
Meltblown liefert feine Fasern, aber wie – physikalische Modellierung und Simulation der turbulenten Verstreckung ermöglicht detaillierten Einblick

Dr. Dietmar Hietel, Dr. Walter Arne,
Dr. Raimund Wegener, Manuel Wieland
Fraunhofer-Institut für Techno- und
Wirtschaftsmathematik ITWM, Kaiserslautern

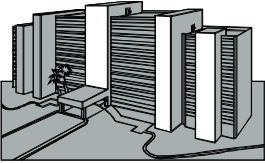
Hofer Vliesstofftage
Donnerstag, 7. November 2019



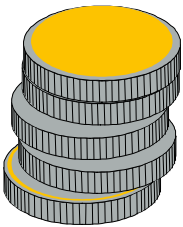
Fraunhofer-Gesellschaft Profil 2018



26 000
Mitarbeiter



72 Institute



2,6 Milliarden €
Budget

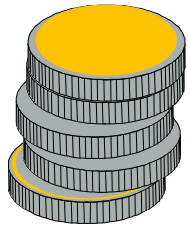
Fraunhofer Mission:
Brückenschlag von
angewandter Forschung zu
industrieller Anwendung



Fraunhofer-Institut für Techno- und Wirtschaftsmathematik ITWM Profil 2018



280 Mitarbeiter



28 Millionen € Budget



ITWM Mission:
Mathematik ist Technologie

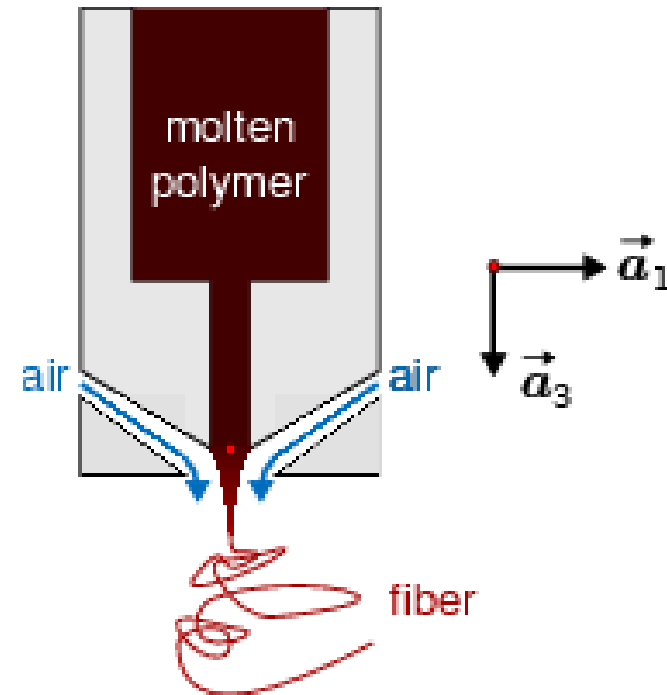
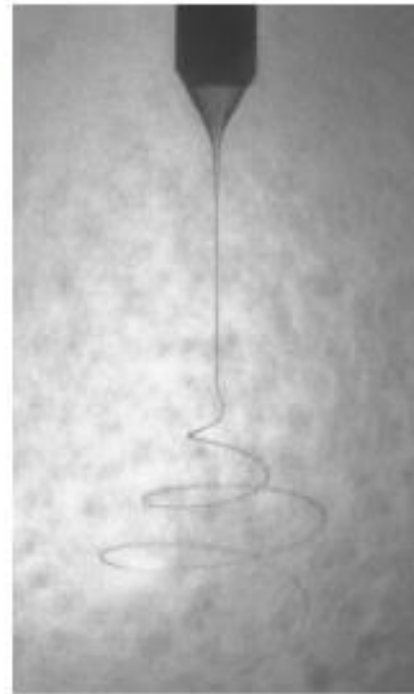
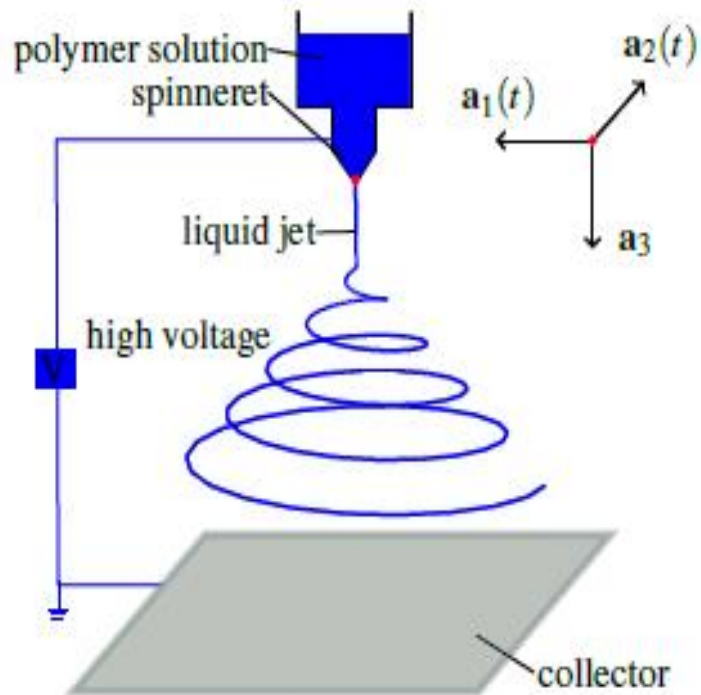


Inhalt

- Motivation
- Visko-elastisches Modell für Filamentdynamik
- Einfluss der Luftströmung einschließlich stochastischer Kräfte durch Turbulenz
- Simulationsergebnisse Luftströmung
- Kopplungsstrategie zwischen uniaxialem und turbulenten Teil der Filamentver Streckung
- Simulation der Filamentver Streckung
 - Filamentdynamik
 - Verlauf der Ver Streckung
 - Durchmesserverteilung
- Zusammenfassung und Ausblick

Feinstfaserprozesse: Elektrosponnen und Meltblown

- Effiziente Produktionsprozesse für feine Fasern
- Instabilitäten führen zu zusätzlicher Verstreckung
 - Elektrisches Feld beim Elektrosponnen
 - Luftturbulenzen beim Meltblown



