

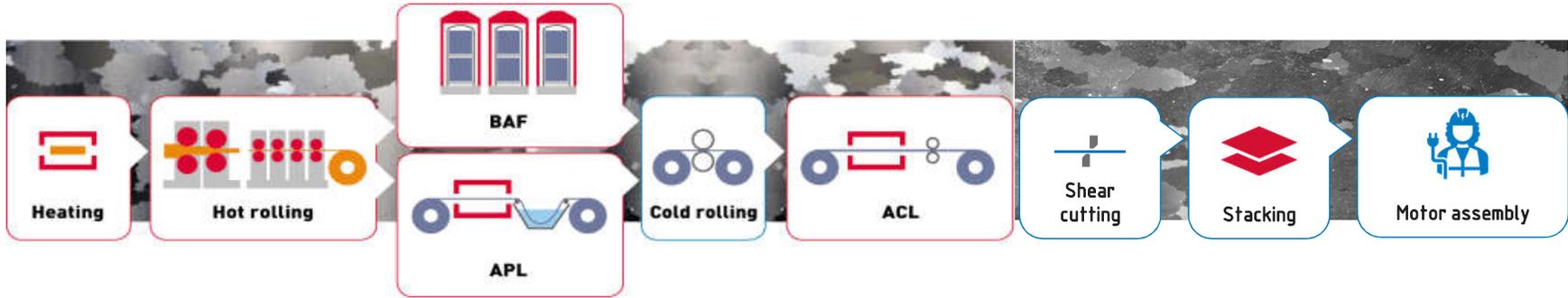
REKRISTALLISATIONS- MODELL

**FÜR DIE WÄRMEBEHANDLUNG
VON NICHT-KORNORIENTIERTEM
(NGO) ELEKTROBLECH**

Dr.- Ing. Christian Wuppermann
Head of R&D and Process Engineering

Herstellung von NGO Elektroblech

EINLEITUNG



Annealing and Coating Line (ACL)

