

41st ICFG Plenary Meeting, Warschau, Poland, 15.09.2008
Subgroup on simulation

Importance of the yield stress –strain curves

Report from a project by the GCFG and the IMU on „how to
make yield stress – strain curves properly“

G. H. Arfmann, M. Twickler*)

*) G. H. Arfmann and M. Twickler are joint managing director of CPM GmbH, Germany

Projektauslösende Problemstellung

Umformsimulationen im Bereich der Schmiedetechnik mit den Zielgrößen

- Geometrie und Materialfluss
- Spannungen und Werkzeugbeanspruchung
- Gefüge

⇒ **Anforderungen an die Materialdaten (Fließkurven, etc.)**

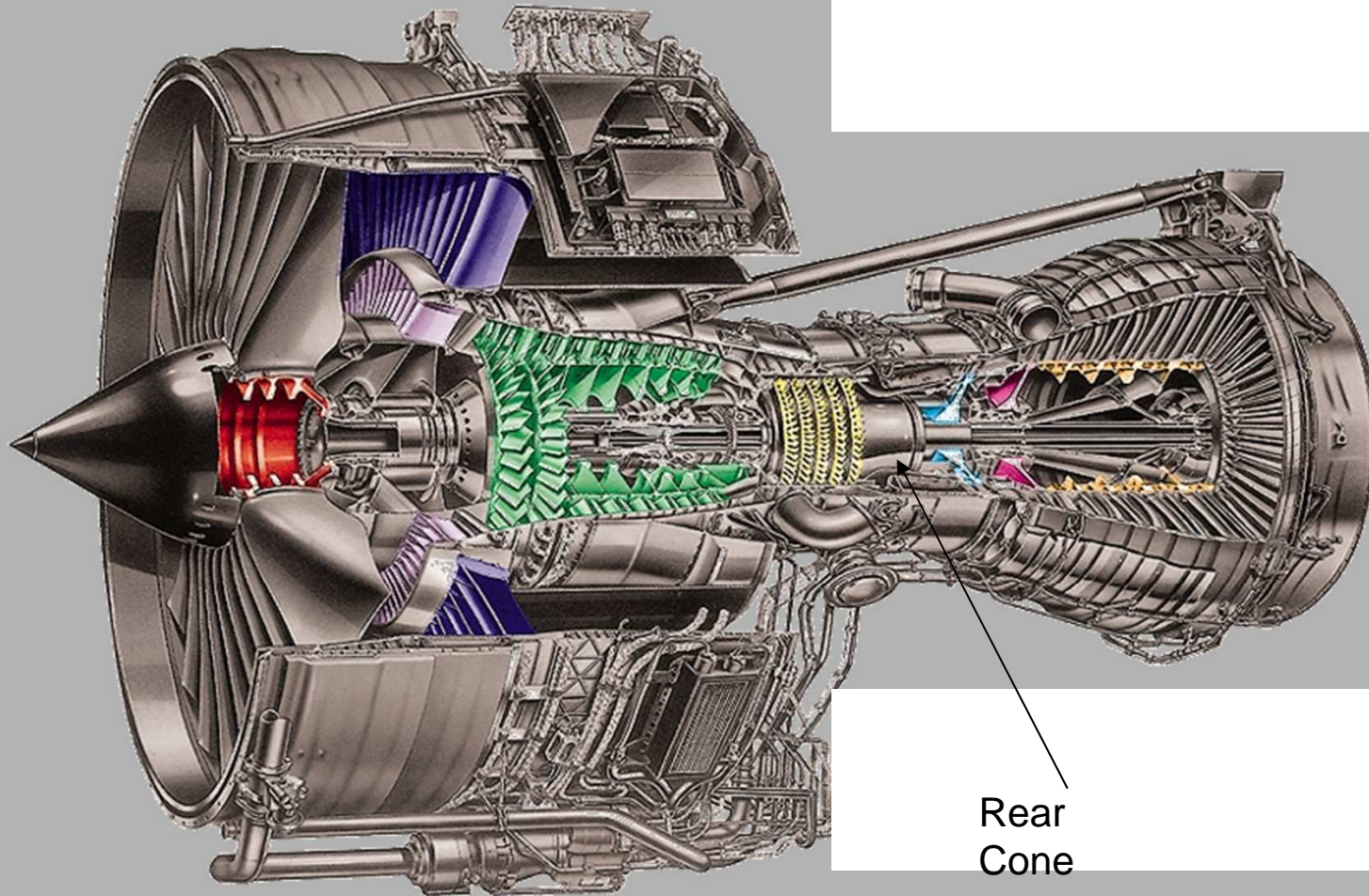
- Vollständigkeit der Daten
- verlässliche Ermittlungsmethode
- genaue und reproduzierbare Messungen

⇒ **Notwendigkeit der Formulierung von Anforderungen an**

- die Ermittlungsmethode
- die notwendige Maschinenausstattung
- die Messtechnik
- die Dokumentation
- etc.

⇒ **Erstellung einer Richtlinie zur Aufnahme von Fließkurven**

Schnitt durch ein Flugtriebwerk

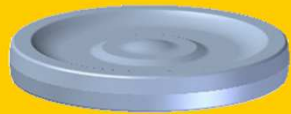


© Peter Janschek, Leitritz Turbinenbau GmbH, Remscheid, Germany

15. September 2008

ICFG Warschau

Fertigungsfolge für Turbinenscheiben



Schmiede
n

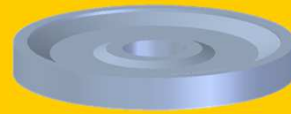
Anlage

- Hydraulische Presse 50 MN
- Gegenschlaghammer 630kJ



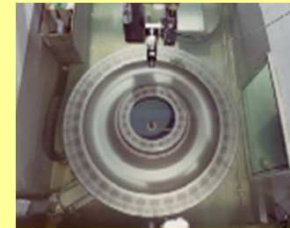
Wärme-
behandlun
g

- Automatische Wbh-Anlage mit Öl-Abschreckbecken
- Drehherdöfen



Drehen auf
Ultraschall-
Prüfkontur

- universal CNC Drehmaschine



Ultraschall-
prüfung

- Krautkrämer USP 1200
- Krautkrämer UPR-7

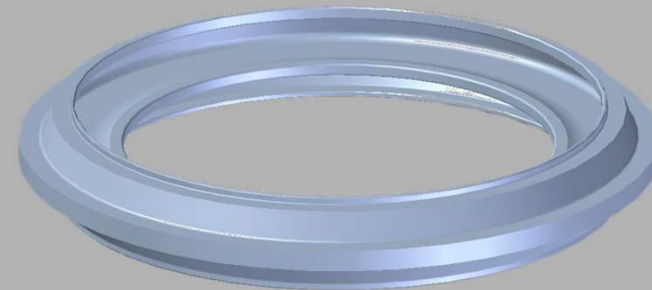
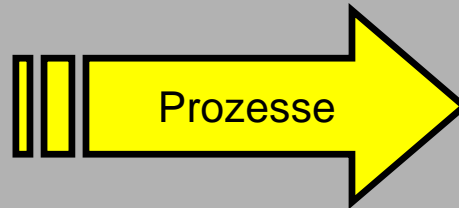


Rißprüfung

- Farbeindringstoffprüfung

© Peter Janschek, Leitritz Turbinenbau GmbH, Remscheid, Germany

Fertigung von der Stange zur Scheibe



© Peter Janschek, Leitritz Turbinenbau GmbH, Remscheid, Germany

15. September 2008

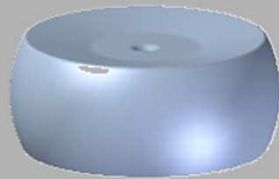
ICFG Warschau

Scheiben-Fertigungsprozess iso-iso (2mal Isotherm-Pressen)

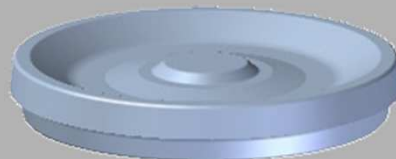
Prozess



Billet



Pancake



Fertig-
schmiede

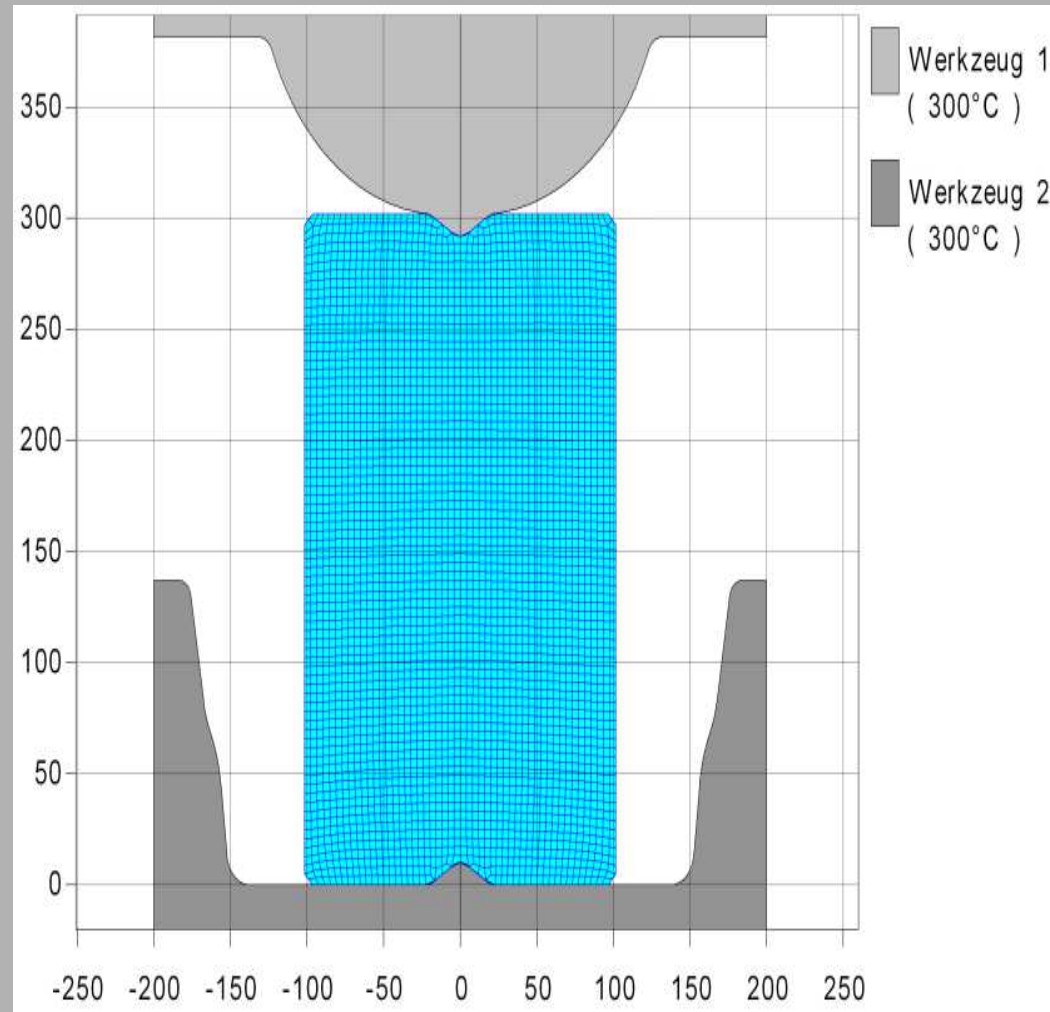
n

Produkte

- BR 710/715 HPC Stages 4-6
- BR 710 HPT Stages 1+2
- EJ 200 Cover plate + HPT



Prozessauslegung Vorschmieden

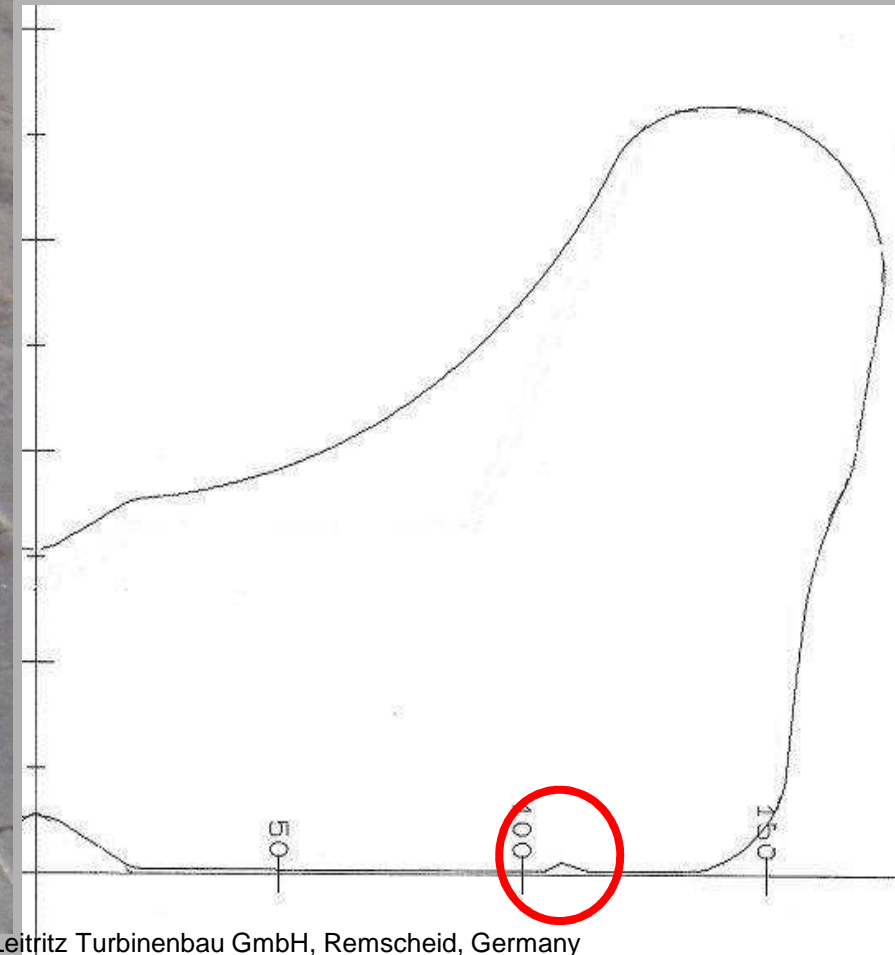
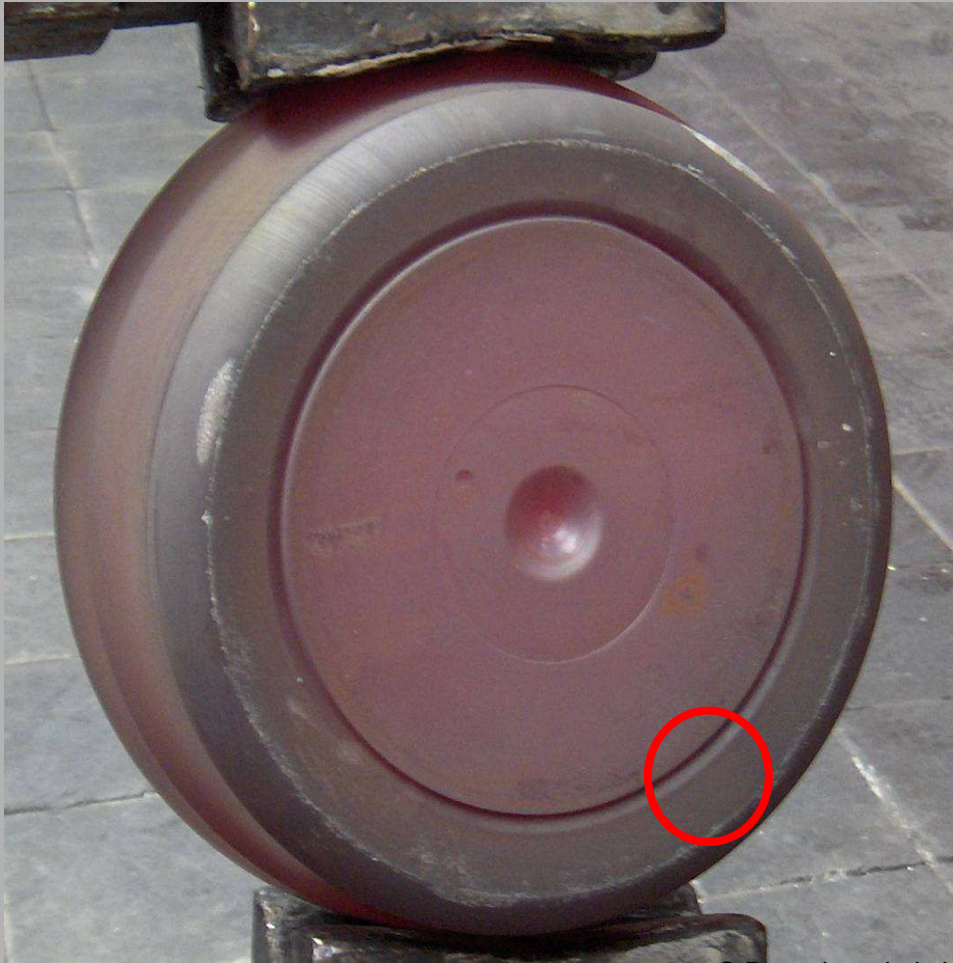