Visko-elastisches Modell der Filamentdynamik beim Meltblown-Prozess

- Modell erfasst visko-elastisches Verhalten der Filamente (Asymptotic Upper-Convective Maxwell)
- Materielle Beschreibung durch Lagrange-Ansatz
- Entdimensionalisierte Form mit normalisierter Tangente $e = \|\boldsymbol{\tau}\|$ [Marheineke et al. 2016]
- p ist deutlich kleiner als σ und könnte vernachlässigt werden [Yarin et al. 2011]
- Kopplung von umgebender Luftströmung durch \mathbf{f}_{air} für Kraftwirkung und rechte Seite für Temperaturaustausch

$$\partial_t \mathbf{r} = \mathbf{v},$$

$$\partial_\zeta \mathbf{r} = \boldsymbol{\tau},$$

$$\partial_t \mathbf{v} = \partial_\zeta \left(\sigma \frac{\boldsymbol{\tau}}{e^2} \right) + \frac{1}{\text{Fr}^2} \mathbf{e}_g + \mathbf{f}_{air},$$

$$\partial_t T = -\frac{\text{St}}{\varepsilon} e \pi d \alpha (T - T_\star),$$

$$\text{De} \left(\partial_t \sigma - (2\sigma + 3p) \frac{\partial_t e}{e} \right) + \frac{\sigma}{\theta} = \frac{3}{\text{Re}} \frac{\mu}{\theta} \frac{\partial_t e}{e},$$

$$\text{De} \left(\partial_t p + p \frac{\partial_t e}{e} \right) + \frac{p}{\theta} = -\frac{1}{\text{Re}} \frac{\mu}{\theta} \frac{\partial_t e}{e}.$$

Filament-Luft-Interaktion

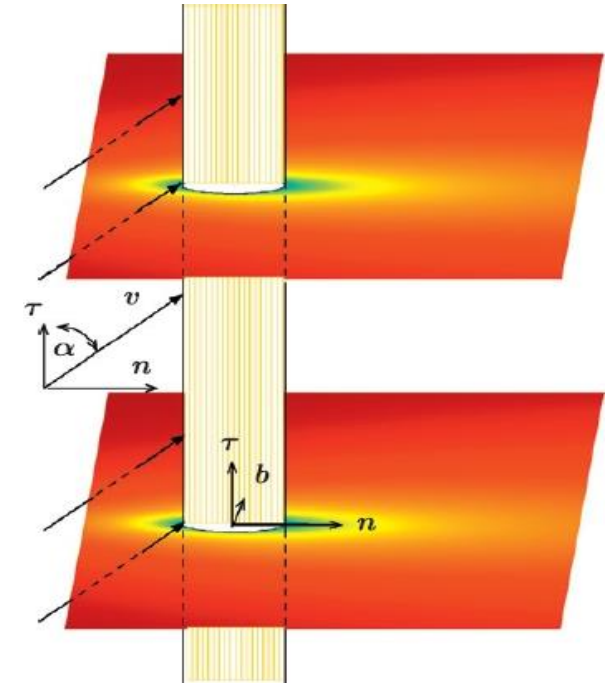
Impuls- und Wärmeaustausch hängt wesentlich ab von

- Relativgeschwindigkeit zwischen Luft (*) und Filament (Betrag und Richtung)
- Temperatursprung zwischen Luft (*) und Filament
- Formale Struktur lautet [Marheineke, Wegener 2011]

$$\mathbf{f}_{gas}(\psi, \gamma) = \frac{\eta_*^2}{d\rho_*} \mathbf{F}(\mathbf{d}_3, \frac{d\rho_*}{\eta_*} (\mathbf{v}_* - \mathbf{v}))$$

$$q_{gas}(\psi, \gamma) = \pi k_* (T_* - T)$$

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

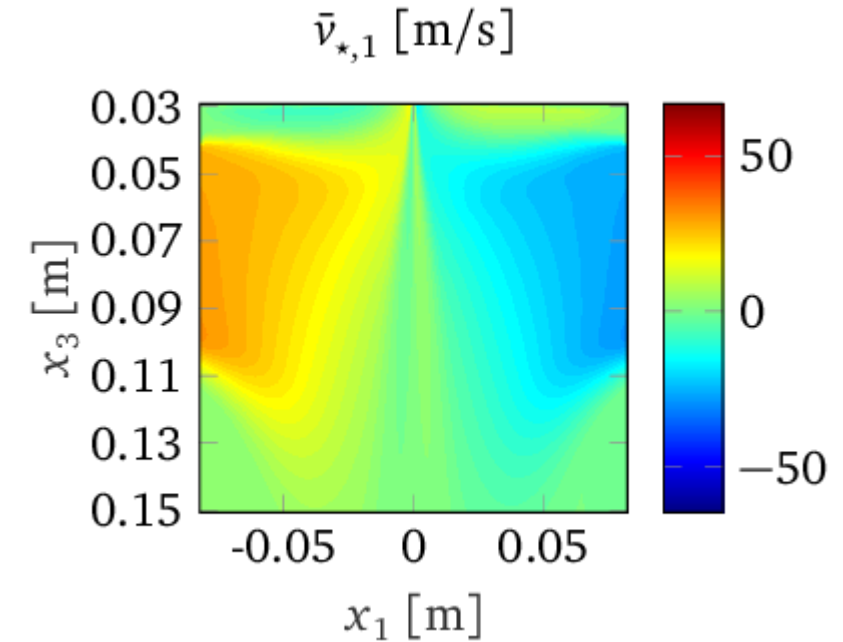
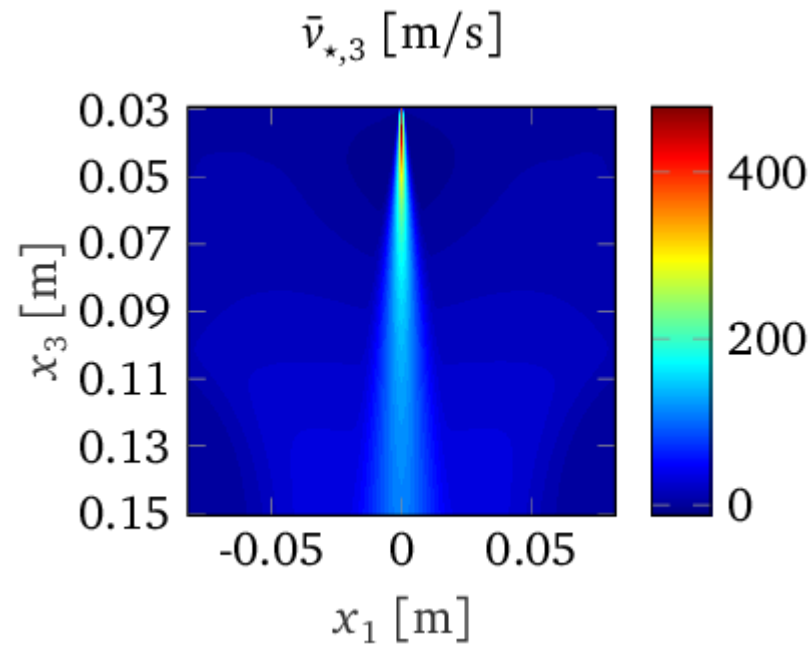
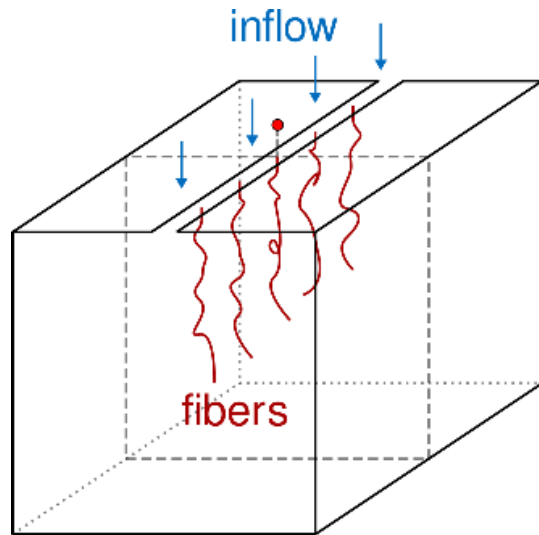


