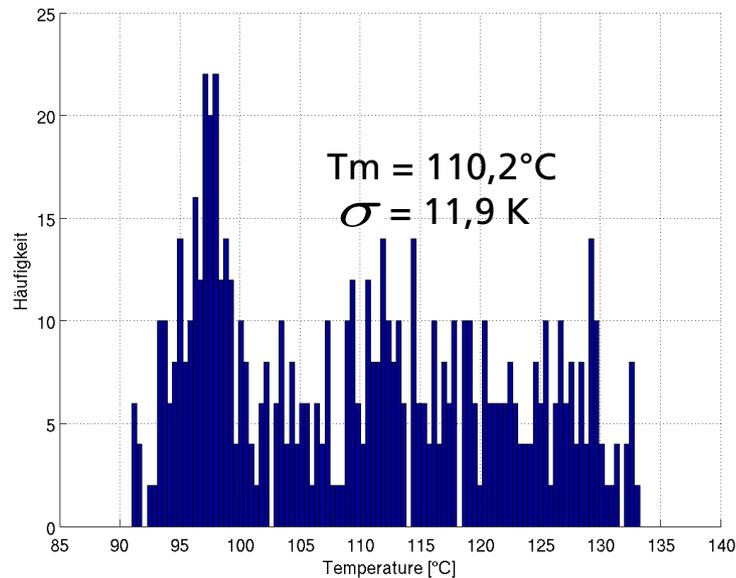
- Untersuchung des Abkühlverhaltens
- Gute Übereinstimmung zwischen Simulation und Experiment
- Große Temperaturunterschiede zwischen Eizelfilamenten bieten Spielraum zur Prozessoptimierung.



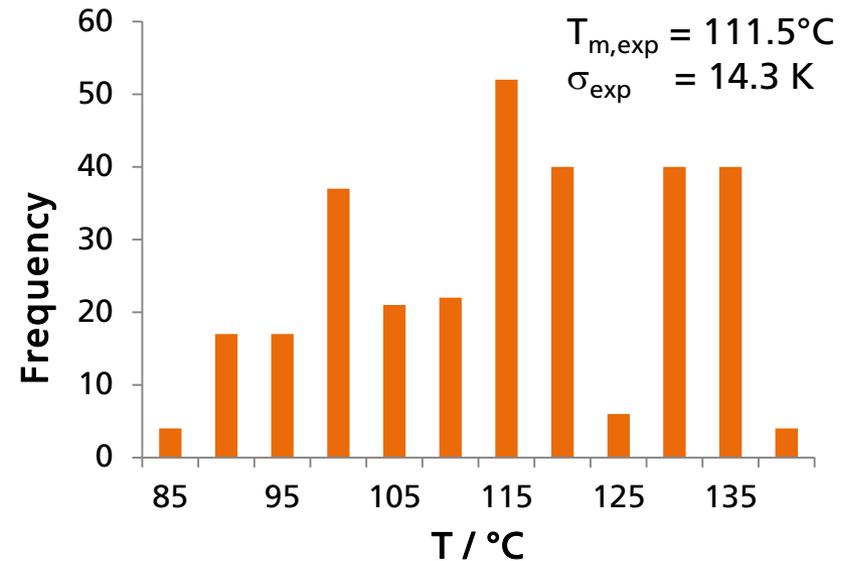
# Simulation des Spinnprozesses

- Vergleich der Temperaturverteilung zwischen Simulation und Experiment.
- Gute Übereinstimmung der Verteilungen mit leichter Abweichung bei der Standardabweichung.

Simulation

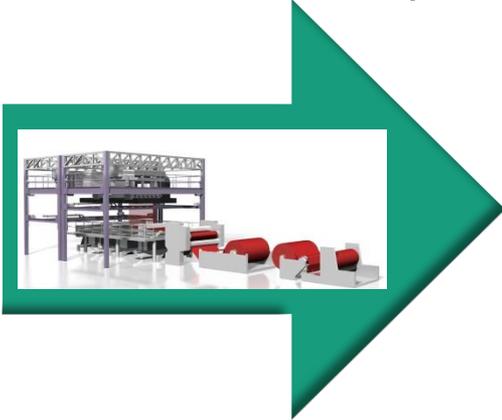


Experiment



# Virtuelle Vliesproduktion: Die FIDYST-Suite

- FIDYST  
(Fiber Dynamics  
Simulation Tool)



- turbulente Dynamik  
einzelner typischer  
Filamente basierend  
auf CFD-Daten

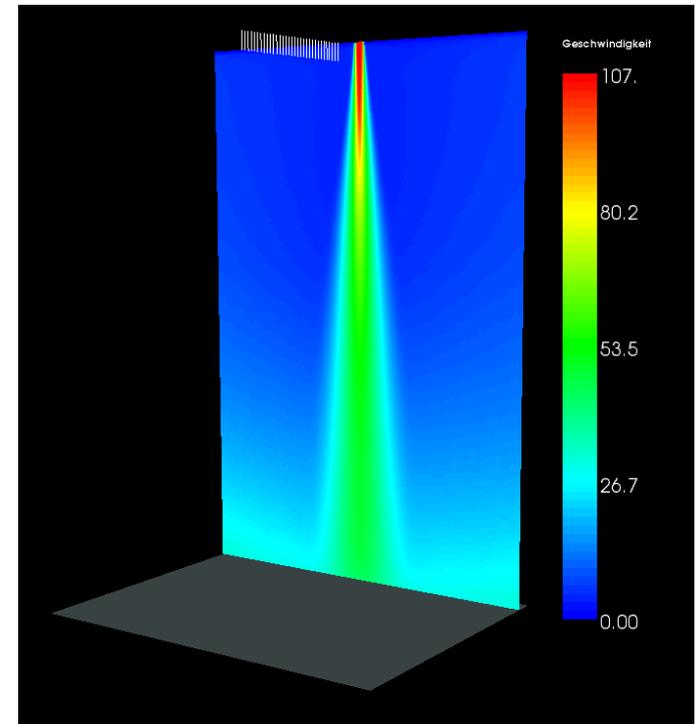
# FIDYST: Modellierung und Simulation des Ablagevorgangs