© Peter Janschek, Leitritz Turbinenbau GmbH, Remscheid, Germany

15. September 2008

ICFG Warschau

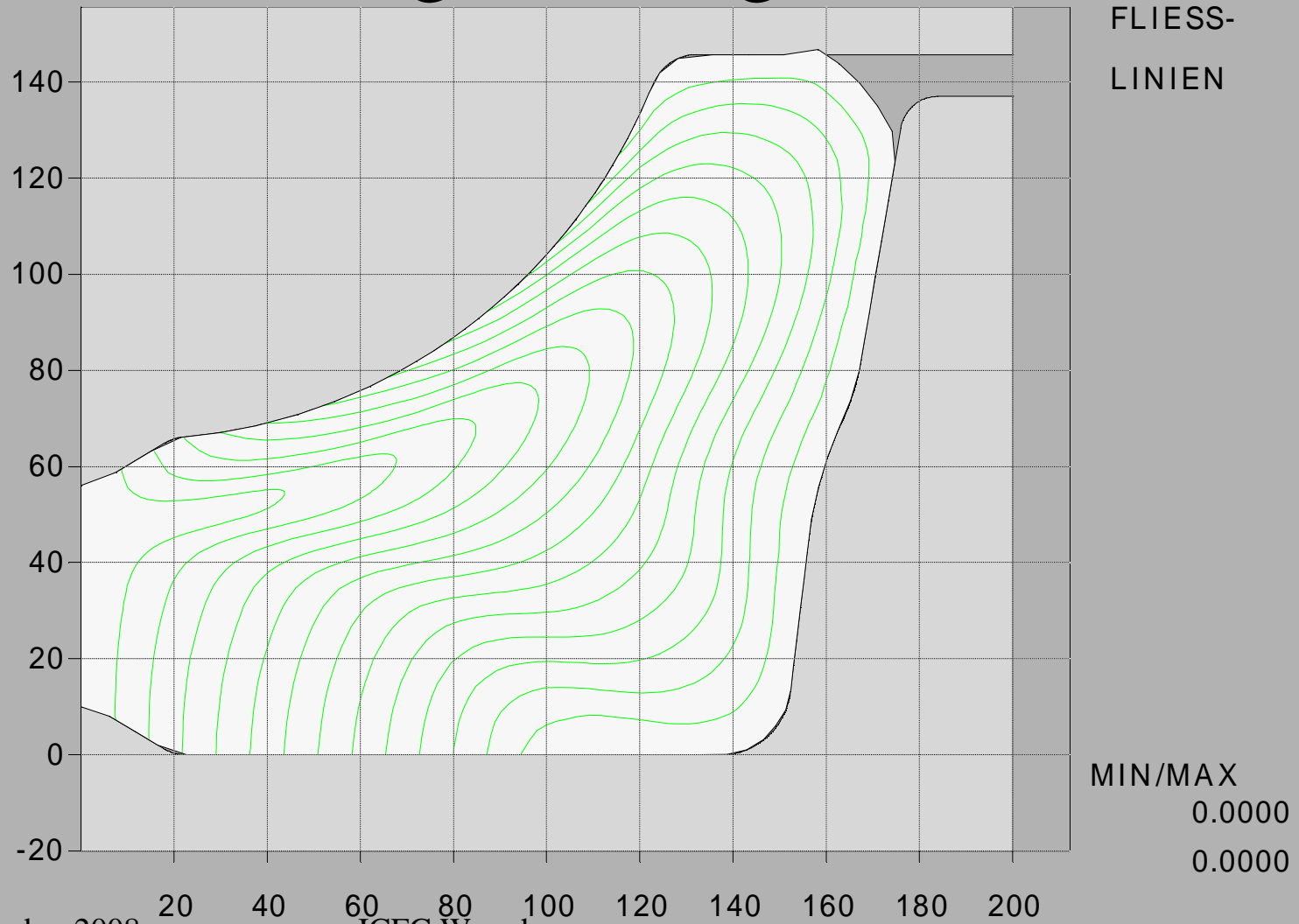
Scheibe nach dem Vorschmieden – Ringkerbe auf der Unterseite



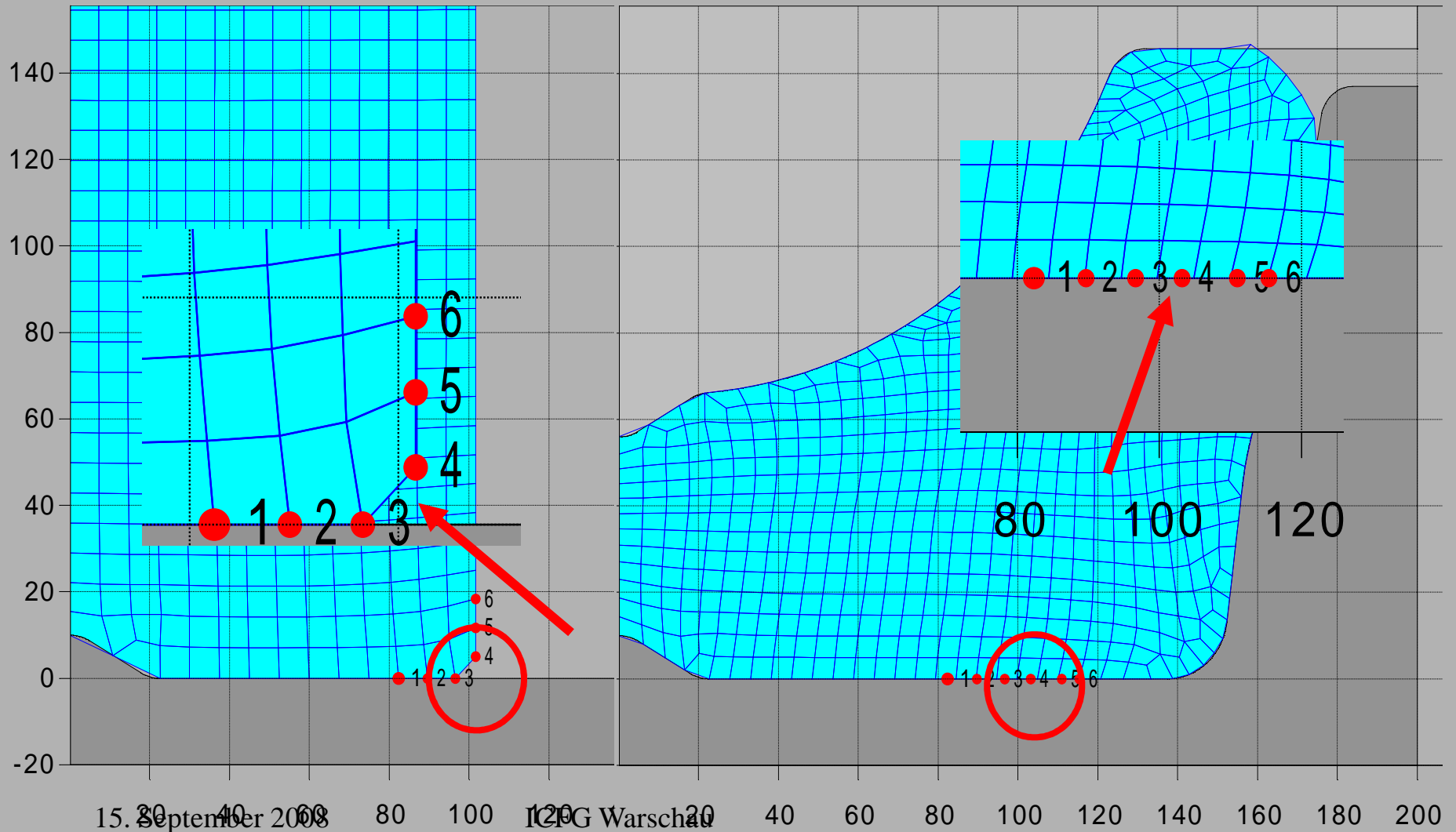
15. September 2008

© Peter Janschek, Leitritz Turbinenbau GmbH, Remscheid, Germany
ICFG Warschau

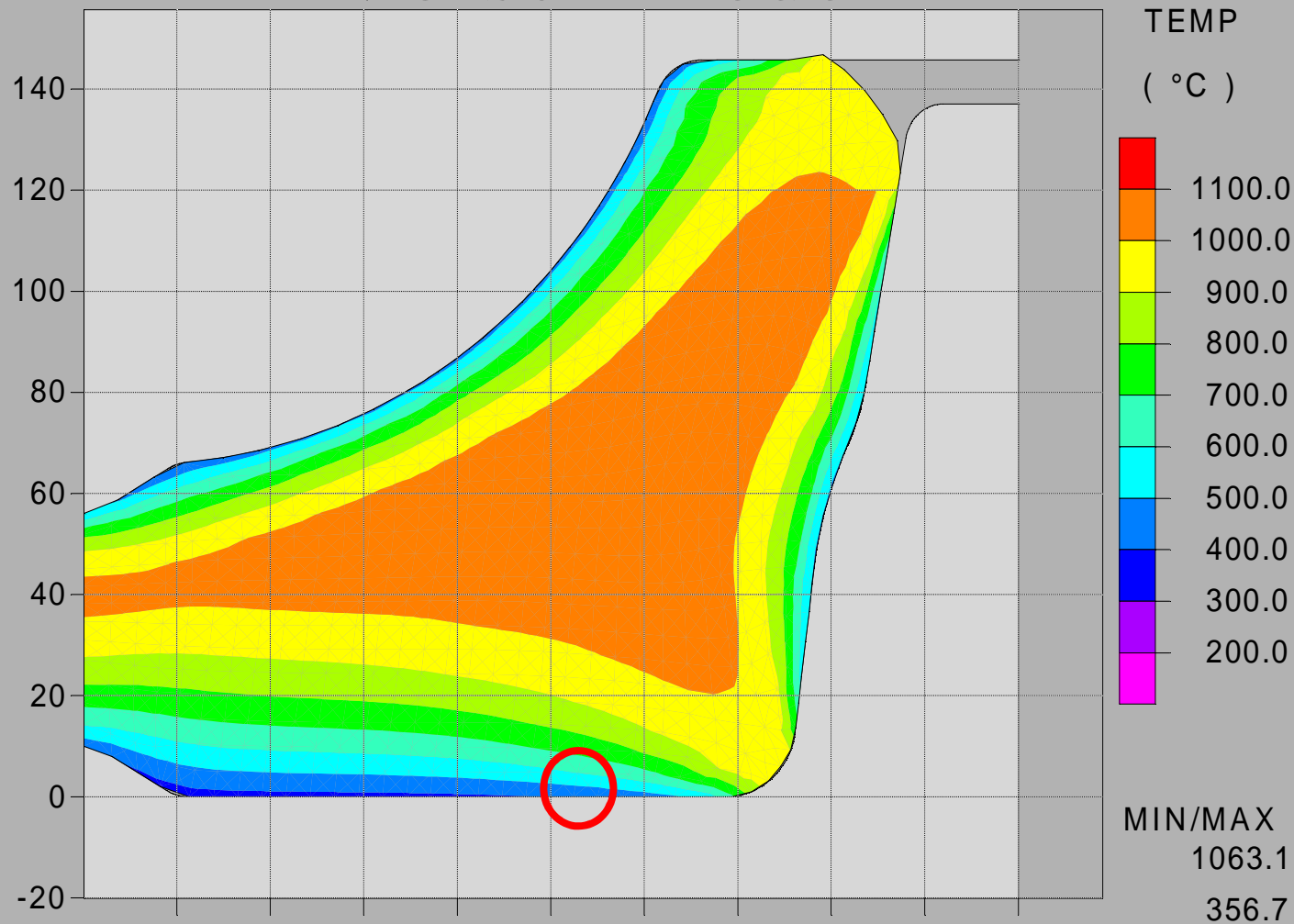
Fließlinien zeigen keine Unregelmässigkeit



Woher kommt die Kerbe?



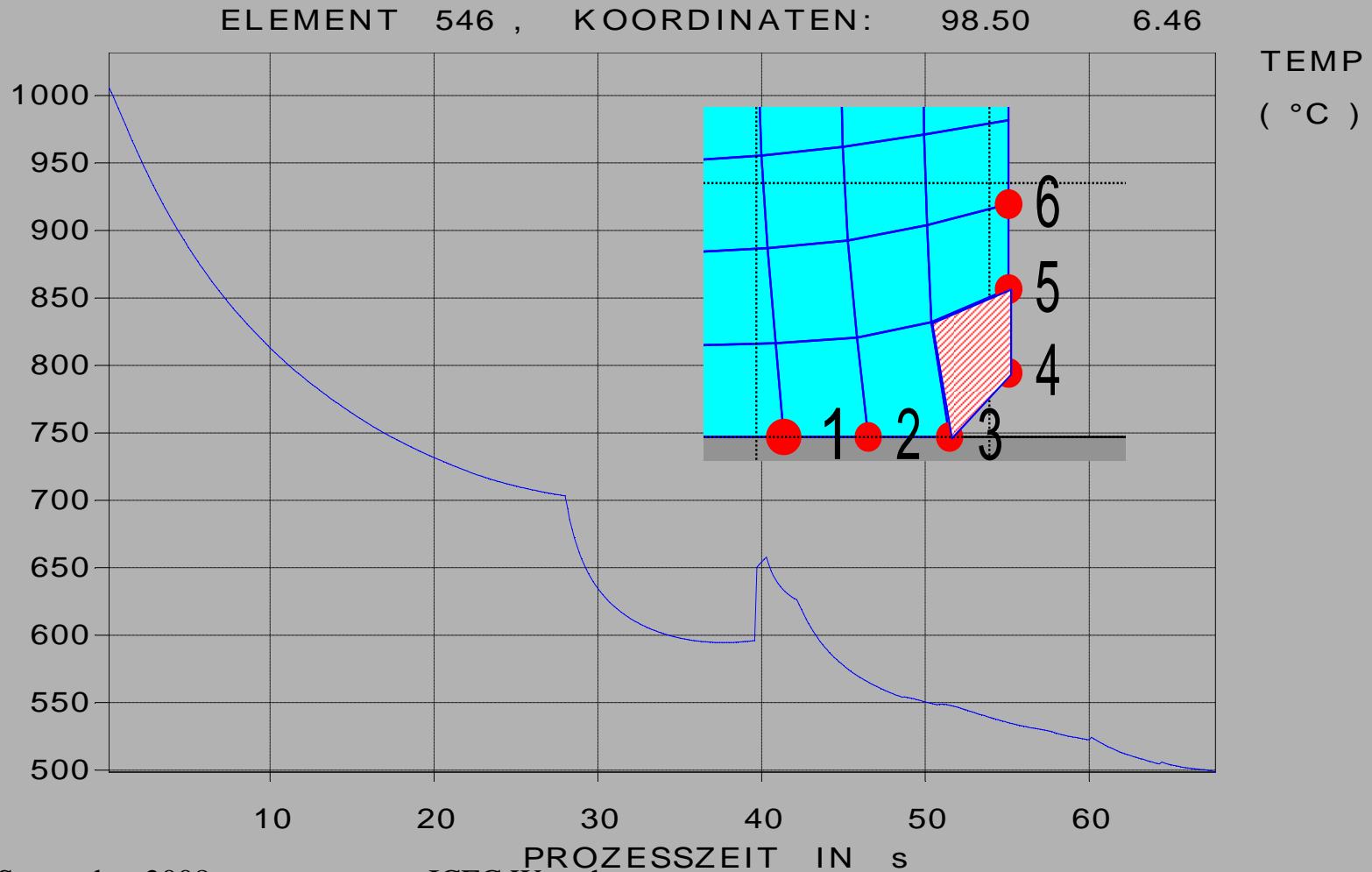
Temperaturverteilung beim Vorschmieden



15. September 2008

ICFG Warschau

Temperaturverlauf des ECKELEMENTS



15. September 2008

ICFG Warschau

© Peter Janschek, Leitritz Turbinenbau GmbH, Remscheid, Germany

Fließkurve ist nur zwischen 950 und 1070°C definiert!

Materialdaten Definition

MATERIAL: 2.4668, Inconel 718, 950-1070 [°C], 0.1-10 [1/sec], D0=ASTM 6 (c)
(max. 80 Char.)

Auswahl einer Fließkurvenbeschreibung Hensel-Spittel

0.00000	0.00000
0.00000	0.00000
0.00000	0.00000
0.00000	0.00000

Tabellarische Definition von PHI / KF

PHIPKT	0.100	1.00	10.0	0.00	0.00
Anzahl	4	5	4	0	0
Temperaturen					
Temp. 1:	950.00	950.00	950.00		
Temp. 2:	980.00	980.00	980.00		
Temp. 3:	1010.00	1010.00	1010.00		
Temp. 4:	1070.00	1040.00	1040.00		
Temp. 5:		1070.00			
Temp. 6:					

Cancel OK

15. September 2008

ICFG Warschau

© Peter Janschek, Leitritz Turbinenbau GmbH, Remscheid, Germany

Erweiterung des Temperaturbereichs

Materialdaten Definition

MATERIAL: (max. 80 Char.)

