

---

# Modellierung, Simulation und Optimierung von Spinnprozessen

---

Dr. Walter Arne  
Dr. Dietmar Hietel

Fraunhofer-Institut für Techno-  
und Wirtschaftsmathematik,  
Kaiserslautern



31. Hofer Vliesstofftage, 9./10. November 2016

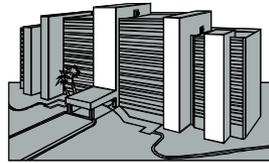
# Gliederung

- Überblick Fraunhofer-Gesellschaft und ITWM
- Modellierung Strömung und Filamente
- Beispiele aus der Industrie

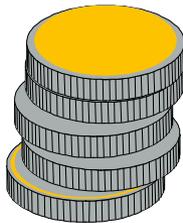
# Fraunhofer-Gesellschaft Profil 2016



24 000  
Mitarbeiter

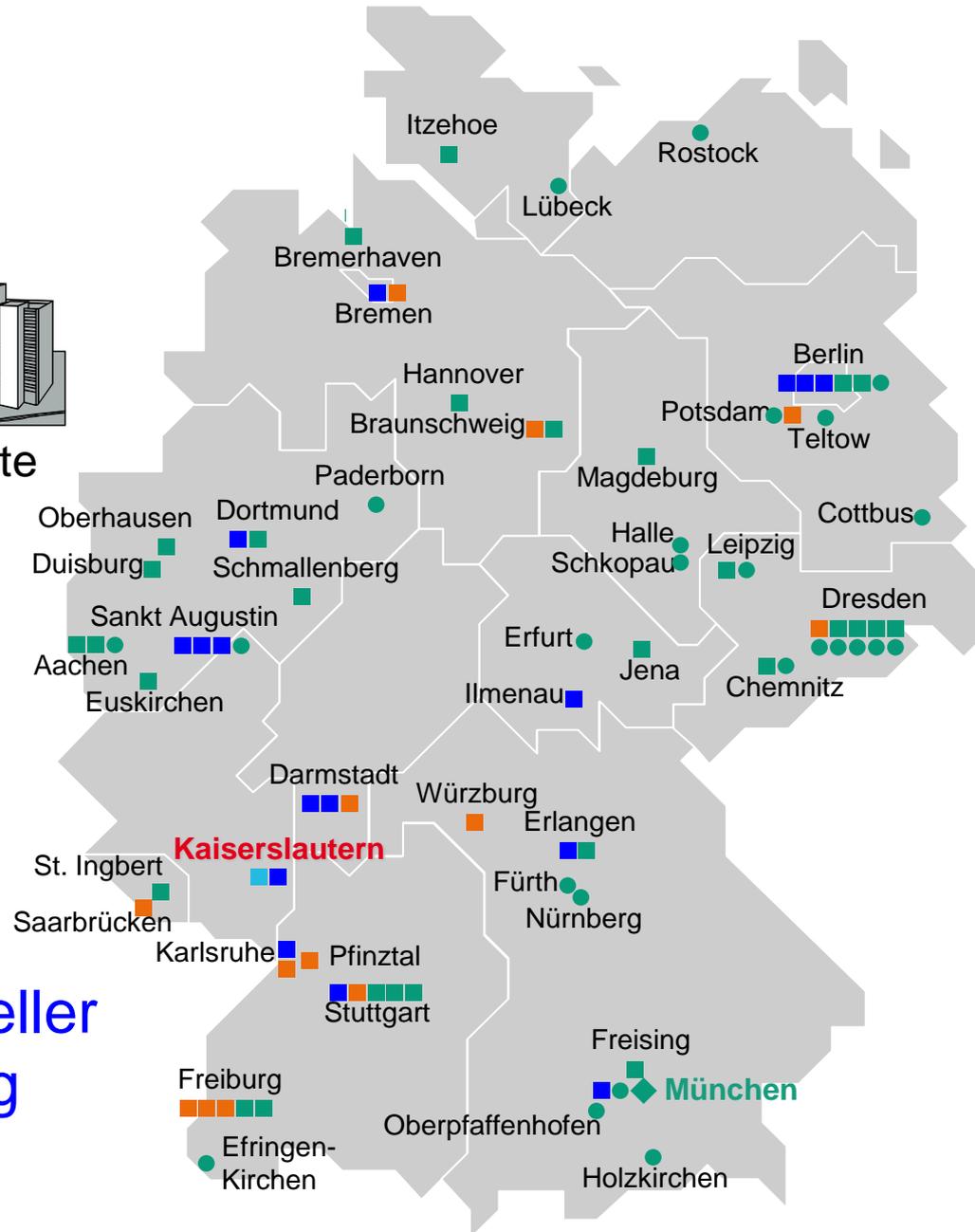


67 Institute



2.1 Milliarden €  
Budget

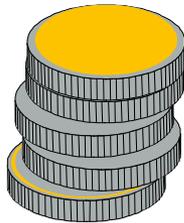
**Fraunhofer Mission:**  
Brückenschlag zwischen  
akademischer und industrieller  
Forschung und Entwicklung



# Fraunhofer-Institut für Techno- und Wirtschaftsmathematik ITWM Profil 2016



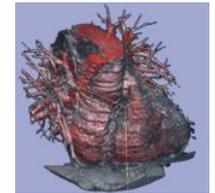
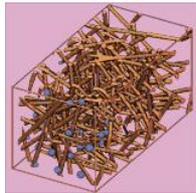
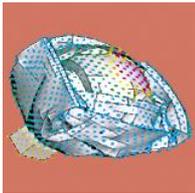
270  
Mitarbeiter