Stochastische Wirkung aufgrund der turbulenten Luftströmung

- Turbulente Luftströmung $v_{\star} = \bar{v}_{\star} + v'_{\star}$ besteht
 - aus mittlerer Hauptströmung (deterministisch) \bar{v}_{\star} und
 - dem zeitlich und räumlich fluktuierenden Teil (stochastisch) v'_{\star}
- Stochastischer Teil v'_{\star} resultiert aus Rekonstruktion der relevanten Skalen des Turbulenzmodells [Hübsch et al. 2013]
 - Dies beruht auf turbulenter kinetischer Energie sowie turbulenter Dissipationsrate in Verbindung mit der Annahme eines homogenen isotropen Gaußschen Zufallsfeldes
 - Global-zu-Lokal-Annahme erlaubt Superposition zur effizienten Erzeugung der großskaligen Turbulenzstrukturen
- Wirkung der turbulenten Luft auf Filamente führt zu stochastisch schwankender Kraft f_{air}

Simulation der Luftströmung – Strömungsgeschwindigkeiten

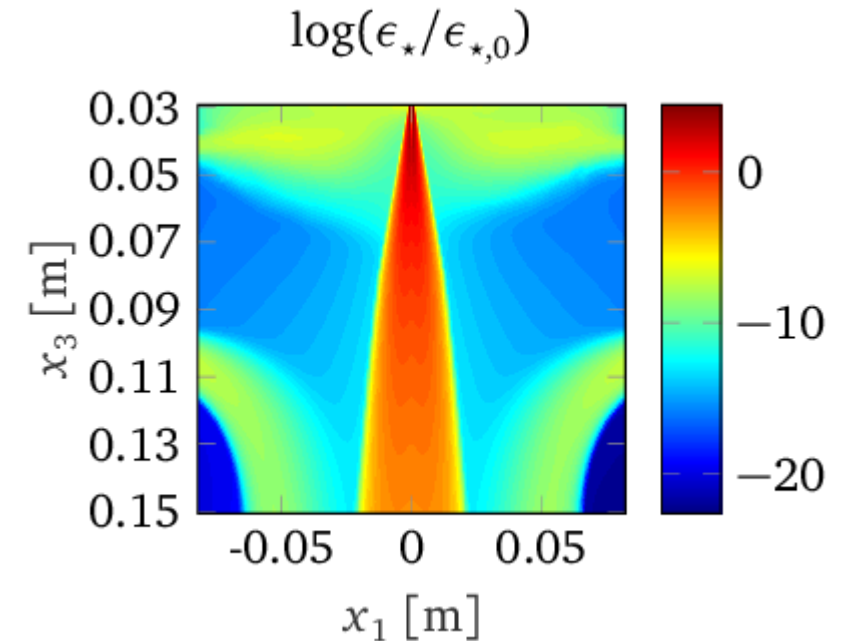
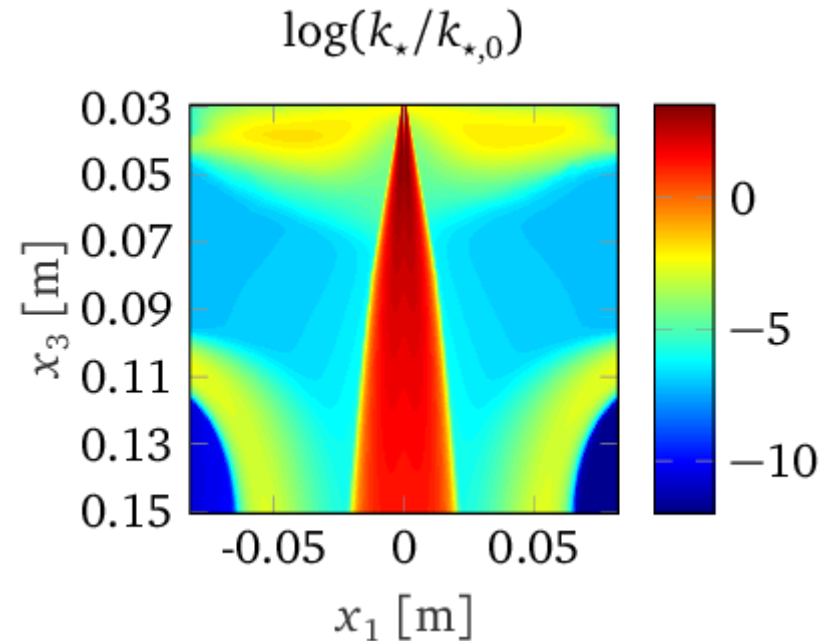
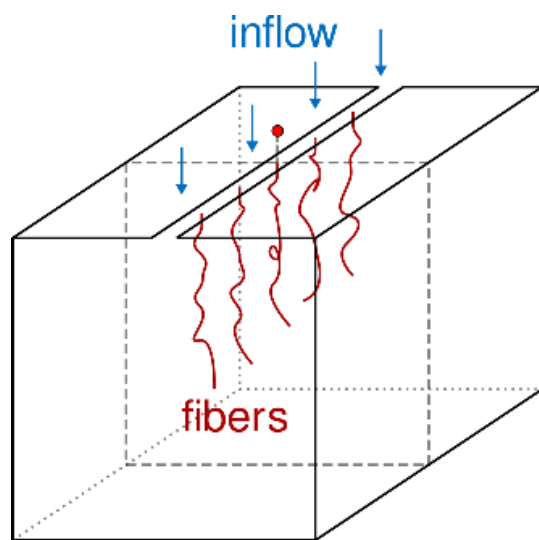
- Berechnungen der Luftströmung mit ANSYS FLUENT in vertikaler Ebene in Produktionsrichtung



- Mittlere vertikale Geschwindigkeit $\bar{v}_{*,3}$
- Mittlere MD-Geschwindigkeit $\bar{v}_{*,1}$