Verallgemeinertes String-Modell für einen elastischen, längentreuen Faden:

$$(\rho A)\partial_{tt}\mathbf{r} = \partial_s(T\partial_s\mathbf{r}) - \partial_{ss}((EI)\partial_{ss}\mathbf{r}) + \mathbf{f}$$
$$\|\partial_s\mathbf{r}\| = 1$$

mit den Kräften

- Trägheit
- Zugspannung und Biegesteifigkeit
- Gravitation und Luftkräfte
- Kontakt- und Reibungskräfte
- elektrostatische Kräfte



# FIDYST: Modellierung der Luftkräfte

- Simulation der Luftströmung mit kommerziellem CFD-Programm (FLUENT)
- Eingabe der CFD-Daten in FIDYST mit folgendem Luftkraftmodell\*

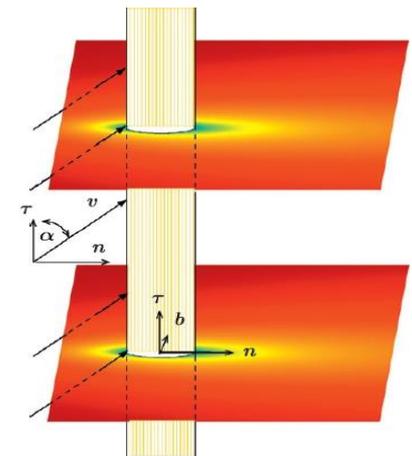
- deterministische Luftkräfte:

$$f_n^{air}(v(s, t), t) = v_n(s, t)^2 \cdot c_n(v_n(s, t))$$

$$f_\tau^{air}(v(s, t), t) = v_\tau(s, t)v_n(s, t) \cdot c_\tau(v_n(s, t))$$

- turbulente Luftkräfte:

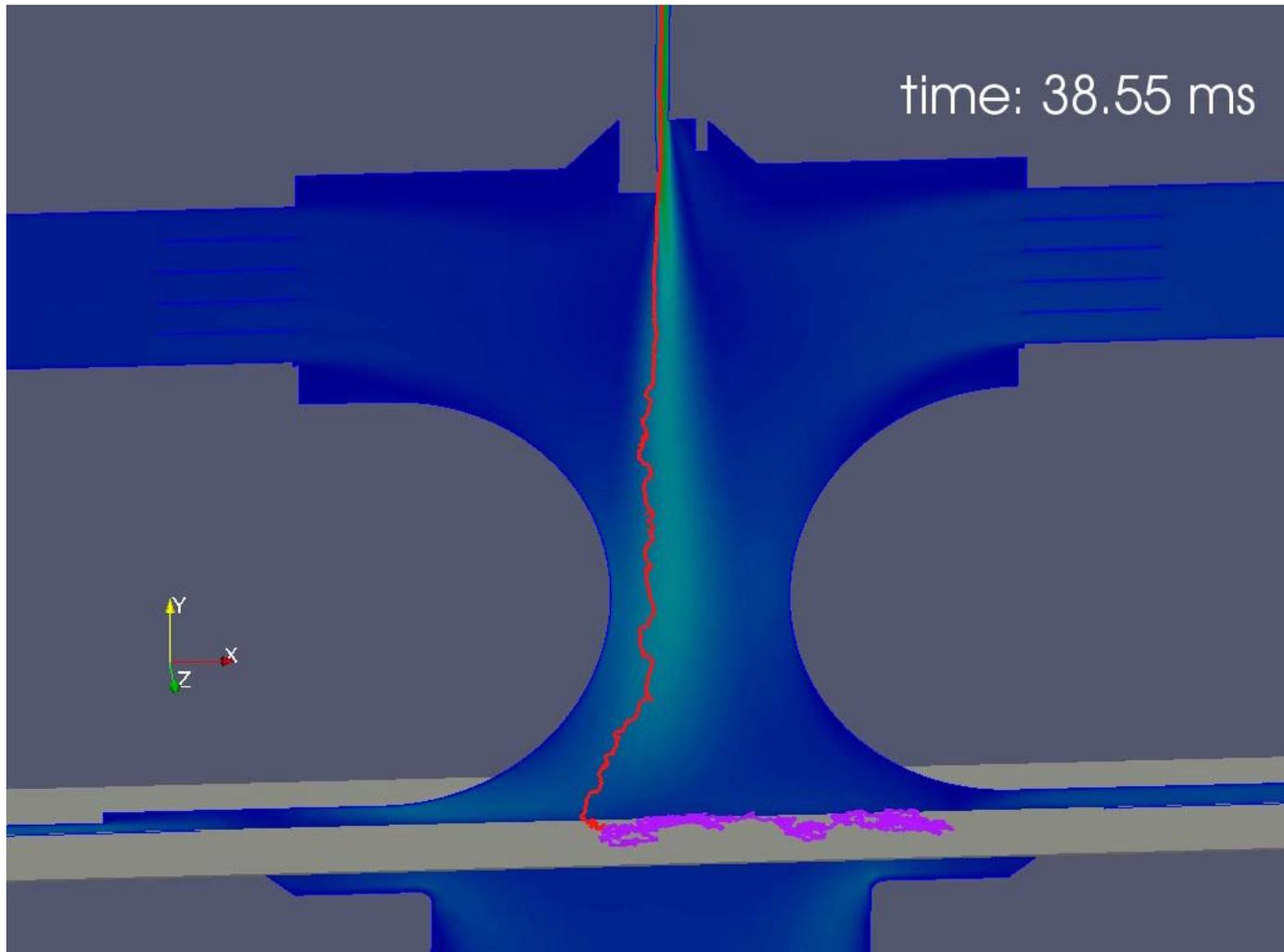
$$f_{stochastic} = f(\mathbf{u}, k, \epsilon)$$



- Rückwirkung der Fäden auf die Strömung durch Quellterme in der Impuls- und Energiebilanz

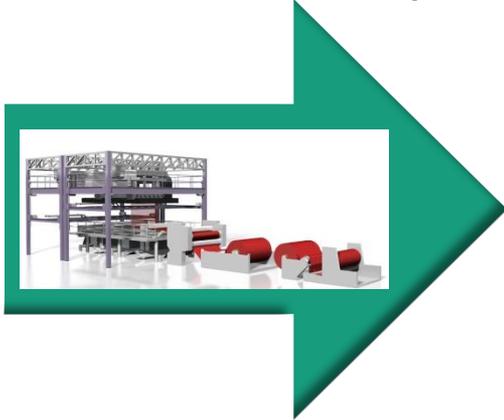
\* N. Marheineke, R. Wegener. Modeling and Application of a Stochastic Drag for Fibers in Turbulent Flows. *Int. J. Multiphase*. 37(2), 136-148, 2011.