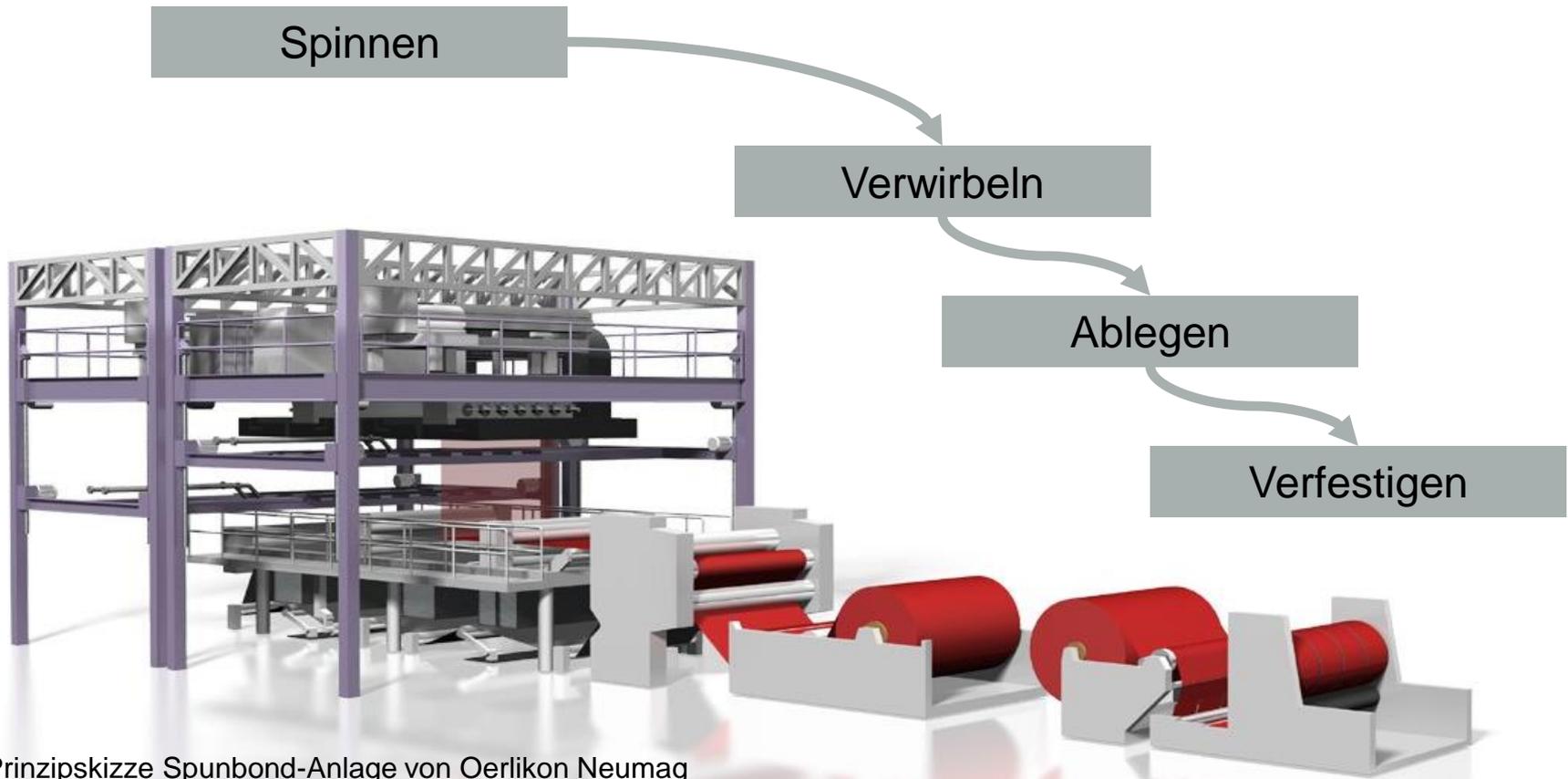
24 Millionen €  
Budget



## ITWM Mission: Mathematik ist Technologie



# Produktion von Vliesstoffen



Prinzipskizze Spunbond-Anlage von Oerlikon Neumag

# Umgebende Gasströmung: Navier-Stokes-Gleichungen

- Bilanzgleichungen für Masse, Impuls und Energie mit Faden Quellen

$$\partial_t \rho_\star + \nabla \cdot (\mathbf{v}_\star \rho_\star) = 0$$

$$\partial_t (\rho_\star \mathbf{v}_\star) + \nabla \cdot (\mathbf{v}_\star \otimes \rho_\star \mathbf{v}_\star) = \nabla \cdot \mathbf{S}_\star^T + \rho_\star g \mathbf{e}_g + \mathbf{f}_{jets}$$

$$\partial_t (\rho_\star e_\star) + \nabla \cdot (\mathbf{v}_\star \rho_\star e_\star) = \mathbf{S}_\star : \nabla \mathbf{v}_\star - \nabla \cdot \mathbf{q}_\star + q_{jets}$$

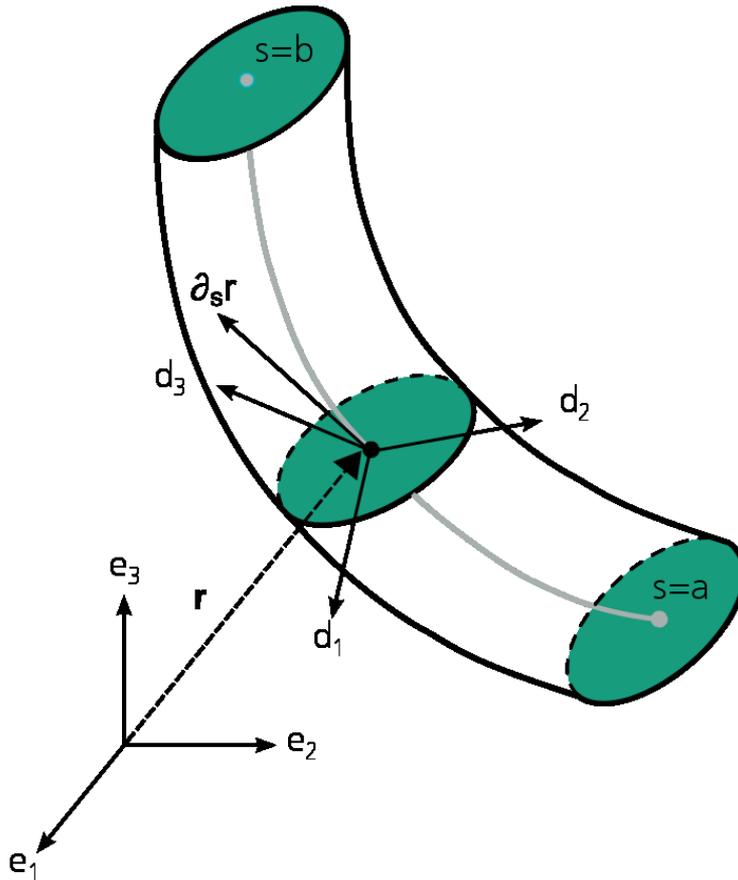
- Spannungstensor für Newtonisches Fluid mit Fourier Gesetz

$$\mathbf{S}_\star = -p_\star \mathbf{I} + \mu_\star (\nabla \mathbf{v}_\star + \nabla \mathbf{v}_\star^T) + \lambda_\star \nabla \cdot \mathbf{v}_\star \mathbf{I} \quad \mathbf{q}_\star = -k_\star \nabla T_\star,$$

- Ideales Gasgesetz: Thermale und kalorische Zustandsgleichungen

$$p_\star = \rho_\star R_\star T_\star, \quad e_\star = \int_0^{T_\star} c_{p_\star}(T) dT - \frac{p_\star}{\rho_\star}$$

# Cosserat Rod



- Fadenkurve

$$r:(a,b) \rightarrow E^3$$

- Direktoren

$$d_i:(a,b) \rightarrow E^3$$

$$i=1,2,3$$

# Fadendynamik – Cosserat Rod



- Bilanzgleichungen für Masse, Impuls, Drehimpuls, Energie und Quellen der Luft

$$\partial_t A + \partial_s(uA) = 0$$

$$\rho(\partial_t(A\mathbf{v}) + \partial_s(uA\mathbf{v})) = \partial_s \mathbf{n} + \rho A g \mathbf{e}_g + \mathbf{f}_{air}$$

$$\rho(\partial_t(\mathbf{J} \cdot \boldsymbol{\omega}) + \partial_s(u\mathbf{J} \cdot \boldsymbol{\omega})) = \partial_s \mathbf{m} + \mathbf{d}_3 \times \mathbf{n}$$

$$\rho c_p(\partial_t(AT) + \partial_s(uAT)) = q_{rad} + q_{air}$$

- Kinematische Gleichungen

$$\partial_s \mathbf{r} = \mathbf{d}_3$$

$$\partial_s \mathbf{d}_k = \boldsymbol{\kappa} \times \mathbf{d}_k$$

$$\partial_t \mathbf{r} = \mathbf{v} - u \mathbf{d}_3$$

$$\partial_t \mathbf{d}_k = (\boldsymbol{\omega} - u \boldsymbol{\kappa}) \times \mathbf{d}_k$$

- Geometrisches Modell für kreisförmige Querschnitte

$$\mathbf{J} = I(\mathbf{d}_1 \otimes \mathbf{d}_1 + \mathbf{d}_2 \otimes \mathbf{d}_2 + 2\mathbf{d}_3 \otimes \mathbf{d}_3) \quad I = \frac{\pi}{64} d^4, \quad A = \frac{\pi}{4} d^2$$

