
Simulationsbasierte Optimierung der Strömung von Polymerschmelzen

22. Hofer Vliesstofftage

7. – 8. November 2007

Dr. Dietmar Hietel



Fraunhofer Institut
Techno- und
Wirtschaftsmathematik

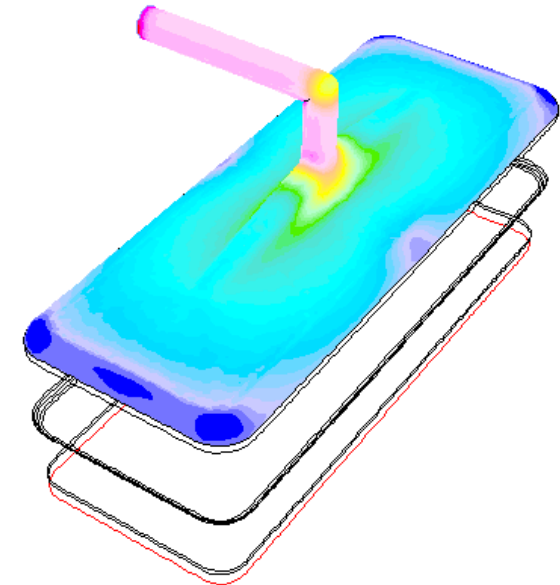
Inhalt

- Aufgaben und Zweck der Schmelzeverteilung
- Modellierung: Rheologie und Polymerströmung
- Simulation der Polymerströmung in Kapillaren und Verteilern
- Optimierung von Verteilergeometrien
- Vorteile durch optimierte Verteiler

Aufgaben und Zweck der Schmelzeströmung

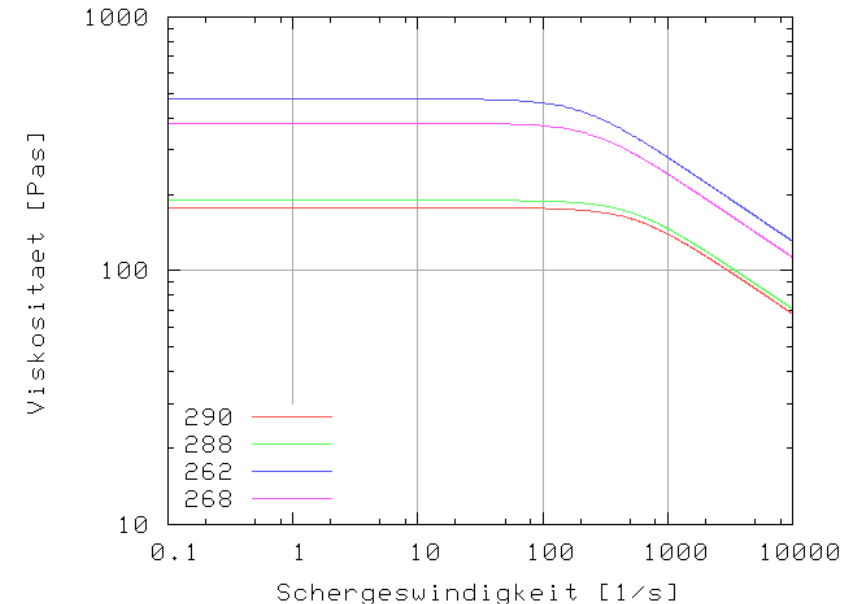
- Gleichmäßige Schmelzeverteilung auf alle Kapillare
- Filterung des Polymerstroms
- Vermeidung von Temperaturunterschieden
- Vermeidung von Totzonen wegen Degradierung
- Möglichst gleichmäßige Verweilzeit des Polymers

- Transport der Schmelze vom Extruder über Rohrsystem zum Spinnkopf oder Segmenten des Spinnkopfs
- Verteilung vom Rohrquerschnitt auf deutlich größere Fläche
- Wechselwirkung der Schmelze mit Wänden
 - Haftung an Wand
 - Temperaturdifferenz zwischen Wand und Schmelze



Rheologische Beschreibung der Polymereigenschaften

- Chemisch-physikalische Eigenschaften der Polymerketten führen zu Abhängigkeit der Viskosität von Temperatur und Scherrate
- Beschreibung als Nicht-Newtonsches Fluid mit strukturviskosem Verhalten, d.h. Viskosität sinkt mit steigender Scherrate ab
- Deborah-Zahl als Verhältnis von Relaxations- zu typischer Fließzeit gering → Elastizitätseffekte weitgehend vernachlässigbar
- Polymerspezifische Angabe der Viskosität direkt durch entsprechende Messungen oder Beschreibung durch Viskositätsmodell (z.B. Carreau-Modell)