Auswahl einer Fließkurvenbeschreibung

0.00000	0.00000
0.00000	0.00000
0.00000	0.00000
0.00000	0.00000

Tabellarische Definition von PHI / KF

PHIPKT	0.100	1.00	10.0	0.00	0.00
Anzahl Temperaturen	10	5	5	0	0
Temp. 1:	316.00	900.00	900.00		
Temp. 2:	472.00	950.00	950.00		
Temp. 3:	538.00	1000.00	1000.00		
Temp. 4:	650.00	1100.00	1100.00		
Temp. 5:	760.00	1150.00	1150.00		
Temp. 6:	900.00				

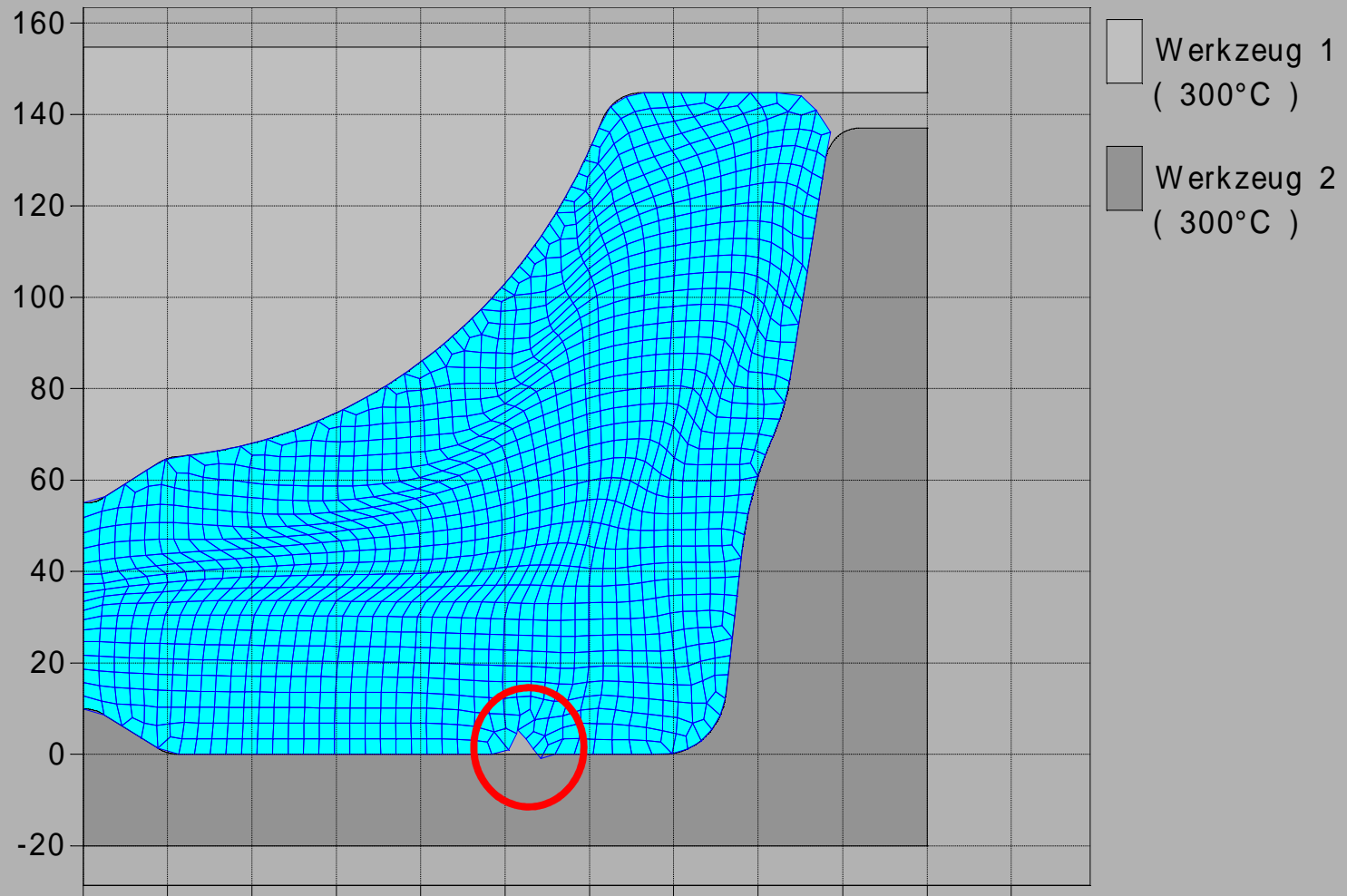
Cancel

15. September 2008

ICFG Warschau

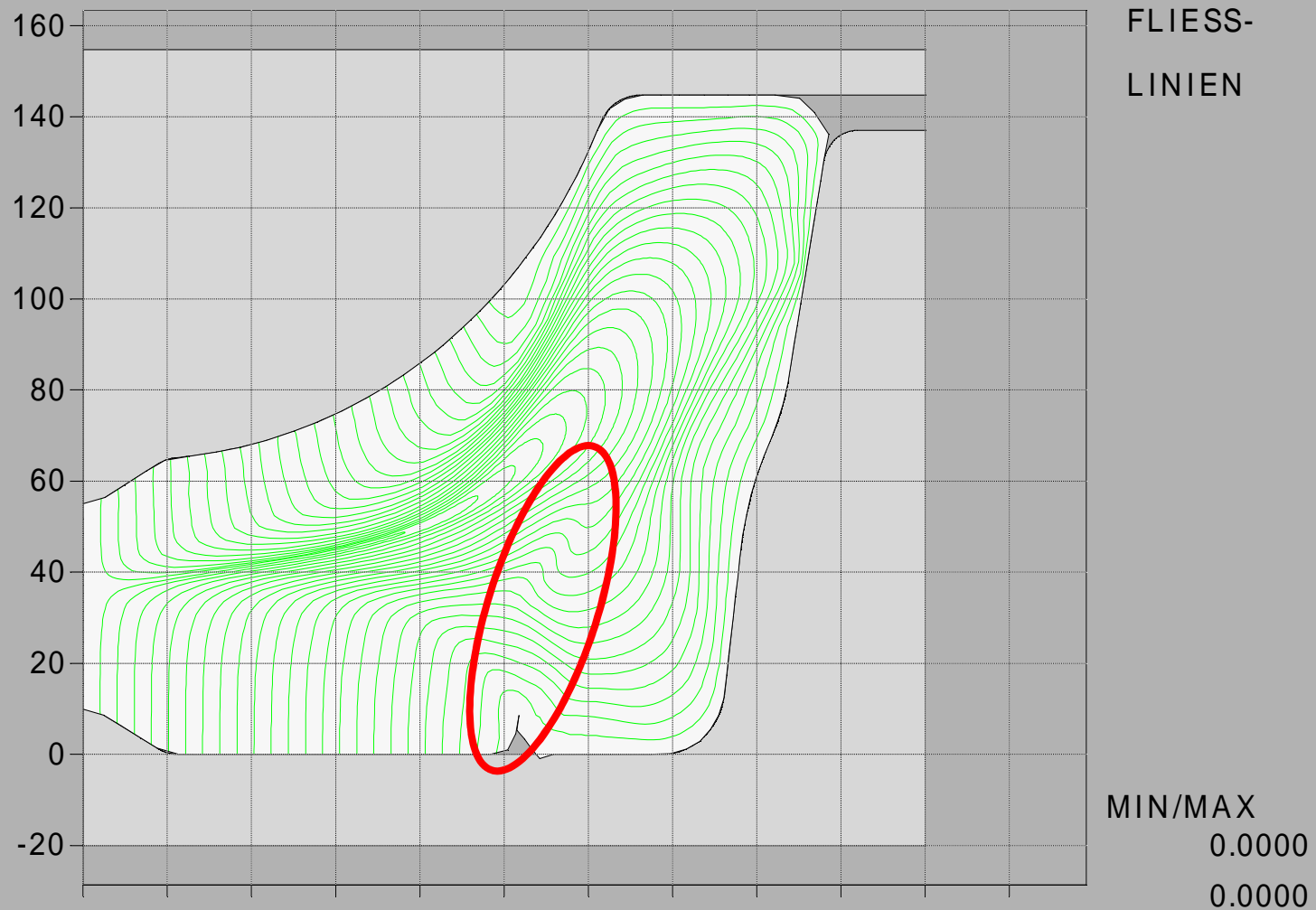
© Peter Janschek, Leitritz Turbinenbau GmbH, Remscheid, Germany

Mit gültigen Fließkurven wird das Verhalten richtig abgebildet



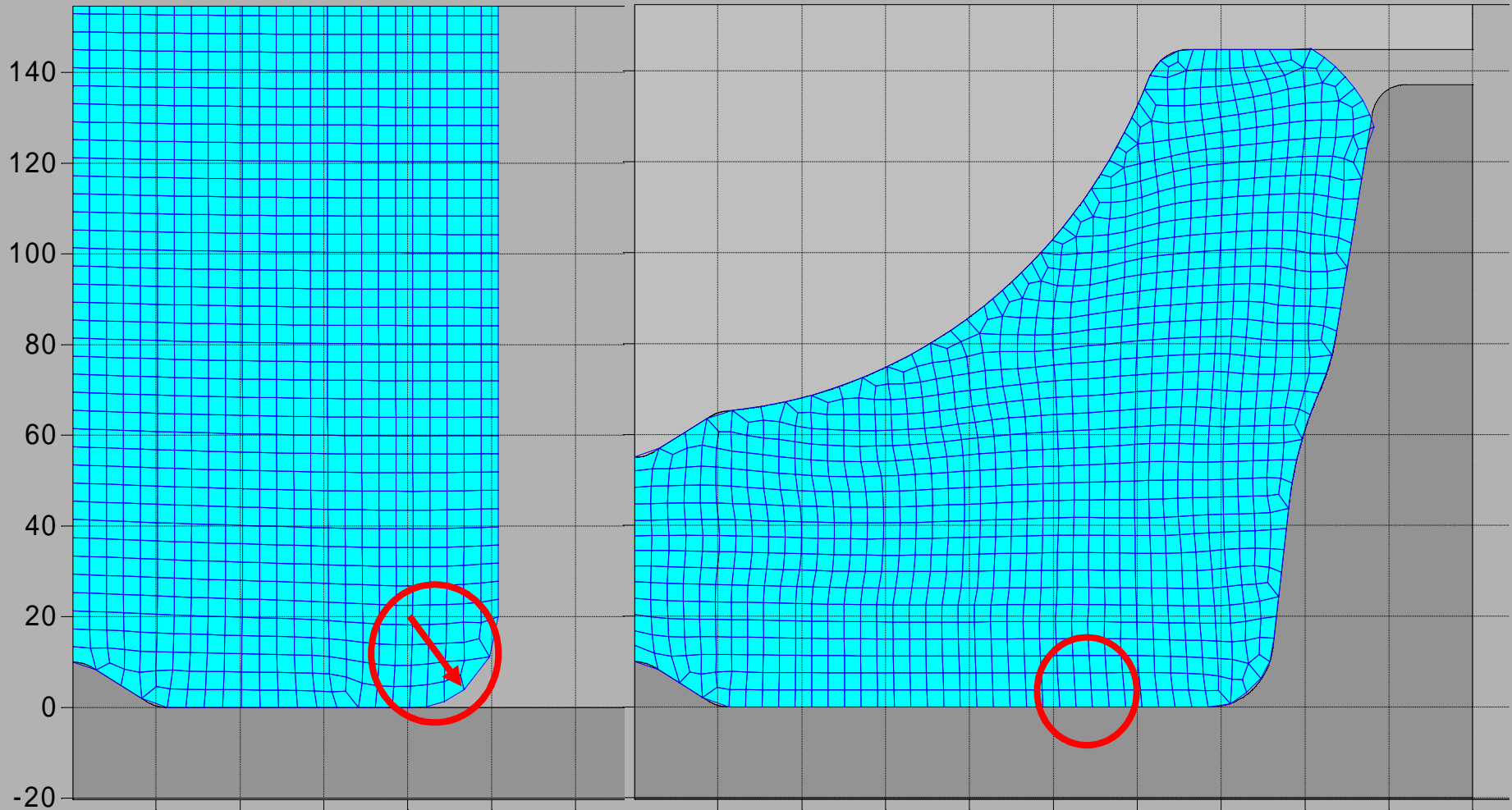
15. September 2008 20 40 60 80 100 120 140 160 180 200 220

Die Fließlinien zeigen eine Störung im Stofffluss



15. September 2008 20 40 60 ICFG Warschau 100 120 140 160 180 200 220

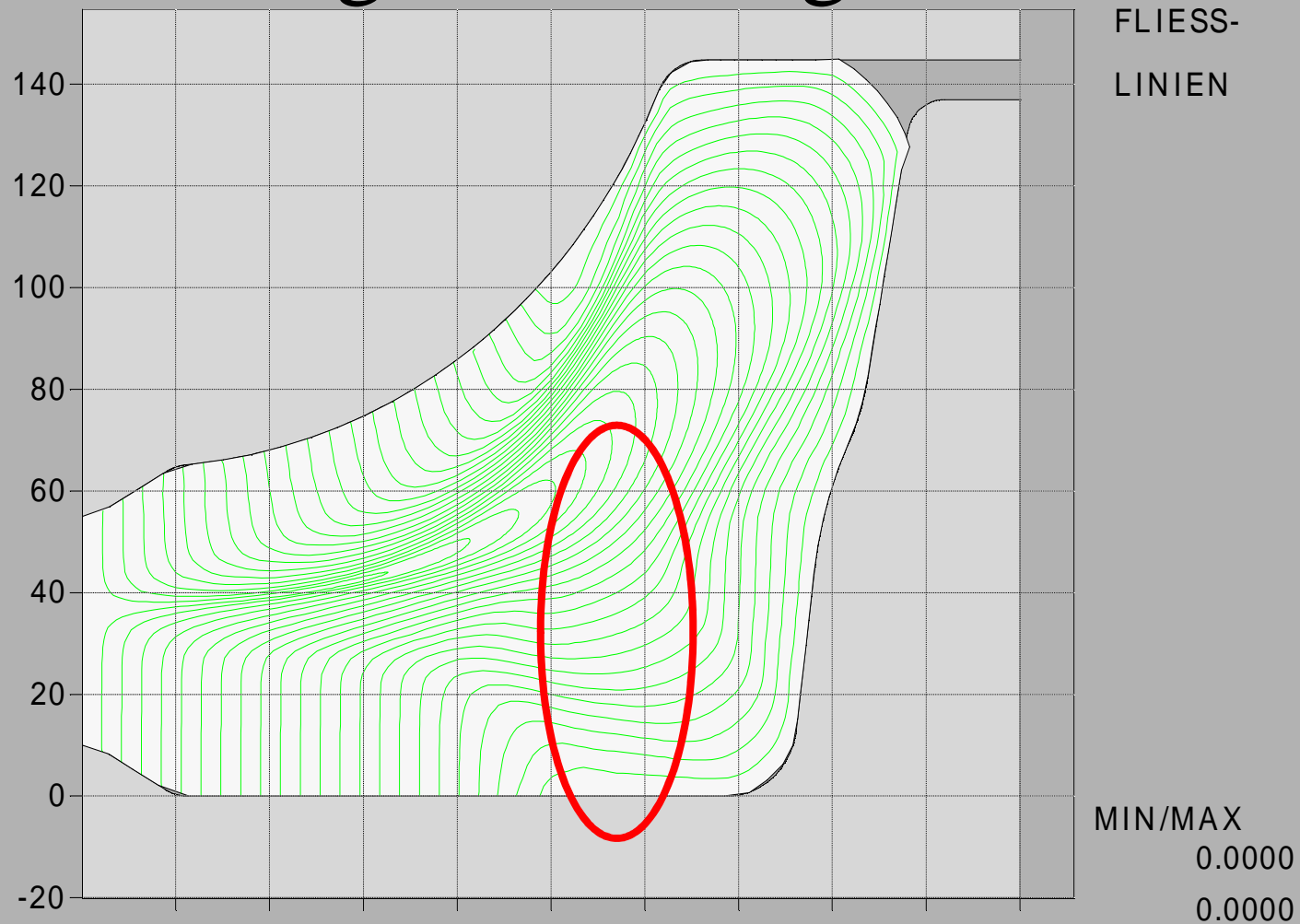
Anderung des Eckenradius auf $R = 20$ mm – Simulation ohne Fehler