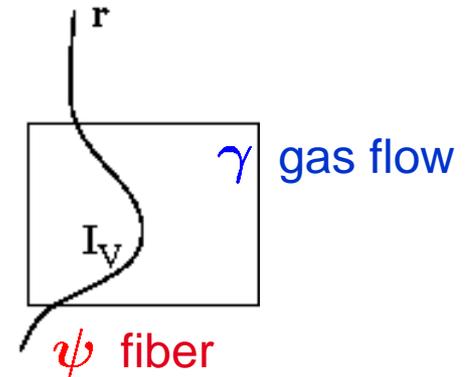
- Viskose Materialgesetze

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{d}_3 = 3\mu(T)A\partial_s u, \quad \mathbf{m} = 3\mu(T)I(\mathbf{d}_1 \otimes \mathbf{d}_1 + \mathbf{d}_2 \otimes \mathbf{d}_2 + \frac{2}{3}\mathbf{d}_3 \otimes \mathbf{d}_3) \cdot \partial_s \boldsymbol{\omega}$$

# Faden-Strömung-Wechselwirkung – Impuls und Energie

- Berechnung von Faden-Strömung Wechselwirkung basiert auf dem Gaskraftmodell und dem Prinzip “Actio = Reactio”

$$\int_V \mathbf{f}_{jets}(\mathbf{x}, t) d\mathbf{x} = - \int_{I_V(t)} \mathbf{f}_{gas}(s, t) ds$$
$$\int_V q_{jets}(\mathbf{x}, t) d\mathbf{x} = - \int_{I_V(t)} q_{gas}(s, t) ds$$



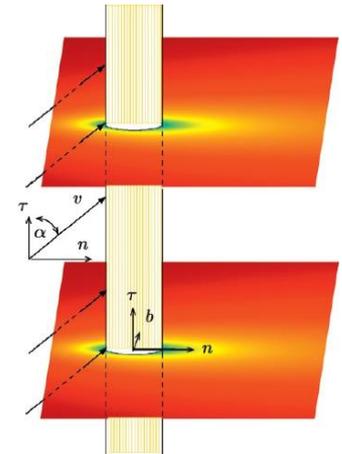
- Kraft und Wärme werden lokal an jedem Faden ausgewertet
- Die Quellen des Fadenvorhangs in der Gasströmung werden in jeder Zelle ausgewertet

# Faden-Strömung-Wechselwirkung

$$\mathbf{f}_{air}(\psi, \gamma) = \frac{\mu_{\star}^2}{d\rho_{\star}} \mathbf{F}\left(\mathbf{d}_3, \frac{d\rho_{\star}}{\mu_{\star}}(\mathbf{v}_{\star} - \mathbf{v})\right)$$

$$\mathbf{q}_{air}(\psi, \gamma) = 2k_{\star}(T_{\star} - T)$$

$$\text{Nu}\left(\frac{\mathbf{v}_{\star} - \mathbf{v}}{\|\mathbf{v}_{\star} - \mathbf{v}\|} \cdot \mathbf{d}_3, \frac{\pi d\rho_{\star}}{2 \mu_{\star}} \|\mathbf{v}_{\star} - \mathbf{v}\|, \frac{\mu_{\star} c_{p\star}}{k_{\star}}\right)$$



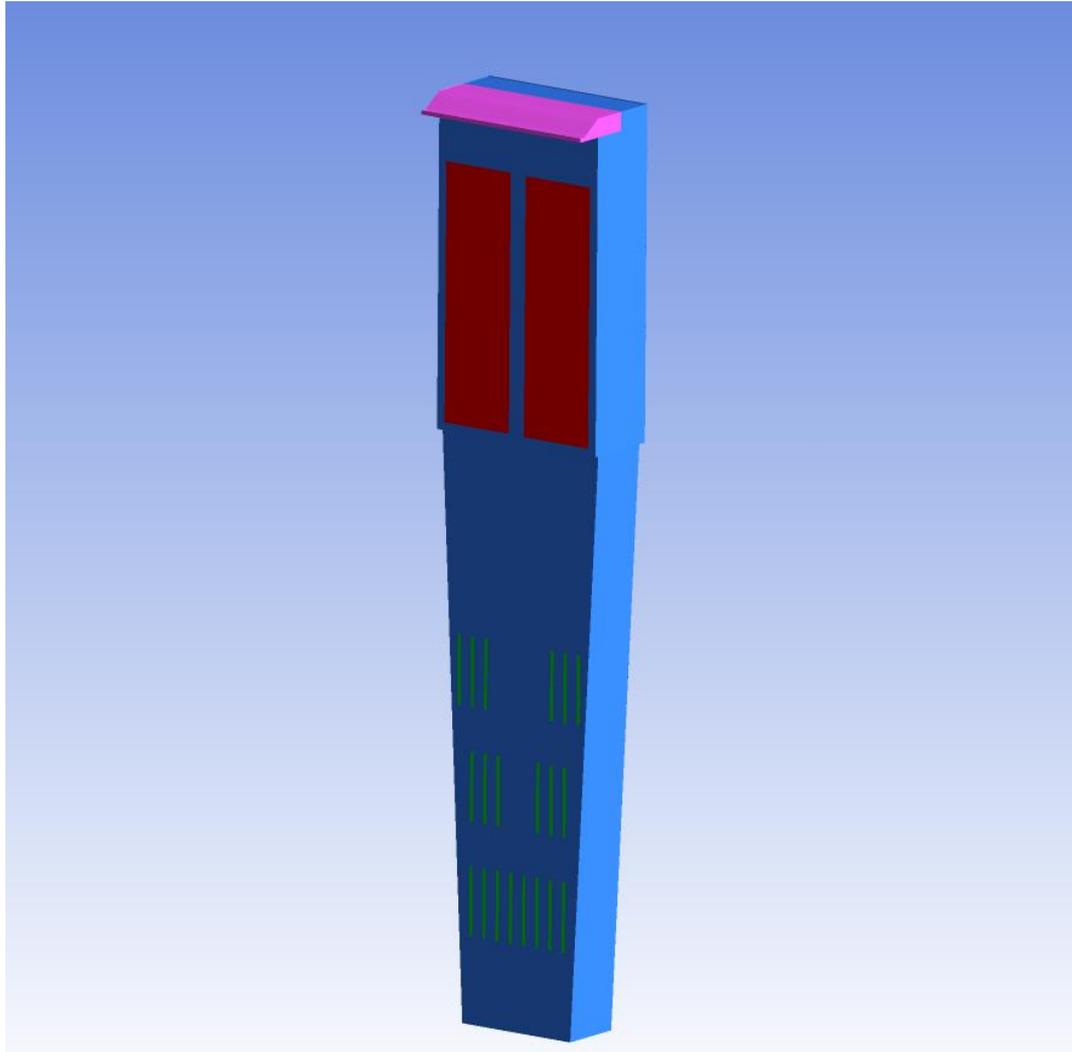
Der Austausch hängt hauptsächlich ab von

- Relativgeschwindigkeit zwischen Fäden und Strömung
- Temperaturunterschied von Strömung zu Fäden