Strömungsdynamische Modellierung der Schmelze

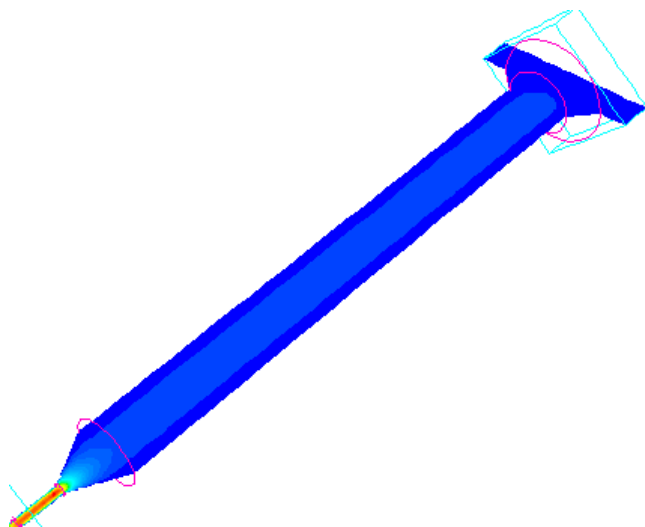
- Strömungsdynamische Erhaltungsgleichungen (Navier-Stokes-Gleichungen)
- Reynoldszahl sehr klein → Kriechströmung → Trägheitseffekte vernachlässigbar

$$\begin{aligned} \nabla^T u &= 0 && \text{Massenerhaltung} \\ -\nabla p + (\nabla^T S^T)^T &= 0 && \text{Impulserhaltung} \\ c_v \rho u^T \nabla \theta &= \nabla^T (Su) - (\nabla^T S)u - p \nabla^T u + \nabla^T (K \nabla \theta) && \text{Energieerhaltung} \end{aligned}$$

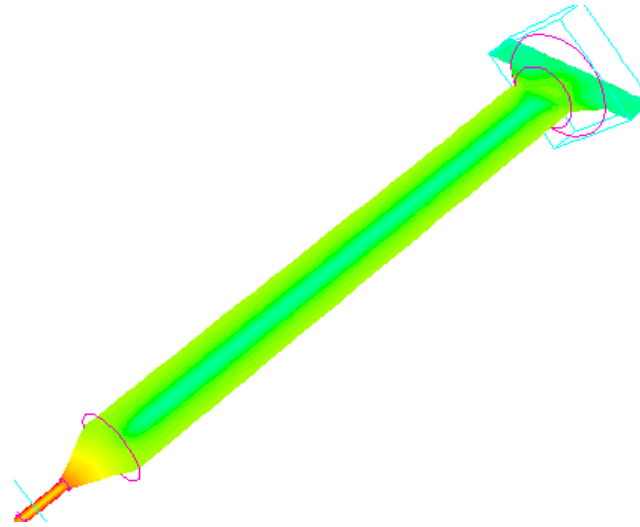
- Spannungstensor $S := \frac{1}{2}\mu(\nabla u + \nabla u^T)$ beinhaltet Viskositätsmodell
- Simulation mit Standard-CFD-Tools wie FLUENT möglich

Simulation der Polymerströmung innerhalb der Kapillare

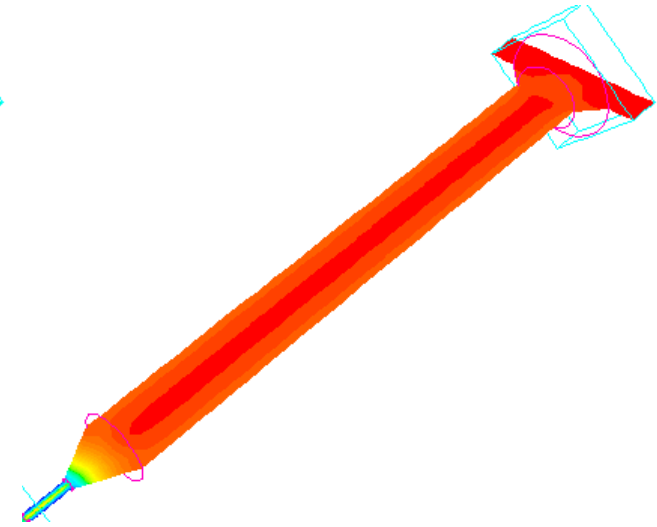
- Gleiche Temperatur von Schmelze und Wandung
- Einfluss der Geometrie auf Strömungsgeschwindigkeit, Scherrate und Viskosität