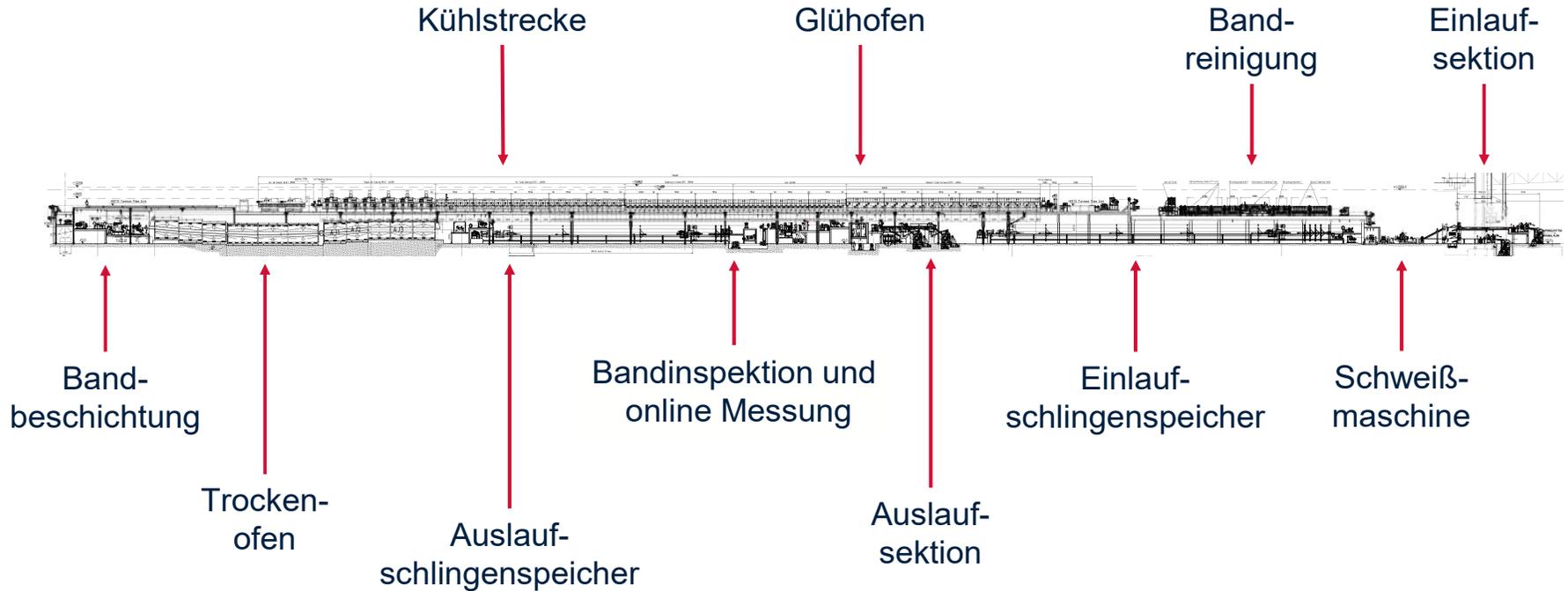


Elektromotor Quelle: Carpenter Technology



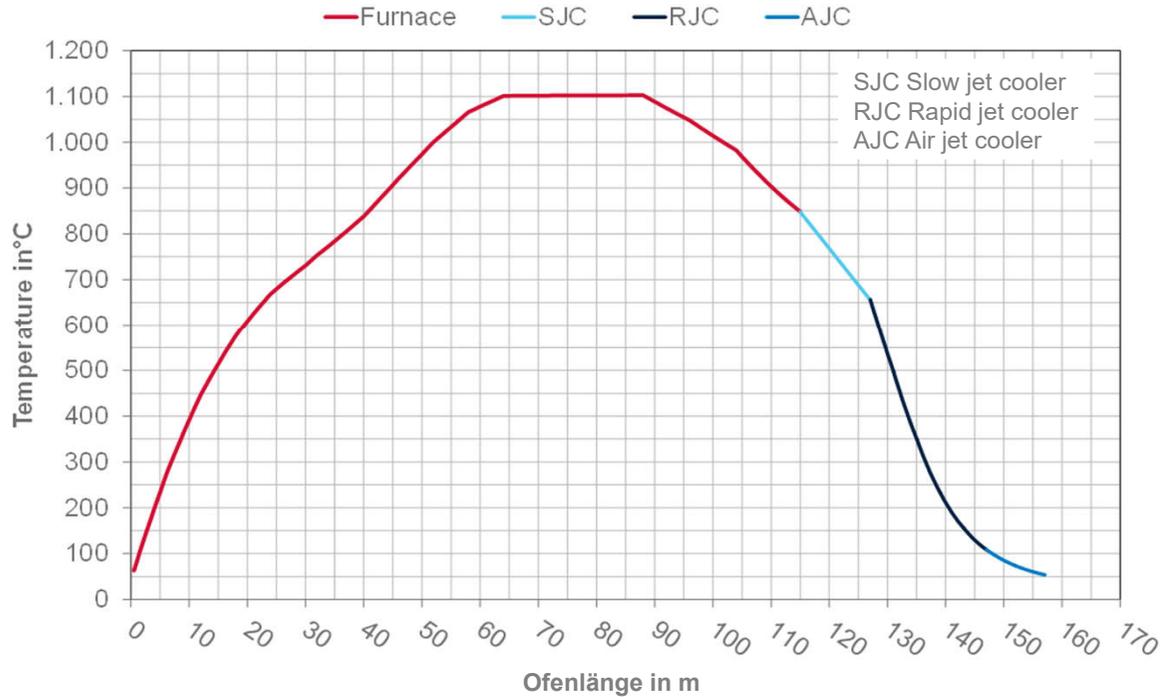
Annealing and Coating Line (ACL)

EINLEITUNG

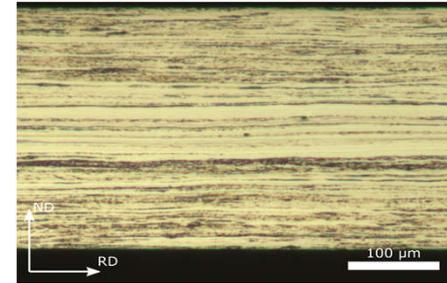


Typischer Wärmebehandlungszyklus

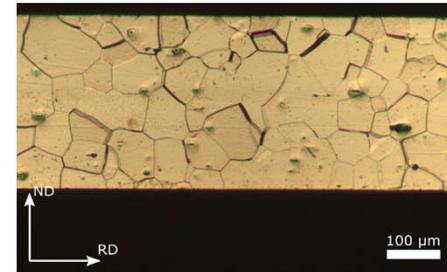
EINLEITUNG



Kaltgewalzt



Geglüht



EINLEITUNG

- Zur Herstellung effizienter Elektromotoren werden spezielle Elektroblechgüten benötigt. Deren Eigenschaften müssen **hinsichtlich der Nutzung in Elektroaustos optimiert werden**, z.B. für den Einsatz bei hohen Frequenzen
- Optimale Glühparameter
 - Laborversuche (hoher Zeitaufwand)
 - Betriebsversuche (hoher Zeit- und Kostenaufwand)
- Mithilfe eines mathematisches ReX-Modells **kann der Entwicklungsaufwand verringert werden**
 - **Verringerter Zeit- und Kostenaufwand**
 - **Höhere Flexibilität**
 - **Erhöhung des Prozessverständnisses**
- Das Modell kann als on-line Werkstoffmodell eingesetzt werden
 - **Heilung von Defekten** aus den Vorprozessen
 - **Erhöhung der Ausbringung → Weniger abgewertetes Material**