Simulation der Luftströmung – Turbulenzstruktur

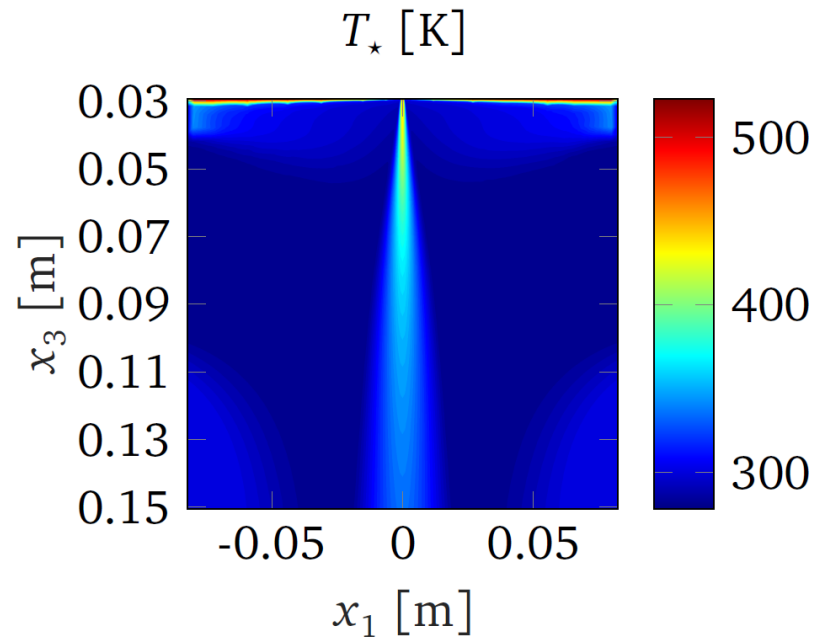
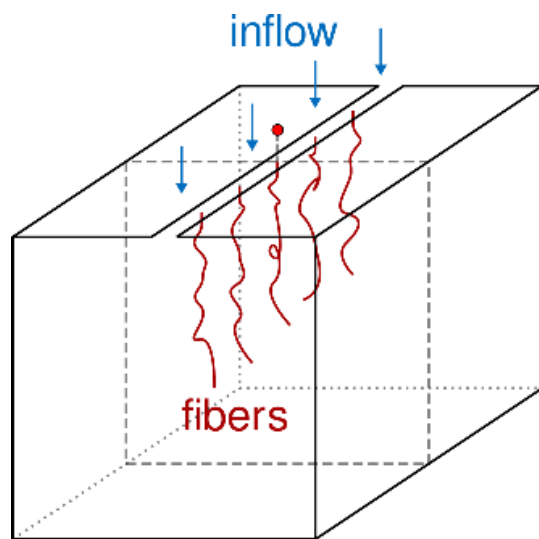
- Turbulenzstruktur anhand der relativen turbulenten kinetischen Energie und Dissipationsrate



- Turbulente kinetische Energie k_*
- Turbulent Dissipationsrate ϵ_*

Simulation der Luftströmung – Temperaturverteilung

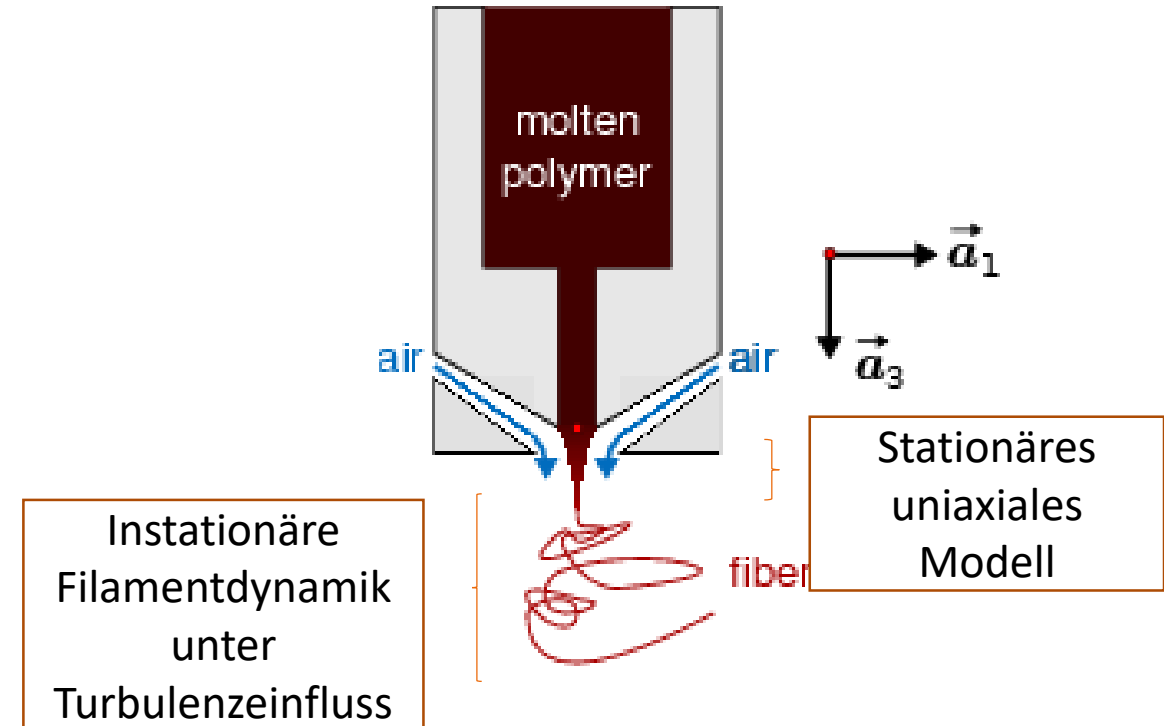
- Temperaturverteilung zeigt schnelle Abkühlung aufgrund der transsonischen Luftströmung nahe der Düse (Temperaturabfall um rund 80 K) and Austausch mit umgebender Luft



- Gezielte Temperaturerhöhung durch erwärmte Sekundärluft wurde in NaBlo-Projekt bereits untersucht (Vortrag 2012) und an Meltblown-Anlage von DITF in Denkendorf realisiert