Strömungsgeschwindigkeit



Scherrate

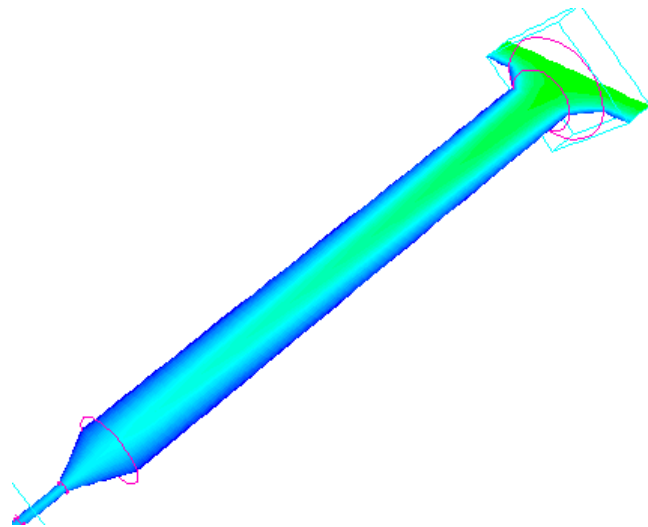


Viskosität

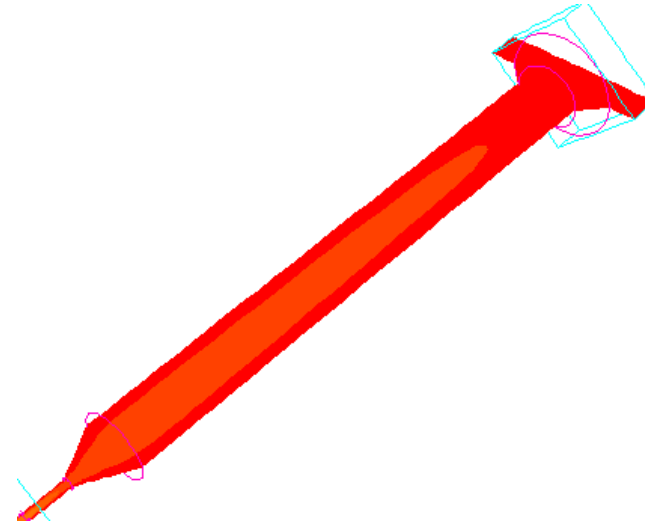
- Strömungsgeschwindigkeit nimmt durch Querschnittsverengung in eigentlicher Kapillarbohrung stark zu → Scherrate steigt dementsprechend an
- Scherraten liegen dort im strukturviskosen Bereich → Viskosität sinkt deutlich ab

Simulation der Polymerströmung innerhalb der Kapillare

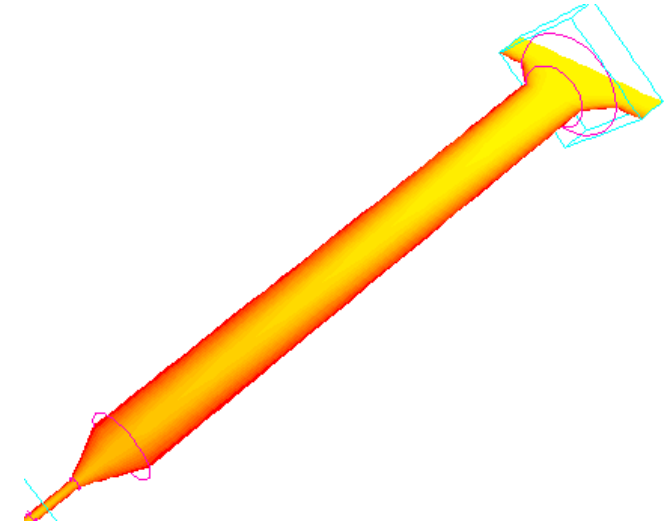
- Einfluss der Differenz zwischen Schmelze- und Wandtemperatur auf Polymertemperatur