# FIDYST: Simulation des Ablagevorgangs

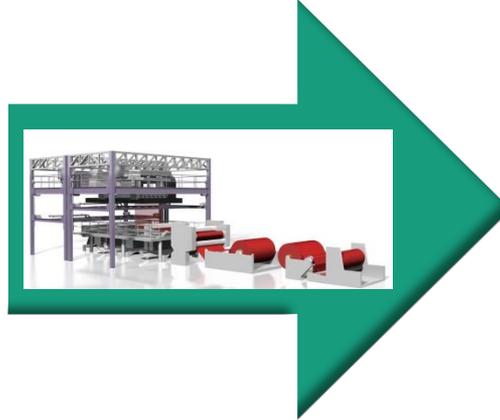


# Virtuelle Vliesproduktion: Die FIDYST-Suite

- FIDYST  
(Fiber Dynamics  
Simulation Tool)



- IDENT  
(Identification Tool)

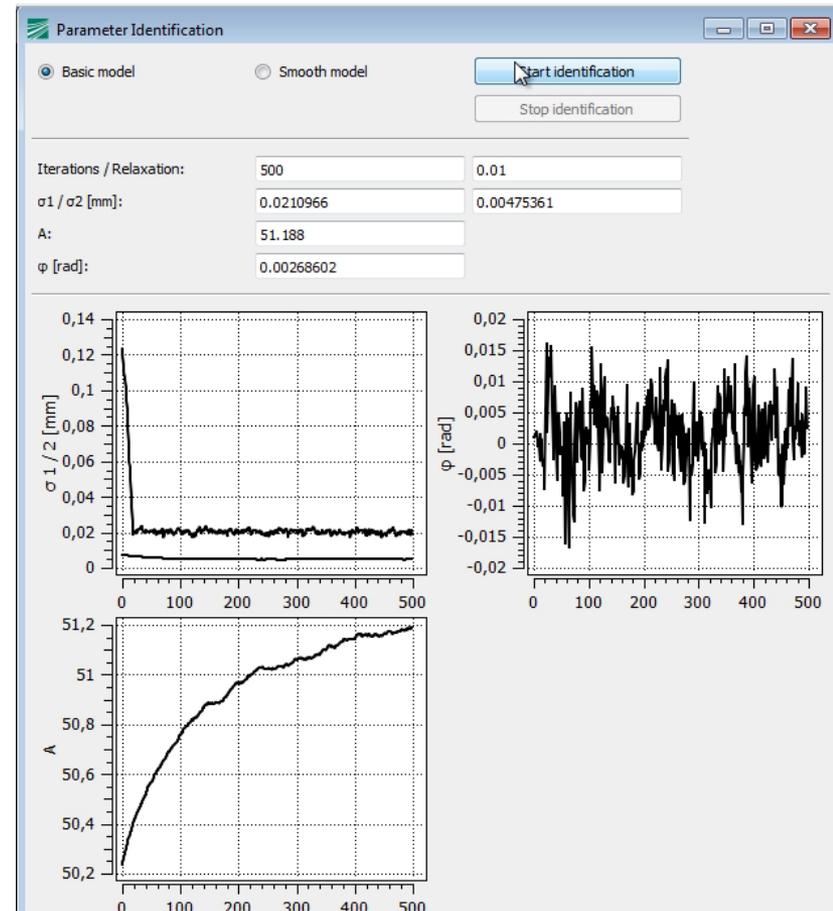


- turbulente Dynamik  
einzelner typischer  
Filamente basierend  
auf CFD-Daten

- Identifizierung der  
Modellparameter auf  
Basis von FIDYST-  
Daten

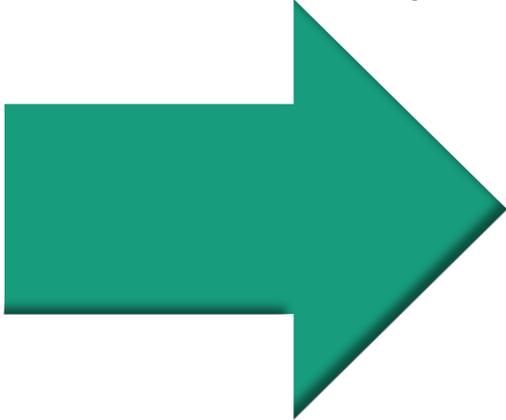
# IDENT: Identifizierung der Modellparameter

- Detaillierte FIDYST-Simulationen sind zeitaufwändig.
- Nur einige repräsentative Filamente werden mit FIDYST simuliert.
- Mit dem Tool IDENT werden Parameter für ein Ersatzmodell identifiziert.
- Mit dem Ersatzmodell kann ein virtuelles Vlies mit Tausenden von Einzelfilamenten innerhalb weniger Sekunden erstellt werden.