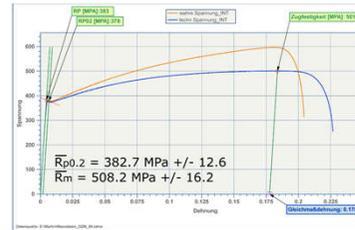
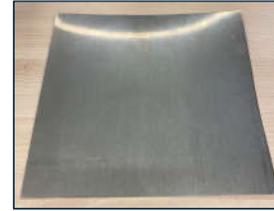
Modellentwicklung

EINLEITUNG

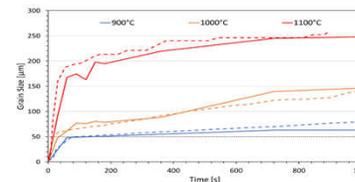
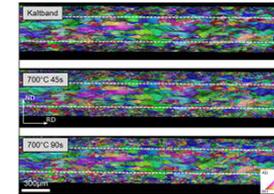
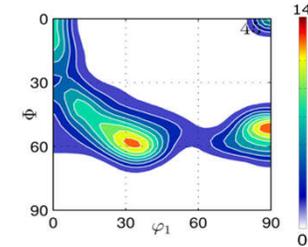


Sensitivitätsanalyse und Optimierung

Zeit / Aufwand / Kosten



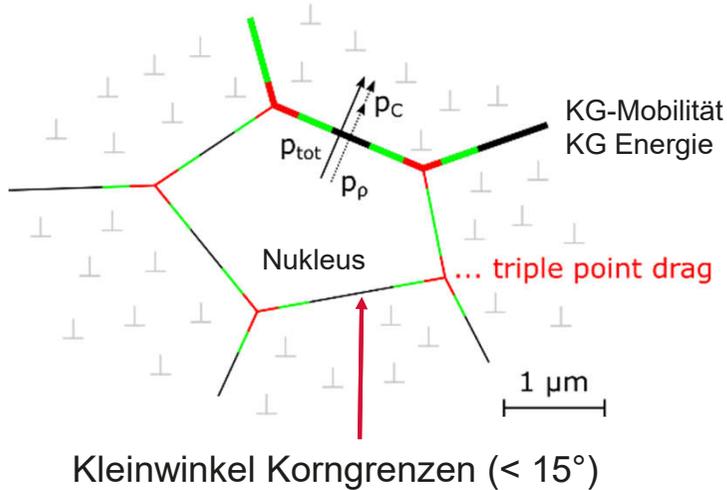
Einflussfaktor	BK Start	BK-Kinetik*	BK-Bauelement	3D µm	Kornwachstum	Kommentar
NucleDensity	-	-	-	-	-	-
NucleSize	-	-	-	-	-	Wenn NucleSize zu nahe an MaxSize kommt zu Anomalien
QuantifSize	-	-	-	-	-	Wenn QuantifSize zu nahe an MaxSize kommt zu Anomalien
SubGrainStart	-	-	-	-	-	
SubGrainSize	-	-	-	-	-	
Layer	-	-	-	-	-	Selbstverständlich gering
GrainGrowth	-	-	-	-	-	Kornwachstumsgeschwindigkeit
MSD_Energy	-	-	-	-	-	
MSD_Mobility	-	-	-	-	-	Etwas großer Einfluss, daher Bestimmung essenziell!
TimeConstantDip	-	-	-	-	-	
NOPEMS	-	-	-	-	-	Performancebewertung siehe Paper Massen



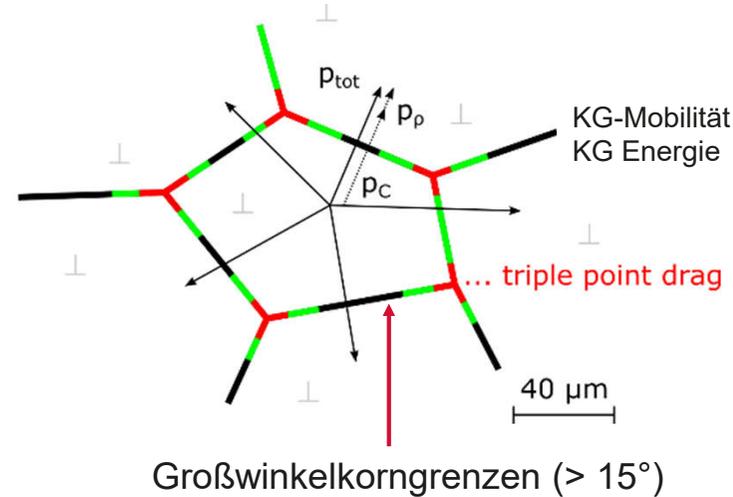
Modellprinzip

DAS NUMERISCHE MODELL

a) Start der Wärmebehandlung - Rekristallisation



b) Fortschreitende Wärmebehandlung - Kornwachstum



Treibende Kräfte

p_{tot}	Gesamtkraft
p_p	Gespeicherte elastische Energie
p_c	Treibende Kraft auf Basis des Krümmungsradius der Korngrenze