Wand um 10° kälter



gleiche Temperatur

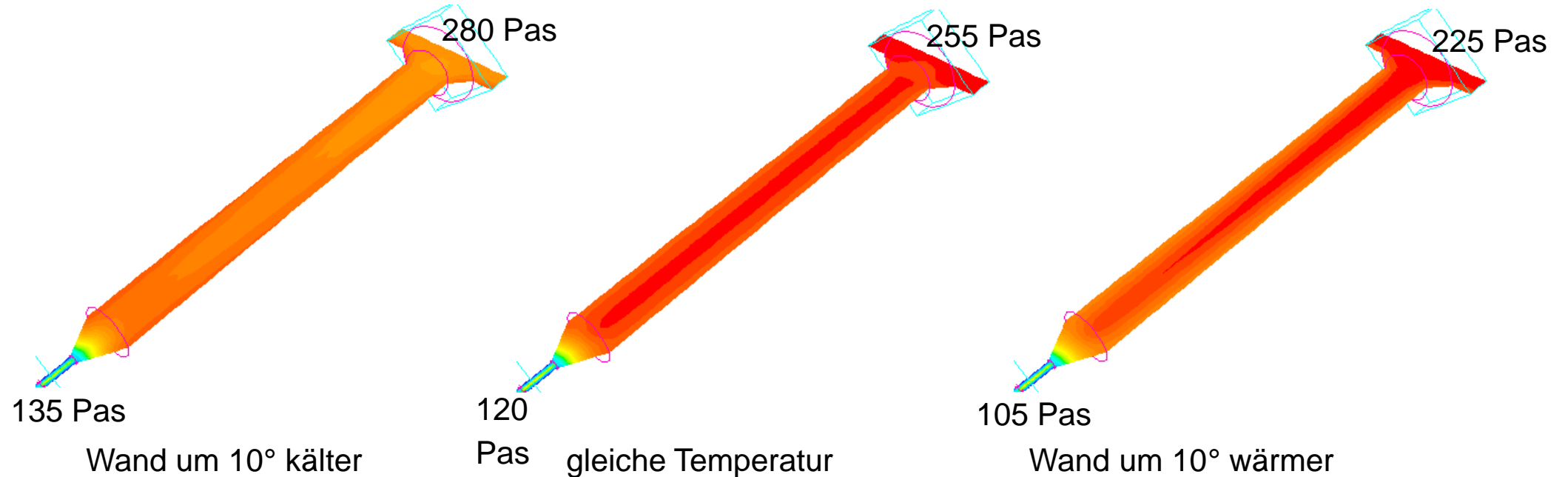


Wand um 10° wärmer

- Wand kühlt Schmelze ab oder heizt Schmelze auf
- Temperatur in der eigentlichen Kapillarbohrung relativ gleichmäßig

Simulation der Polymerströmung innerhalb der Kapillare

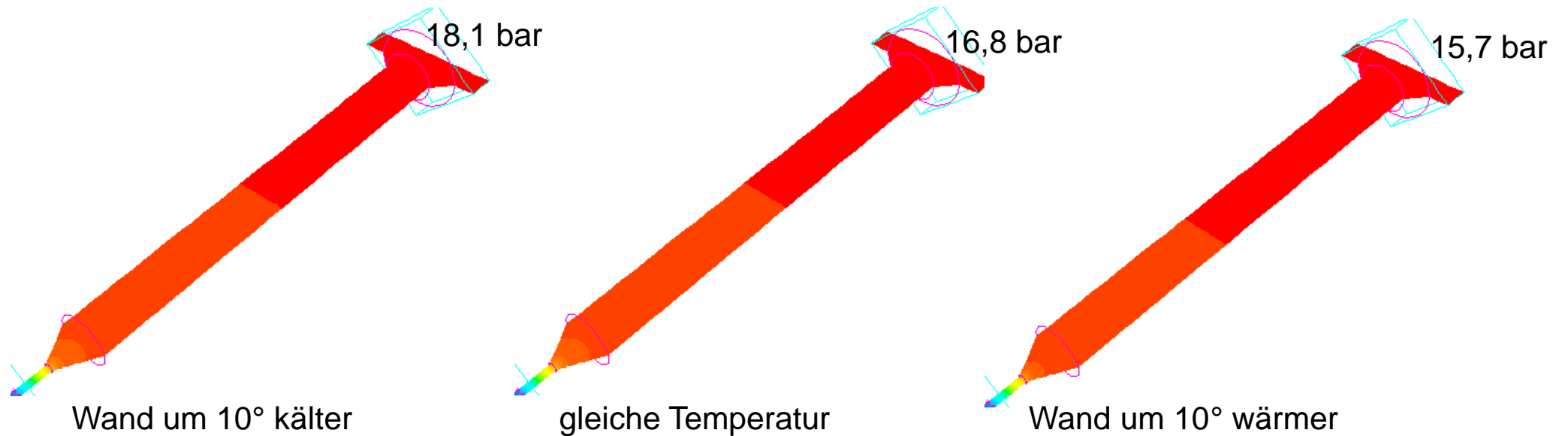
- Einfluss der Temperaturunterschiede und Scherraten auf Viskosität der Schmelze