15. September 2008

ICFG Warschau

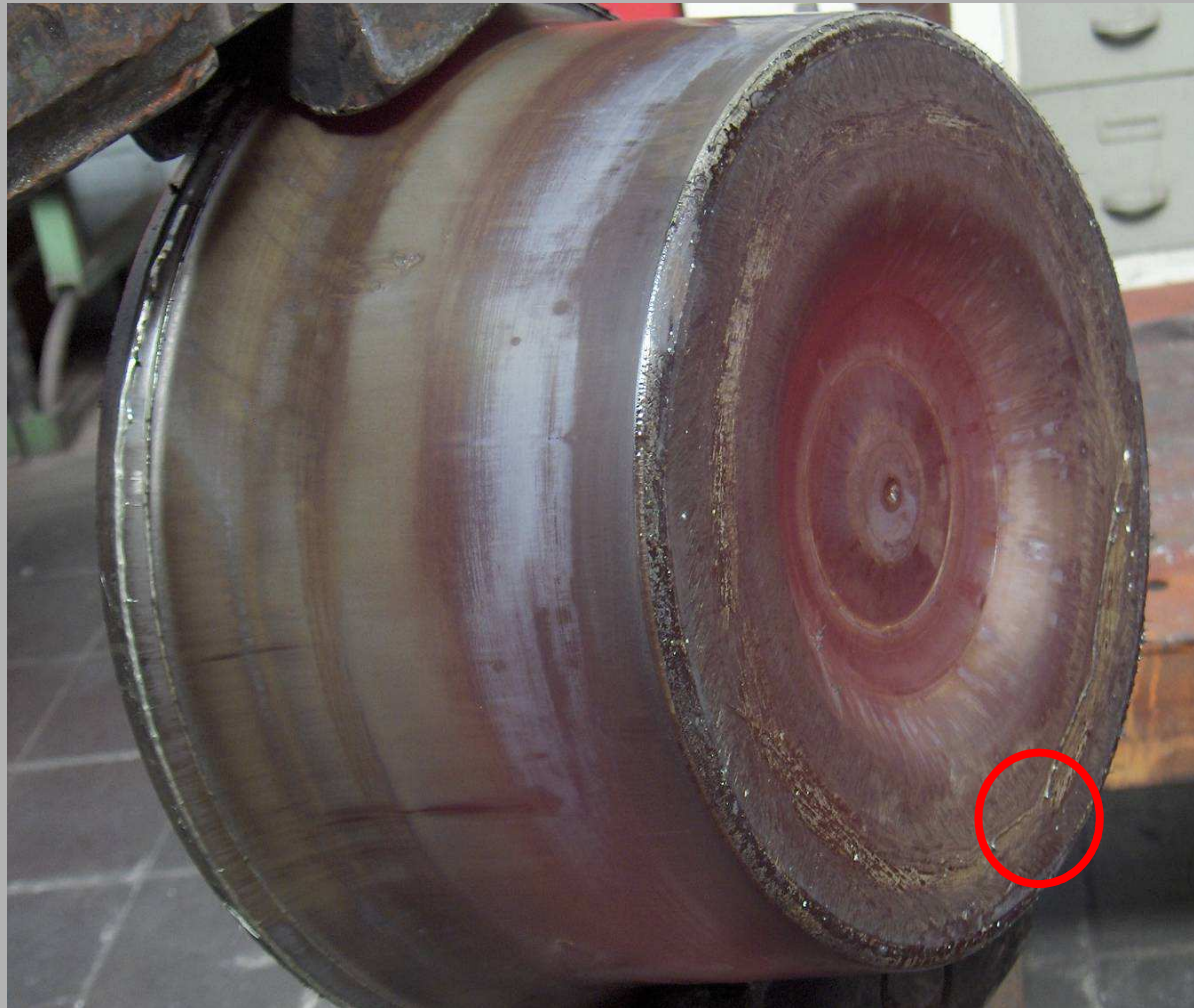
Auch die Fließlinien laufen jetzt gleichmässig



15. September 2008

ICFG Warschau

Das Schmiedeteil zeigt sich nach der Radienänderung fehlerfrei



15. September 2008

ICFG Warschau

© Peter Janschek, Leitritz Turbinenbau GmbH, Remscheid, Germany

Fazit:

- korrekte Simulationsergebnisse setzen
(u.a.) gültige Fließkurven voraus
- Gültig bedeutet für die Benutzung von
Tabellen:
Fließkurven müssen im gesamten
Temperatur-, Geschwindigkeits- und
Umformgradfeld, das während der
Simulation berechnet wird, Stützwerte
aus Messungen besitzen



LEISTRITZ Turbinenkomponenten Remscheid GmbH

15. September 2008

ICFG Warschau

© Peter Janschek, Leitritz Turbinenbau GmbH, Remscheid, Germany

Projektverlauf (Teil 1)

Vorstufe: Oktober 2005

Projektstart: Dezember 2005 / Januar 2006

Information potentieller Teilnehmer: Januar 2006

Zu-/Absage von Teilnehmern / Feststellung der Partner: bis März 2006

Kontaktierte Forschungseinrichtungen

IAM	Duisburg
IBF	Aachen
IEHK	Aachen
IFU	Stuttgart
IFUM	Hannover
IMA	Dresden
IMFT	Freiberg
LFT	Erlangen
MPIE	Düsseldorf
TU	Chemnitz

**Teilnehmende Forschungseinrichtungen und Spektrum der
Aktivitäten im Projekt**

IAM Duisburg	Kalt	Warm
IBF Aachen (abgesagt)		
IEHK Aachen		Warm
IFU Stuttgart	Kalt	Warm
IFUM Hannover	Kalt	Warm
IMA Dresden (ausgestiegen)	Kalt	Warm
IMFT Freiberg	Kalt	Warm
LFT Erlangen	Kalt	Warm
MPIE Düsseldorf (während d. Projektes eingestellt)	Kalt	Warm
TU Chemnitz (ausgestiegen)		

Das Projekt begleitende Industriefirmen

CDP Bharat

Hatebur

Hirschvogel

Leistriz

IMU

Tekfor

Daimler Chrysler

Gerlach

Probenfertigung (warm)

Probenfertigung (kalt und warm)

Projektverlauf (Teil 2)

Vorlage der gewünschten Probenformen der teilnehmenden Institute: bis Mai 2006

Zusage der zwei Industriepartner zur Fertigung der Proben: bis Mai 2006

Übermittlung der gewünschten Probenformen an die zwei Industriepartner: 02. 06. 2006

Versand der Kaltproben an die teilnehmenden Institute: 09. 10. 2006

Übermittlung erster Teilergebnisse zu den **Kaltfließkurven: zum 13.03.2007**

Erste Projektsitzung: 14.03.2007

Projektverlauf (Teil 3)

Versand der Warmproben an die teilnehmenden Institute: 16. 03. 2007

Übermittlung weiterer Teilergebnisse zu den **Kaltfließkurven**: zum 17.12.2007

Übermittlung der Ergebnisse zum **Referenzversuch (kalt)**: zum 17.12.2007

Übermittlung weiterer Ergebnisse (**Kaltfließkurven**) zu den Themen
'Probenform' und 'Korrekturen': zum 17.12.2007

Übermittlung erster Teilergebnisse zu den **Warmfließkurven**: zum 17.12.2007

Zweite Projektsitzung: 18.12.2007

Projektverlauf (Teil 4)

Übermittlung korrigierter Ergebnisse zum **Referenzversuch (kalt)**: zum 05.05.2008

Übermittlung der Ergebnisse zum **Referenzversuch (warm)**: zum 05.05.2008

Dritte Projektsitzung: 05.05.2008

Übermittlung letzter Korrekturen zum **Referenzversuch (warm)**: Juli 2008

Werkstoffauswahl (Industriebefragung)

Werkstoff-Nr.	Werkstoff-bezeichnung	Werkstoffnorm	Firmen Kalt	Firmen Warm	Firmen Halbwarm
EN AW-5754	EN AW-Al Mg3	DIN EN 573-3 : 2003-10	EJOT		
EN AW-6060	EN AW-Al MgSi	DIN EN 573-3 : 2003-10	EJOT		
EN AW-7075	EN AW-Al Zn5,5MgCu	DIN EN 573-3 : 2003-10	EJOT		
	AlSi1Mg			CDP Bharat (400...520)	
	AlSi1MgCu			CDP Bharat (400...520)	
	AlMgSiCu			Hirschvogel	
1.0214	QST 36-3 / 10 C 10	DIN 1654 / EN 10263-2	TEXTRON		
1.0205	Rst 36-2		TEXTRON		
1.0234	QSt 38-3 / C 15 C	DIN 1654 / EN 10263	TEXTRON		
1.0303	QSt 32-3		TEXTRON		
1.0503	C45	DIN EN 10250-2 (12/1999), DIN EN 10277-2 (10/1999)	Presta 20,100,200,250,300,350,400,450,500 °C		Presta
1.0535	C55	DIN EN 10250-2 (12/1999)	Presta 20,100,200,250,300,350,400,450,500 °C		Presta
1.1132	Cq 15	DIN 1654 / EN 10263	TEXTRON		
1.1152	Cq 22		TEXTRON		
1.1192	Cq45	DIN EN 10263-4 (02/2002)	Presta		Presta
1.1199	49MnVS 3			Fridingen	
1.1213	Cf53		GKN, Daimler	GKN, Daimler	GKN, Daimler
1.1303	38MnSV6			Fridingen	
	38MnVS5			Gerlach, Daimler	
	38MnSi6			CDP Bharat (650...950)	
1.1352	30MnVS6			Fridingen, Daimler	
1.1519	17CrNi6			Fridingen	Fridingen
1.4016	X 6 Cr17		TEXTRON		
1.4301	X 5 CrNi 1810		TEXTRON		
	X 5 CrNi Cu 189		TEXTRON		
1.4305	X8CrNiS 18-9			Fridingen	Fridingen
1.4541	X 6 CrNiTi 1810		TEXTRON		
1.5213	27MnSV6			Fridingen	
1.5508	22 B2 / 23 B2	DIN 1654 / EN 10263	TEXTRON		
1.5508	25 CrB2		TEXTRON		
1.5508 (Sondergüte)	18 B3 / 23 B2	DIN 1654 / EN 10263	TEXTRON		
1.5511	35 B2	DIN 1654 / EN 10263	TEXTRON		

Werkstoffauswahl (Industriebefragung)

Werkstoff-Nr.	Werkstoff-bezeichnung	Werkstoffnorm	Firmen Kalt	Firmen Warm	Firmen Halbwarm
1.5535	23MnB4	DIN EN 10263-4	EJOT, Textron		EJOT
1.6580	30CrNiMo8			Fridingen	Fridingen
1.6587	17CrNiMo6			Fridingen	Fridingen
1.7015	15Cr3		Daimler		
1.7018	9 SMnPb28			Fridingen	Fridingen
1.7034	37 Cr4		TEXTRON		
1.7076	32 CrB4	DIN 1654 / EN 10263-4	TEXTRON		
1.7131	16 MnCr 5		TEXTRON, Daimler, Hirschvogel	CDP Bharat (650...950)	CDP Bharat (650...950)
1.7147	20MnCR5	DIN EN 10084 : 1998-06	GKN, Hirschvogel	Fridingen, GKN	Fridingen, GKN
1.7149	20MnCrS5	DIN EN 10263-3 (02/2002), DIN EN 10277-4 (10/1999)	Presta 20,100,200,250,300,350,400,450,500 °C		Presta
1.7168	20 MnCrB5		TEXTRON		
1.7182	27MnCrB5 2			Fridingen	Fridingen
1.7220	34CrMo4	DIN EN 10263-4	EJOT, Textron, Daimler, Hirschvogel		EJOT
1.7225	42 CrMo 4		TEXTRON	Gerlach	
	42CrMoV4			CDP Bharat (650...950)	CDP Bharat (650...950)
1.7321	20MnCr4		Daimler	Fridingen	Fridingen
1.7323	20MoCrS4	DIN EN 10084 (06/1998), DIN EN 10263-3 (02/2002)	Presta 20,100,200,250,300,350,400,450,500 °C		Presta
1.7325	25MoCr 4			Fridingen	Fridingen
1.7326	25MoCrS4		Presta 20,100,200,250,300,350,400,450,500 °C		Presta
1.7333	22CrMoS3 5			Fridingen	Fridingen
1.7335	15CrMo5			Fridingen	Fridingen
1.7709	21 CrMoV57	DIN 1654 / EN 10263	TEXTRON		
1.8519	31 CrMoV9			Fridingen	Fridingen
	100Cr6			CDP Bharat (650...950)	CDP Bharat (650...950)
	70MnVS4			Daimler	
	C70S6			Daimler	
	23MnCrMo5		Daimler		
	21NiCrMoS6		Hirschvogel		
	SAE1050				Hirschvogel
2.4668	Inco718			Leistriz	
3.7164	Titan64	TiAl6V4		Leistriz	
	Ti6246			Leistriz	
	Ti6242			Leistriz	
	Ti834			Leistriz	
	Ti829			Leistriz	
	Ti811			Leistriz	
	Ti679			Leistriz	
	Aluminium2618	UNSA92618		Leistriz	

Werkstoff- und Prüfparameterauswahl

Kaltfließkurven

Werkstoff:	16 Mn Cr S 5
Temperaturen:	20°C, 100°C, 200°C
Umformgeschwindigkeiten:	0,1/sec, 1,0/sec, 10,0/sec

Warmfließkurven

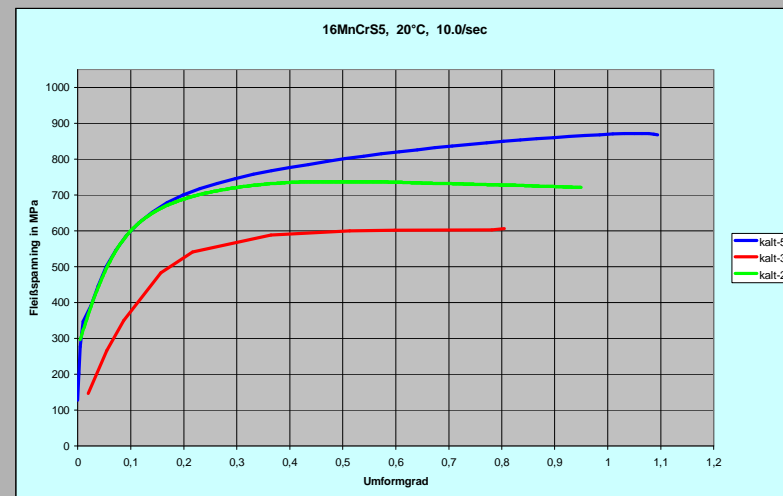
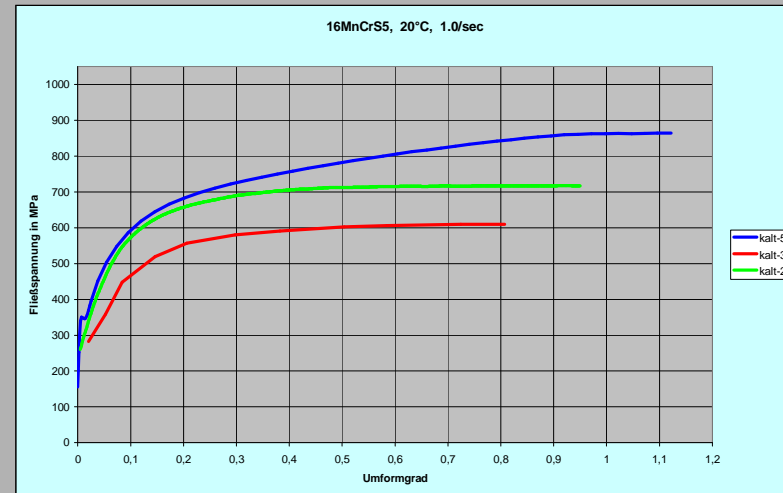
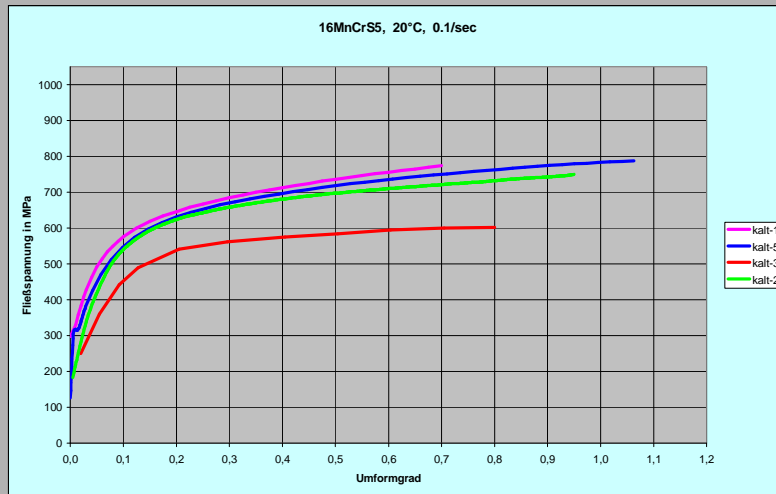
Werkstoff:	38 Mn Si V S 5
Temperaturen:	800°C, 950°C, 1100°C
Umformgeschwindigkeiten:	0,1/sec, 1,0/sec, 10,0/sec

Verfügbare Ergebnisse zu den Fließkurven (kalt), Phase 1

	20°C			100°C			200°C		
	0.1	1	10	0.1	1	10	0.1	1	10
MPIE									
IAM									
LFT									
IMFT									
IFUM									
IFU									