Eigenschaften der Korngrenzen

KG-Mobilität
KG-Energie

Rücktreibende Kräfte

Tripel-Punkte
Ausscheidungen

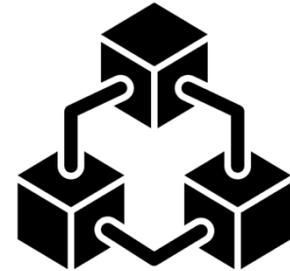
Ziel der Modellentwicklung

DAS NUMERISCHE MODELL

Nutzung von

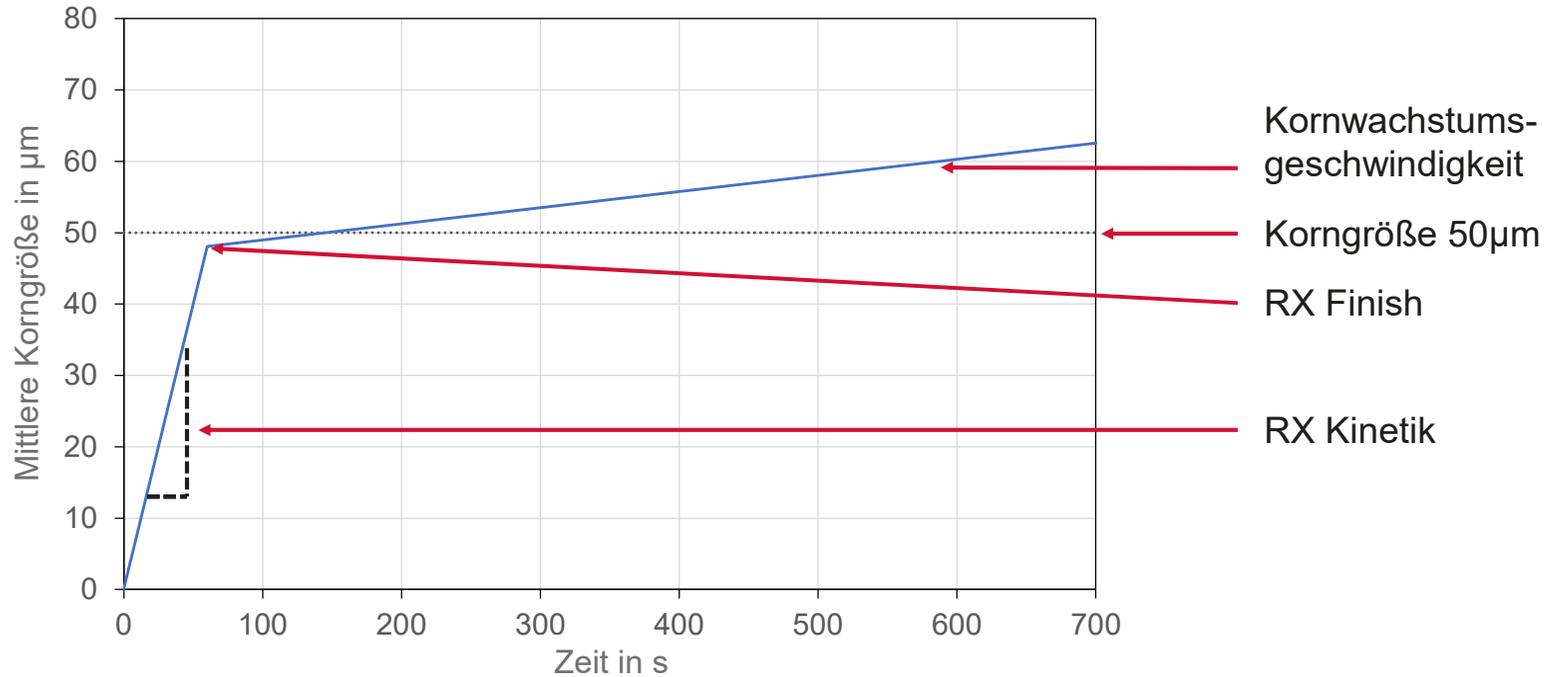
- I. so vielen physikalischen Modellparametern und
- II. so wenig empirisch ermittelten Modellparametern wie möglich

