Faserorientierungsvorhersage mittels der Spritzgusssimulation

M. Morak[1)], D.Tscharnuter[1)], T. Lucyshyn[2)],
T. Gross[3)], R. Steinberger[3)], M. Göttlinger[4)], W. Hahn[4)]

1) Polymer Competence Center Leoben GmbH
2) Polymer Processing, Montanuniversität Leoben
3) Hirtenberger Automotive Safety AG
4) HILTI AG

Gliederung

- Einleitung
- Spritzgusssimulation
  - **RSC-Modell**
  - **Optimierungsmethodik**
- Material- und Prüfkörperspezifikation
- Ergebnisse
  - **μCT-Ergebnisse**
  - **Resultate der Spritzgusssimulation**
- Zusammenfassung

Einleitung

- Kurzfaserverstärkte Thermoplaste werden aufgrund ihrer Vorteile immer öfter eingesetzt.
- Beim Spritzgussprozess von faserverstärkten Bauteilen kommt es zur Orientierung der Fasern.
- Orientierung beeinflusst das mechanische Verhalten
- Vorhersage der Faserorientierung für möglichst genaue Simulationsvorhersage wesentlich
- Einbinden der Spritzgusssimulationsergebnisse in mikromechanische Modelle

Spritzgusssimulation
Folgar-Tucker-Modell

- Software Paket zur Umsetzung der Spritzgusssimulationen

  Autodesk Moldflow 3D
- Vorhersage der Faserorientierungsverteilung nach Folgar-Tucker[1], basierend auf Jeffery's Gleichung[2]
- Orientierung im 3D Raum durch den Einheitsvektor $\underline{p}$ beschrieben:

$$\underline{p} = \begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\varphi \ \sin\theta \\ \sin\varphi \ \sin\theta \\ \cos\theta \end{pmatrix}$$

- Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion: $\psi(\underline{p})$
- Tensor-Darstellung der Faserorientierung nach Advani und Tucker[3]

$$\boldsymbol{A} := \left\langle \underline{p}\,\underline{p} \right\rangle = \oint_{\Omega} \underline{p} \otimes \underline{p}\, \psi\left(\underline{p}\right) d\underline{p}$$

[1] F. Folgar, C.L. Tucker III, "Orientation Behavior of Fibers in Concentrated Suspensions, 1984

[2] G.B. Jeffery, "The Motion of Ellipsoidal Particles Immersed in a Viscous Fluid", 1922

[3] S.G. Advani, C.L. Tucker III, "The Use of Tensors to Describe and Predict Fiber Orientation in Short Fiber Composites, 1987

Spritzgusssimulation
Folgar-Tucker-Modell

- Normierungsbedingung der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion

$$\oint_{\Omega} \psi\left(\underline{p}\right) d\underline{p} = 1 \quad \Rightarrow \quad tr(\boldsymbol{A}) = 1$$

- Folgar und Tucker Gleichungen

$$\frac{\mathrm{D}\boldsymbol{A}}{\mathrm{D}t} = (\boldsymbol{W} \cdot \boldsymbol{A} - \boldsymbol{A} \cdot \boldsymbol{W}) + \xi(\boldsymbol{D} \cdot \boldsymbol{A} - \boldsymbol{A} \cdot \boldsymbol{D} - 2\mathbb{A} : \boldsymbol{D}) + 2\, C_{\mathrm{i}}\, \dot{\gamma}(\boldsymbol{I} - 3\boldsymbol{A})$$

- C_{i} ... Frei zu bestimmender Faserinteraktionskoeffizient
- $\boldsymbol{W}$ ... Drehgeschwindigkeitstensor
- $\boldsymbol{D}$ ... Deformationsratentensor
- ξ ... Faserformfaktor
- $\dot{\gamma}$ ... Skalare Größe des Dehnratentensors
- $\mathbb{A}$ ... Orientierungstensor vierter Stufe

RSC-Modell[4]:

$$\frac{\mathrm{D}\boldsymbol{A}}{\mathrm{D}t} = (\boldsymbol{W}\cdot\boldsymbol{A} - \boldsymbol{A}\cdot\boldsymbol{W}) + \xi(\boldsymbol{D}\cdot\boldsymbol{A} - \boldsymbol{A}\cdot\boldsymbol{D} - 2[\mathbb{A} + (1-\kappa)(\mathbb{L} - \mathbb{M}:\mathbb{A})]:\boldsymbol{D})$$
$$+2\,\kappa\,C_{\mathrm{i}}\,\dot{\gamma}(\boldsymbol{I} - 3\boldsymbol{A})$$

- κ und C_{i} ... Frei zu bestimmende Parameter
- $\mathbb{L} = \sum_{i=1}^{3} \lambda_{\mathrm{i}}\, e_{\mathrm{i}}\, e_{\mathrm{i}}\, e_{\mathrm{i}}\, e_{\mathrm{i}}$ ... Tensor vierter Ordnung mit den Eigenwerten und Eigenvektoren des Orientierungstensors $\mathbb{A}$
- $\mathbb{M} = \sum_{i=1}^{3} \lambda_{\mathrm{i}}\, e_{\mathrm{i}}\, e_{\mathrm{i}}\, e_{\mathrm{i}}\, e_{\mathrm{i}}$ ... Tensor vierter Ordnung mit den Eigenwerten und Eigenvektoren des Orientierungstensors $\mathbb{A}$

- $\kappa = 1 \Rightarrow$ Degeneration des RSC-Modells zum Folgar-Tucker Modell

[4] Autodesk Moldflow Insight, „Fiber Orientation Solver Verification and Validation“, 2012