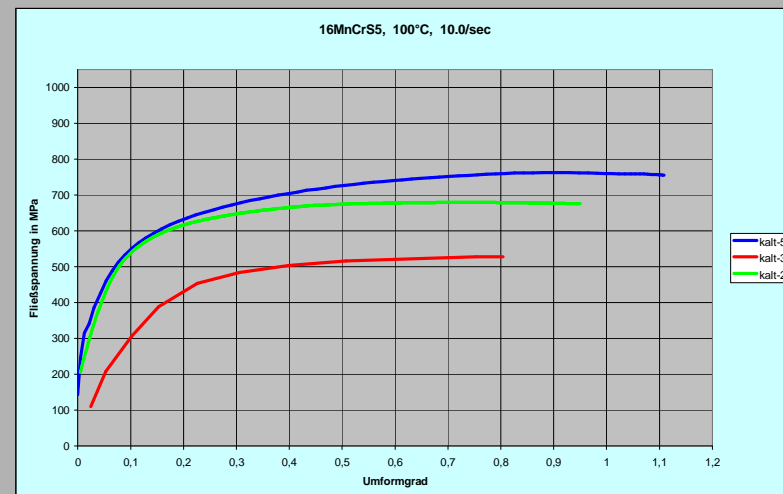
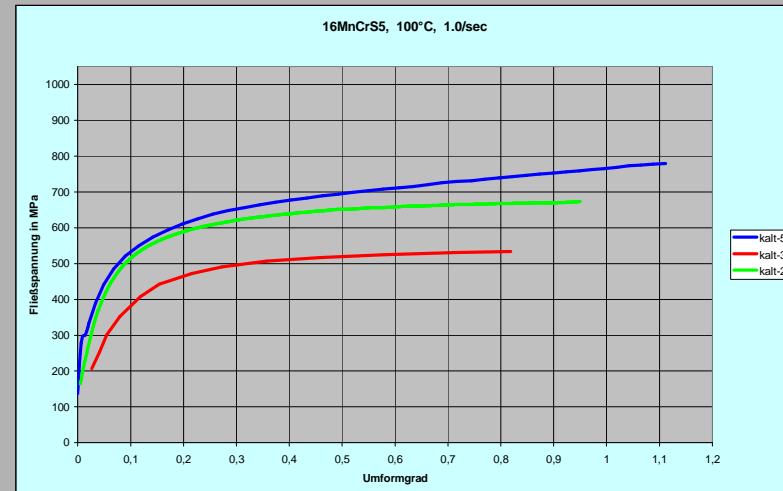
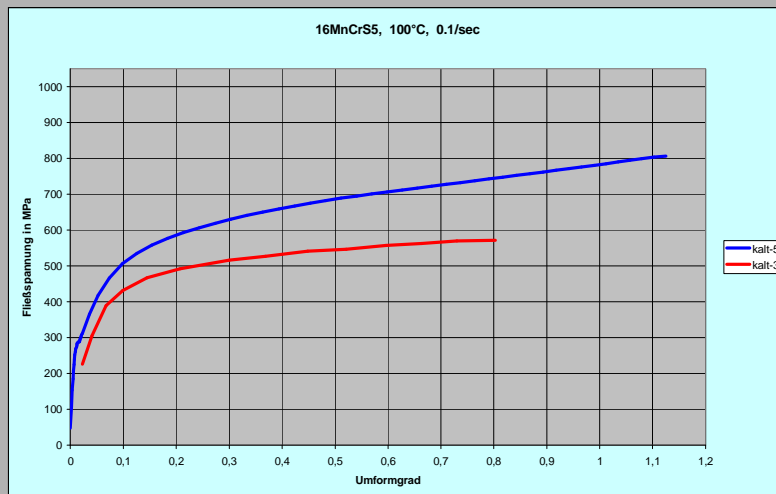
Verfügbare Ergebnisse zu den Fließkurven (kalt), Phase 1

hier: $T = 20^{\circ}\text{C}$



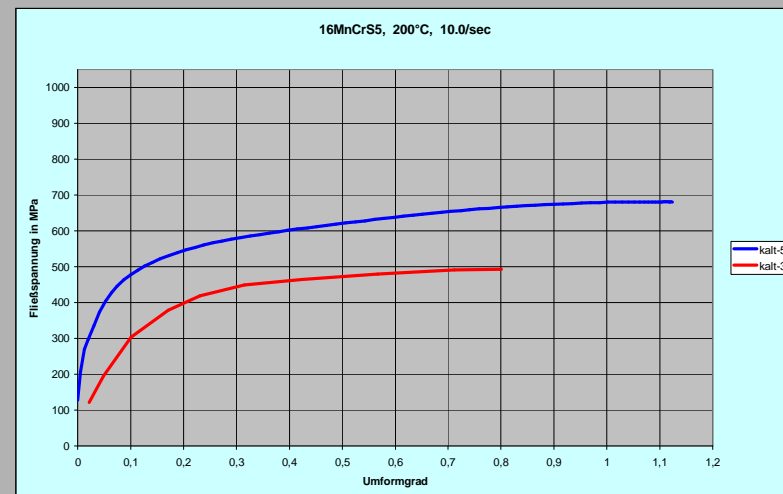
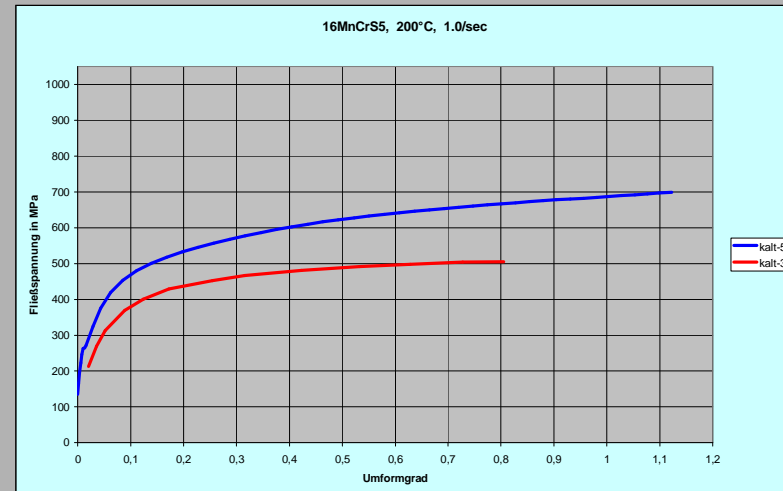
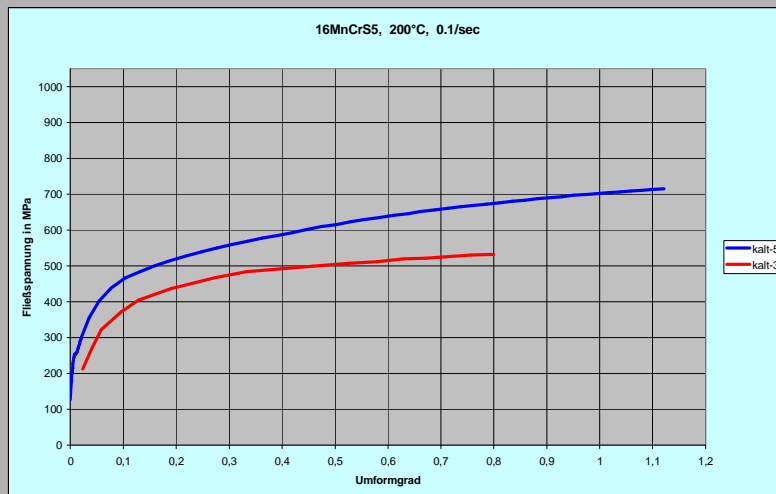
Verfügbare Ergebnisse zu den Fließkurven (kalt), Phase 1

hier: $T = 100^{\circ}\text{C}$

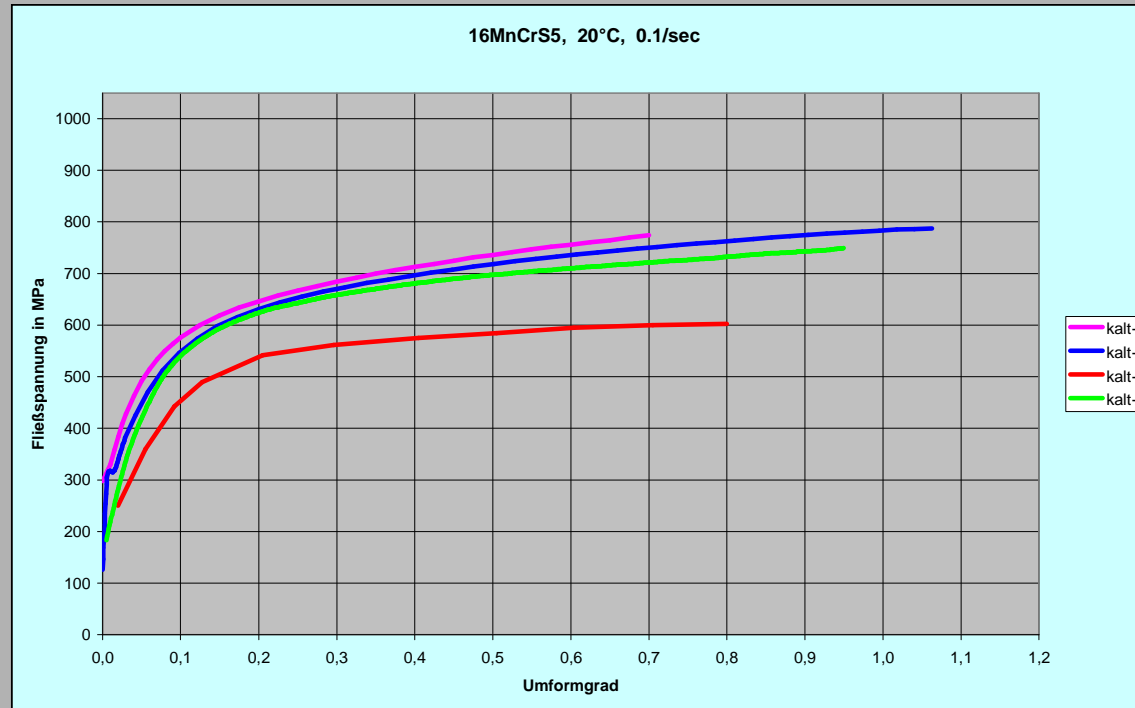


Verfügbare Ergebnisse zu den Fließkurven (kalt), Phase 1

hier: $T = 200^{\circ}\text{C}$

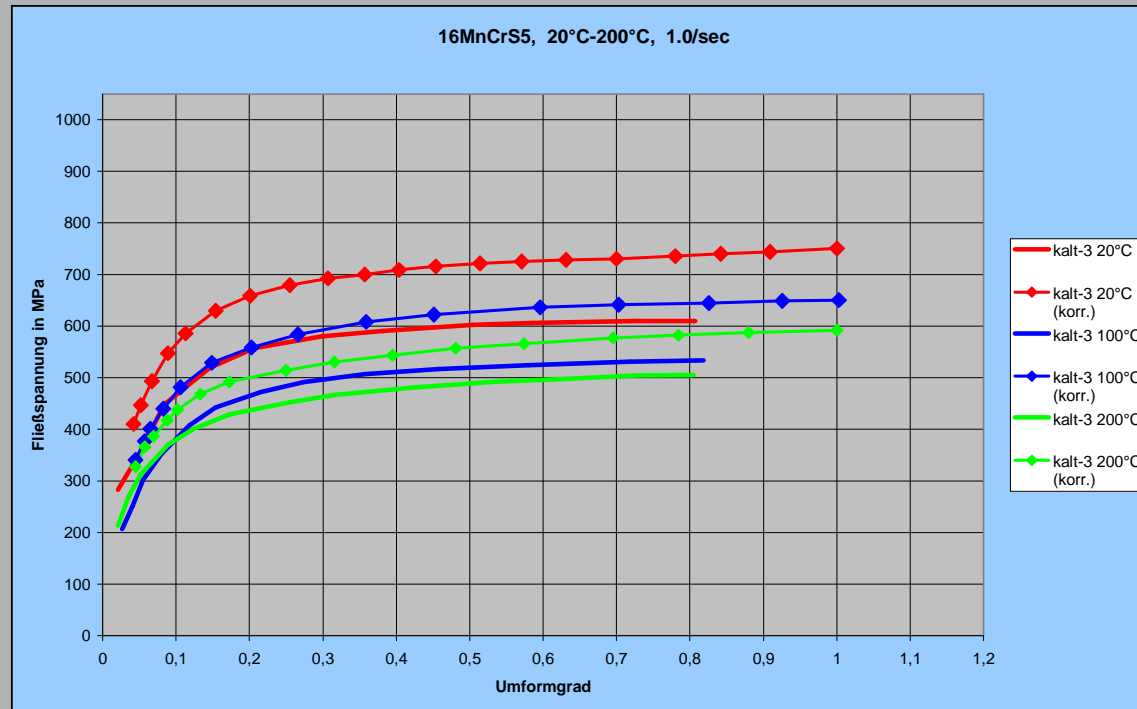


Signifikante Abweichung: kalt-3 liegt immer 15-20% unter dem Niveau der übrigen Ergebnisse



Vermutung: systematischer Fehler in der Datenaufnahme oder in der Datenverarbeitung => **Nachuntersuchung !**

Ergebnis der Nachuntersuchung: technischer Fehler in der Kalibrierung (Hardware-Fehler)



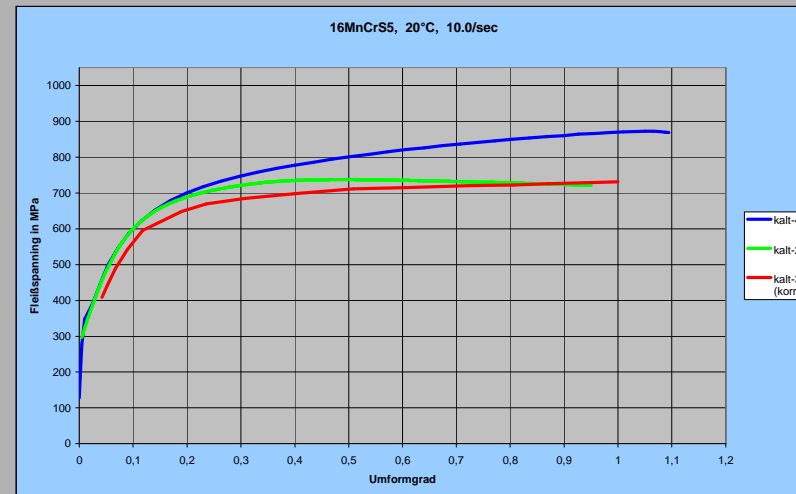
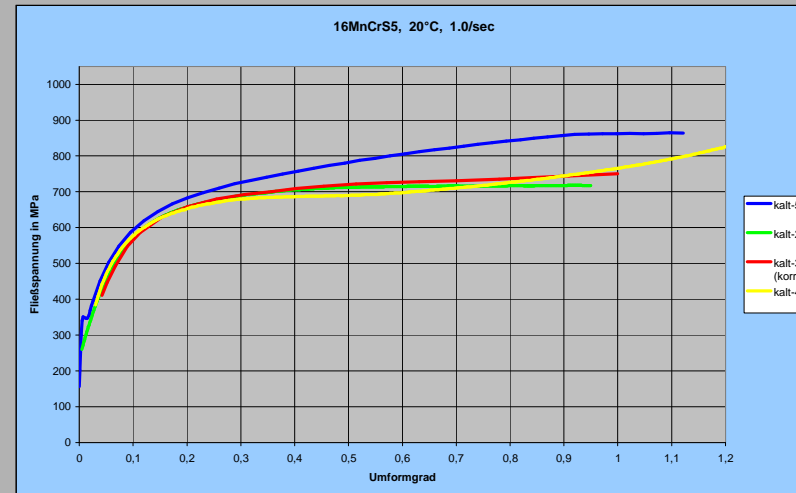
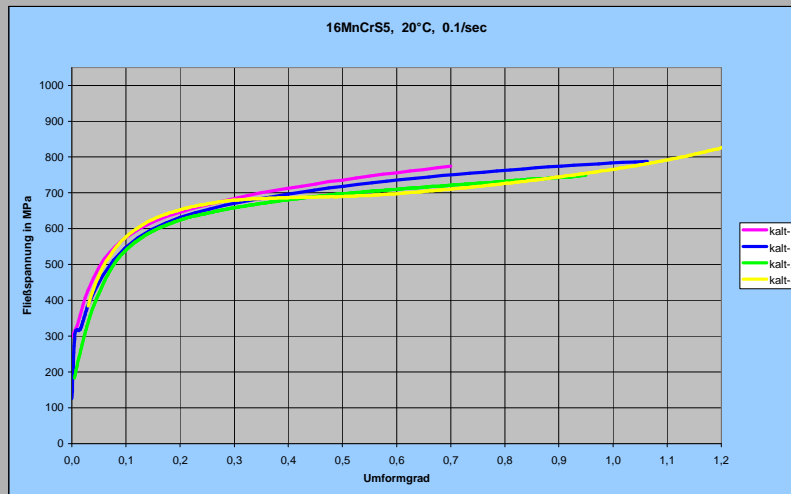
Ergebnis für die Fließkurvenermittlung: deutliche Anhebung der Festigkeitsniveaus im gesamten Temperaturbereich

Verfügbare Ergebnisse zu den Fließkurven (kalt), Phase 2

	20°C			100°C			200°C		
	0.1	1	10	0.1	1	10	0.1	1	10
MPIE	■	■	■	■	■	■	■	■	■
IAM	■	■	□	□	□	□	□	□	□
LFT	■	□	□	□	□	□	□	□	□
IMFT	■	■	■	■	■	■	■	■	■
IFUM	■	■	■	□	■	■	□	□	□
IFU	□	■	■	□	■	■	□	■	■