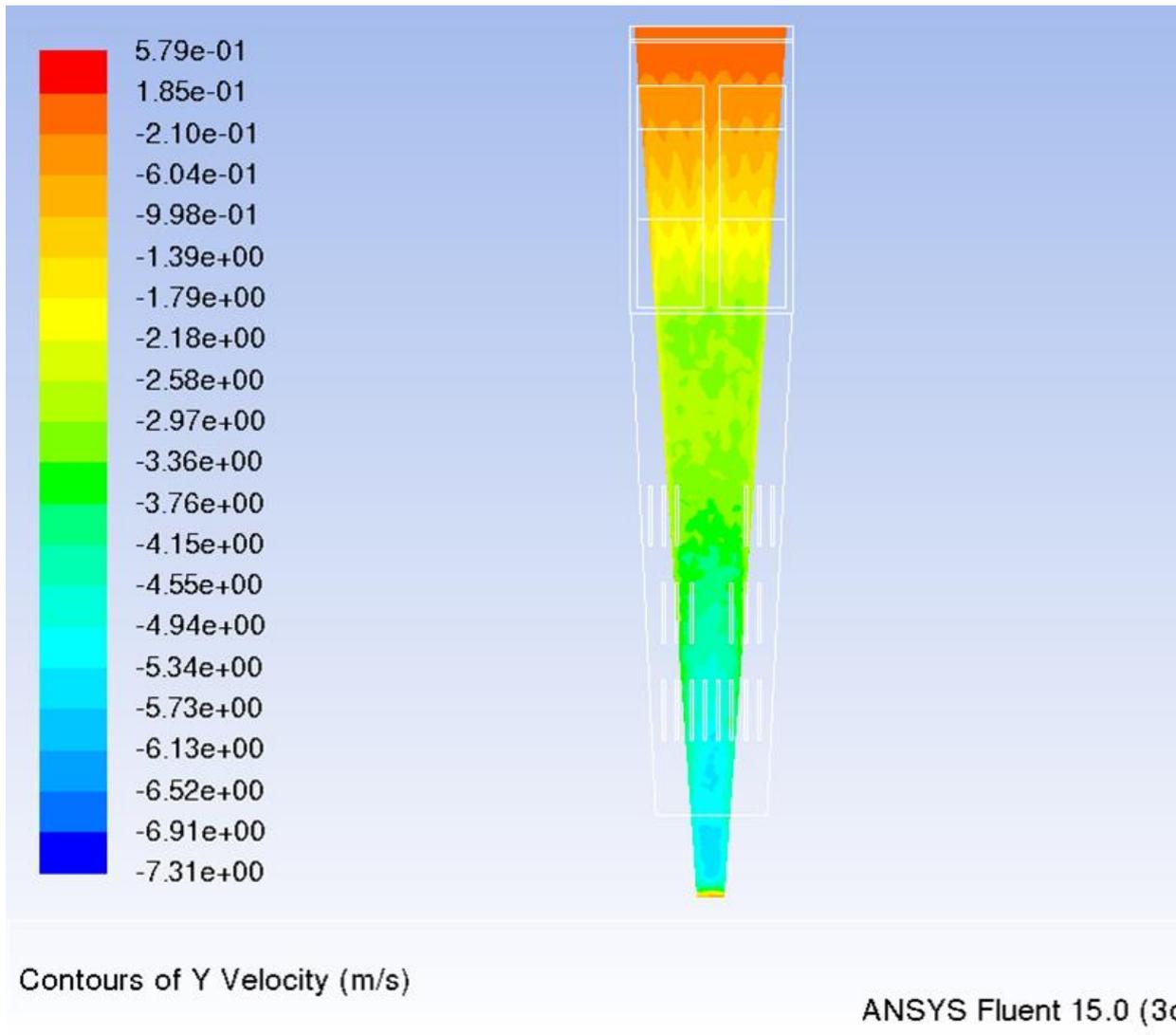
# Implementierung des gekoppelten Algorithmus

- Berechnung der Gasströmung mit ANSYS FLUENT (Finite Volumen Methode)
- MATLAB Randwertlöser entwickelt am ITWM (adaptive Kollokations-Fortsetzungsmethode)
- UDFs zur Einbeziehung der Quellen für Masse, Impuls und Wärme
- Parallelisierung der Fadenberechnung
- Die Konvergenz ist in der Regel nach 12 Iterationsschritten erreicht, die Simulationszeit beträgt zwischen 3 bis 7 Tage
- W. Arne, N. Marheineke, J. Schnebele, R. Wegener. Fluid-fiber-interaction in rotational spinning process of glass wool production. Journal of mathematics in industry, 1:2, 2011.

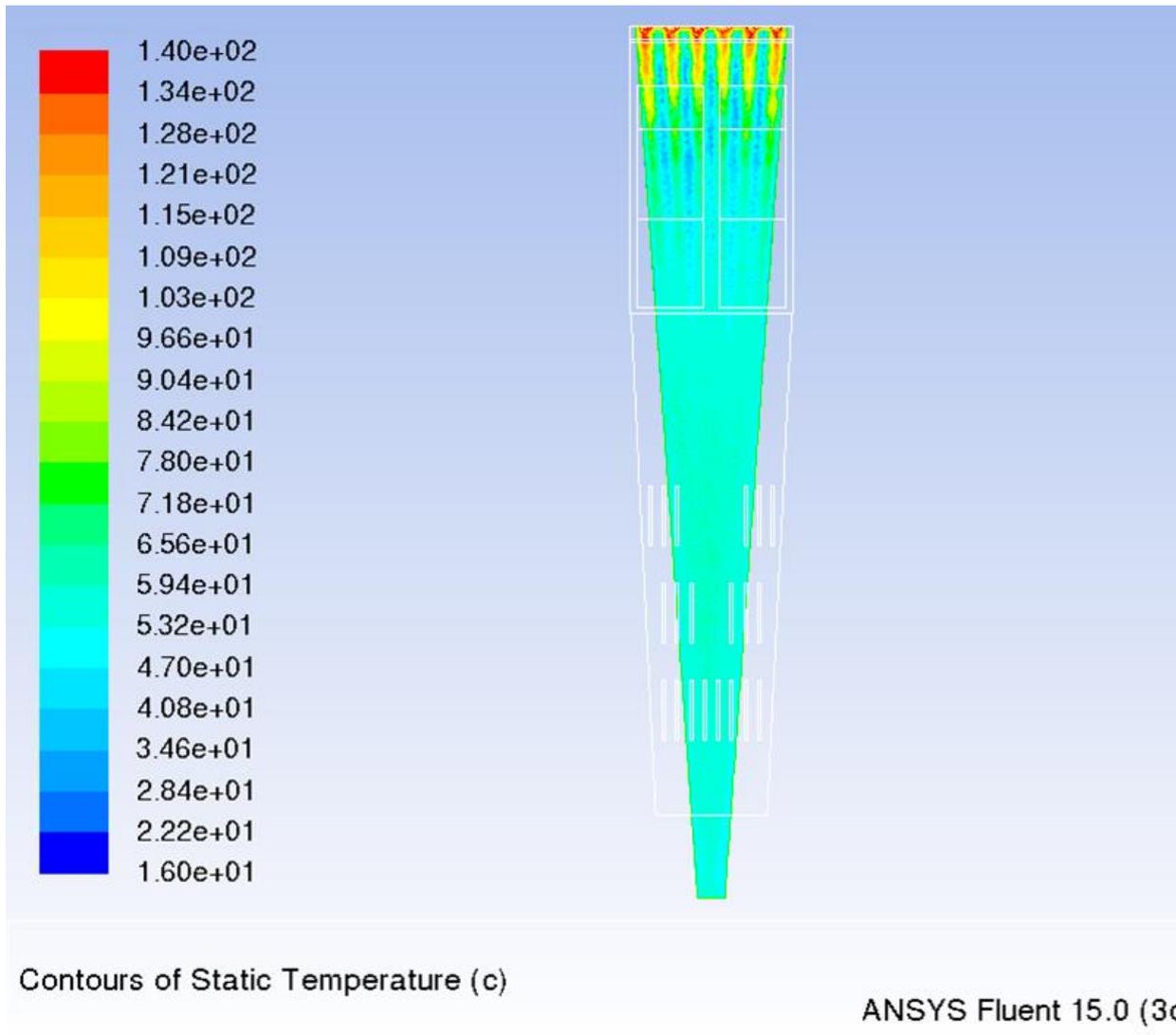
# Van de Wiele Spunbond, Geometrie der Anlage