Spritzgusssimulation
Optimierungsmethodik

- Durchführen von μCT-Scans als Referenzergebnisse

- Relevante Grenzen der Parameter κ und C_{i} lt. Moldflow MAN

$$C_{\mathrm{i}} \in [0, 0.1]$$

$$\kappa \in [0.0001, 1.0]$$

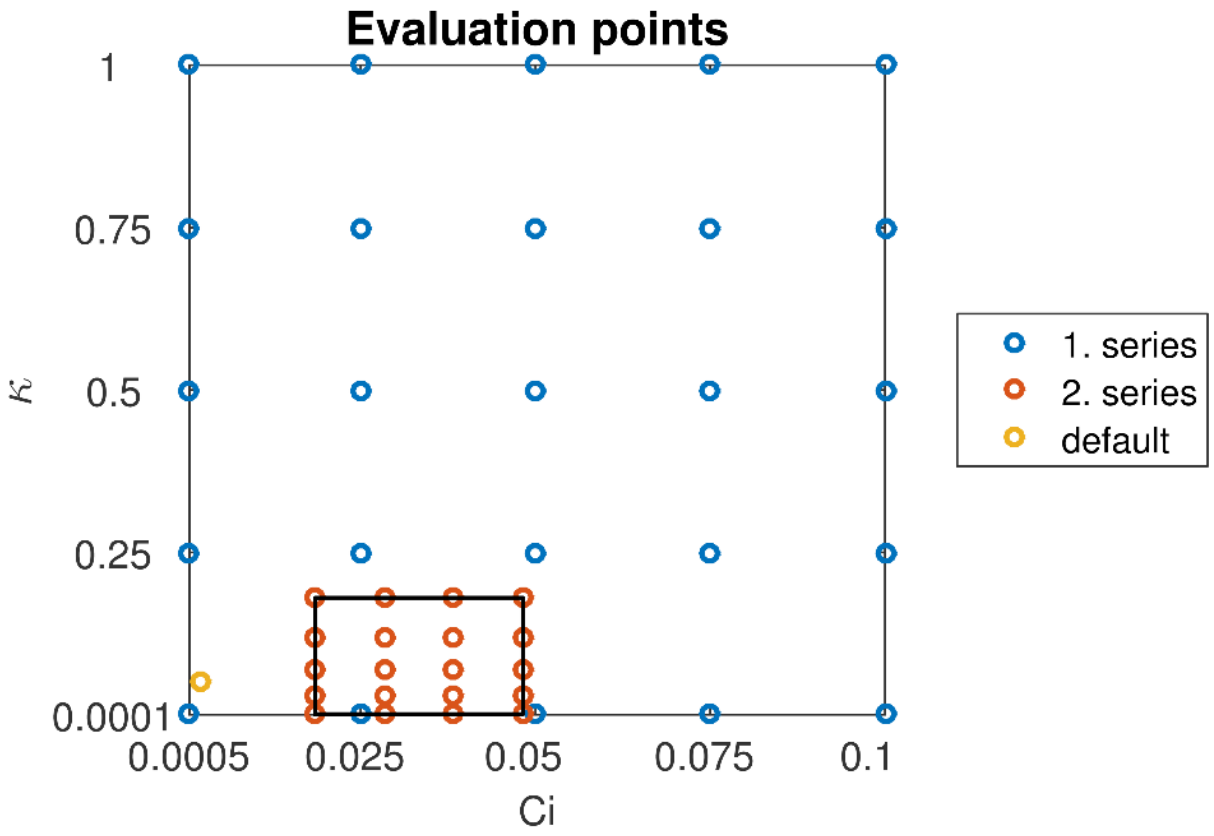
- Referenzwerte der Optimierung sind die Default-Werte

- Durchführung von zwei Optimierungsreihen

- Fehlerberechnung in der Frobeniusnorm:

$$\|\boldsymbol{A}\|_{\mathrm{F}} := \sqrt{\sum_{i=1}^{m} \sum_{j=1}^{n} |a_{\mathrm{ij}}|^2}$$