→ Optimierung der Vorhersagekraft des Modells für verschiedene Werkstoffe und Startbedingungen



Parameter für die Validierung des Modells

DAS NUMERISCHE MODELL



Sensitivitätsanalyse der Modellparameter

DAS NUMERISCHE MODELL

Parameter ↑	RX-Start	RX-Kinetic*	RX-Finish**	50 µm***	Kornwachstum*
Keimdichte	+	~	+	-	~/+
NucleiSEE****	~	~	~	~	~
Versetzungsdichte (qualitativ)	-	~	-	+	~
Versetzungsdichte (quantitativ)	+	+	+	-	-
SubgrainScatter	~	~	~	~	~
Subkorngröße	~	~	-	+	~
SheetLayer	~	~	~	~	~
Kornform	~	~	~	~	~
Korngrenzenenergie	~	~	~	+	+
Korngrenzenmobilität	++	++	-	++	++
TriplePointDrag	~	~	~	+	++
NrOfPPG	~/-	~/-	~	-	-

Legende:

Messung
Literatur
Empirisch

*Steigung

** Änderung der Steigung (+ in Richtung kleiner Körner) –
Größere Korndurchmesser haben hier wahrscheinlich einen
positiven Einfluss, da dann größere Korngrößen schneller
erreicht werden.

*** Bemerkung – Die Rekristallisation ist wahrscheinlich
schon bei Korngrößen zwischen 20 und 50 µm beendet.

**** SEE: Stored elastic energy

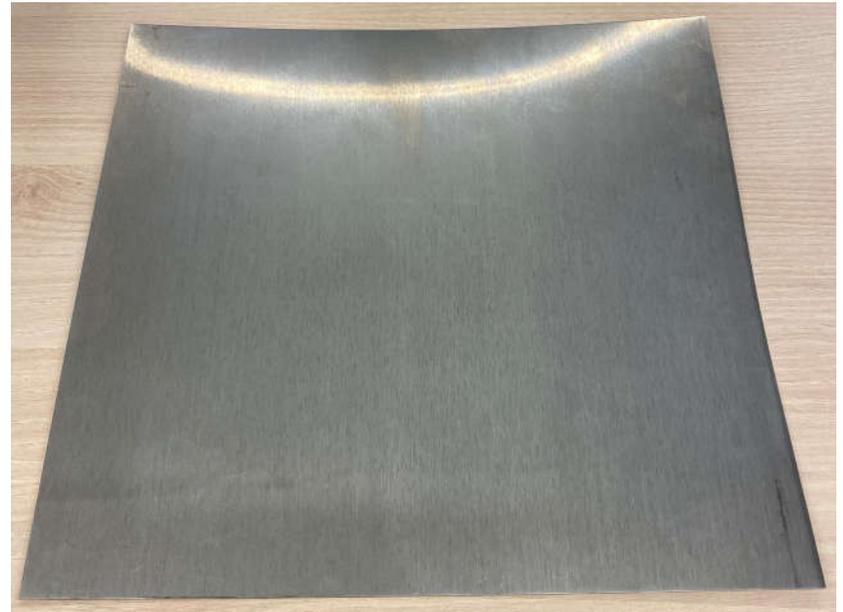
PROBENMATERIAL

Nicht kornorientiertes Elektroblech

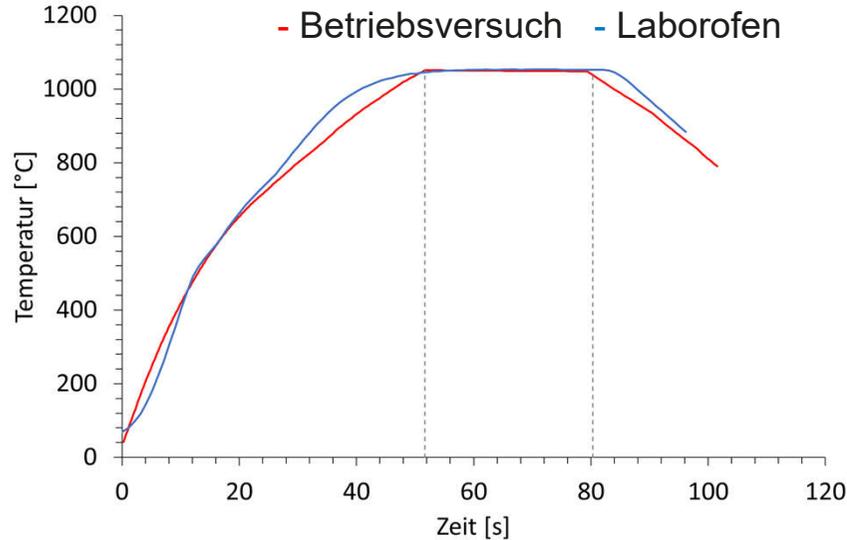
Chemische Zusammensetzung: ~2,7%Si, ~0,7%Al, <0,2%Mn