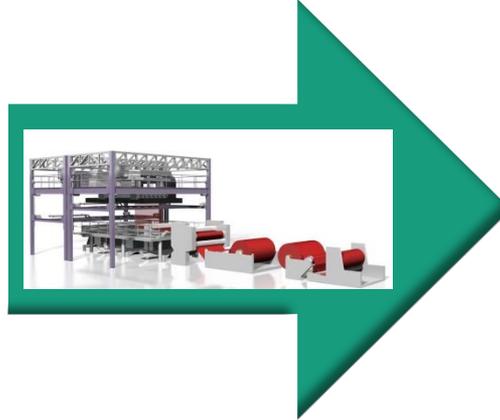
# Virtuelle Vliesproduktion: Die FIDYST-Suite

- FIDYST  
(Fiber Dynamics  
Simulation Tool)



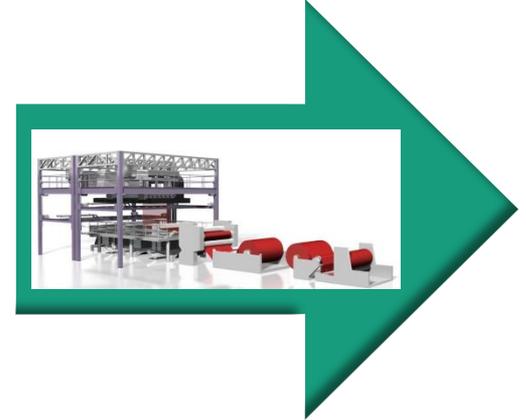
- turbulente Dynamik einzelner typischer Filamente basierend auf CFD-Daten

- IDENT  
(Identification Tool)



- Identifizierung der Modellparameter auf Basis von FIDYST-Daten

- SURRO  
(Surrogate Model)

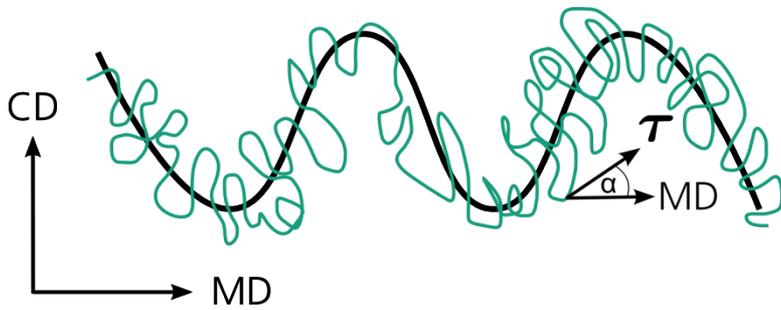


- Überlagerung der Ablage aller Filamente zum „virtuellen Vlies“

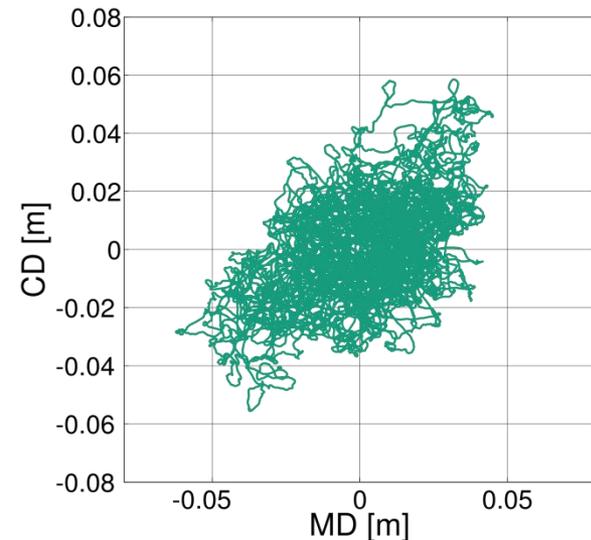
# SURRO: Simulation und Bewertung der Vliesablage

Idee des stochastischen Ersatzmodells\*:

- Filamentablage = Spurkurve + stochastischer Prozess
- Identifizierung der stochastischen Parameter aus einer Vollsimulation (FIDYST)

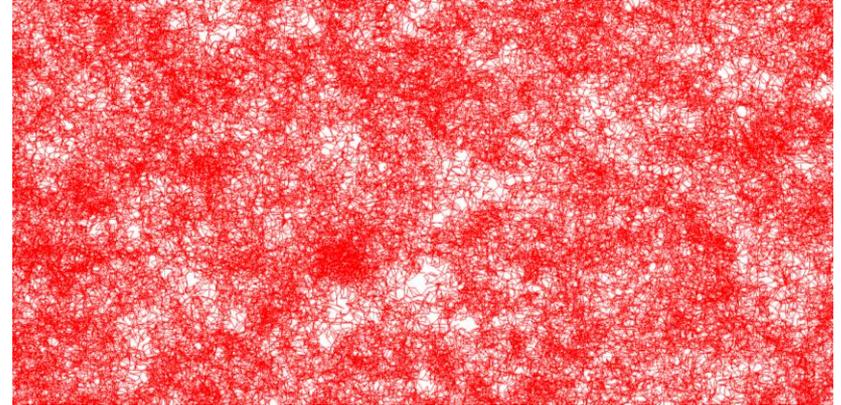
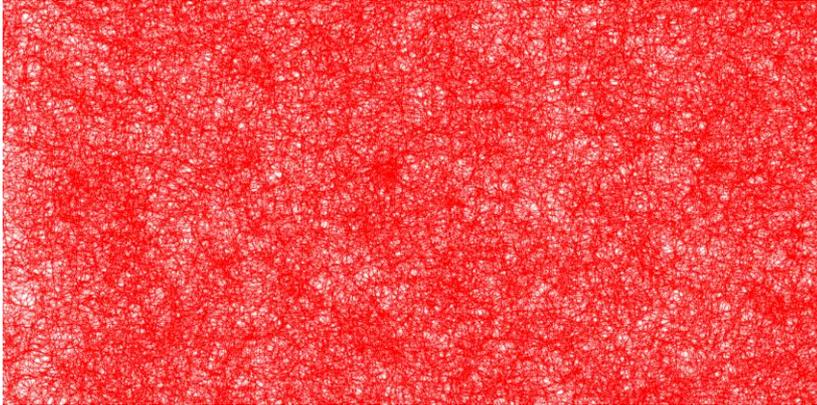


$$d\xi_t = \tau(\alpha_t)dt - d\gamma_t$$
$$d\alpha_t = -\nabla B(\xi_t) \cdot \tau^\perp(\alpha_t)dt + AdW_t$$