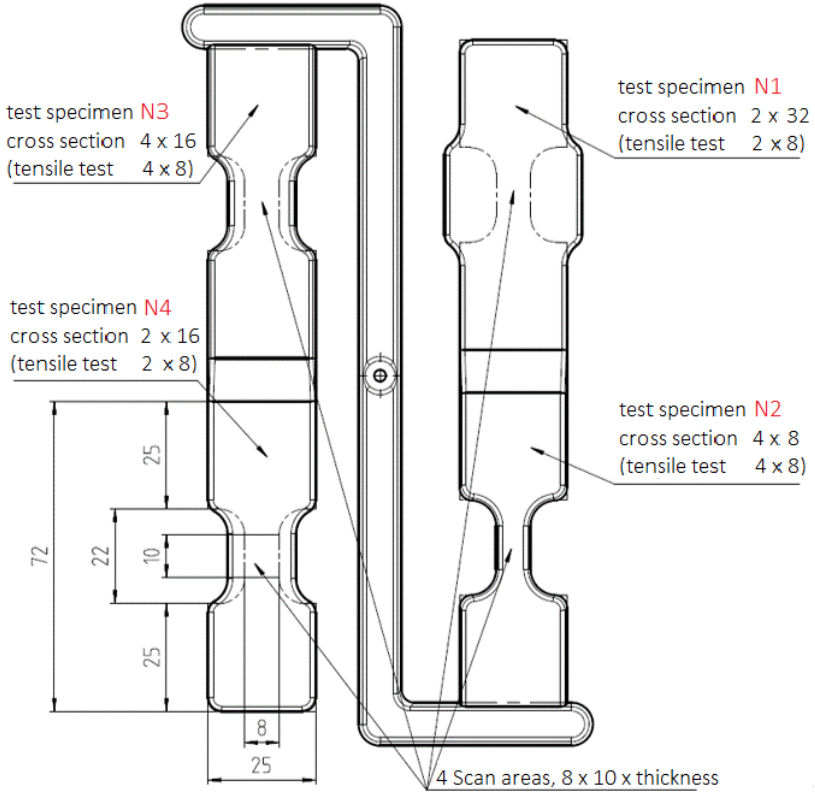
- 2. Simulationsreihe

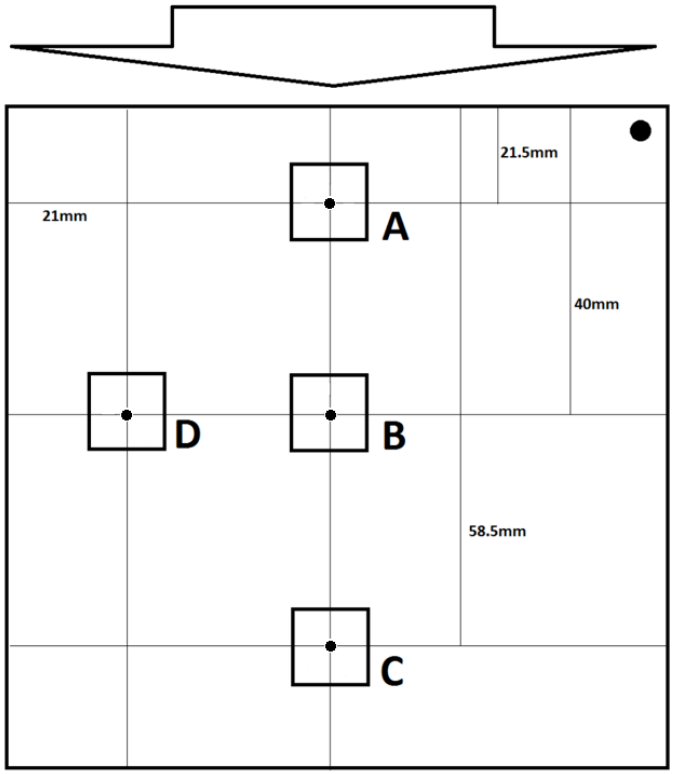


Material- und Prüfkörperspezifikation

- PA6GF30
  - **Schlagzähmodifiziertes 30wt% glasfaserverstärktes PA6**

Dimensions in mm

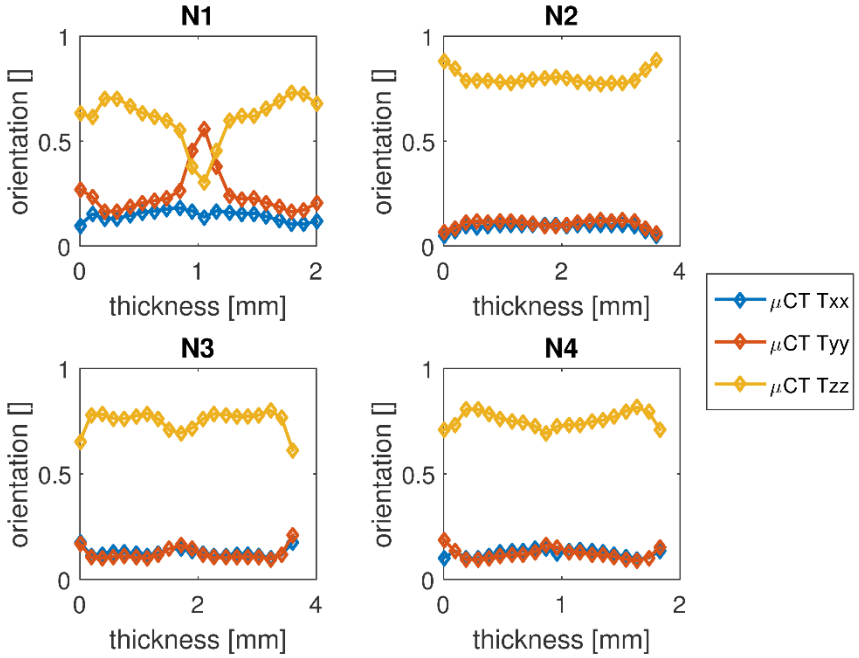




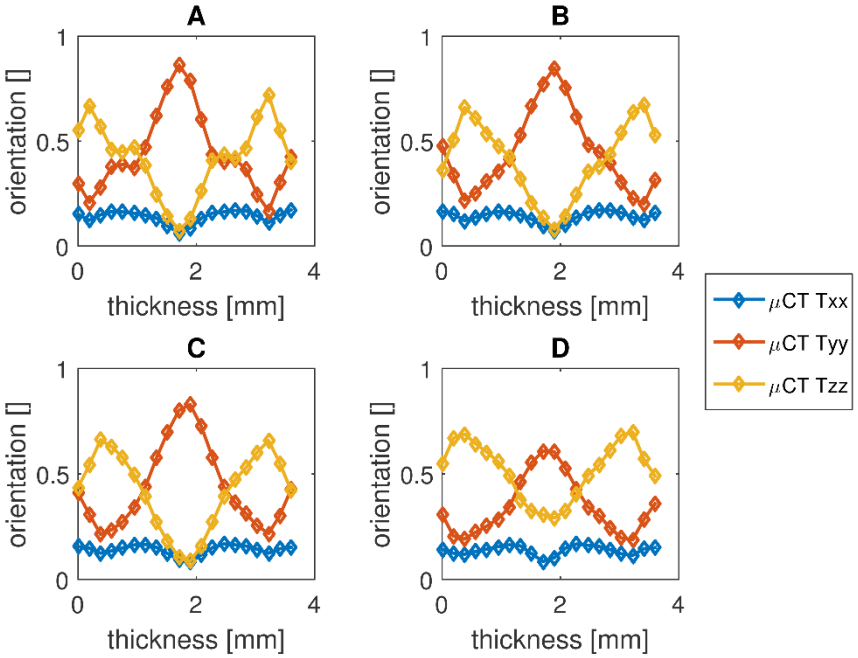
Ergebnisse
µCT-Ergebnisse

- µCT-Scans wurden mit VG Studio MAX 2.2 ausgewertet
- Integrationsnetz mit 20x1x1mm^3 mit einer Zellengröße von 180µm