- Deutliche Viskositätsunterschiede aufgrund Temperaturniveaus und Scherraten

Simulation der Polymerströmung innerhalb der Kapillare

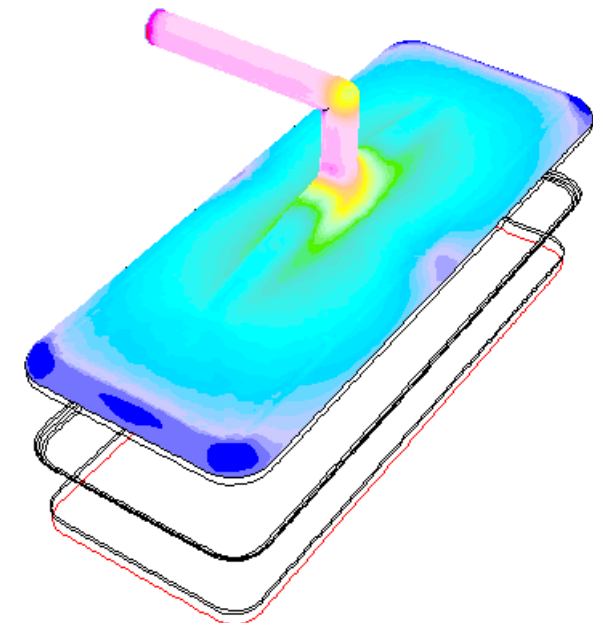
- Einfluss der Viskositätsunterschiede auf Druckdifferenz bei gleichem Lochdurchsatz



- Druckabfall deutlich abhängig von Viskosität →
Lochdurchsatz nur gleichmäßig, wenn Druck und Temperatur gleichmäßig sind

Simulation der Polymerströmung im Verteiler

- Auflösung aller Kapillaren zusammen mit Verteiler in einem Gitter quasi unmöglich
- Die Kapillare können über Strömungswiderstand als poröses Medium erfasst werden
- Koeffizienten dieses Modells werden über Detailsimulation der Kapillare bestimmt
- Lochplatten und Filtersiebe können analog als poröses Medium erfasst werden
- 3D-Simulation komplexer Verteilergeometrien werden auf dieses Weise möglich



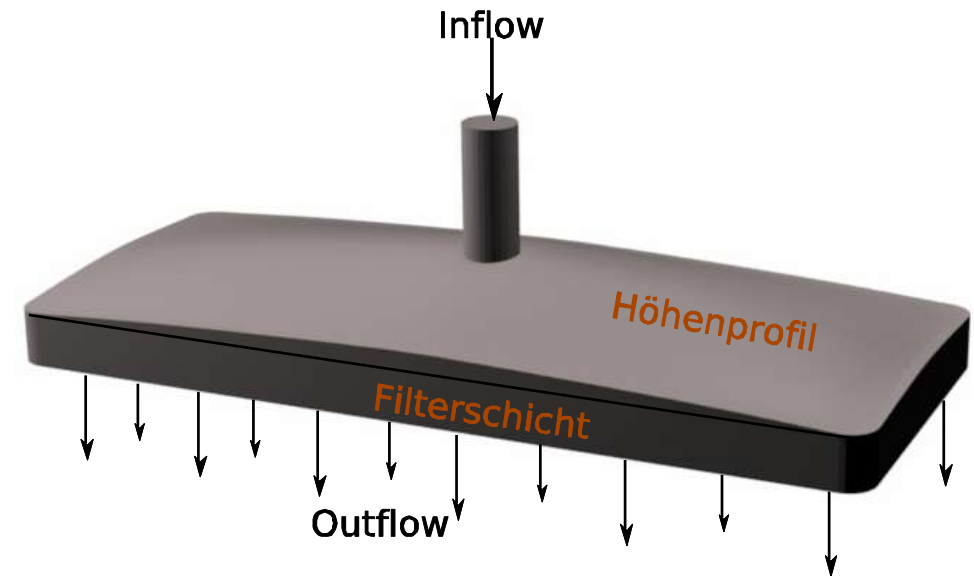
Wandschubspannung

Reduziertes Modell zur Optimierung von Verteilergeometrien

- Optimierung der Verteilergeometrie im 3D-Modell schwierig
- Verteiler oft durch Höhenprofil beschrieben
- Reduziertes 2D-Modell über Verteilfläche