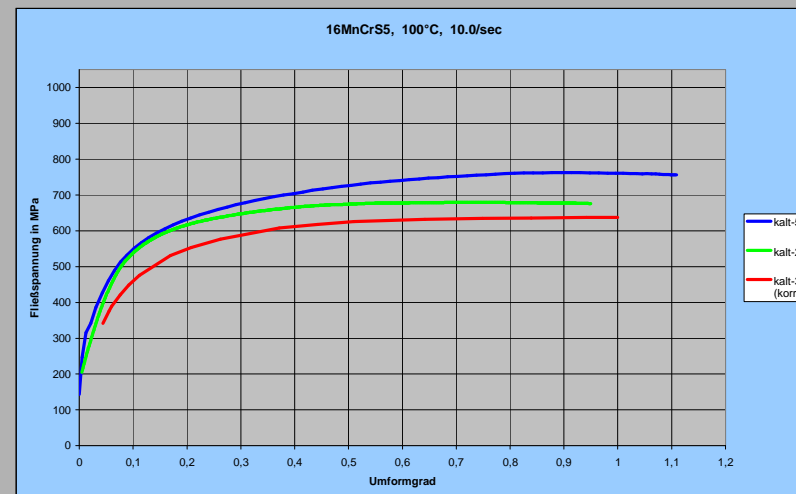
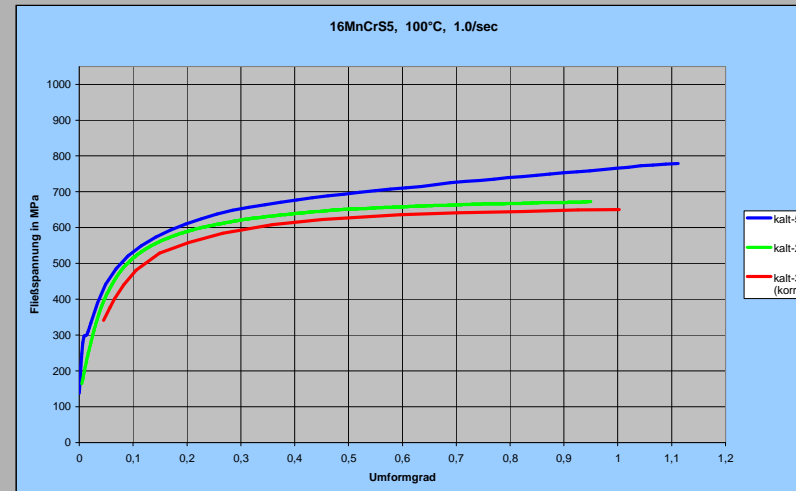
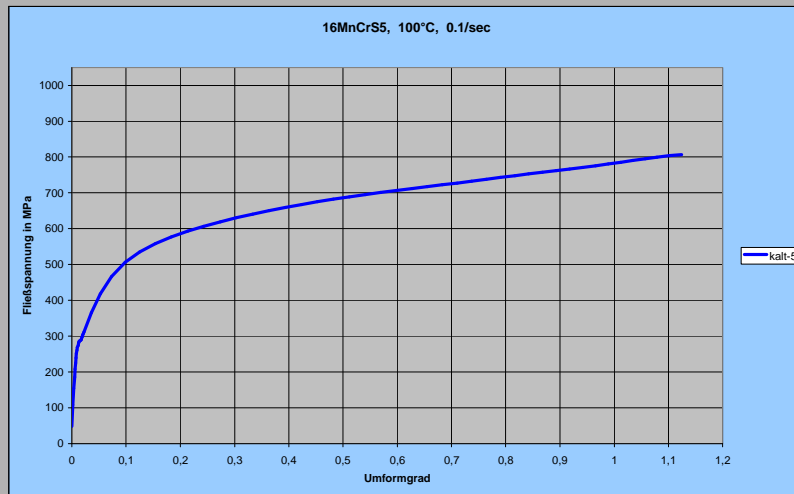
Verfügbare Ergebnisse zu den Fließkurven (kalt), Phase 2

hier: $T = 20^{\circ}\text{C}$



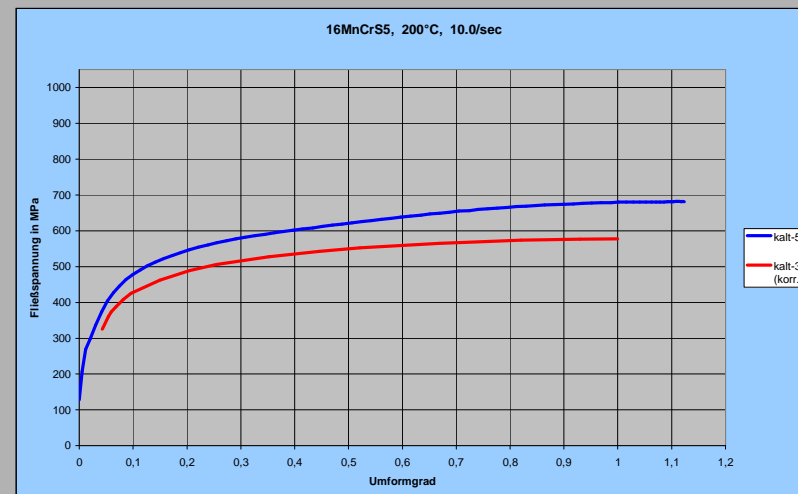
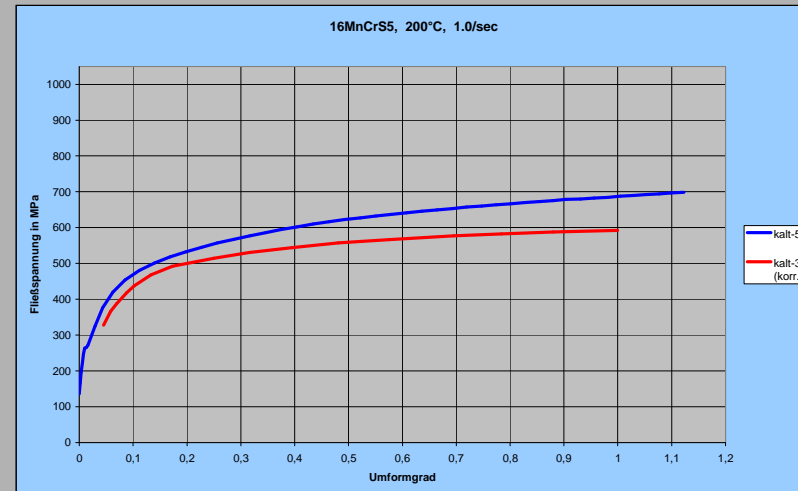
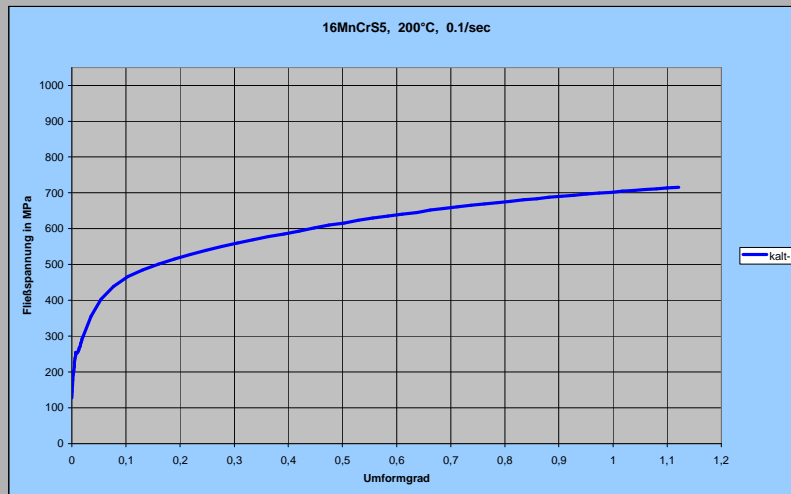
Verfügbare Ergebnisse zu den Fließkurven (kalt), Phase 2

hier: $T = 100^{\circ}\text{C}$



Verfügbare Ergebnisse zu den Fließkurven (kalt), Phase 2

hier: $T = 200^{\circ}\text{C}$



Offene Frage hinsichtlich einer signifikanten Einflussnahme auf die Fließkurvenermittlung:

- Probenabmessungen / Probenqualität
- Probenform
- Schmierung
- Erweiterte Korrekturverfahren

⇒ **Vergleichsversuch** mit einheitlicher Probenform, einheitlicher Probenabmessung und einheitlicher Schmierung

Probenform: Zylinderstauchprobe

Schmierung: Teflonfolie (zur Verfügung gestellt vom LFT, Erlangen)

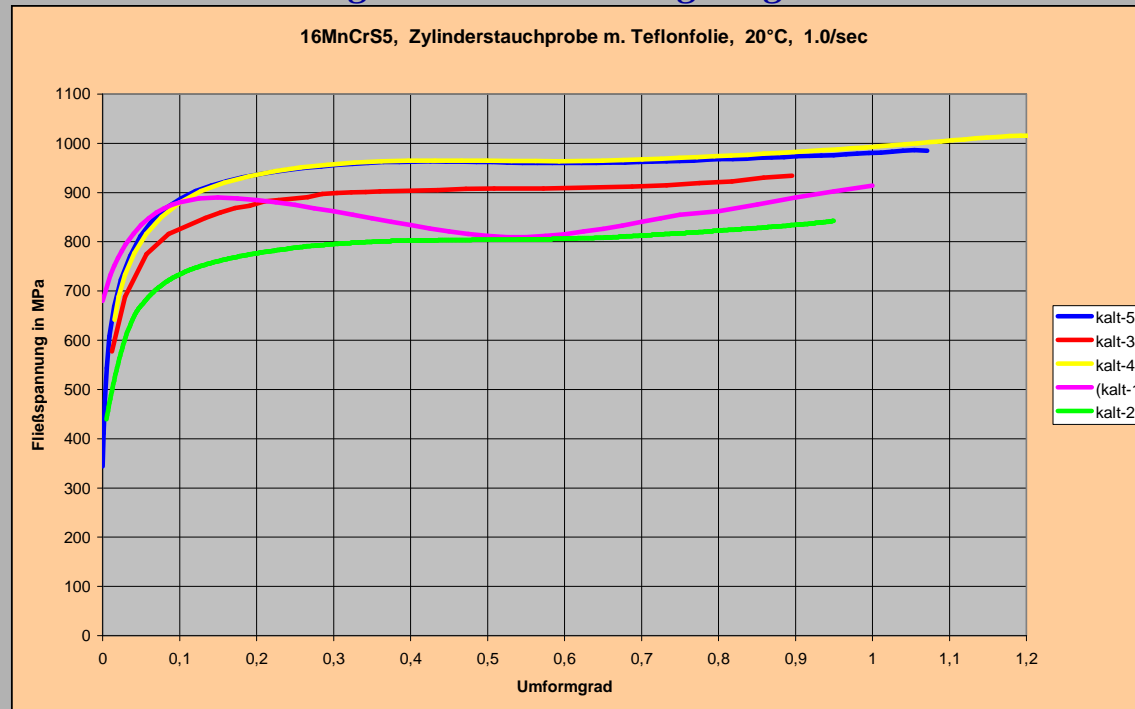
Versuchsparameter: Temperatur: 20°C, Umformgeschwindigkeit: 1.0/sec

⇒ **Weitere Untersuchungen** zu Probenform und Korrekturverfahren
(durchgeführt von kalt-5)

Verfügbare Ergebnisse zum Referenzversuch (kalt)

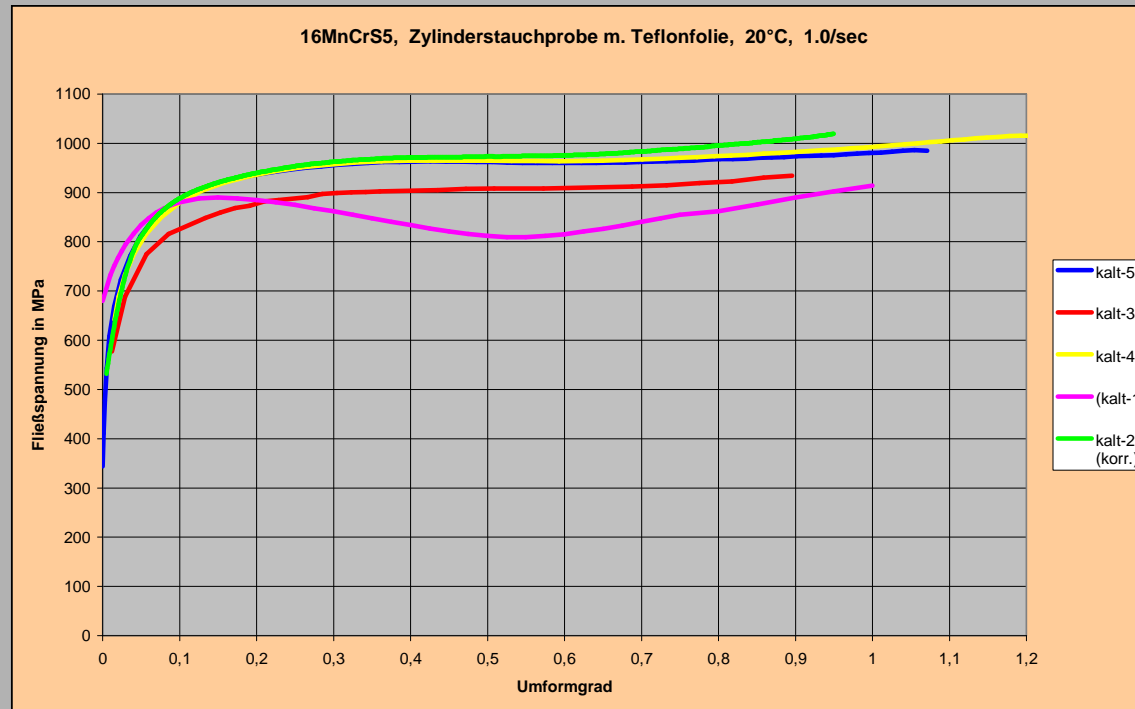
Temperatur	20°C
Umformgeschwindigkeit	1 1/s
MPIE	
IAM	
LFT	
IMFT	
IFUM	
IFU	

Verfügbare Ergebnisse zum Referenzversuch (kalt)
Anmerkung: technisch bedingt war seitens kalt-1 keine genaue Auswertung möglich



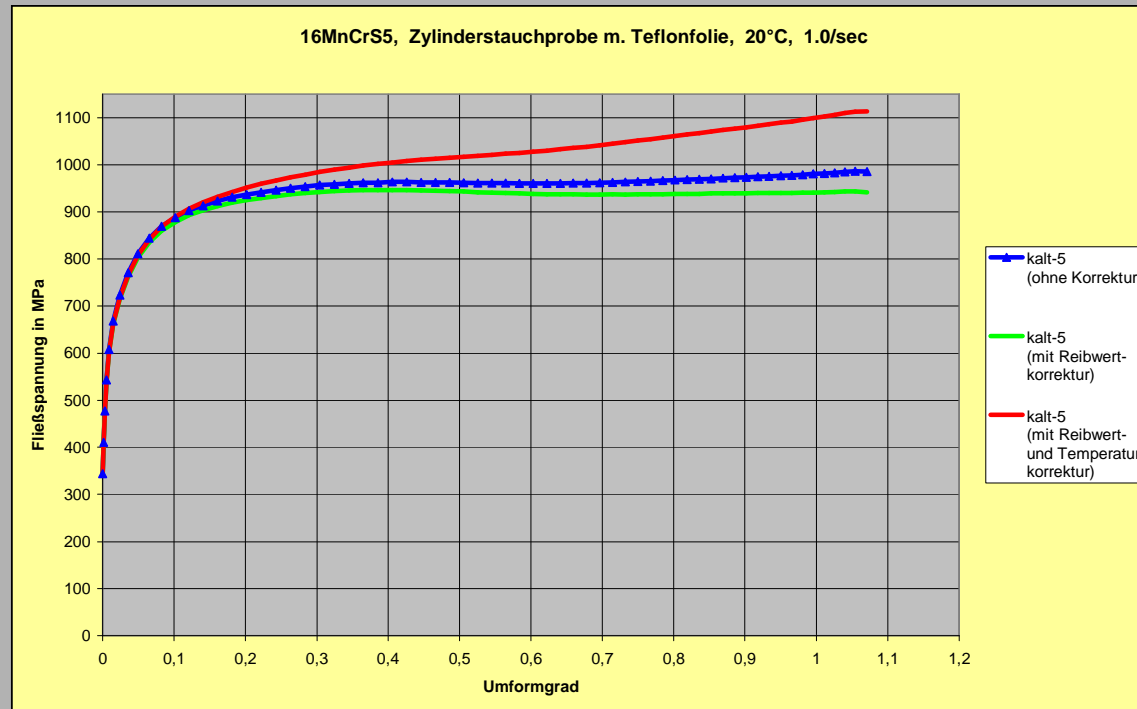
Auffälligkeit: deutlich zu geringes Niveau für kalt-2,
Vermutung: Fehler in der Datenaufnahme oder in der
Datenverarbeitung => **Überprüfung !**

Verfügbare Ergebnisse zum Referenzversuch (kalt) nach Korrektur für kalt-2



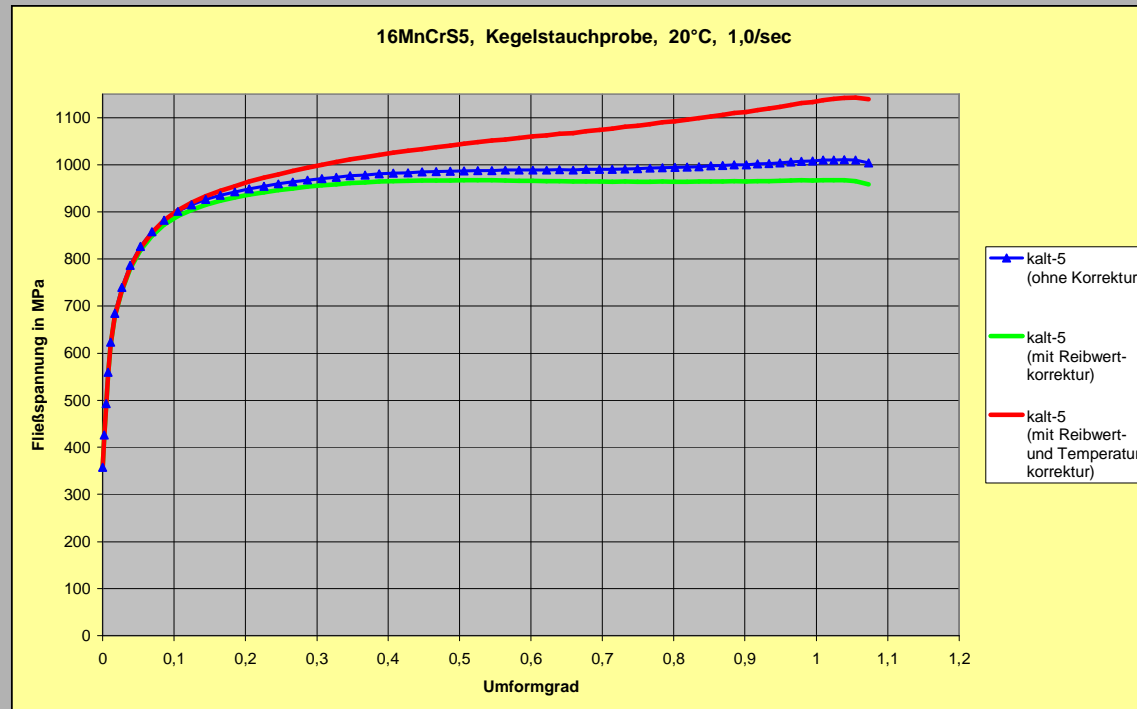
Ergebnis der Überprüfung: Fehler in der Auswertesoftware, Probenabmessung war fest codiert.