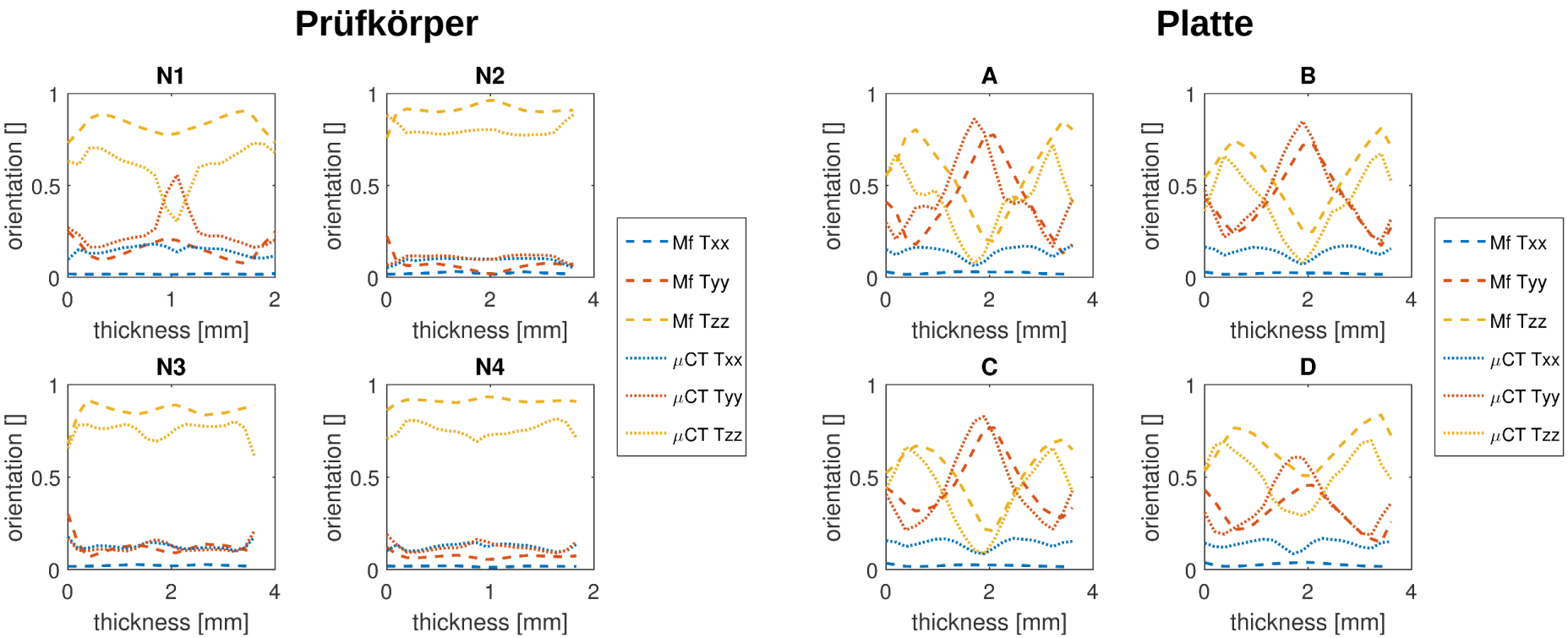
Resultate der Prüfkörper



Resultate der Platte

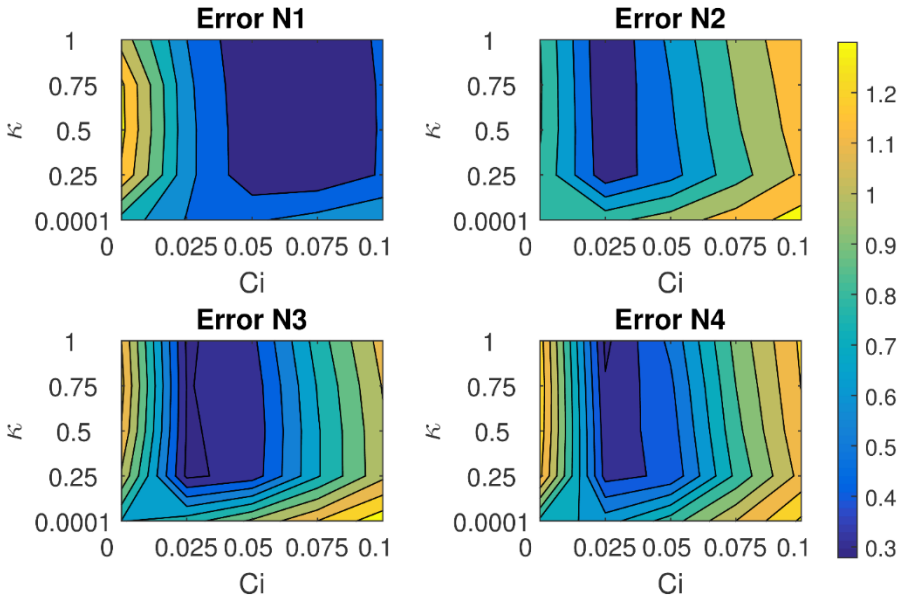


Resultate der Default-Werte

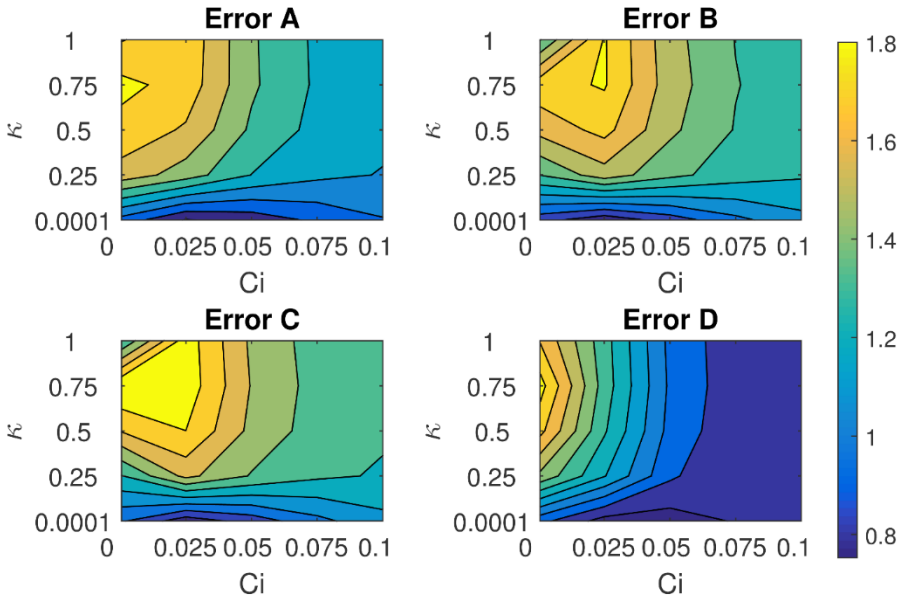


Fehler der ersten Simulationsreihe