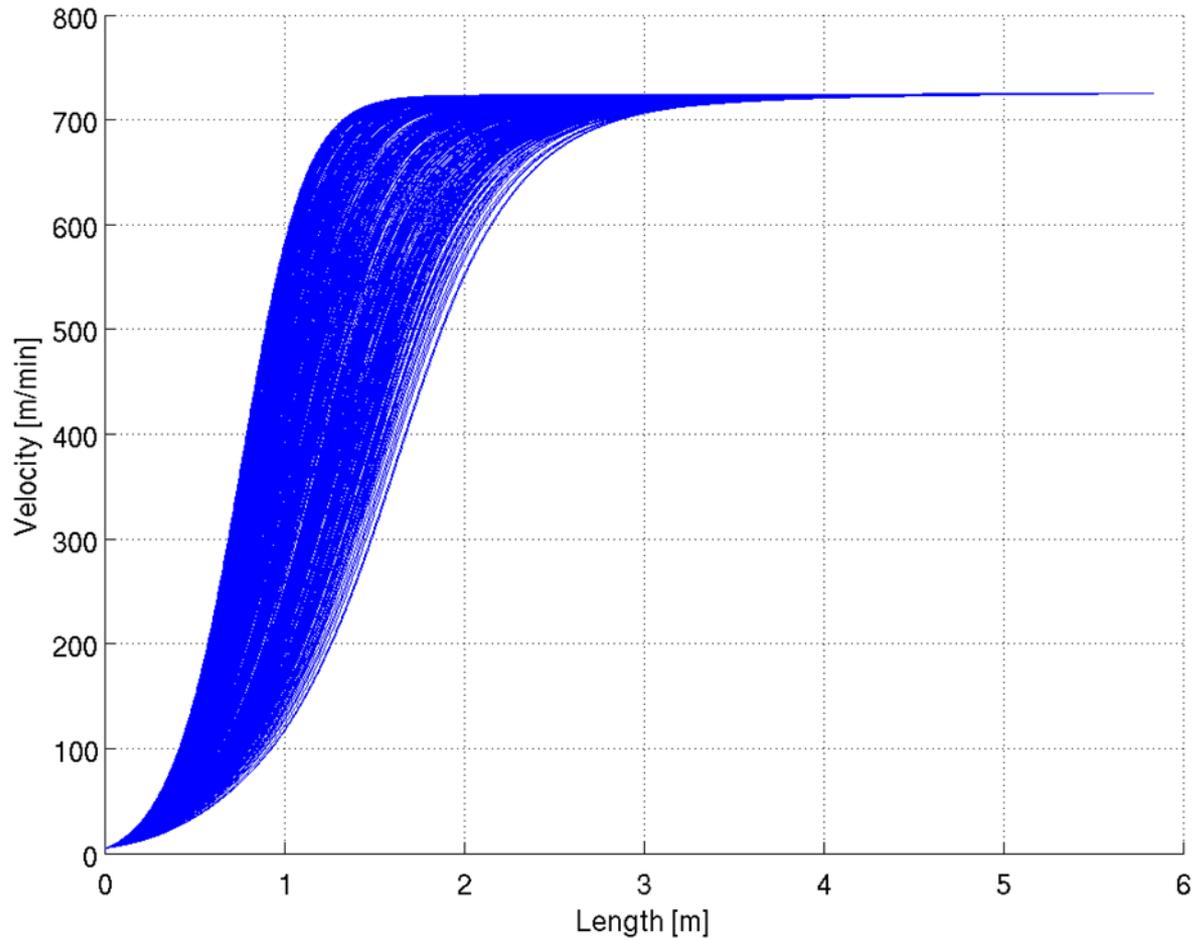
# Van de Wiele Spunbond, Luftgeschwindigkeit m/s



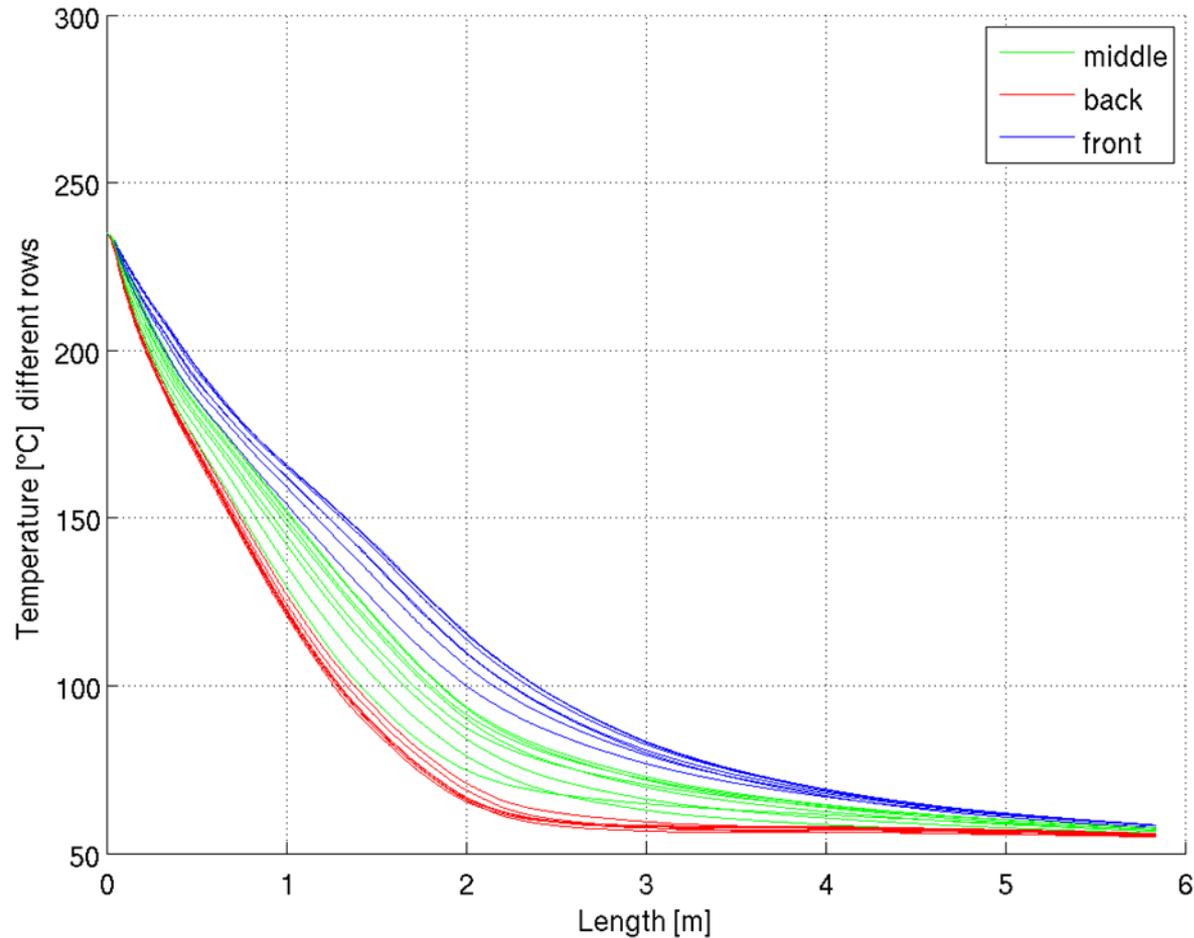
# Van de Wiele Spunbond, Lufttemperatur °C