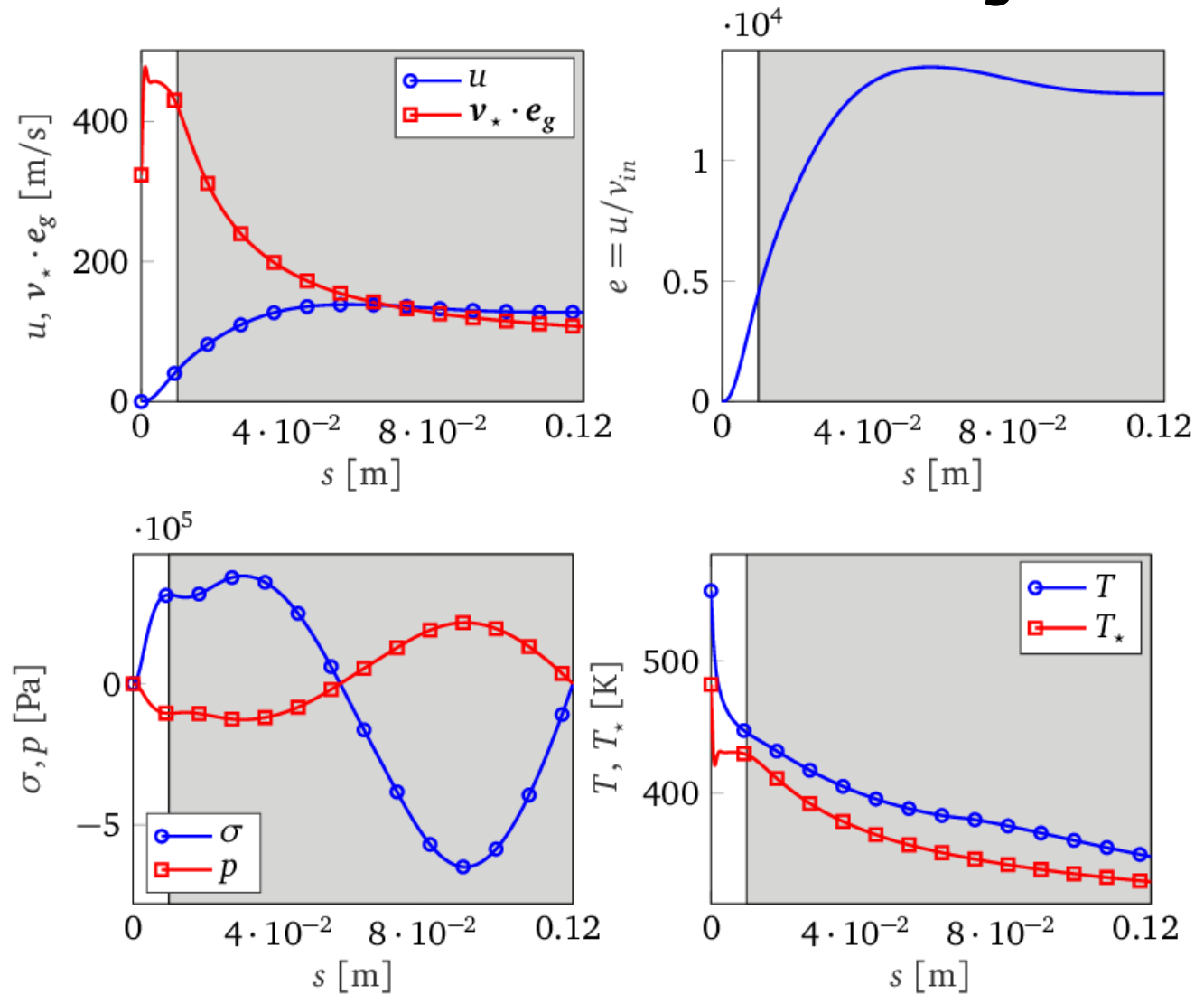
Gekoppelte Lösungsstrategie für Filamentdynamik

- **Ziel:** Auflösung der turbulenten Skalen erfordert nicht umsetzbare Zeit- und Ortsauflösung
- **Beobachtung:** Deterministische Luftkräfte und hohe Temperaturen dominieren Verhalten nahe Düsenaustritt
- **Strategie:** Kopplung von stationärem viskosen uniaxiale Fadenmodell für Region nahe Düse mit instationärem visko-elastischen Fadenmodell für den großen Rest
- **Kopplungspunkt:** Übergang von stationärem zu instationärem Modell, wenn turbulente Fluktuationen mehr als 10% der Hauptströmung ausmachen



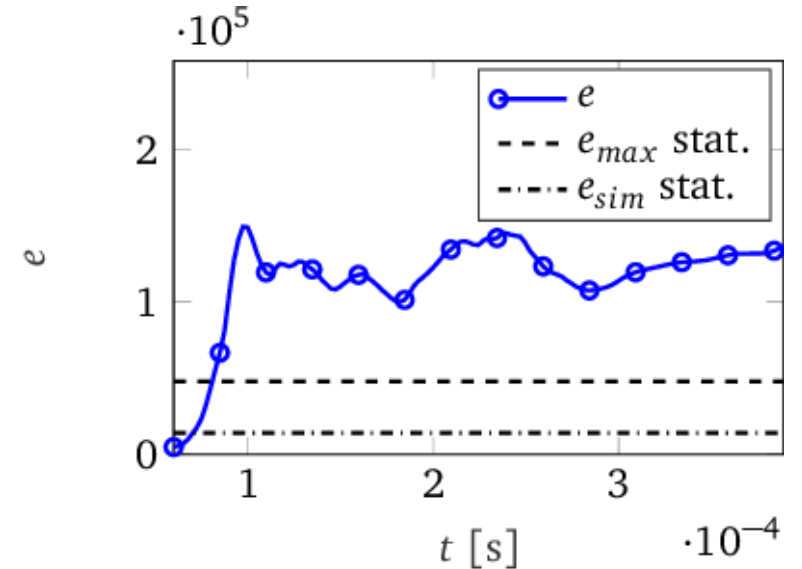
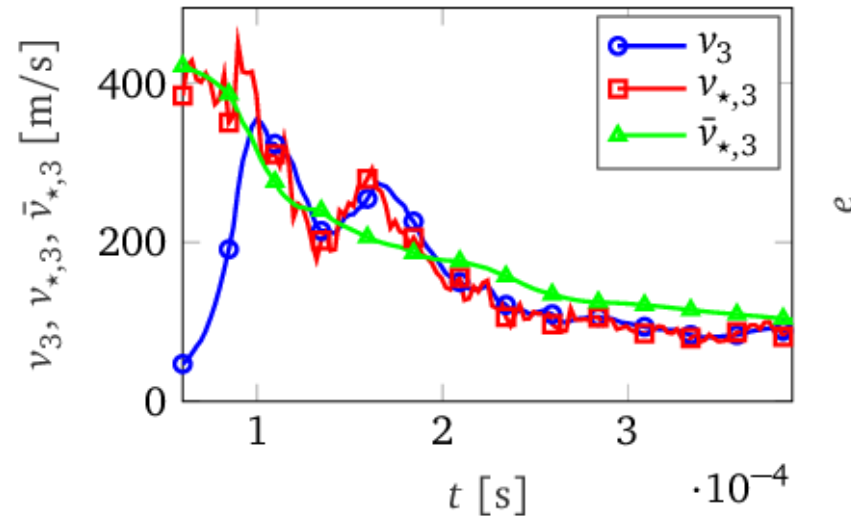
Filamentdynamik nahe der Düse – Stationäre uniaxiale Lösung ab Düse

- Filamentgeschwindigkeit u
- Dehnung e
- Spannung σ
- Druck p
- Temperatur T
- Kopplungspunkt liegt zwischen weißer und grauer Region