Prüfkörper

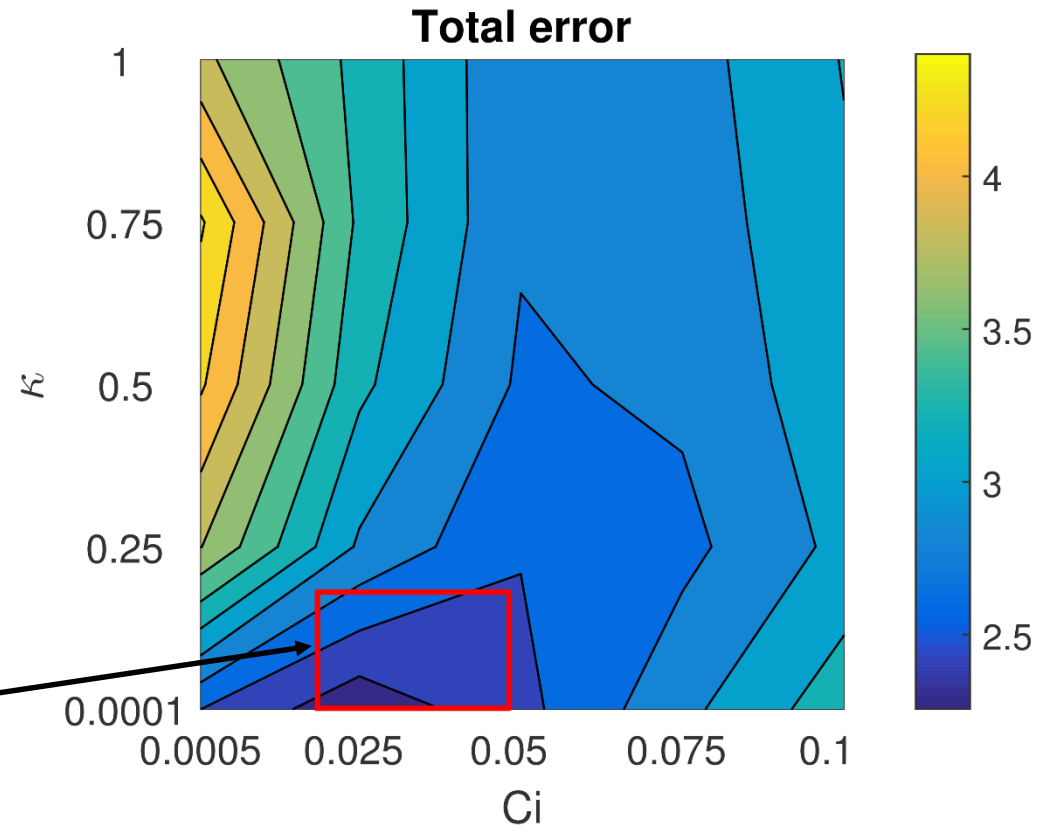


Platte



Ergebnisse
Resultate der Spritzgusssimulation

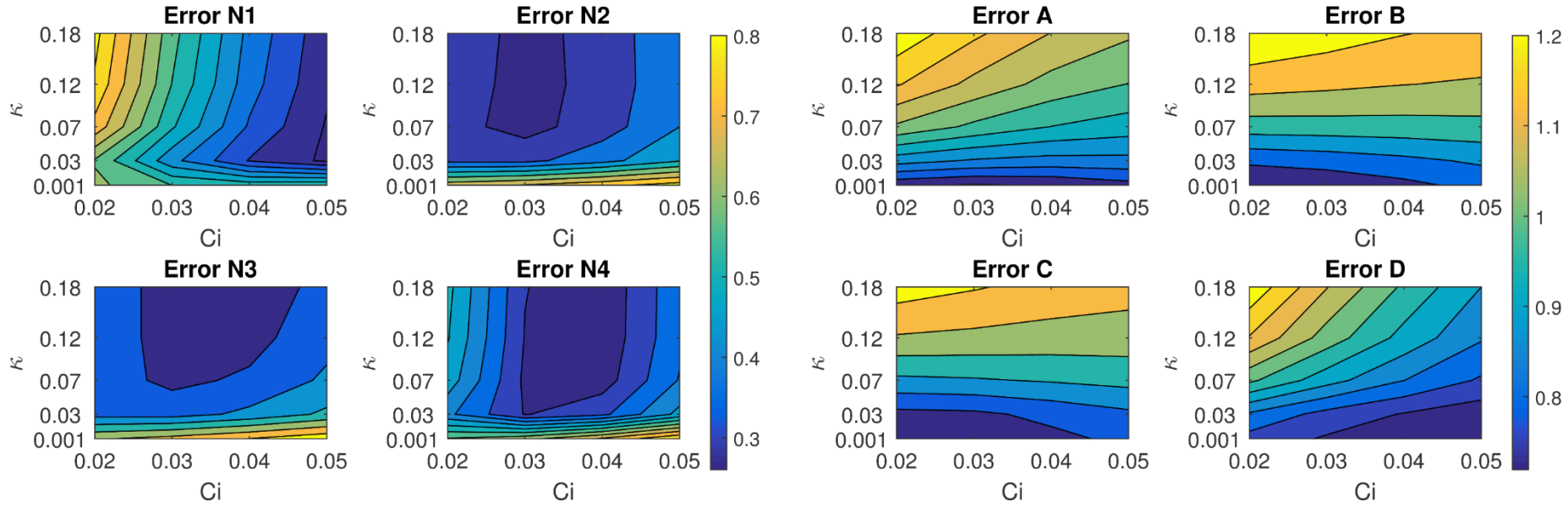
Gesamtfehler über alle acht untersuchten Positionen auf der Platte und den Prüfkörpern