Blechdicke nach dem Kaltwalzen: 0,35 mm

Probenzustand:
a) Kaltgewalzt
b) Geglüht



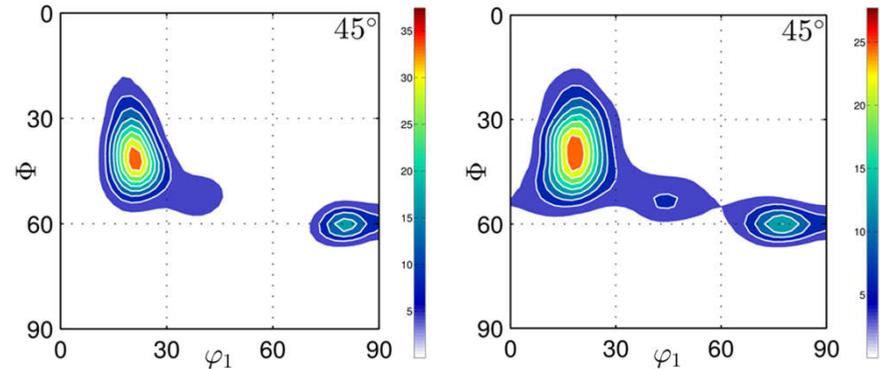
LABORVERSUCHE



Textur

a) Betriebsversuch

b) Laborofen



Korngröße und Oberflächenhärte

	Betr.-Vers.	Labor
KG(avg.) in μm	77.6 ± 46.5	71.4 ± 43.4
$HV_{0.2/15}$	207.0 ± 5.1	207.3 ± 5.9

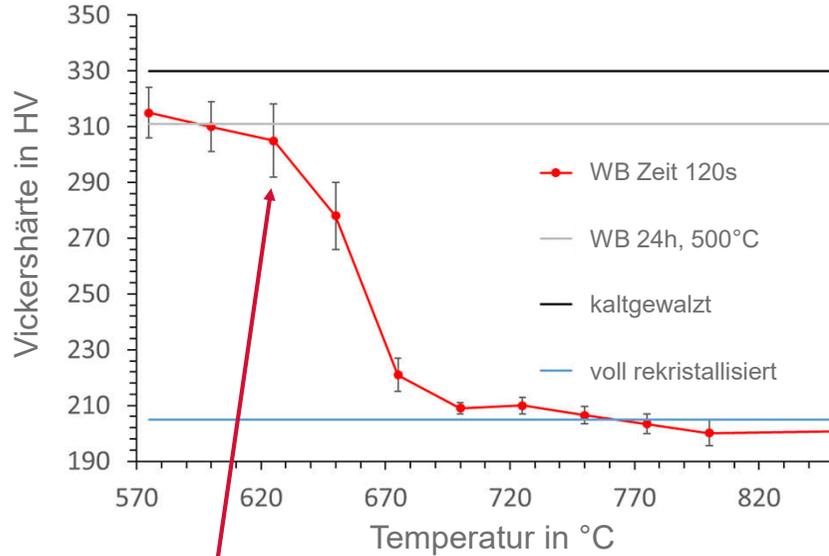
Testmatrix für ReX-Versuche im Laborofen

LABORVERSUCHE

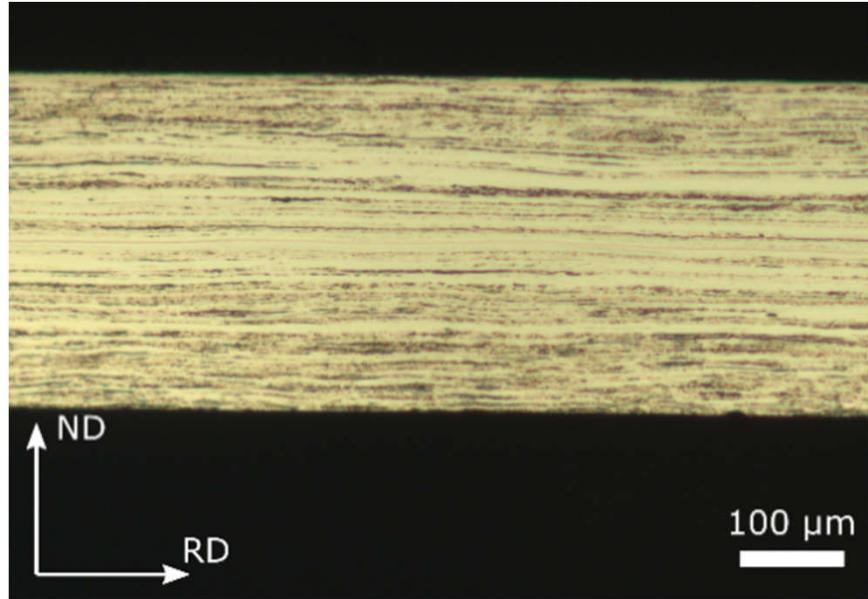
Temperatur	Wärmebehandlungszeiten										
500 °C											24 h
575 °C				120 s							
600 °C	30 s	60 s	90 s	120 s	150 s	180 s	360 s	720 s	3600 s		
625 °C				120 s							
650 °C				120 s							
675 °C				120 s							
700 °C	30 s	60 s	90 s	120 s	150 s	180 s	360 s	720 s	3600 s		
725 °C				120 s							
750 °C				120 s							
775 °C				120 s							
800 °C	30 s	60 s	90 s	120 s	150 s	180 s	360 s	720 s	3600 s		
900 °C		60 s						720 s	3600 s		
1000 °C	30 s	60 s	90 s	120 s	150 s	180 s	360 s	720 s	3600 s		
1100 °C	30 s	60 s	90 s	120 s	150 s	180 s	360 s	720 s	3600 s		
<i>fett = isochron; grau = Referenzzyklen; normal = isotherm.</i>											