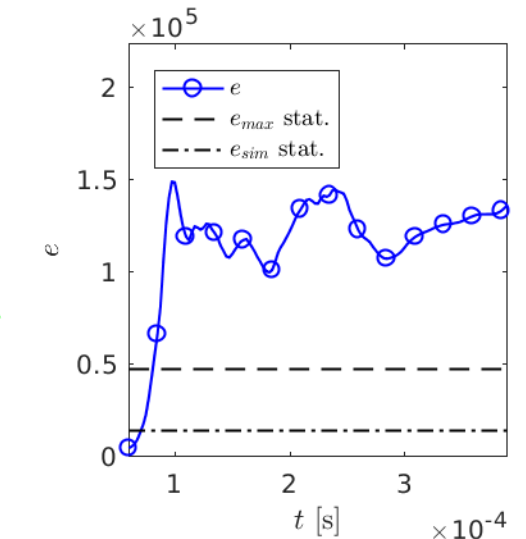
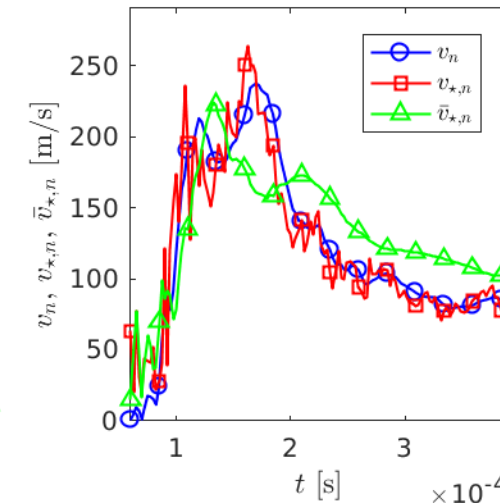
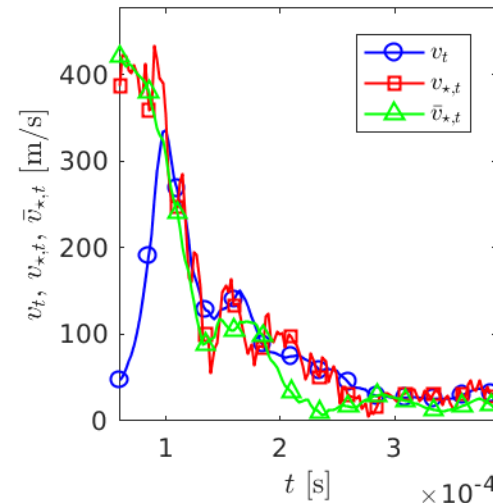
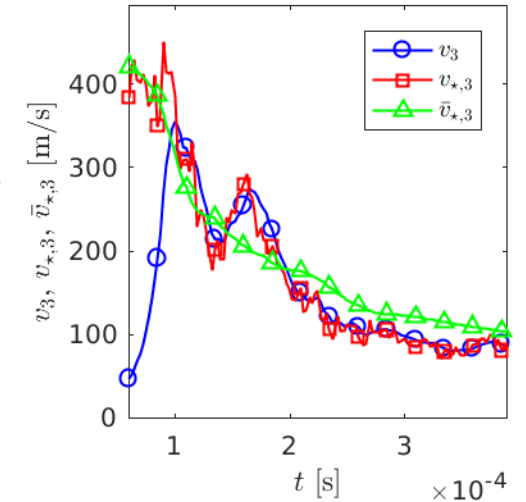
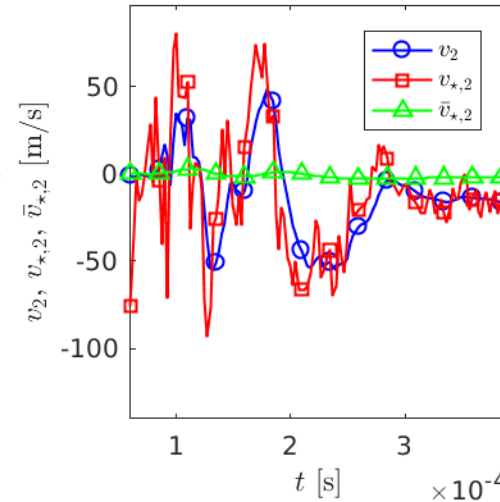
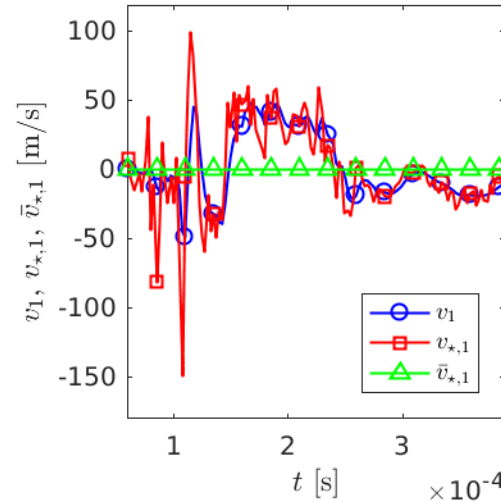
Filamentdynamik mit Turbulenzwirkung – Instationäre Simulation ab Kopplungspunkt

- Geschwindigkeitskomponenten von oben nach unten
- Filamentgeschwindigkeit **blau**
- Mittlere Luftgeschw. **grün**
- Turbulente Luftgeschw. **rot**
- Entwicklung der Dehnung e über der Zeit
- Dehnung wächst aufgrund visko-elastischen Verhaltens nicht monoton