Gebiet für zweite Simulationsreihe

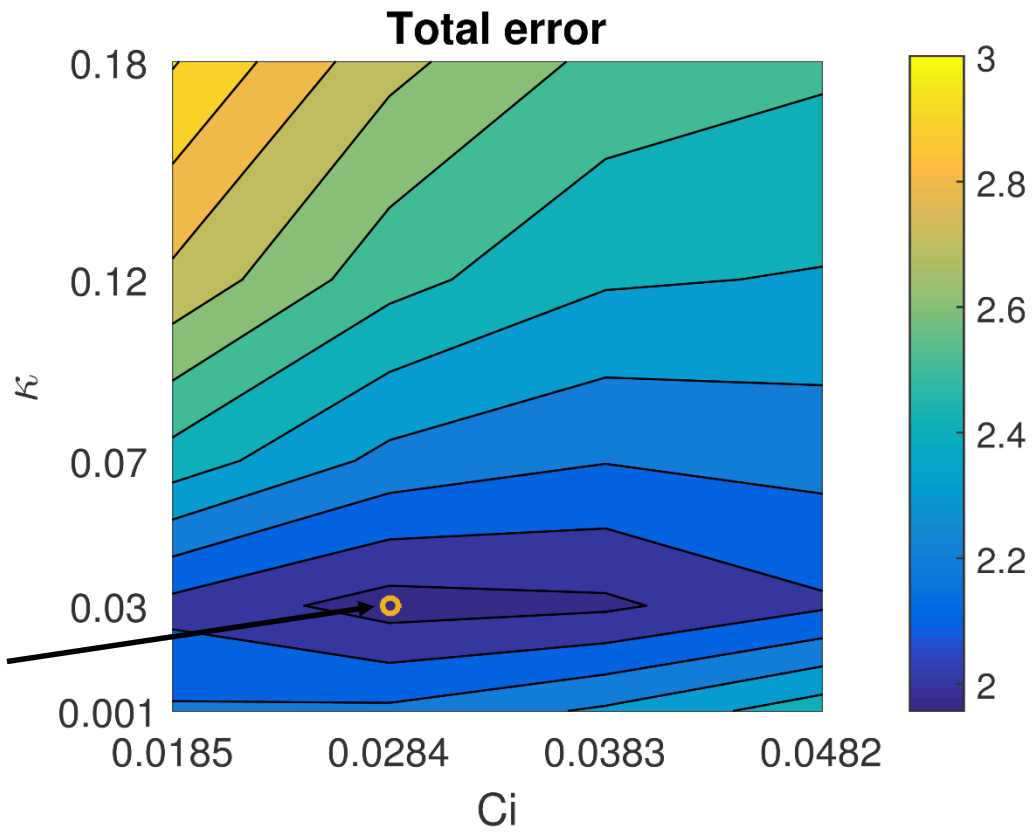
Fehler der zweiten Simulationsreihe

Prüfkörper **Platte**



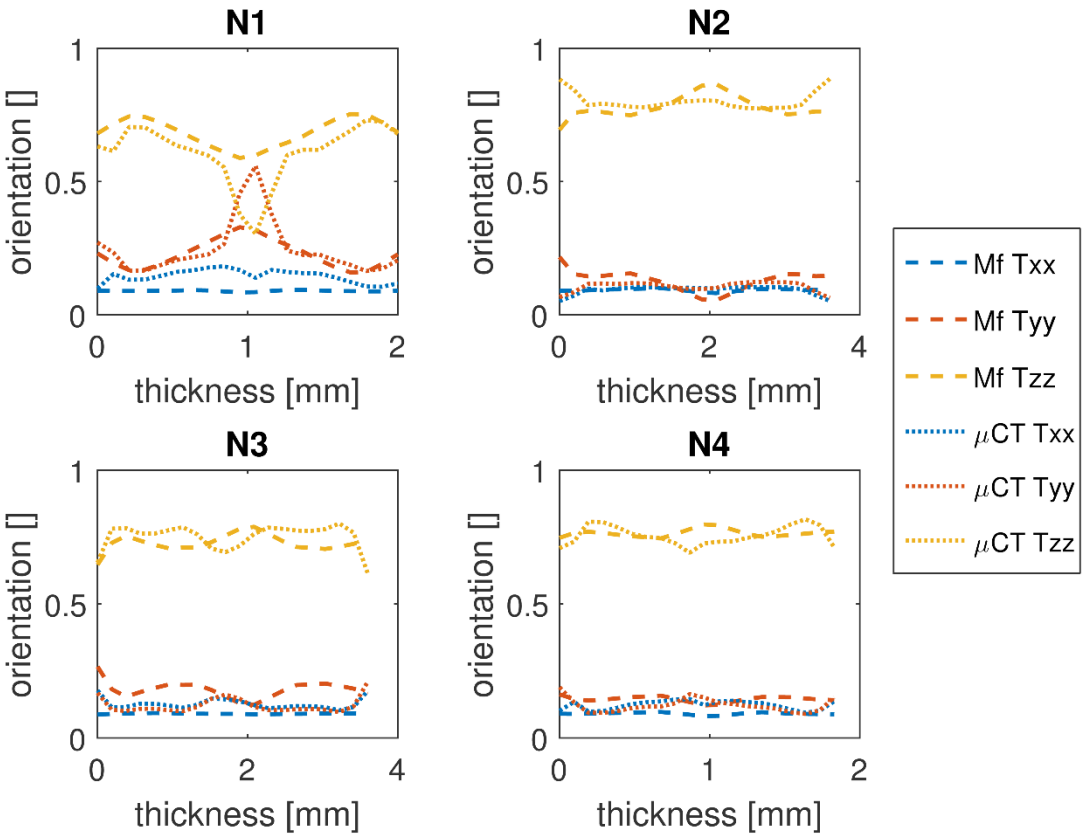
Ergebnisse
Resultate der Spritzgusssimulation

Gesamtfehler über alle acht untersuchten Positionen auf der Platte und den Prüfkörpern