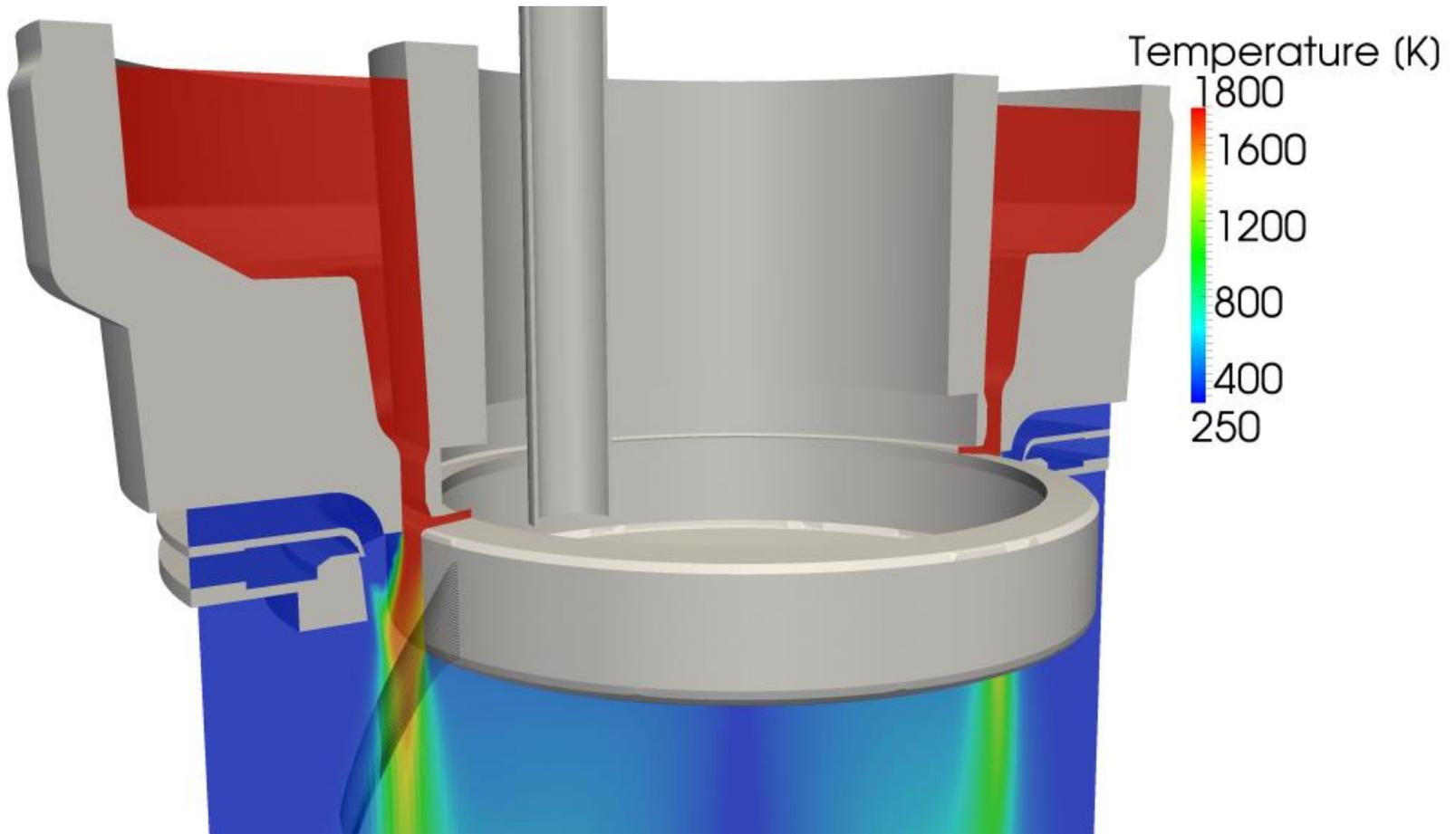
# Van de Wiele Spunbond, Geschwindigkeit der Fäden m/min



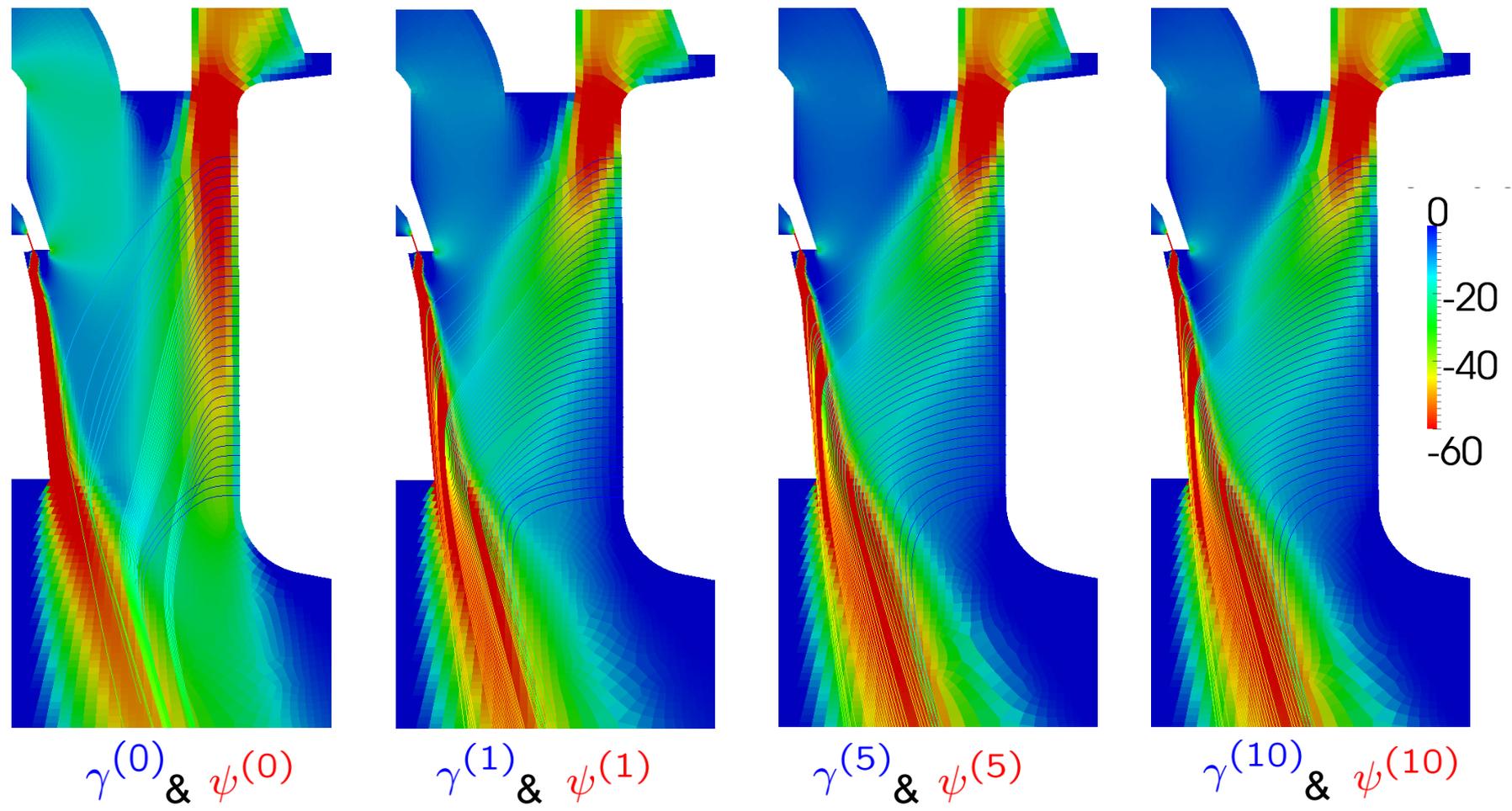
# Van de Wiele Spunbond, Temperatur der Fäden °C