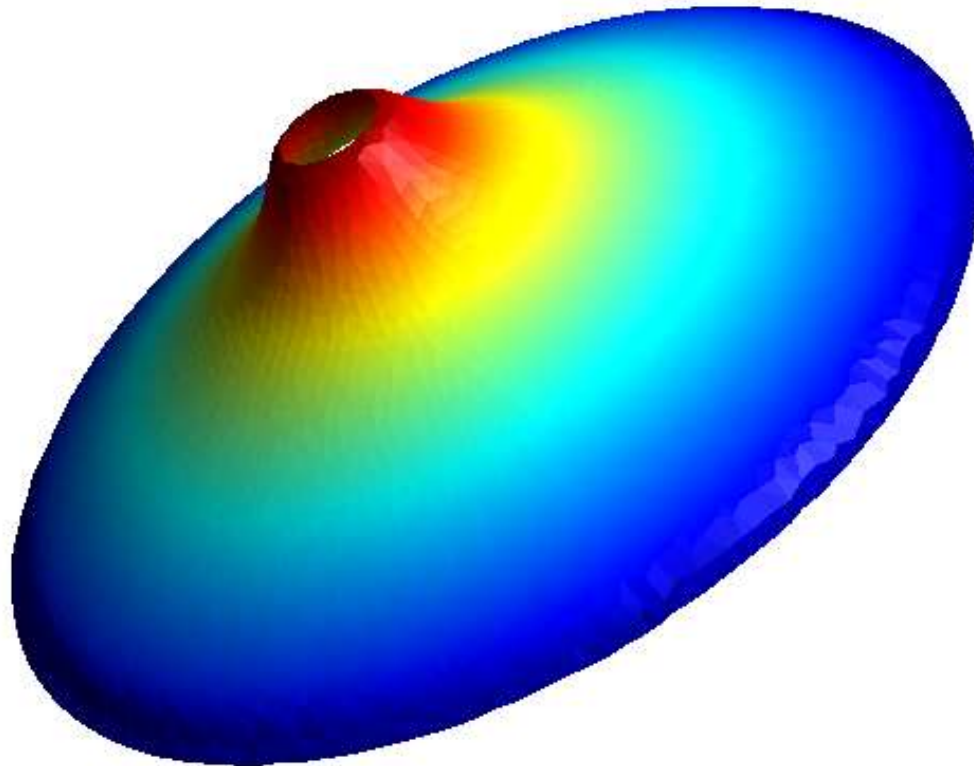
$$\nabla^T(-h^3 \nabla p) = -12 \mu \alpha p + q$$

- Inflow über Quelle q oder Rohrrand
- Outflow abhängig von Druckdifferenz, Viskosität und Porosität der Spinnplatte
- Optimierung über Standardverfahren
- Kriterium: hohe Wandschubspannung