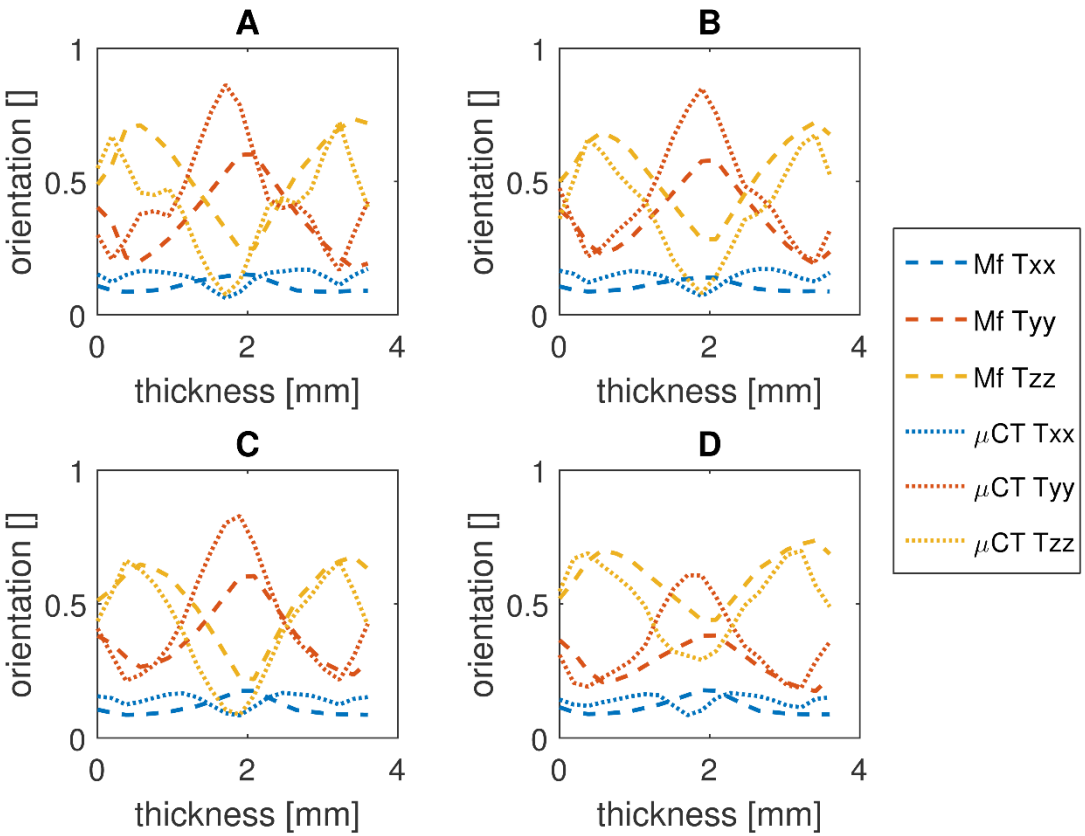


$(C_i, \kappa) = (0.0284, 0.03)$

Resultate der Prüfkörper mit dem besten Parameterpaar für κ und C_{i}

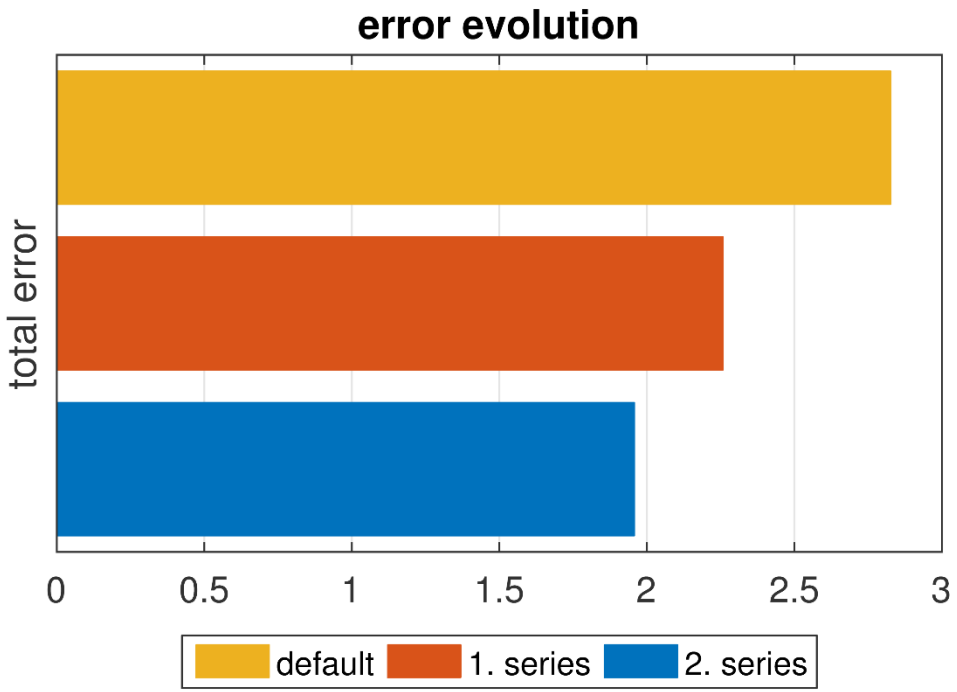


Resultate der Platte mit dem besten Parameterpaar für κ und C_{i}



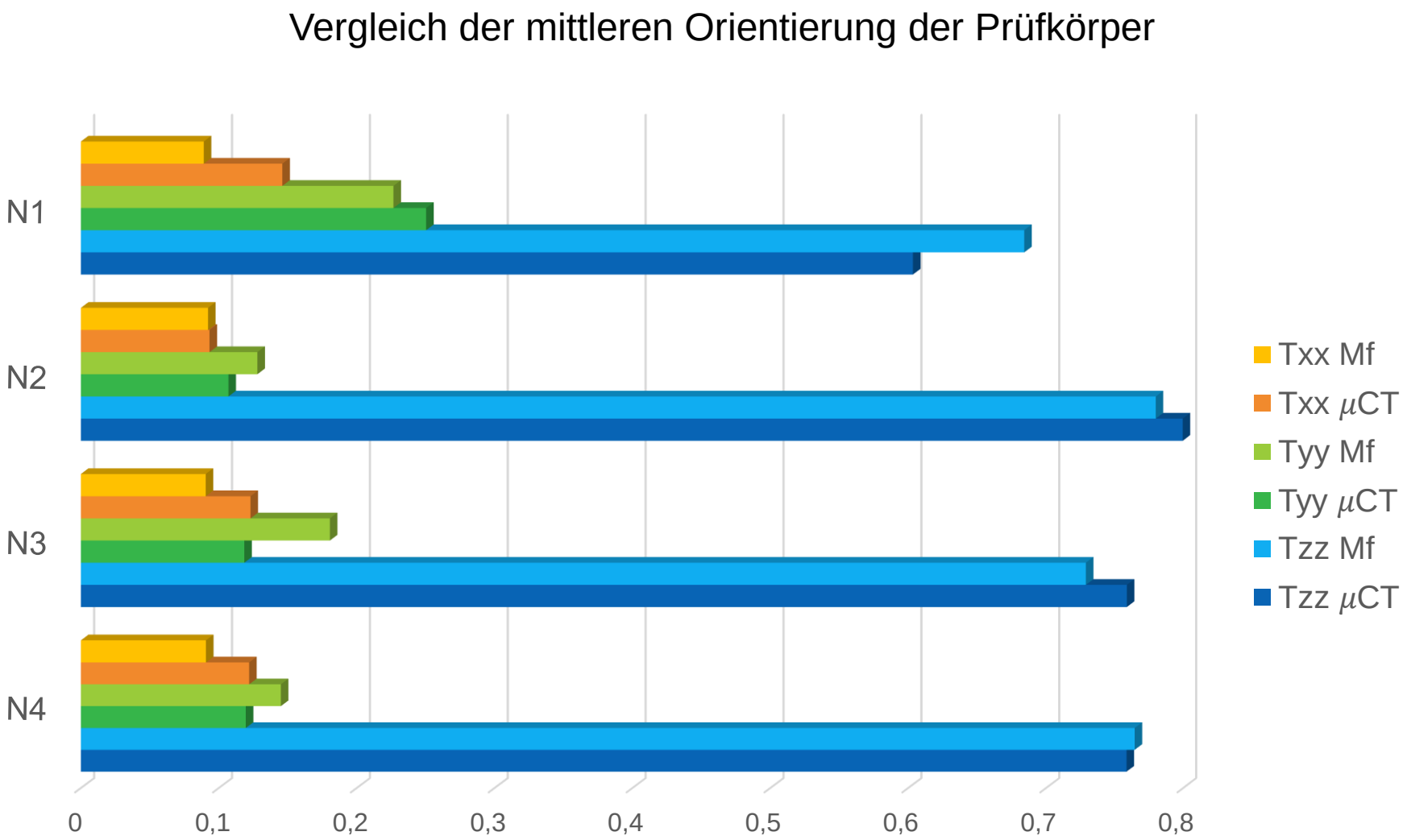
Ergebnisse
Resultate der Spritzgusssimulation