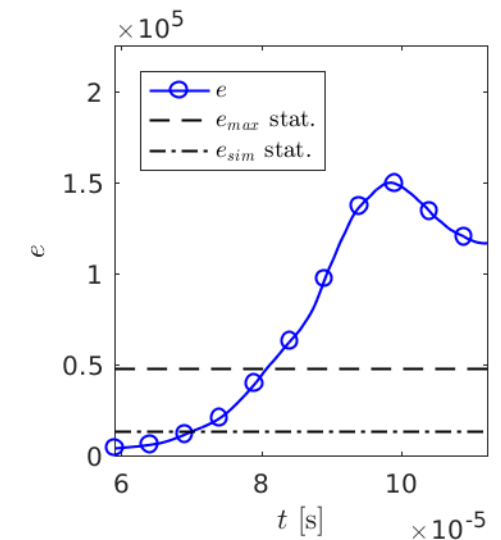
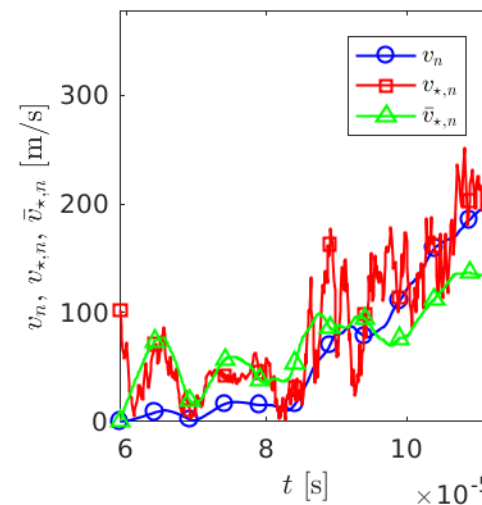
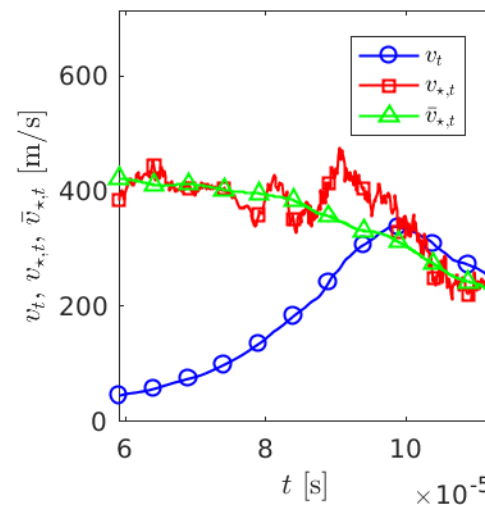
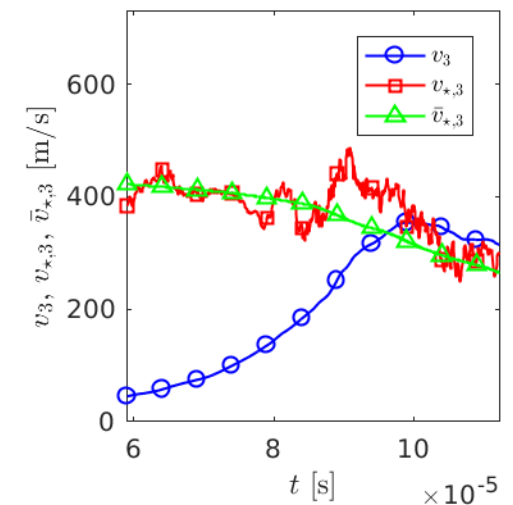
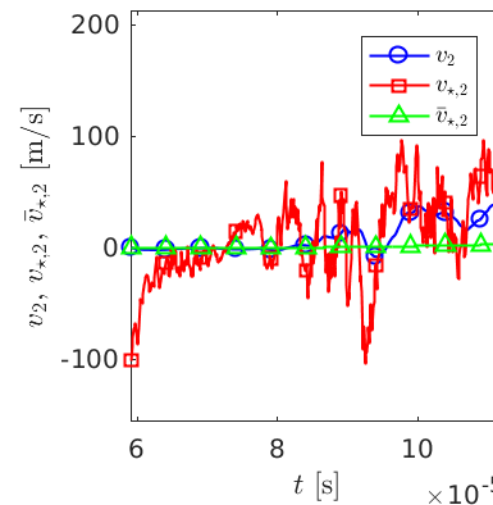
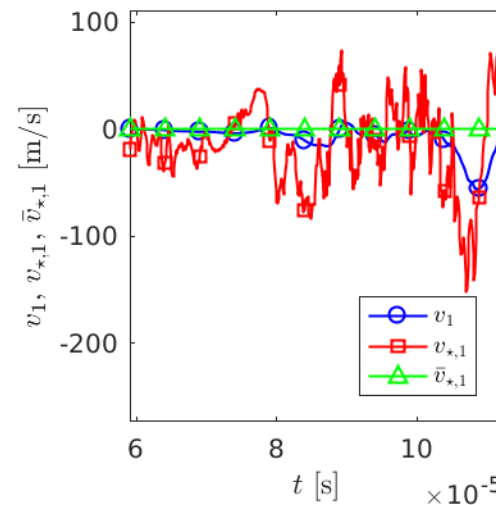
Filamentdynamik mit Turbulenzwirkung – Instationäre Simulation

- Oben:
Geschwindigkeitskomp. CD
= 1, MD = 2, vert. = 3
- Filamentgeschwindigkeit
blau
- Mittlere Luftgeschw. grün
- Turbulente Luftgeschw. rot
- Unten:
Tangentialgeschw. links
Normalgeschw. mittig
Dehnung rechts
- Normal- ähnlich stark wie
Tangentialgeschwindigkeit



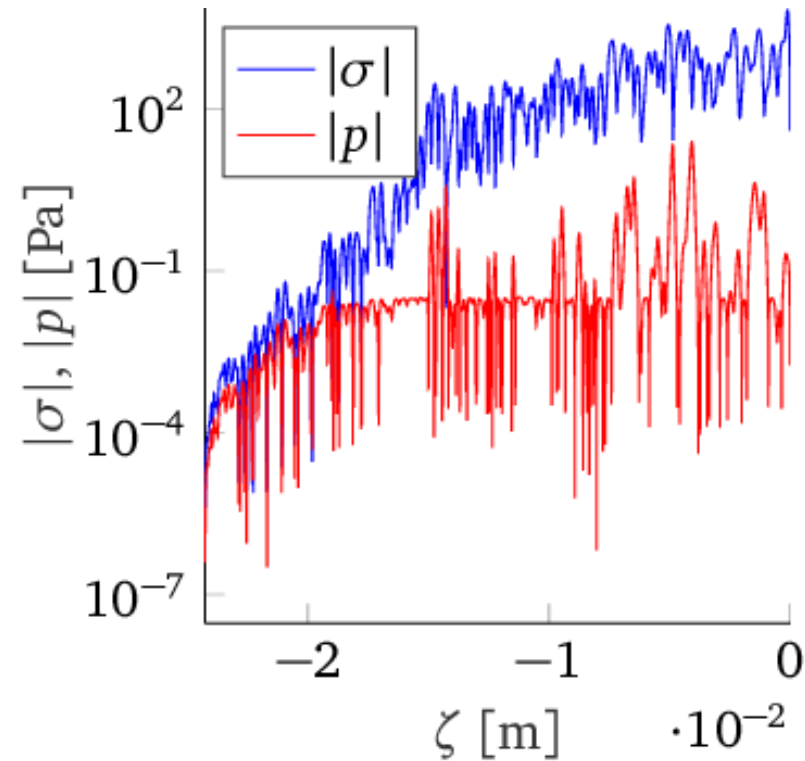
Filamentdynamik mit Turbulenzwirkung – Zoom inst. Simulation

- Oben:
Geschwindigkeitskomp. CD
= 1, MD = 2, vert. = 3
- Filamentgeschwindigkeit
blau
- Mittlere Luftgeschw. grün
- Turbulente Luftgeschw. rot
- Unten:
Tangentialgeschw. links
Normalgeschw. mittig
Dehnung rechts
- Normal- ähnlich stark wie
Tangentialgeschwindigkeit
ist entscheidend für weiter
ansteigende Dehnung