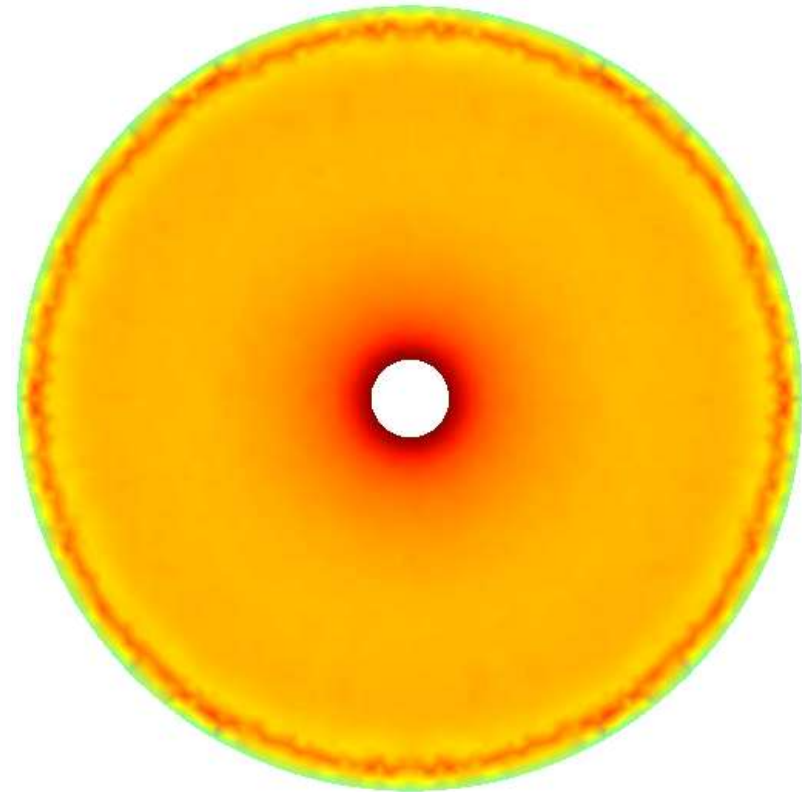


Beispiel: Optimierung für runden Verteiler

- Schmelzeintritt über ausgeschnittenen Rohrkern
- Äußerer Rand besonders kritisch
- Endliche Randhöhe führt zu Staupunkt/Totzone
- verschwindende Randhöhe führt zu Singularitäten der Lösung