- Fehleranalyse

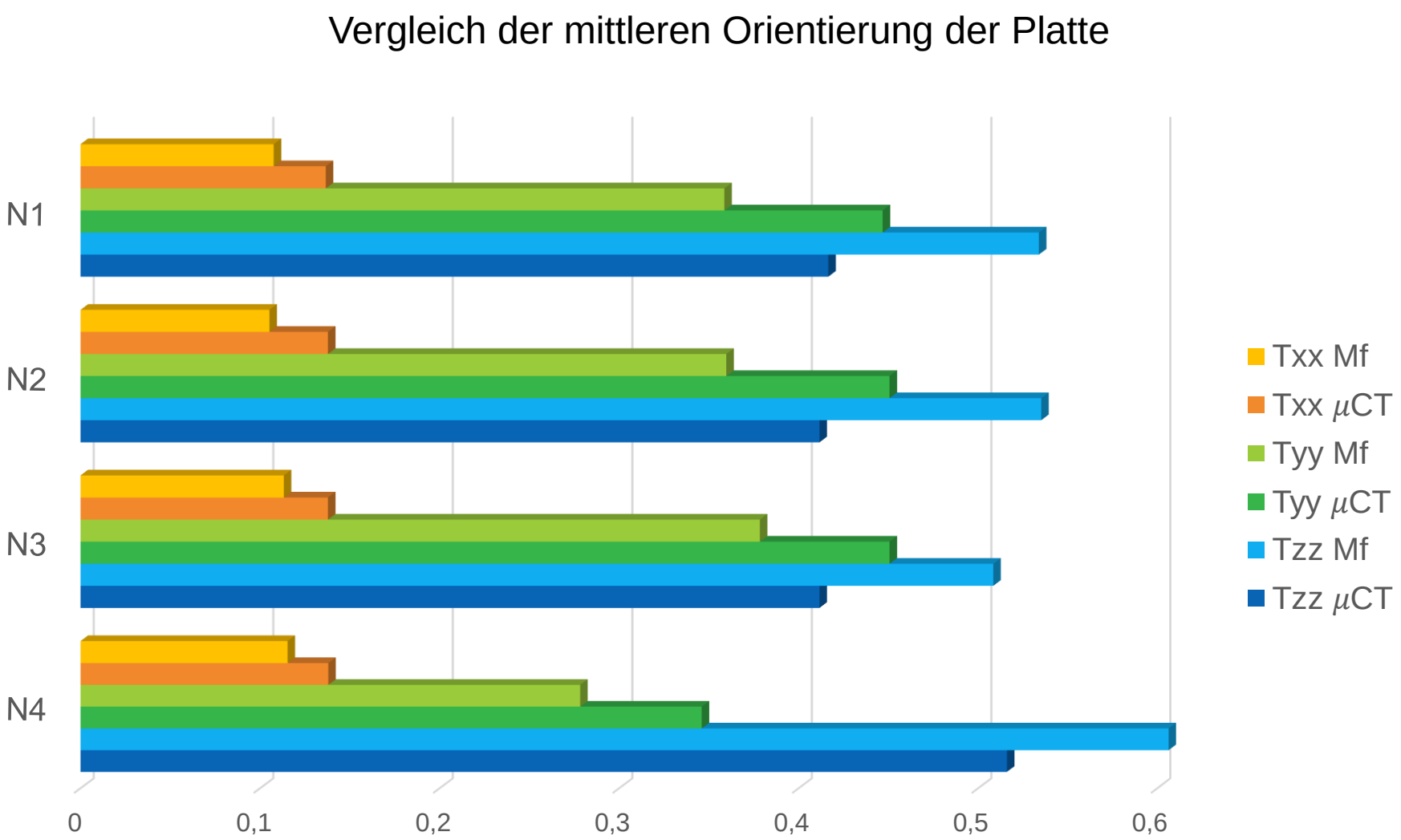


- Fehler konnte in etwa um 1/3 reduziert werden

Ergebnisse
Resultate der Spritzgusssimulation



Ergebnisse
Resultate der Spritzgusssimulation



Zusammenfassung

- Wie gut die simulierten mit den gemessenen Daten übereinstimmen hängt stark von der Wahl der Parameter des RSC-Modells ab.

- Der optimale Parameterbereich für κ bei einer stark ausgeprägten Orientierung in Fließrichtung liegt bei nahezu 1, was zur Degeneration des RSC-Modells zum Folgar-Tucker-Modell führt.

- Der optimale Bereich von κ für die beiden unterschiedlichen Bauteile liegt weit auseinander.

- Gradientenverfahren zur genaueren Bestimmung von (κ, C_{i})

- Teils gute Übereinstimmung bei den mittleren Orientierungen

Danksagung

Die vorliegende Forschungsarbeit wurde an der Polymer Competence Center Leoben GmbH im Rahmen des Kompetenzzentren-Programms COMET des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie und des Bundesministeriums für Wirtschaft, Familie und Jugend unter Beteiligung der Montan Universität Leoben und der HILTI AG und der Hirtenberger Automotive Safety AG durchgeführt und mit Mitteln des Bundes und der Länder Steiermark, Niederösterreich und Oberösterreich gefördert.