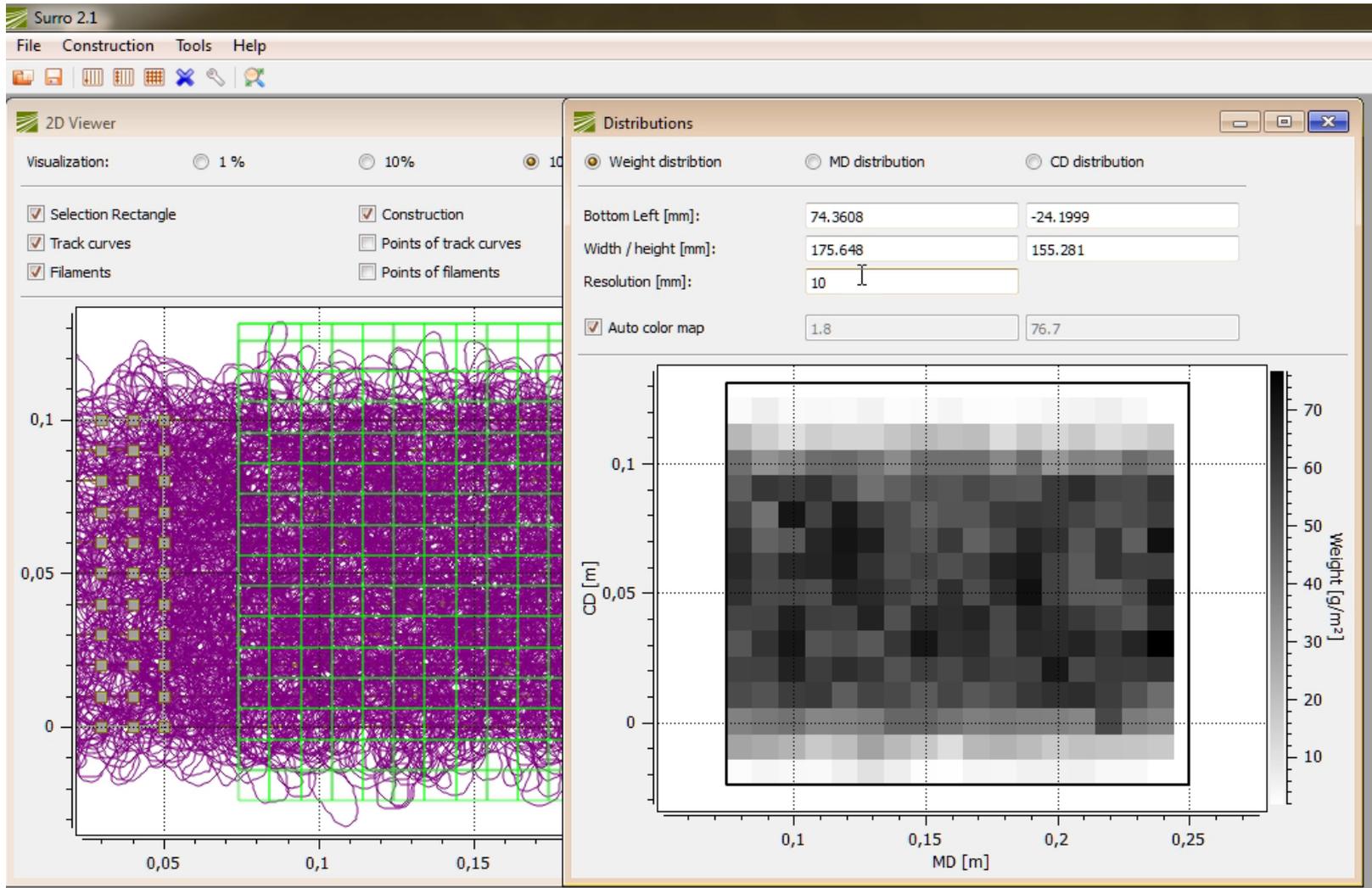
\* A. Klar, N. Marheineke, R. Wegener. Hierarchy of Mathematical Models for Production Processes of Technical Textiles. ZAMM. 89(12), 941-961, 2009.