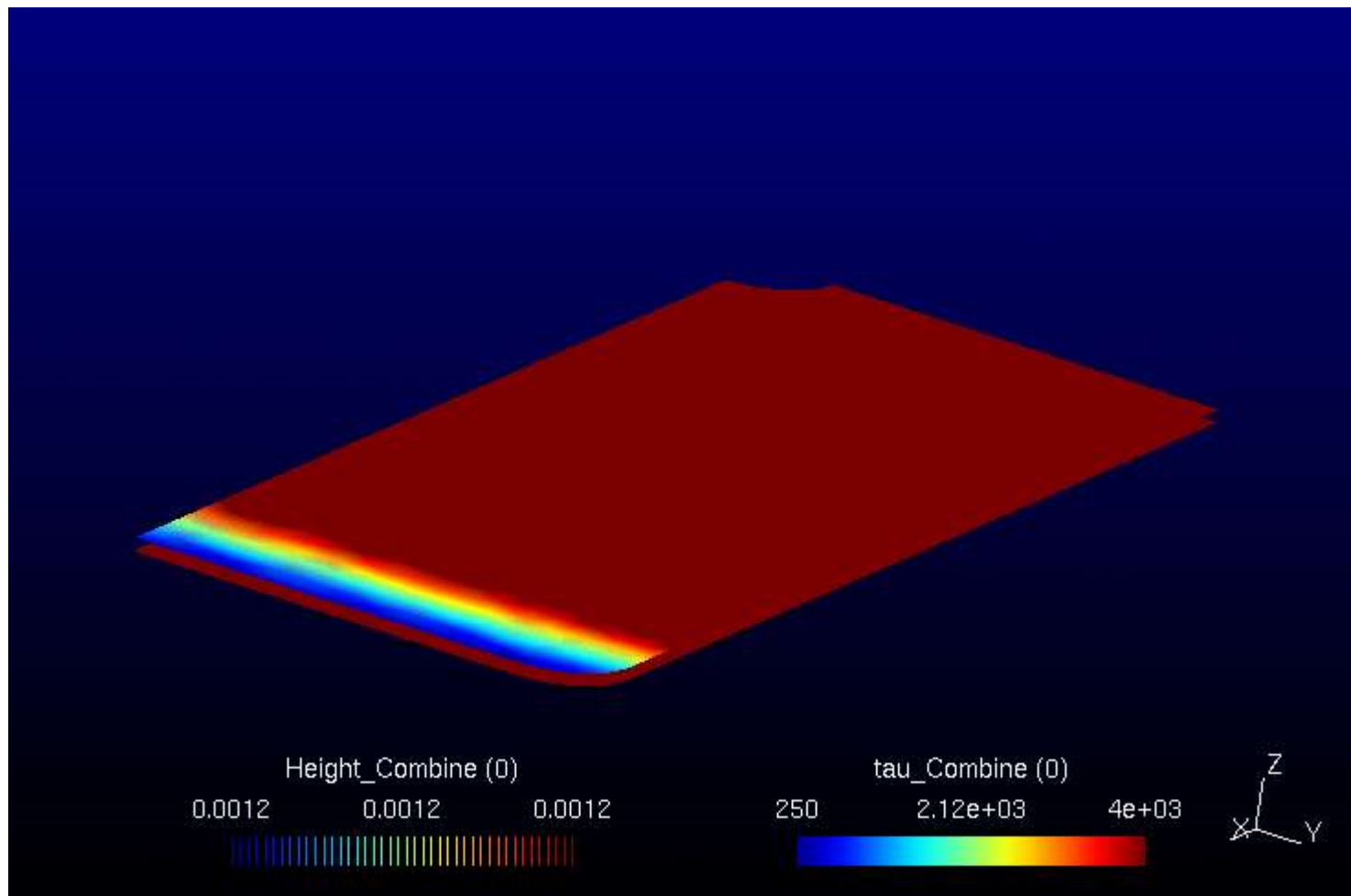
Optimiertes Höhenprofil



Wandschubspannung an Oberteil

Beispiel: Optimierung für rechteckigen Verteiler

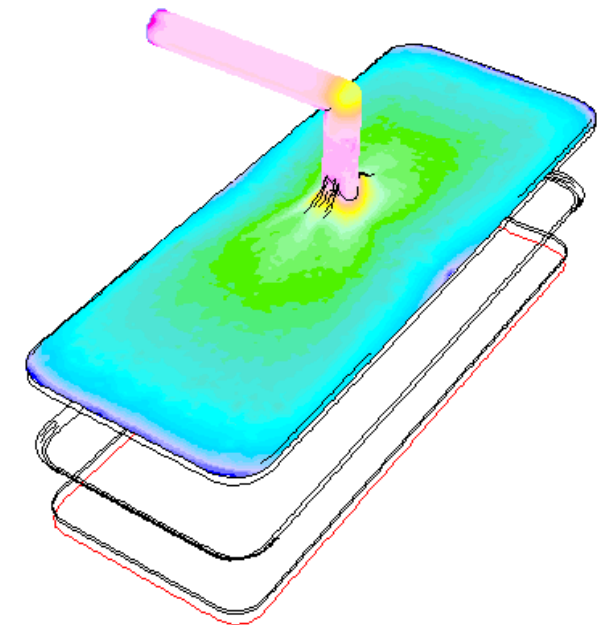
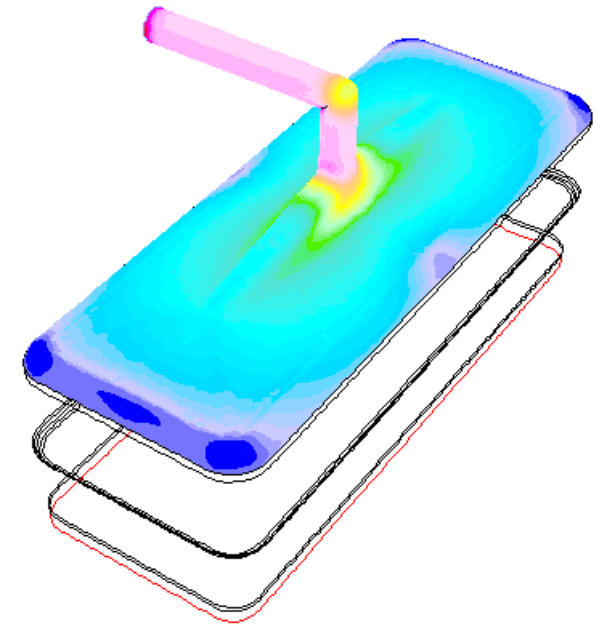
- Darstellung des Optimierungsprozesses ausgehend von flacher Struktur
- Wandschubspannung deutlich erhöht
- Weitere Verbesserung durch analytische Profile am äußeren Rand möglich



Vorteile durch optimierte Schmelzeverteiler

- Vergleichmäßigung der Schmelzeverteilung
- Erhöhung der minimalen Wandschubspannung
- Vermeidung von Staupunkten und Totzonen
- Vergleichmäßigung der Fließzeiten
- Reduktion des Schmelzevolumens und damit Abfallmengen bei Polymerwechsel
- Minderung von Degradierungseffekten
- Erhöhung der Prozesssicherheit

- Verschiedene Industriepartner haben derartig optimierte Verteiler bereits erfolgreich eingeführt



Prozesssimulation als Schlüssel für Innovation

INDEX 2005, Helena Engquist

The potential of nonwovens

A glance into the future showed the potential of nonwovens still quite unexploited! Process optimization based on fiber dynamics simulation by Fraunhofer ITWM revealed how concrete process problems can be solved and optimized for new fiber structures. The interaction of fibers and air provide the basic parameters for the air drag force and because of the simulations sophisticated textile replacements can be developed.

ITMA 2007, Thomas Gries
about ManuTex Research Road Map

Process simulation technologies and mechatronics are expected to play a key role for progress in strategic research topics.

INTC 2007

2 Sessions mit 10 Vorträgen
Modellierung / Simulation

**Prozesssimulation ist in verschiedenen Feldern möglich.
Machen Sie Gebrauch davon, bevor es die Anderen tun!**