Ergebnisse zum Berücksichtigung von Korrekturen bezüglich Temperatur und Reibung (kalt-5)



hier: Zylinderstauchprobe

Ergebnisse zum Berücksichtigung von Korrekturen bezüglich Temperatur und Reibung (kalt-5)



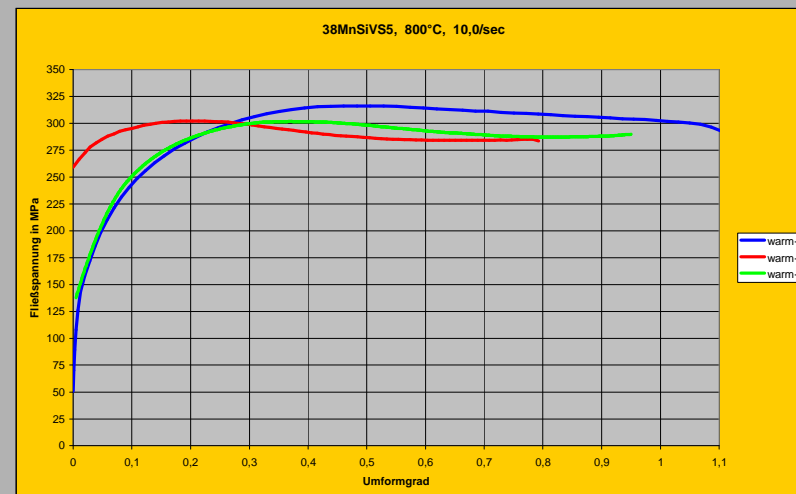
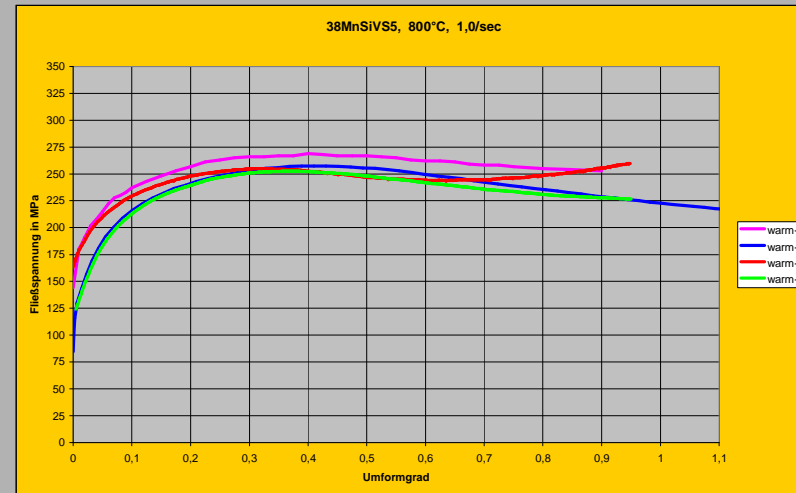
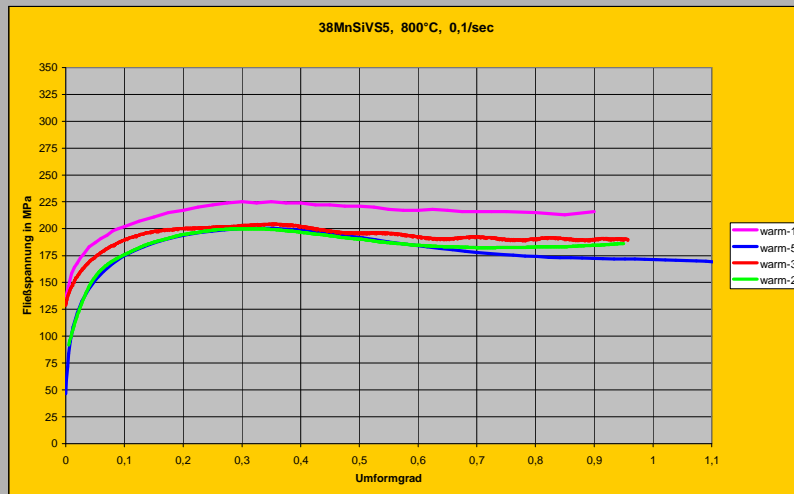
hier: Kegelstauchprobe

Verfügbare Ergebnisse zu den Fließkurven (warm)

	800°C			950°C			1100°C		
	0.1	1	10	0.1	1	10	0.1	1	10
MPIE									
IAM									
LFT									
IMFT									
IFUM									
IEHK									

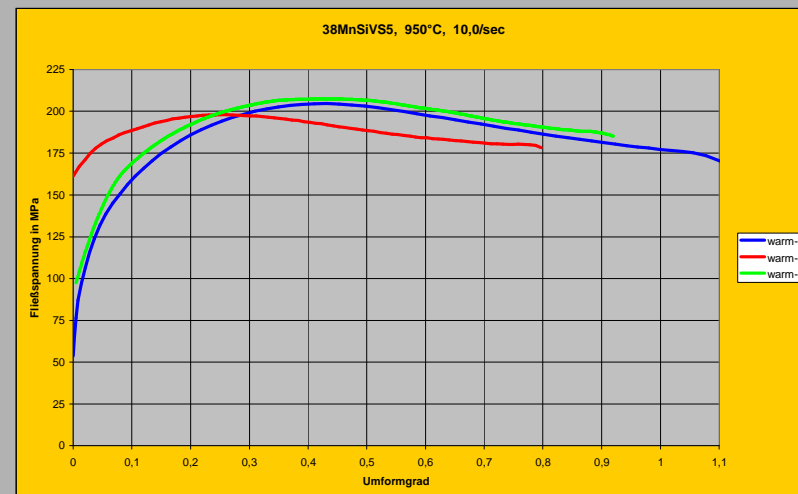
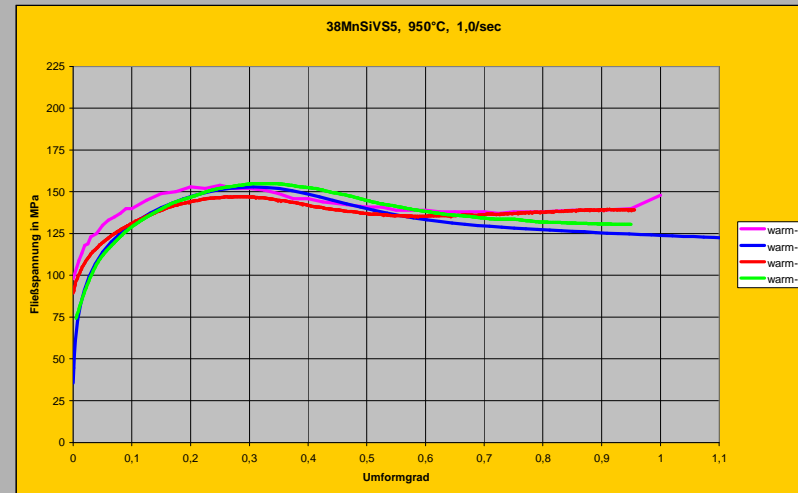
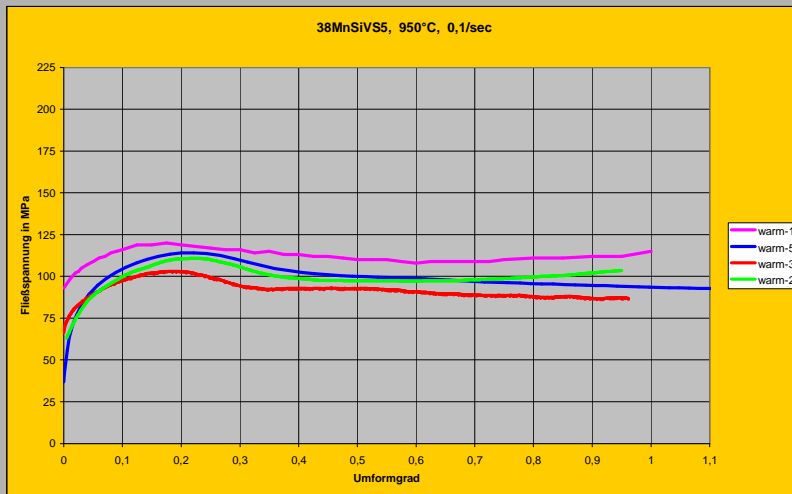
Verfügbare Ergebnisse zu den Fließkurven (warm)

hier: $T = 800^{\circ}\text{C}$



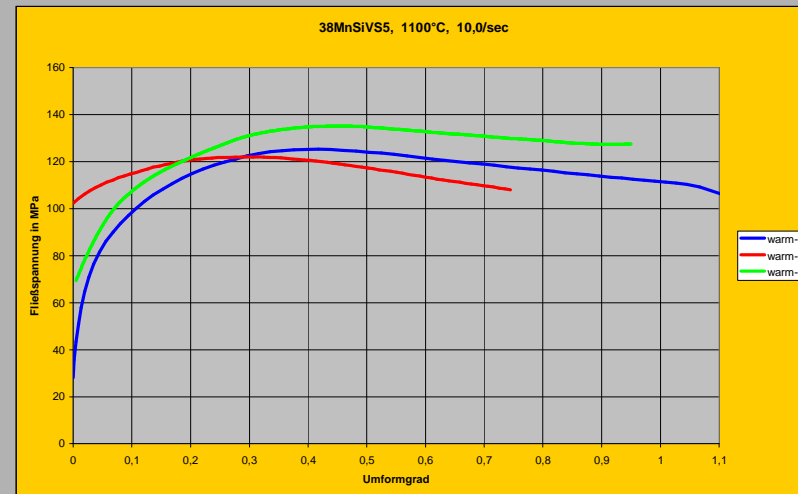
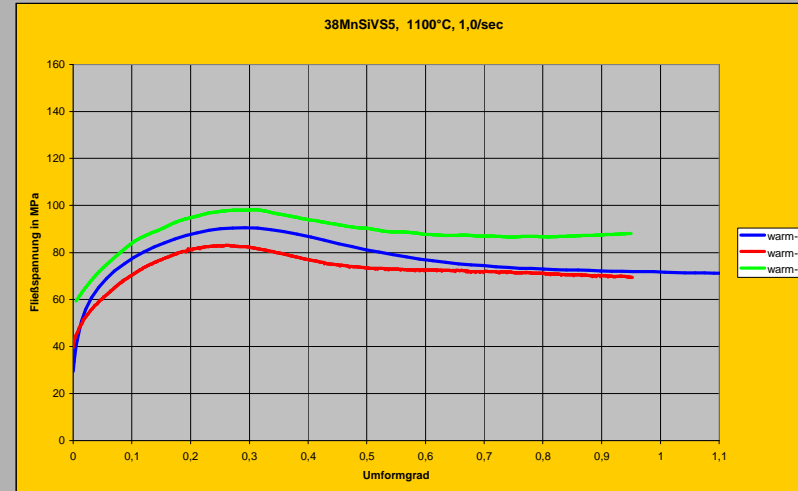
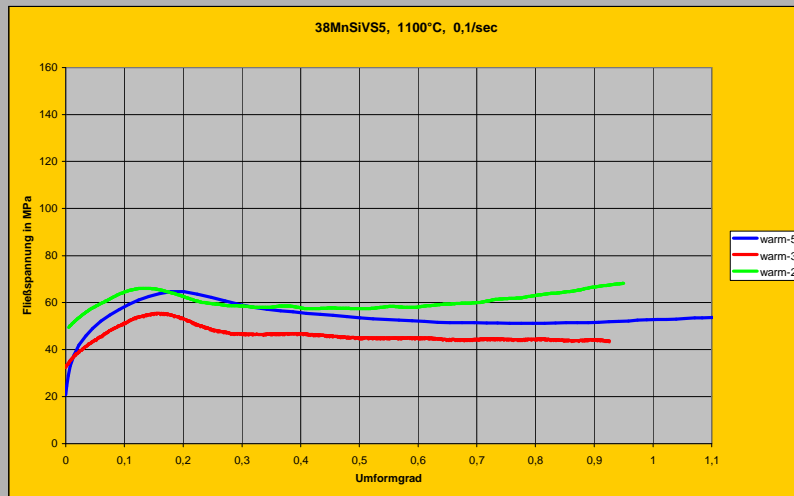
Verfügbare Ergebnisse zu den Fließkurven (warm)

hier: T = 950°C



Verfügbare Ergebnisse zu den Fließkurven (warm)

hier: T = 1100°C



Offene Frage hinsichtlich einer signifikanten Einflussnahme auf die Fließkurvenermittlung:

- Probenabmessungen
- Probenform
- Schmierung
- Festlegung des Fließbeginns
- Aufheizgeschwindigkeit und Haltedauer

⇒ **Vergleichsversuch** mit einheitlicher Probenform, einheitlicher Probenabmessung und einheitlicher Schmierung

Probenform: Zylinderstauchprobe

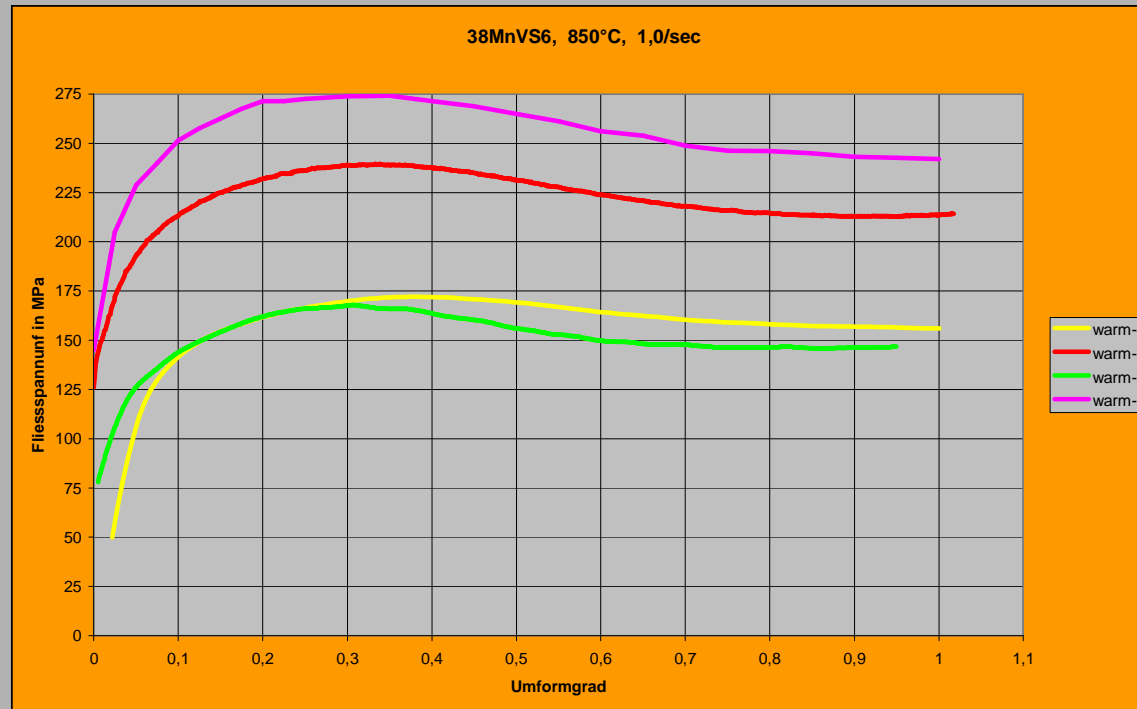
Schmierung: Lubrodal BN (zur Verfügung gestellt vom IFUM, Hannover)