Ergebnisse der isochronen Versuchsreihe

LABORVERSUCHE



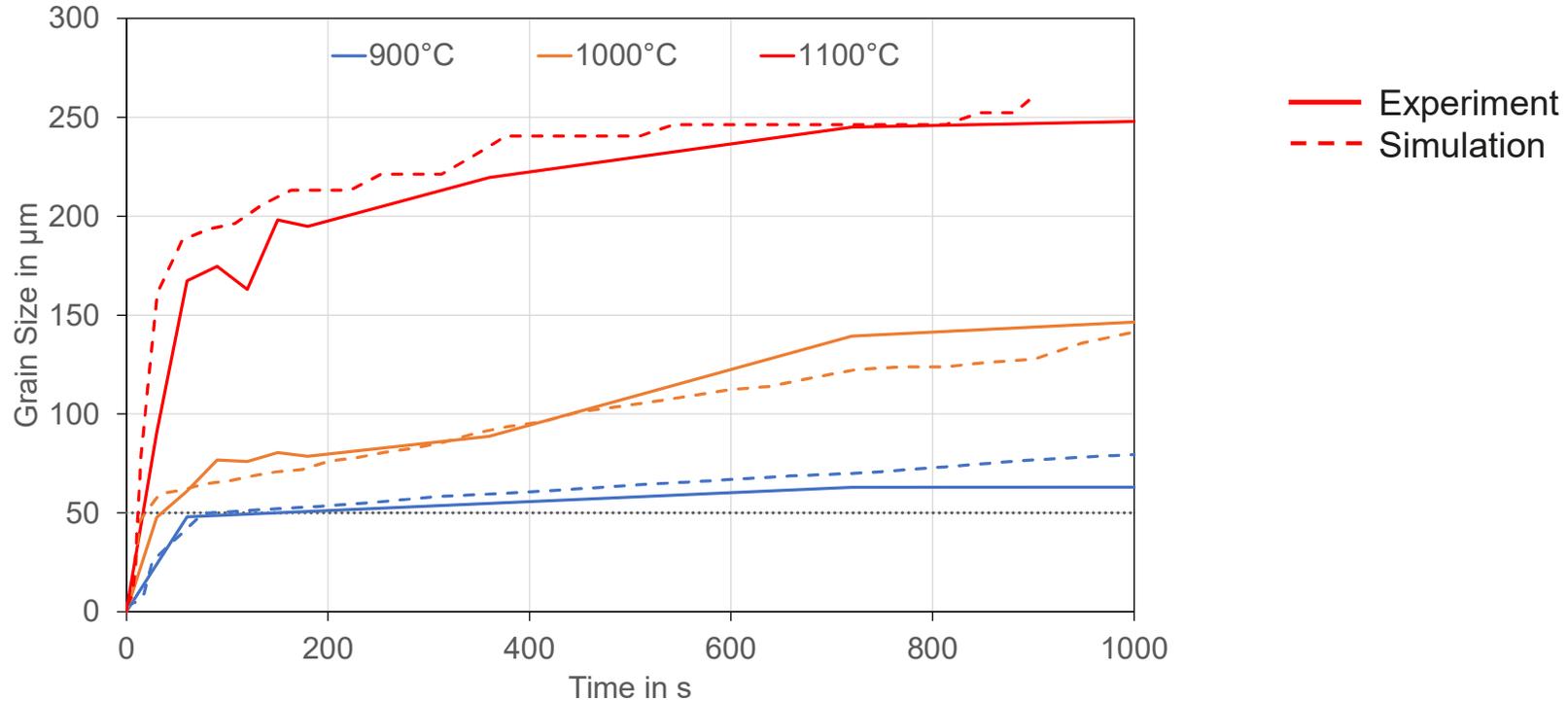
Definition der RX-Start-Temperatur



Schliffbild der Referenzprobe:
Geglüht bei 500 °C für 24h,
→ keine Rekristallisation, reine Erholung