# SURRO: Simulation und Bewertung der Vliesablage

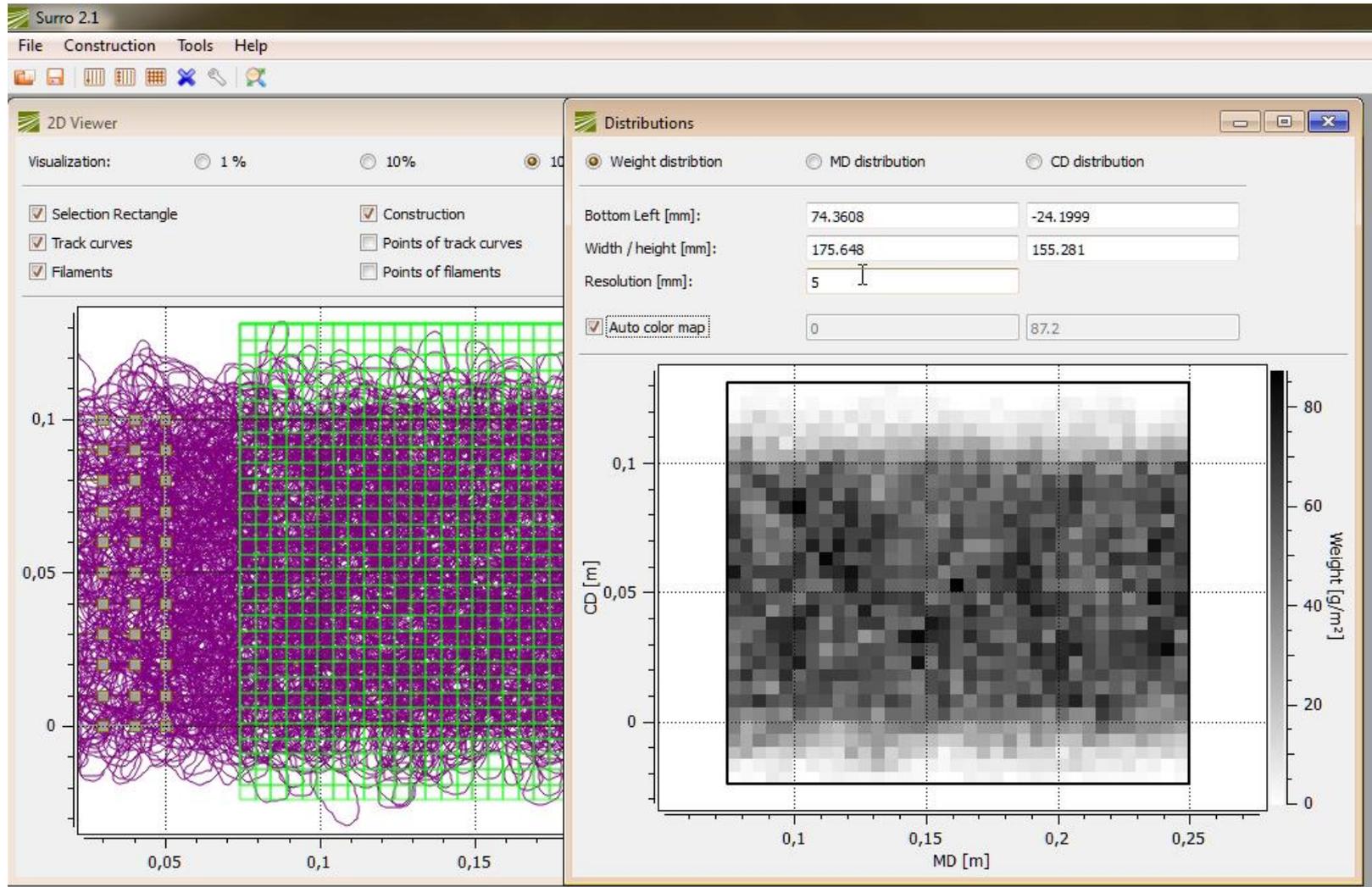


- Translatorische und rotatorische Spinnprozesse
- Vliesstruktur ausgehend von der Ablage der einzelnen Filamente
- Flächengewichtsverteilung in beliebiger Probengröße auswertbar
- Automatische Berechnung der cv-Werte
- Standardabweichung in MD / CD als Indikator für Festigkeit
- Generierung von 3D-Strukturen