Versuchsparameter: Temperatur: 850°C, Umformgeschwindigkeit: 1.0/sec

Verfügbare Ergebnisse zum Referenzversuch (warm)

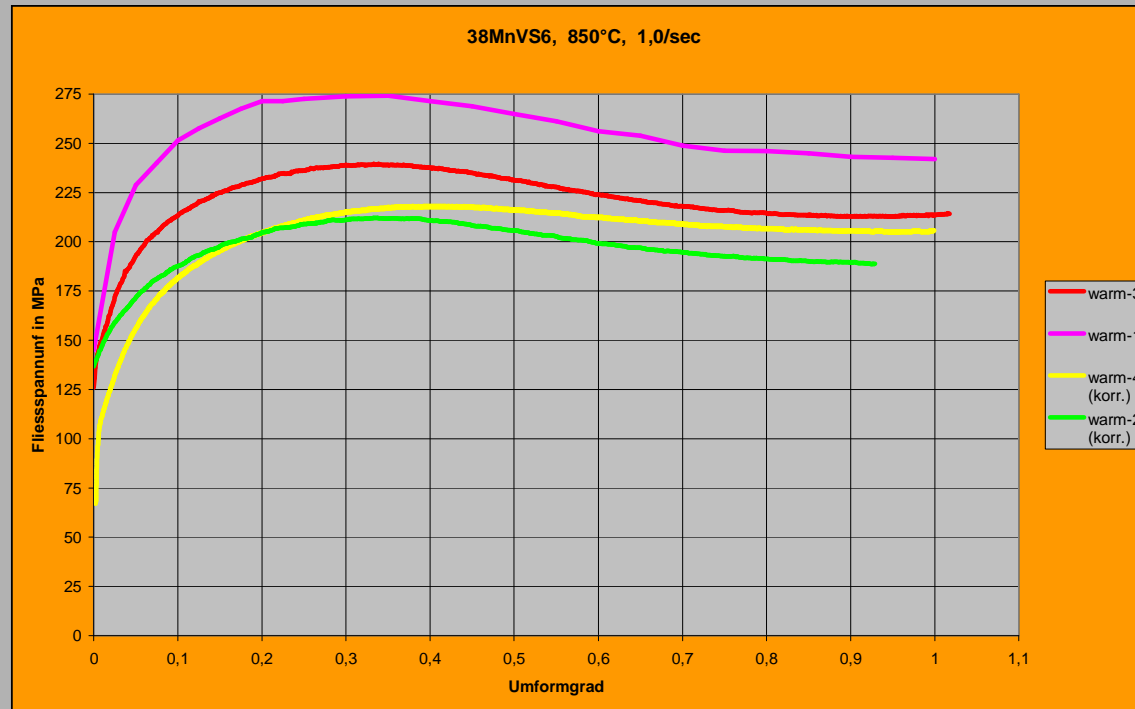
Temperatur	850°C
Umformgeschwindigkeit	1 1/s
IAM	
LFT	
IMFT	
IFUM	
IEHK	

Referenzversuch warm (original)



Auffälligkeit: deutlich zu geringes Niveau für warm-2 und warm-4, fragliches Niveau für warm-1 => Überprüfung !

Referenzversuch warm nach Korrekturen für warm-2 und warm-4



Ergebnis der Überprüfung: Ungenaue bzw. fehlerhafte Auswertung (warm-2), falsche Umformgeschwindigkeit (warm-4), eventuell ungenügende inhomogene Aufheizung (warm-1).

Umsetzung der wesentlichen Erkenntnisse in eine
„Richtlinie zur Fließkurvenaufnahme“
durch CPM unter Mitwirkung der beteiligten Forschungseinrichtungen

Die Richtlinie enthält Anforderungen bezüglich:

- Probenform
- Probenanzahl
- Stauchwerkzeuge
- Schmierung
- Maschineneinrichtung
- Messtechnik
- Auswerteverfahren
- Dokumentation

Die endgültige Richtlinie wurde zum 3. September 2008 erstellt.

Richtlinie „Fließkurvenaufnahme“

Unter „Fließkurvenaufnahme“ versteht man die Ermittlung der Fließspannung in Abhängigkeit vom Vergleichsumformgrad, in der Regel bei konstanter Temperatur und konstanter Umformgeschwindigkeit.

Je nach Anwendungsspektrum der Fließkurve (Kalt-, Halbwarm-, Warmumformung) umfasst eine derartige Ermittlung einen mehrere 100° großen Temperaturbereich und einen sich über mehrere Zehnerpotenzen erstreckenden Umformgeschwindigkeitsbereich.

Für diese Ermittlungen werden Stauchversuche an einfachen Proben des zu untersuchenden Werkstoffs durchgeführt.

Ziel dieser Richtlinie ist es, sowohl dem Nutzer als auch dem Ermittler solcher Kurven Informationen zu Mindestanforderungen an die Versuchstechnik und Dokumentation bei der Ermittlung hochwertiger Fließkurven an die Hand zu geben.

Probenform:

Als Probenform kommen einfache zylindrische Stauchproben mit einem definierten Höhen/Durchmesser-Verhältnis zum Einsatz. Verwendung fanden dabei bisher Höhen/Durchmesser-Verhältnisse von 1,2 bis 2,0. Empfohlen wird, ein Höhen/Durchmesser-Verhältnis von max. 1,8 nicht zu überschreiten. Typische Probenabmessung: Höhe = 18 mm, Durchmesser = 10 mm

(Speziellere Probenformen wie Rastegaev-Proben oder Kegelstauch-Proben sind in der Regel nicht erforderlich und sollten nur für besondere Anforderungen und begründeter Notwendigkeit verwendet werden.)

Die Proben sollen eine Maßgenauigkeit von $\pm 0,02$ mm aufweisen sowie für die Auswertung einzeln vermessen werden.

Da es zu einer großen plastischen Formänderung kommt, sollte die Probenoberfläche (Mantelfläche) feingedreht sein. Die gleiche Anforderung gilt für die Stirnflächen der Probe, um hier den Reibungseinfluss zu minimieren

Bei gering duktilen Werkstoffen (z.B. Werkzeugstählen, PM-Werkstoffe), bei denen die Probe ab einem gewissen Umformgrad zu Versagen durch Rissbildung neigt, kann zur deren Erfassung eine geschliffene Oberfläche vorgesehen werden.

Probenanzahl:

Für jeden Parametersatz sind 3 Proben zu veranschlagen. (Zur Erhöhung der statistischen Sicherheit werden u. U. auch Proben für 5 Versuche je Parameterkombination veranschlagt).

Stauchwerkzeuge:

Die Oberflächen der Stauchwerkzeuge müssen zur Minimierung der Reibungseinflüsse geschliffen und poliert sein. Ferner ist ein hoher E-Modul, eine hohe Oberflächenhärte und bei Warmversuchen eine hohe Warmfestigkeit erforderlich.

Schmierung:

Für den Kaltbereich (bis 300 °C) wird empfohlen, statt eines flüssigen Schmierstoffs eine PTFE-Folie (Teflon) der Dicke 50 µm zu verwenden. Dies bietet den Vorteil einer hohen Reproduzierbarkeit und lässt eine leichte optische Beurteilung der Proben nach dem Versuch zu. Bei größeren Umformgraden sollte auf andere Schmiermittel bzw. auf den Kegelstauchversuch oder auf die Rastegaev-Proben ausgewichen werden.

Für den Warmbereich ist hinsichtlich der Schmierung die Art der Probenerwärmung zu beachten. Wird während des Versuches konduktiv (Kontakt über die Stirnflächen) erwärmt, so ist ein Schmiermittel zu benutzen, welches elektrisch leitfähig ist. Hier käme ein stromleitendes, graphithaltiges Schmiermittel in Frage.

Ansonsten wird Schmierung mit Graphitemulsionen und -suspensionen, Bornitrid oder mit Gläsern empfohlen, wobei graphithaltige Mittel die Gefahr einer Aufkohlung mit sich bringen.

Maschineneinrichtung:

Für die notwendigen Untersuchungen zur Aufnahme einer Fließkurve sind insbesondere servo-hydraulische Prüfmaschinen geeignet.

Die Maschine sollte über eine Weg- und Kraftregelung verfügen, um mittels eines definierten Geschwindigkeitsprofils (ds/dt) eine konstante Umformgeschwindigkeit (dj/dt) abzubilden.

Es sollte möglich sein, ein großes Spektrum von Umformgeschwindigkeiten zu fahren, wobei für den Bereich schnellerer Umformung eine geregelte Umformgeschwindigkeit von mind. 10 1/s erreicht werden sollte. Für viele Umformprozesse ist in der Regel eine Spanne von 0,1 1/s bis 10 1/s. ausreichend, doch wäre ein Spektrum von 0,001 1/s bis 50 1/s wünschenswert, da diese Spanne eine ausreichende Genauigkeit für eine Umformgeschwindigkeitsextrapolation bietet. Je nach Prozess, für den die Fließkurven aufgenommen werden, können aber auch wesentlich höhere oder auch langsamere Umformgeschwindigkeiten erforderlich sein. Auch bei Geschwindigkeiten unter 0,1 1/s (quasistatisch) kann auf eine konstante Umformgeschwindigkeit nicht verzichtet werden.

Die verwendete Erwärmungsart (Öfen, Stauchbecher, konduktive/induktive Erwärmung) sollte Temperaturen von RT bis zu 1280°C ermöglichen.

Maschineneinrichtung (Fortsetzung):

Für die Probenerwärmung, insbesondere im Warmbereich mit zu erwartender Gefügeveränderung, muss sowohl die Aufheizgeschwindigkeit als auch die Haltedauer auf Prüftemperatur vorgebar sein, um damit bei Bedarf möglichst weit der Forderung nachkommen zu können, das Temperaturprofil der Fließkurvenaufnahme mit dem des zu modellierenden Prozess in Übereinstimmung zu bringen.

Für die Probenerwärmung zur Fließkurvenaufnahmen im Kaltbereich, für den je nach Werkstoff ein Temperaturbereich bis 400°C als ausreichend angesehen wird, bestehen keine besonderen Anforderungen.

Als Werkstoff für die Stauchplatten wird in der Regel Hartmetall eingesetzt (hoher E-Modul und dadurch niedrige Nachgiebigkeit und Verformung). Für Untersuchungen in hohen Temperaturbereichen können auch keramische Werkstoffe zum Einsatz kommen.

Die Maschinennachgiebigkeit (Aufbiegung, elastische Verformung) sollte bestimmbar sein, um damit die Versuchsdaten entsprechend korrigieren zu können. Andernfalls müssen direkte Messmethoden für die Wegaufnahme an der Probe eingesetzt werden.

Messtechnik:

Grundsätzlich ist es empfehlenswert, die notwendigen Werte (z.B. Probenhöhe im Stauchversuch) mittels Sensorik möglichst direkt an der Probe zu messen, um Einflüsse des Versuchsaufbaues auszuschließen.

Dennoch erweisen sich induktive Wegaufnehmer in der Maschine als ausreichend, sofern die Elastizität der Maschine und der Versuchseinrichtung kompensiert werden können.

Für die entsprechenden Messeinrichtungen werden folgende Genauigkeiten empfohlen:

Wegmesseinrichtung: Induktive Wegaufnehmer: Linearitätsabweichung 0.2%

Kraftmesseinrichtung: Es sollten je nach zu erwartender Kraft unterschiedliche Messaufnehmer verwendet werden, um für die unterschiedlichsten Kraftbereiche immer eine möglichst hohe Genauigkeit zu erzielen. Insbesondere ist zu beachten, dass Messaufnehmer für kleinere Messbereiche in der Regel eine höhere Genauigkeit aufweisen. Es können sowohl DMS-Kraftmessdosen (für geringe Umformgeschwindigkeiten) als auch Piezo-Kraftsensoren (für hohe Umformgeschwindigkeiten) eingesetzt werden.

Typische Anforderungen sind:

Messbereich bis 500 kN: Messbereichsfehler kleiner als $\pm 0.25\%$

Messbereich oberhalb von 500 kN: Messbereichsfehler $\pm 1\%$.

Linearitätsabweichung: $< \pm 0.5\%$

Auswerteverfahren:

Zielgröße ist generell die Fließspannung des Werkstoffs in Abhängigkeit vom Vergleichsumformgrad. Die Fließspannung lässt sich aus der im Versuch ermittelten Kraft und aus der sich aus der jeweiligen aktuellen Probenhöhe ergebenden Probenquerschnittsfläche ermitteln. Der Vergleichsumformgrad lässt sich aus der jeweiligen aktuellen Probenhöhe berechnen. Dabei ist zu beachten, dass z. B. zur Einbindung in FEM-Software der Umformgrad (\sim plastic strains) in der Regel nur den plastischen Anteil enthält, also statt der augenblicklichen Probenhöhe die bleibende Probenhöhe heranzuziehen ist.

Wichtig für die Auswertung des Stauchversuchs ist die Festlegung der Dehngrenze für den Fließbeginn. Es wird empfohlen die Dehngrenze $R_p 0,05$ $R_p 0,2$ (in DIN 50106 zum Druckversuch ist die Rede von $\sigma_{d0,2} = F_{0,2}/S_0$ mit Druckkraft $F_{0,2}$ und Anfangsquerschnitt S_0) zu verwenden.

Für diese Auswertung sind verschiedene Methoden und Vorgehensweisen denkbar, die Dehngrenze zu ermitteln bzw. festzulegen und anschließend ab dieser Dehngrenze die Fließkurve zu berechnen.

Eine übliche Vorgehensweise ist die optische Festlegung des Fließbeginns anhand des Kraft-Wegverlaufs. Dies beinhaltet zwar - da der Auswerter den sinnvollen Wertebereich für die Fließkurvenermittlung bestimmt - eine etwas subjektive Festlegung, doch kann so in guter Näherung der Fließbeginn bestimmt werden.

Auswerteverfahren (Fortsetzung):

Darüber hinaus kann über den Steigungsabfall inkrementell anliegender Tangenten für den interessanten Bereich zu Beginn der Verformung der Fließbeginn auch hinreichend genau automatisiert ermittelt werden

Neben der Festlegung des Fließbeginns sollte ein Auswertalgorithmus zur Bestimmung einer Fließkurve aus einem Stauchversuch einen Schritt zur Berücksichtigung und Kompensation von Maschinen- und Werkzeugelastizität enthalten. Darüber hinaus ist es wünschenswert, die Messwertaufzeichnung im unbelasteten Zustand zu beginnen und den Kraftanstieg sowie die Maximalkraft und auch die Entlastung mit allen Parametern zu erfassen.

Ein genereller Auswertalgorithmus könnte wie folgt aussehen:

Aufnahme der Kraft-Weg-Verläufe in benötigter Anzahl.

Detektion von Ausreißern und Weiterverarbeitung, falls notwendig Versuchswiederholung

Signalglättung der Messsignale falls erforderlich

Korrektur um die maschinen- und werkzeugspezifischen Elastizität

Festlegung des Fließbeginns

Auswerteverfahren (Fortsetzung):

Ermittlung der Fließkurve durch Berechnung des Umformgrads und der Fließspannung

Grafische und tabellarische Ausgabe von: Einzelfließkurven, Kraft-Weg-Verläufen, Verläufe für Temperatur und Umformgeschwindigkeit

Für weitere Korrekturen hinsichtlich Temperatur und Reibung, die generell empfehlenswert sind, oder für Auswertungen zur Beschreibung der ermittelten Fließkurve durch einen funktionalen Ansatz kann der skizzierte Auswertalgorithmus weitere Arbeitsschritte wie:

Durchführung einer Reibungs- und Temperaturkorrektur

Durchführung einer Regressionsbestimmung

umfassen.

Dokumentation:

Zwingend erforderlich ist eine ausreichende Dokumentation. Nur diese ermöglicht im Nachhinein, die Qualität der Fließkurven zu beurteilen, und ist deshalb zusammen mit der Fließkurve zur Verfügung zu stellen.

Zu einer ausreichenden Dokumentation sollten gehören:

- Angaben zum Werkstoff mit Analyse und Herstellerzeugnis
- Angaben zu Vorgeschichte (wie: gewalzt, gezogen, gegläht) mit detaillierter Angabe aller die Werkstoffeigenschaften beeinflussenden Arbeitsschritte
- Gefügestand (eventuell als Sonderleistung)
- Lage der Proben im Vormaterial
- Die Fließkurven für die entsprechenden Parameterkombinationen von Umformgeschwindigkeit und Temperatur.
- Datenfile zur Dokumentation der gefahrenen Umformgeschwindigkeiten und der Probestemperatur während der Versuche.

Für eine ggf. nachträglich gewünschte Neuauswertung sollten auch die Kraft-, Weg- und Zeitschriebe verwahrt werden.