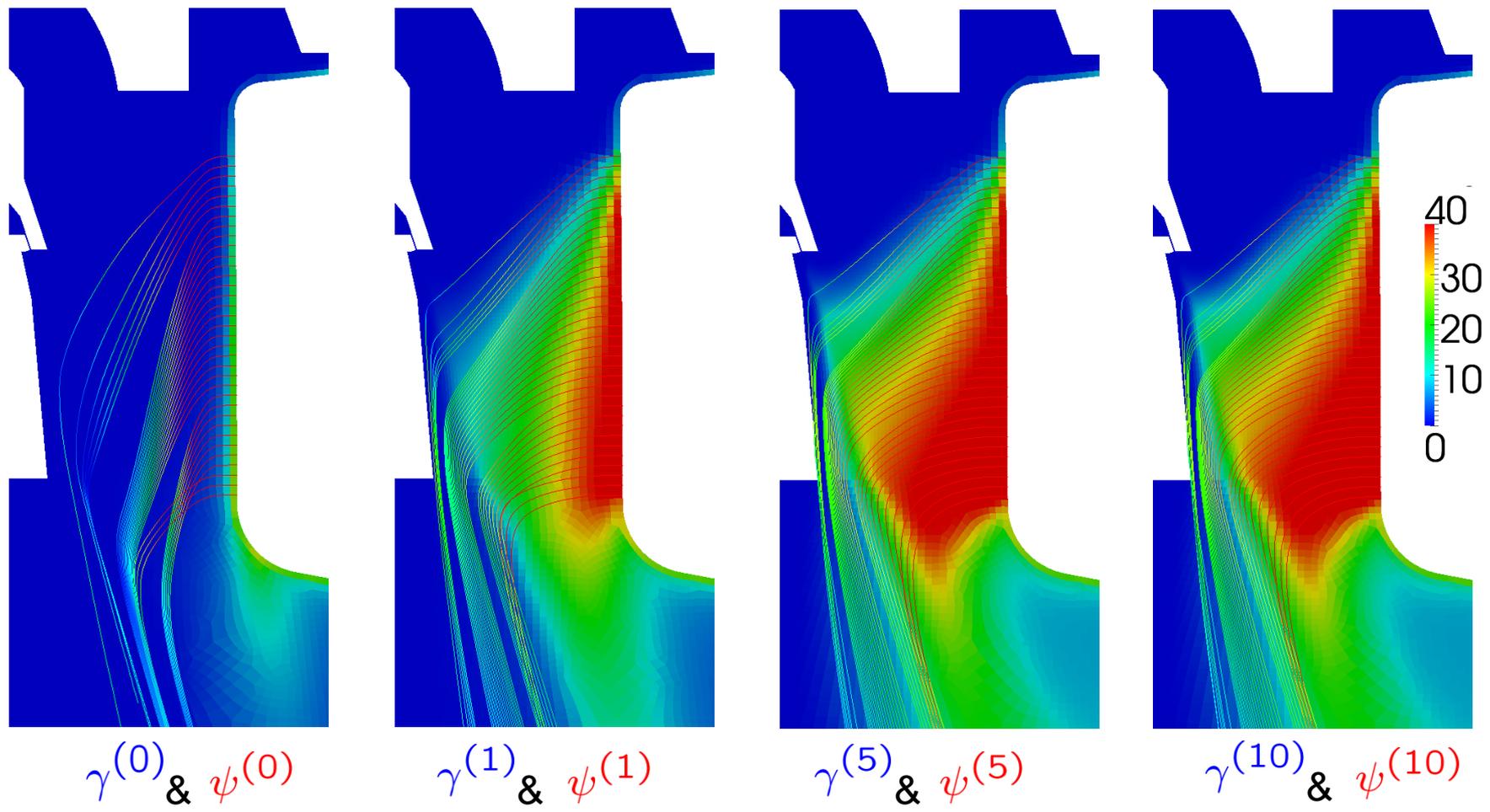
# Woltz GmbH Glaswollproduktion, Rotationssscheibe



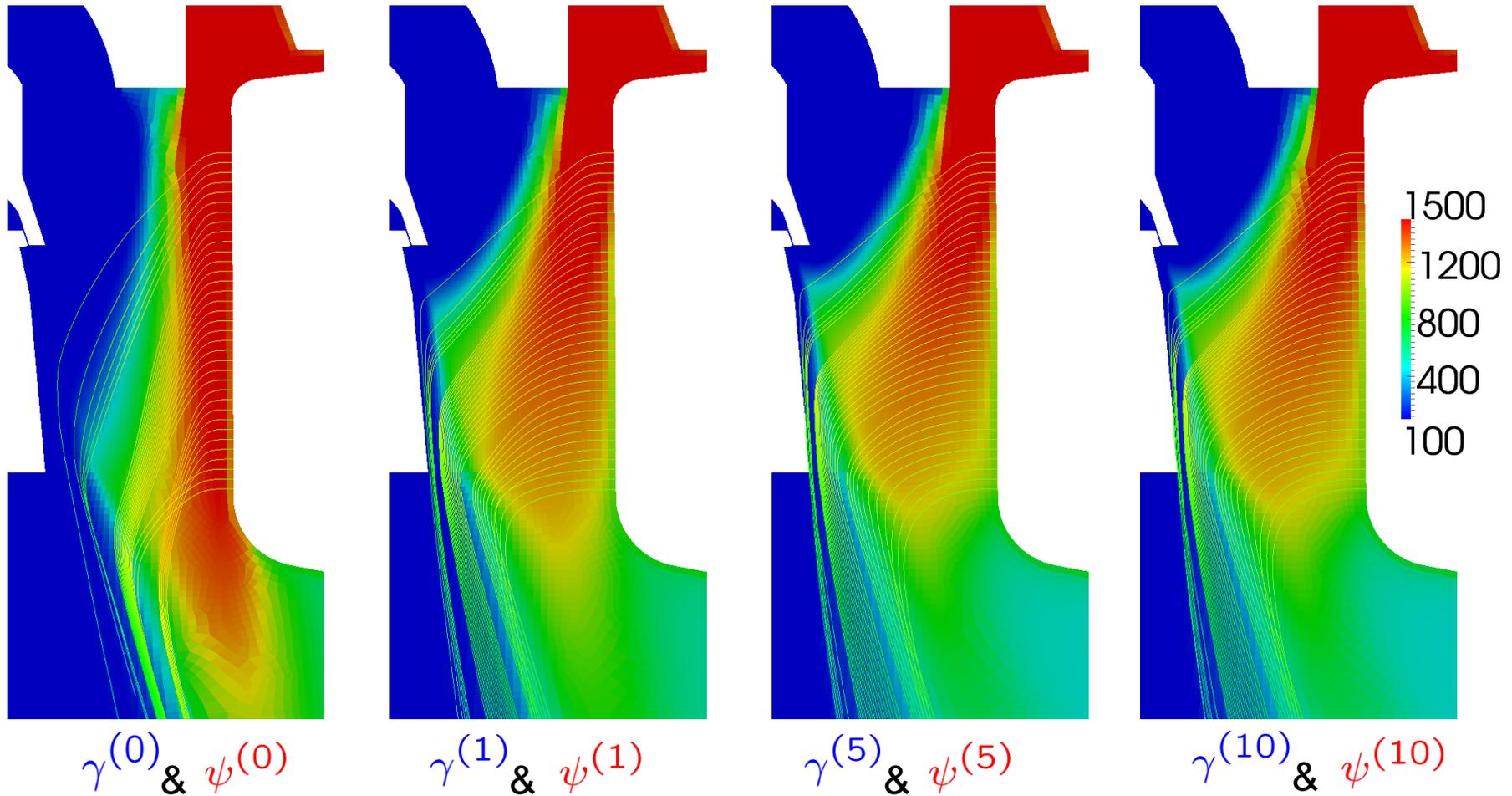
# Woltz GmbH Glaswollproduktion, Axiale Geschwindigkeit m/s