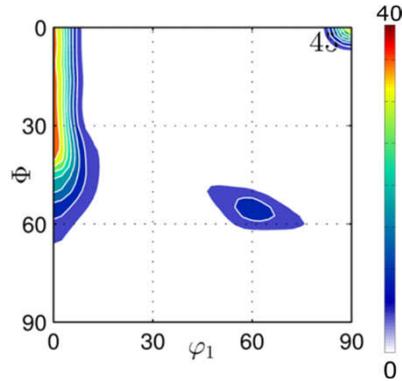
Kornwachstum (isothermen Versuchsreihen)

VALIDIERUNG DES NUMERISCHEN MODELLS

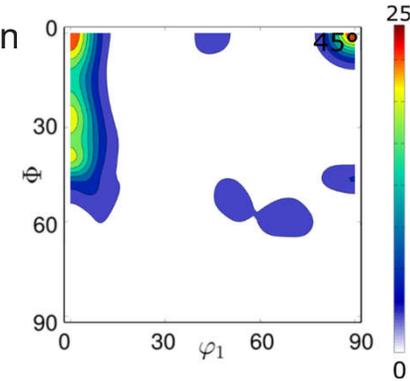


VALIDIERUNG DES NUMERISCHEN MODELLS

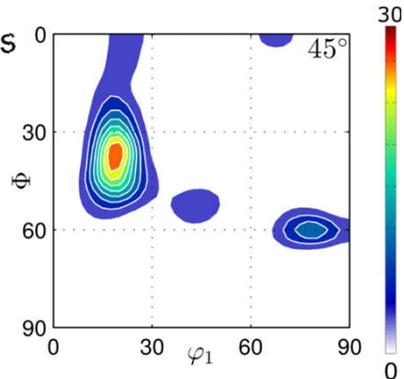
Probenmaterial
→ kaltgewalzt



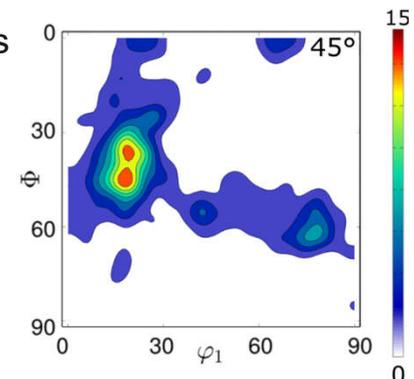
Start-Texture Simulation
→ kaltgewalzt



Laborversuch 1000°C 120s
→ voll rekristallisiert



Simulation 1000°C 120s
→ voll rekristallisiert



ZUSAMMENFASSUNG

- Die maßgeblichen **Modellparameter**, die die RX beeinflussen, wurden in einer **Sensitivitätsanalyse** durch Materialcharakterisierung, Labortests und eine ausführliche Literaturrecherche ermittelt.
- Die **Übereinstimmung** zwischen experimentellem und der berechneten primärem RX, Kornwachstumskinetik und Texturentwicklung ausgehend vom kaltgewalzten Zustand ist **sehr gut**.
- Die Ergebnisse zeigen, dass das **numerische Modell** als effizientes, physikalisch basiertes Werkzeug zur Simulation von Glühphänomenen in NGO ES verwendet werden kann.
- Das Modell hat das **Potenzial**, bestehende empirische Modelle zu ersetzen.
- Das Modell kann als **Auslegungswerkzeug** verwendet werden, um Glühzyklen für bestehende und neue NRO-ES-Sorten zu definieren
- Die **Rechenzeit** liegt in der Größenordnung von Stunden. Dies macht den Einsatz des Modells als Echtzeit-Materialmodell in einem vollkontinuierlichen Glühprozess derzeit nahezu unmöglich.
- Ein **zukünftiges Ziel** ist die Vereinfachung des Modells. In Kombination mit erhöhter Rechenleistung könnte das Modell als Echtzeitmodell in einer kontinuierlichen Glühstrecke eingesetzt werden.



VIELEN DANK

LOI Thermprocess GmbH
Schifferstrasse 80
47059 Duisburg - Germany

Tel. 0203 80398-900
Fax 0203 80398-901
loi@tenova.com

www.loi.tenova.com

TECHINT GROUP

christian.wuppermann@tenova.com



Digital Business Card