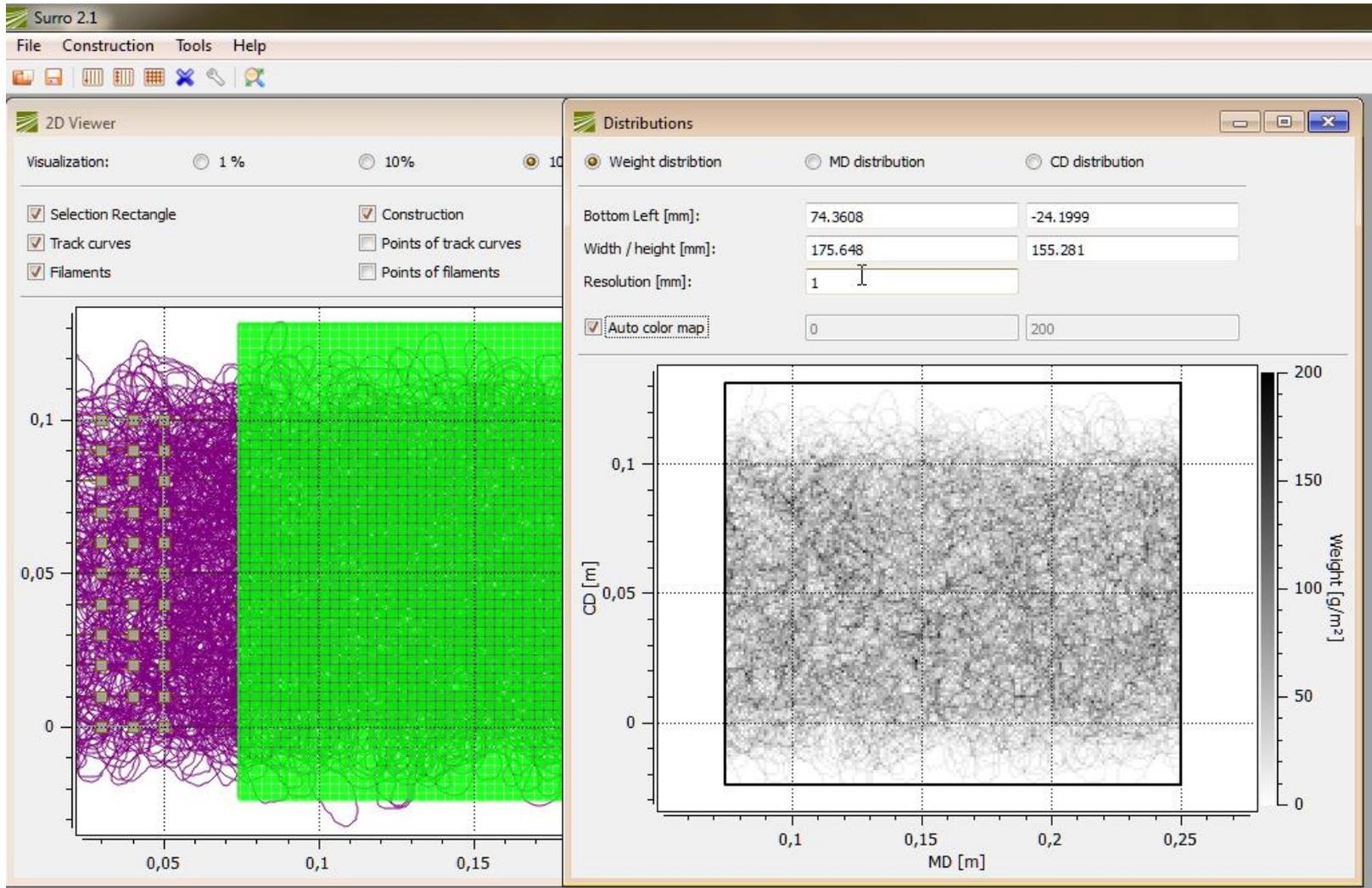
# SURRO: Dichteverteilung



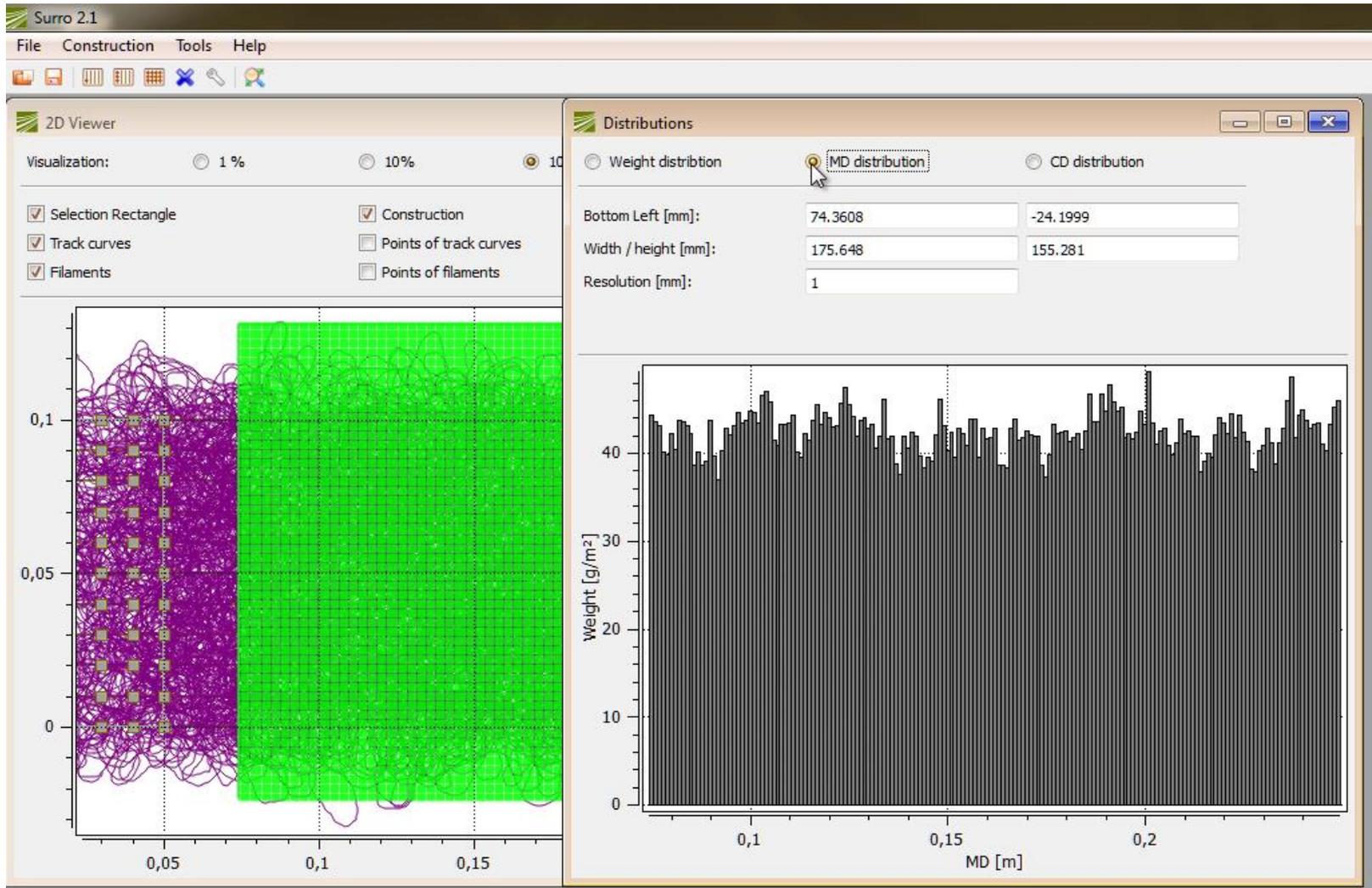
# SURRO: Dichteverteilung



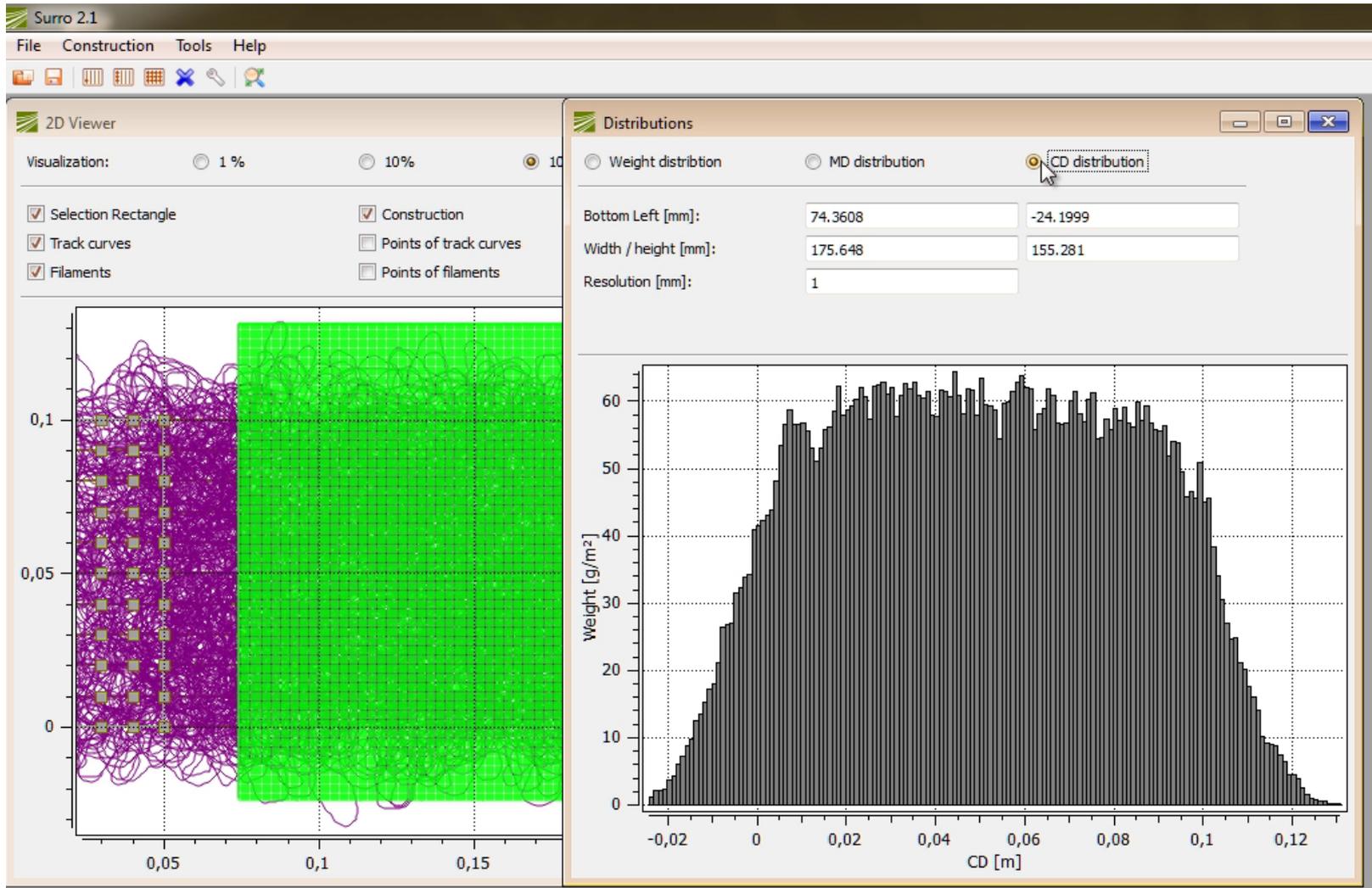
# SURRO: Dichteverteilung



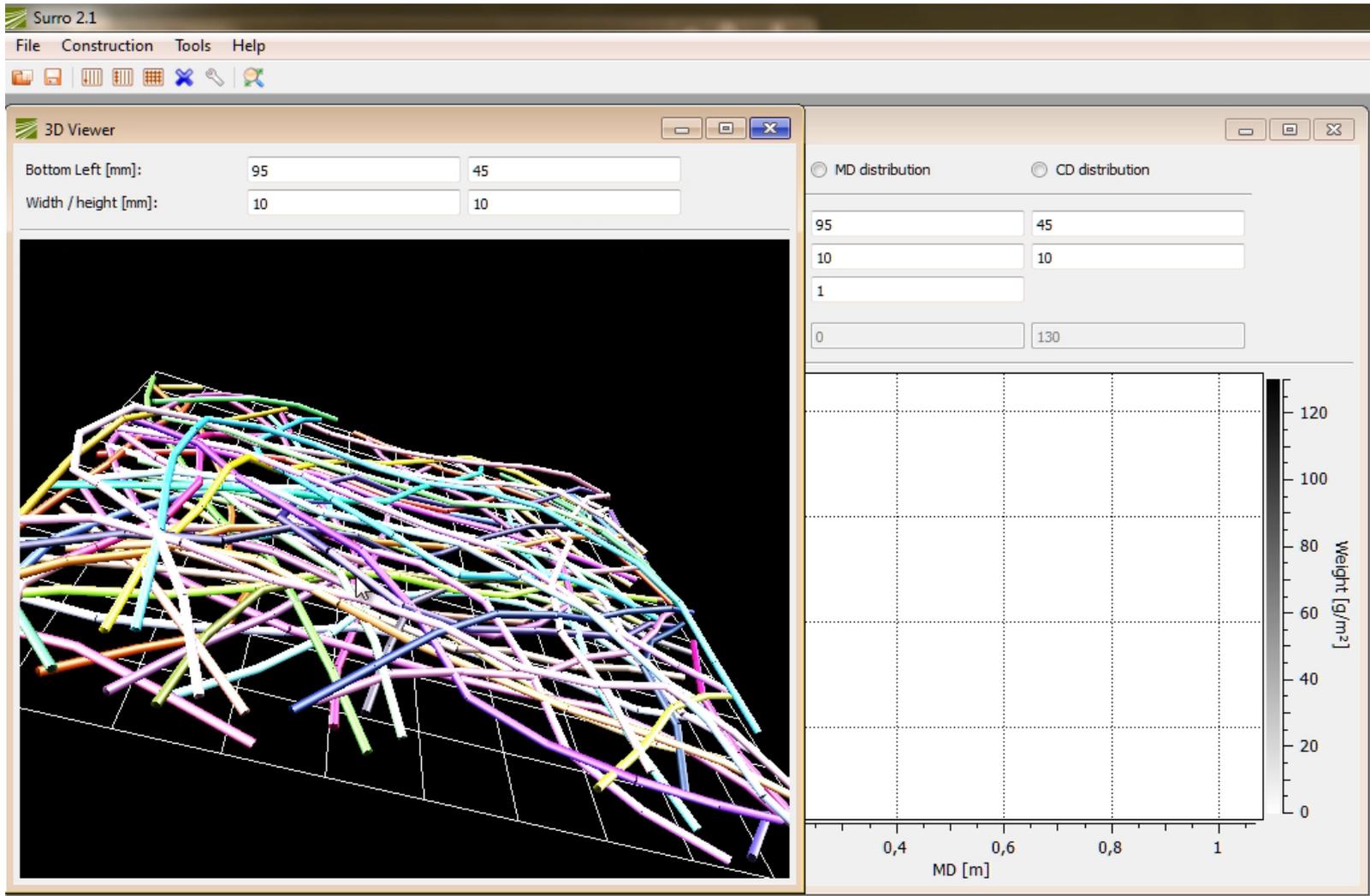
# SURRO: MD-Verteilung



# SURRO: CD-Verteilung



# SURRO: 3D-Struktur



# Die FIDYST-Suite: FIDYST – IDENT – SURRO

- Virtuelle Vliesbildung unter Berücksichtigung der wichtigen physikalischen Einflussgrößen.
- Kopplung mit der turbulenten Luftströmung.
- Möglichkeit zur Optimierung bestehender Spinnprozesse oder zur kompletten Neuauslegung.
- Bewertung und Vergleich des virtuellen Vliesstoffes vor der konstruktiven Umsetzung.
- Unterstützung beim Ermitteln der optimalen Prozessparameter.