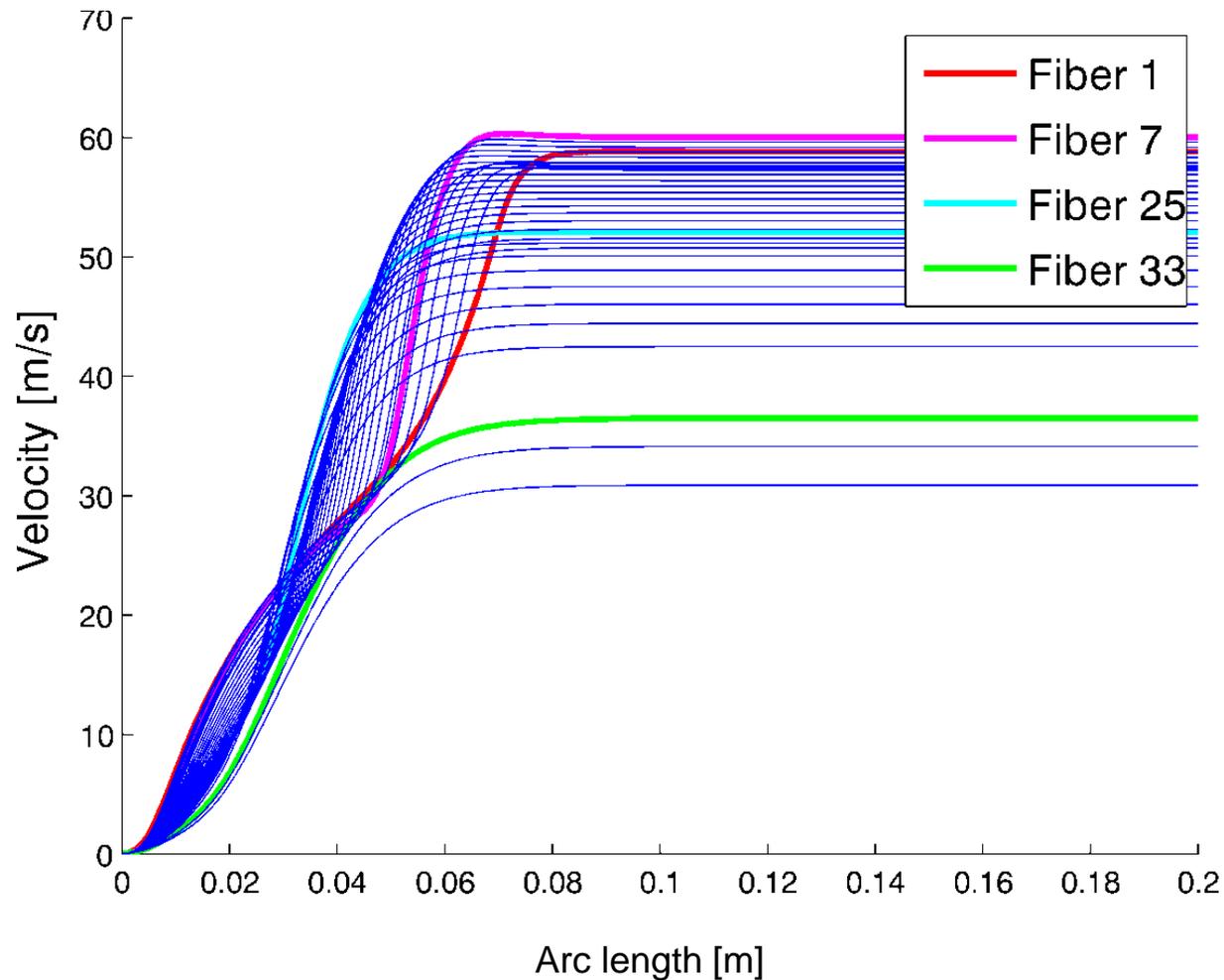
# Woltz GmbH Glaswollproduktion, Umlaufgeschwindigkeit m/s



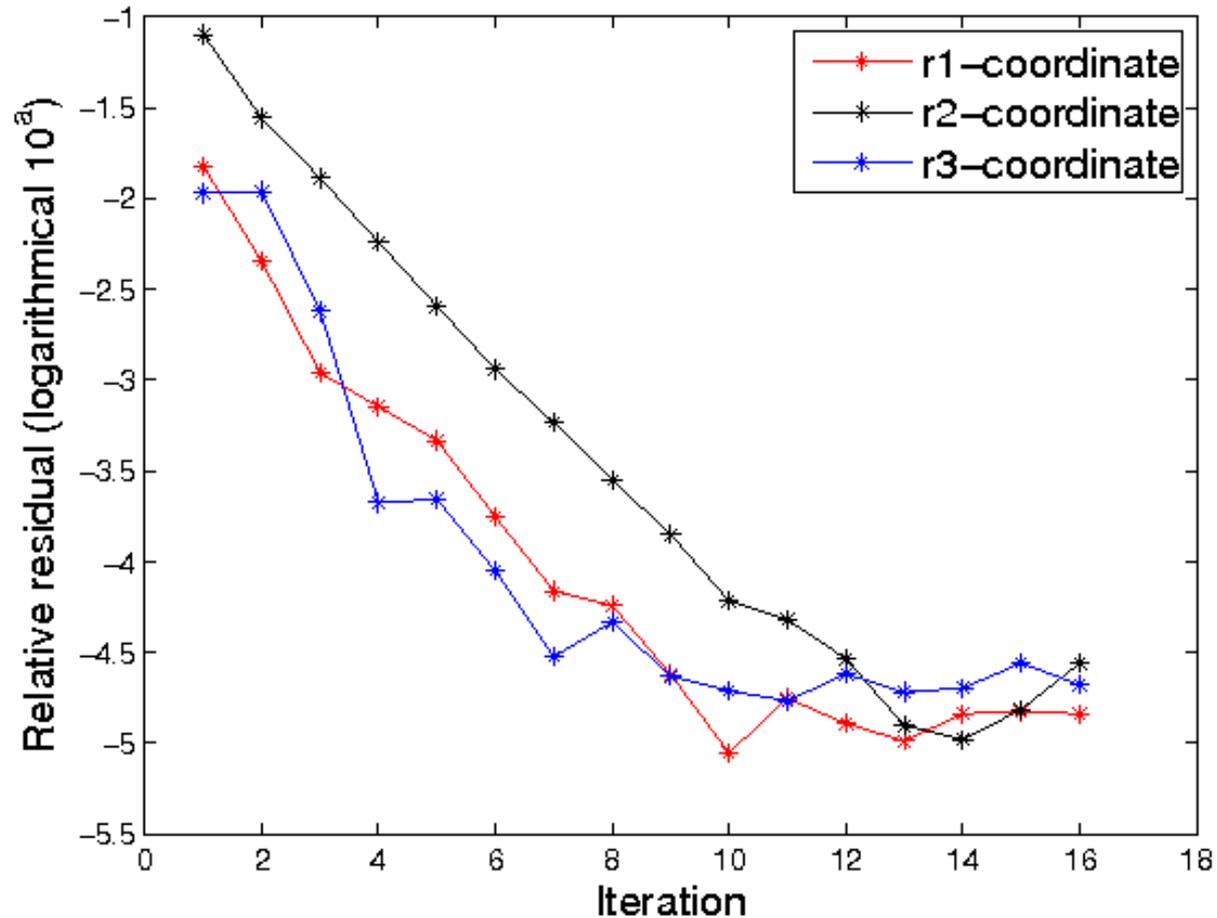
# Woltz GmbH Glaswollproduktion, Temperatur °C



# Woltz GmbH Glaswollproduktion, Geschwindigkeit der Fäden m/s



# Woltz GmbH Glaswollproduktion, Konvergenz



# Zusammenfassung und Perspektiven

- Modellierung Strömung und Filamentdynamik
  - Modellierung Faden-Fluid-Wechselwirkung
  - Simulationen liefern Einblicke in die Prozesse und besseres Verständnis
  - Simulationsergebnisse Van de Wiele, Woltz GmbH liefern gute Übereinstimmungen zur Realität
  - Optimierung der Spinnprozesse zur Steigerung der Qualität, Homogenität und Senkung der Kosten
- 
- Anwendung für andere Art von Spinnprozessen wie Trockenspinnen, Nassspinnen und andere
  - Optimierung der Prozesse bezüglich Qualität und Homogenität
  - Neuauslegung der Prozesse