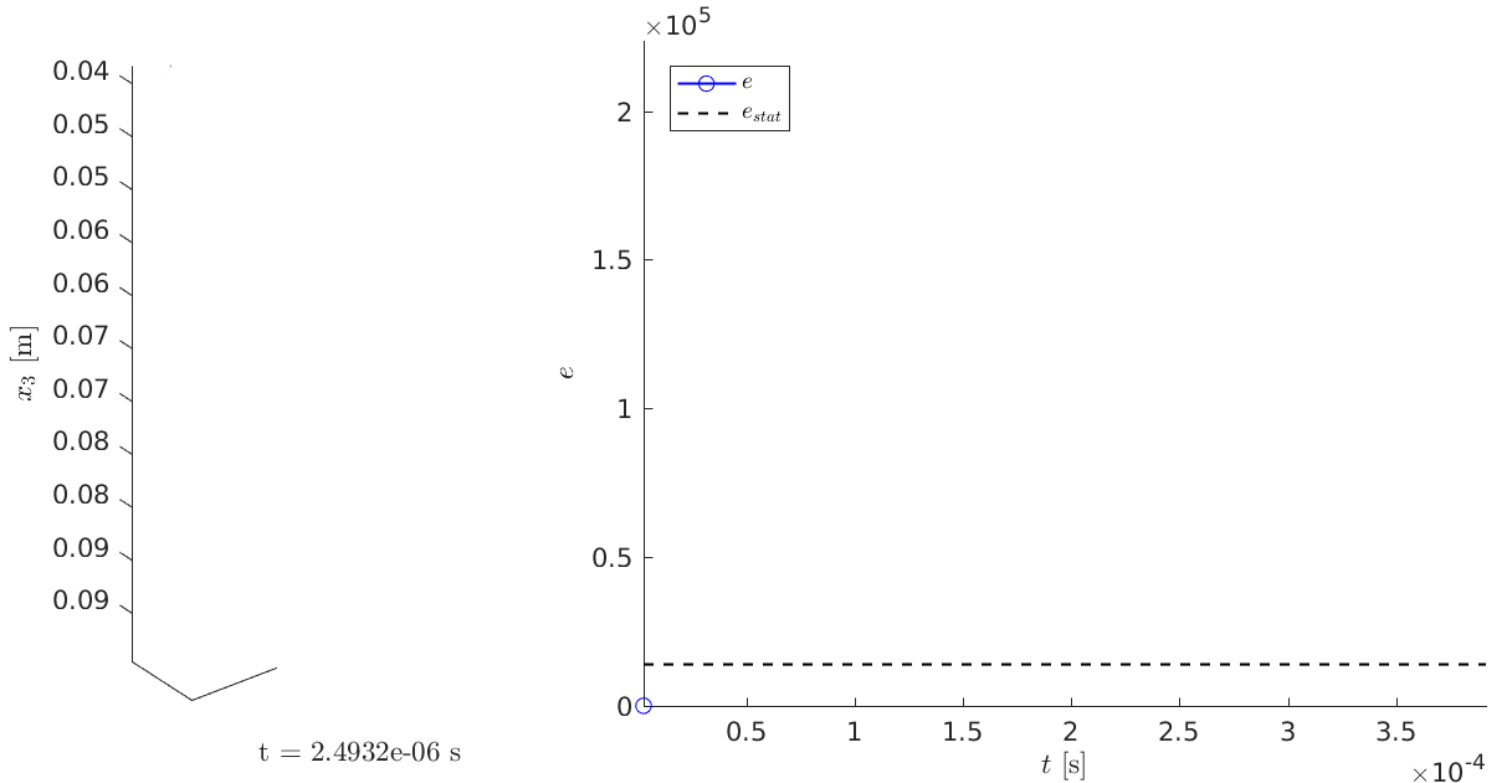
Instationäre Filamentdynamik – Druck in Relation zu Spannung

- Druck p ist deutlich kleiner als Spannung σ und könnte daher vernachlässigt werden [Yarin et al. 2011]
- Simulationen beziehen sowohl σ als auch p mit ein
- Logarithmische Skala bestätigt den Größenordnungsunterschied zwischen p und σ



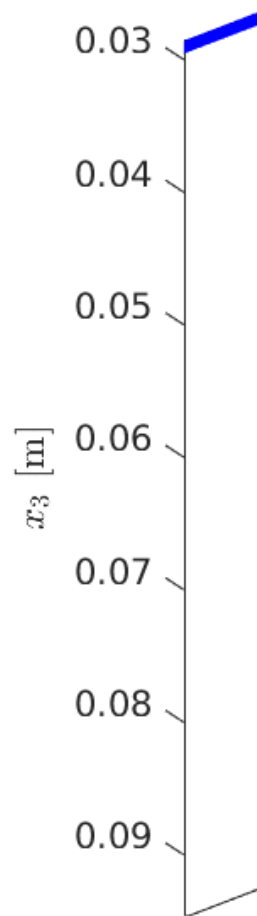
Instationäre Filamentdynamik – Animation von Dynamik und Dehnungsverlauf

- Verfolgung der Dehnung e für einen Massepunkt (rot) entlang der Filamentdynamik
- Deutlich höhere Dehnungen durch turbulente Effekte im Vergleich zur stationären Wirkung der vertikalen Strömungsgeschw.

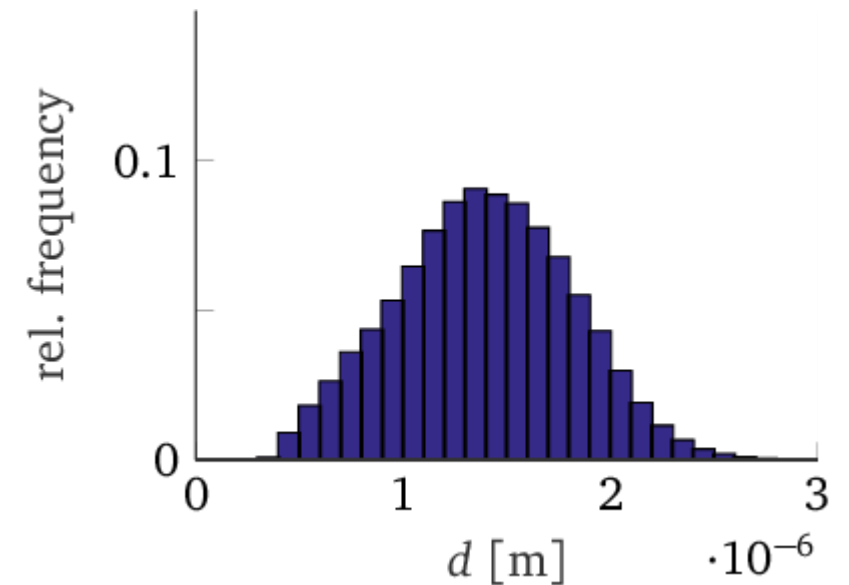


Instationäre Filamentdynamik – Monte-Carlo-Simulation vieler Filamente

- Monte-Carlo-Simulation mit 64 Realisierungen der instationären Filamentdynamik
- Simulierter mittlerer Faserdurchmesser beträgt $1.39 \mu\text{m}$
- Typischer Wert für Meltblown-Prozess
- Simulationen sagen damit auch quantitativ das Verstreckverhalten im Meltblown-Prozess sehr gut voraus



$t = 0.075226$ s



Zusammenfassung und Ausblick

- Modell für Filamentdynamik im Meltblown-Prozess entwickelt
 - Stationäre uniaxiale Verstreckung unmittelbar nach der Düse
 - Turbulente Luftströmung ist entscheidender Faktor für zusätzliche Verstreckung
- Simulationen bilden das Verstreckverhalten auch quantitativ ab
- Filamentablage wurde bereits früher untersucht und wird auf Basis dieses neuen Modells erweitert

- Simulationen ermöglichen qualitativen und quantitativen Einblick in die Faserentstehung im Meltblown-Prozess
- Simulationen werden zu erhebliche Verbesserungen für Meltblown als auch ähnliche Prozesse wie Nanoval oder Biax / Reicofil Multirow führen – packen wir es gemeinsam an