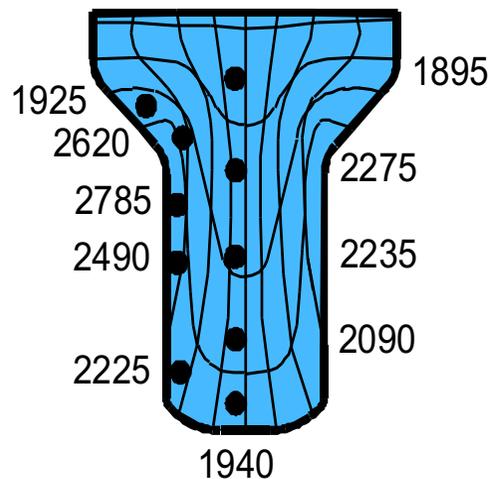
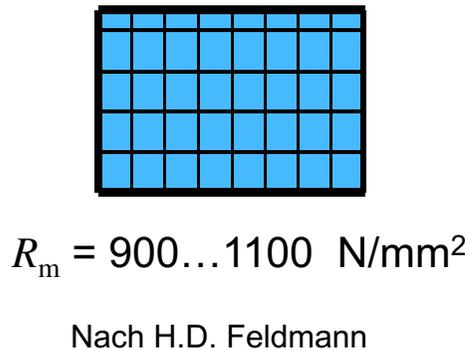


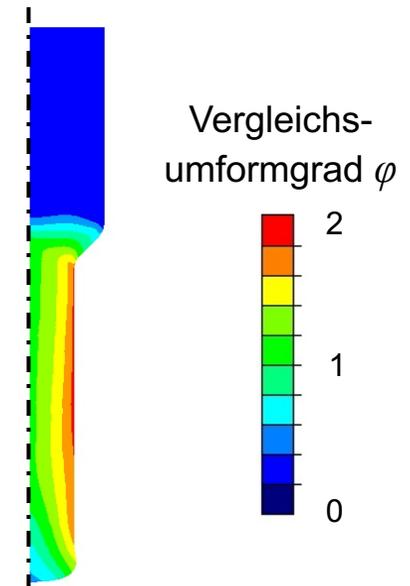
Umformtechnisch hergestellte Getriebewelle

Ziel → Gezielte Einstellung der Prozessparameter (Werkzeug, Werkstoff, Reibung, Stufenabfolge) und Ausnutzung der lokalen Kaltverfestigung zur Einsparung von Gewicht oder Substitution von Wärmebehandlungen

Festigkeitsverteilung vor und nach der Umformung (N/mm²)



Umformgradverteilung (Umformgrad $\varphi = 1$)



Forschungsinstitute



Felix Kolpak
Oliver Napierala
Christoph Dahnke

Forschungsvereinigungen



Im Folgenden werden Ergebnisse aus dem Forschungsprojekt *Erweiterung technologischer Grenzen bei der Massivumformung in unterschiedlichen Temperaturbereichen* (P 1057 / IGF-Nr. 18229 N) präsentiert.

Konzept zur Getriebewellenfertigung

Konzept	Prozessroute	Matrizengeometrie & Tribologie
<p>Wellengrundkörper</p> <p>Getriebewelle</p> <p>+</p> <p>Verzahnung</p>	<p>Einstufig</p> <p>Zweistufig</p>	<p>μ_1, μ_2, μ_3</p>

Vorgehen

Numerische Analyse der Einflussparameter



Maximierung der Umformgrade im Randbereich beim VVFP

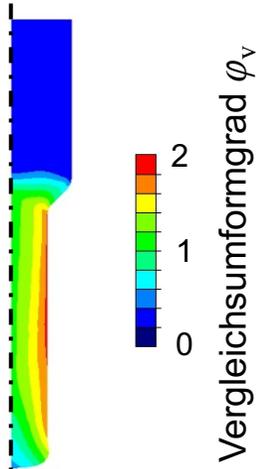


Mehrstufige Fließpressversuche



Bauteileigenschaften

- Härte
- Rauheit
- Eigenspannungen
- Mikrostruktur
- Festigkeit



Einflüsse auf die Festigkeit im Randbereich

- Werkstoff
- Prozessroute
- Werkzeuggeometrie
- Schmierung / Reibung

Numerische Untersuchungen

Vollfaktorielle Analyse skaliertes Wellengrundkörper:

Werkstoffe:

- 16MnCr5
- 18CrNiMo7-6
- 100Cr6

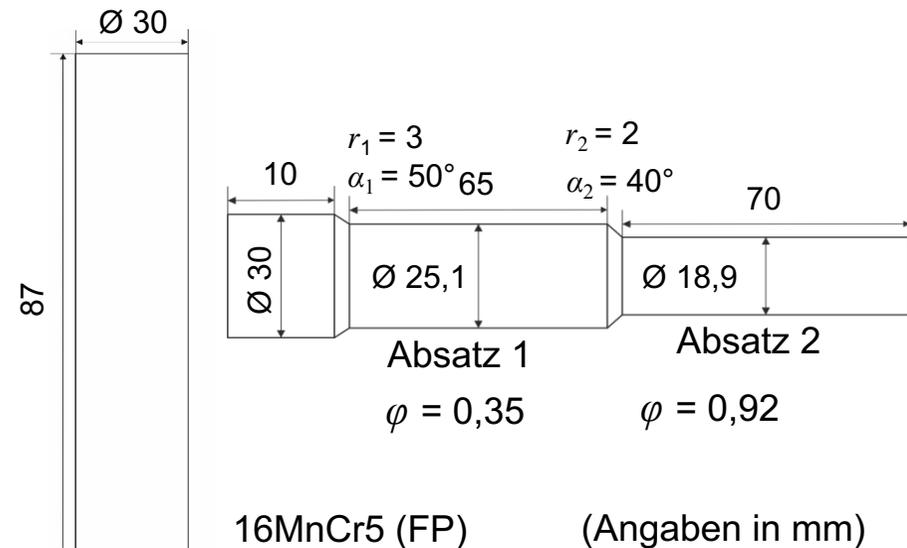
Parameter:

- Einstufig, Zweistufig
- $2\alpha_1 = 60^\circ - 150^\circ$
- $2\alpha_2 = 60^\circ - 150^\circ$
- $r_1 = 1 \text{ mm} - 3 \text{ mm}$
- $r_2 = 1 \text{ mm} - 3 \text{ mm}$
- $\mu = 0,02 - 0,06$

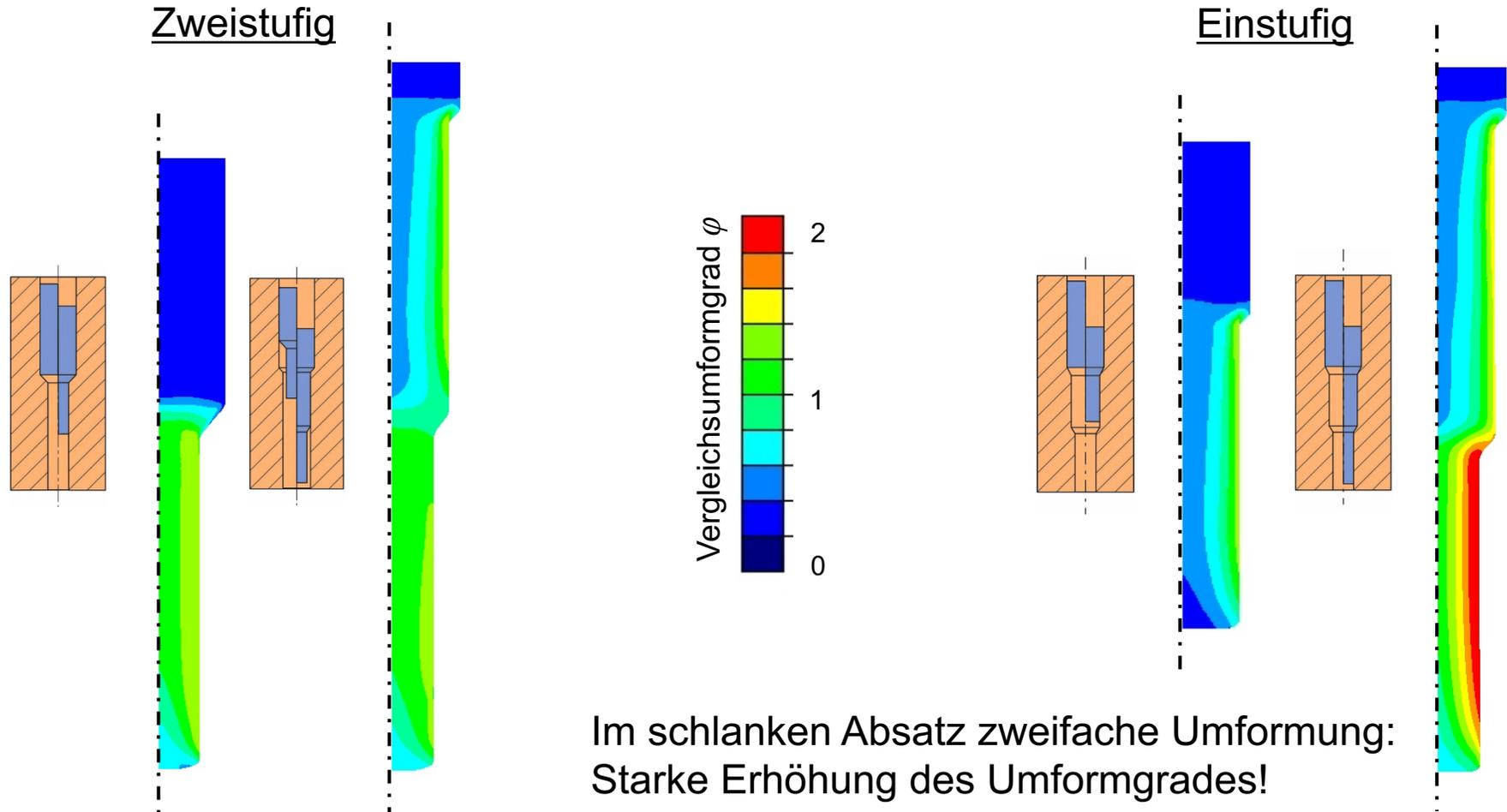
Begrenzende Faktoren:

- Max. Stempelkraft $\leq 2,8 \text{ GPa}$
- Max. Auswerferkraft $\leq 250 \text{ kN}$

Konventionelle Getriebewelle (Referenz)



Einfluss der Prozessroute auf den Umformgrad

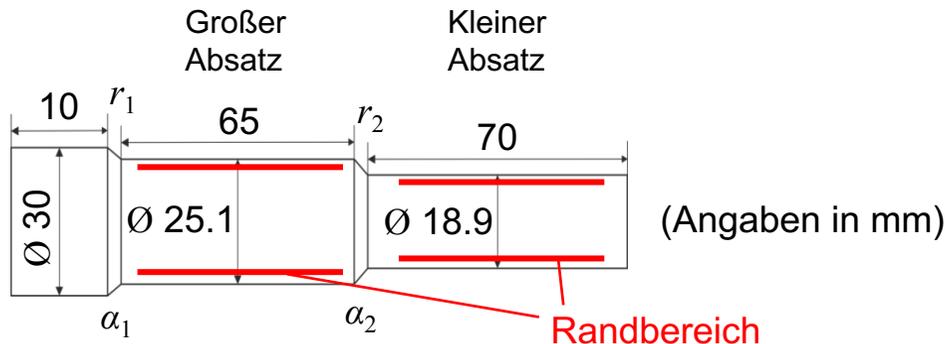


Ableitung der wesentlichen Einflussfaktoren

Parameter	Konventionell (zweistufig)	Zweistufig optimiert	Einstufig optimiert
r_1	2 mm	1 mm	1 mm
$2\alpha_1$	100°	145°	145°
r_2	3 mm	1 mm	1 mm
$2\alpha_2$	80°	145°	60°
Vergleichsumformgrad φ im Randbereich			
Großer Absatz	1,5	3,7 (+ 146%)	3,7 (+ 146%)
Kleiner Absatz	1,3	3,3 (+ 154%)	4,2 (+ 223%)

Vergleichsumformgrad im Randbereich – Einflüsse:

- Steigt mit zunehmender Reibung μ
- Steigt mit abnehmendem Radius r
- Steigt mit zunehmendem Schulteröffnungswinkel α
- Höhere Dehnung bei einstufiger Prozessroute



Experimentelle Validierung

Versuchsreihe 1

Werkstoff	16MnCr5					
Prozessroute	Zweistufig konv.		Zweistufig opt.		Einstufig opt.	
Schmierstoff	MoS ₂	Wachs	MoS ₂	Wachs	MoS ₂	Wachs
Abkühlen	X		X			

Versuchsreihe 2

Werkstoff	18CrNiMo7-6		
Prozessroute	Zweistufig konv.	Zweistufig opt.	Einstufig opt.
Schmierstoff	MoS ₂	MoS ₂	MoS ₂

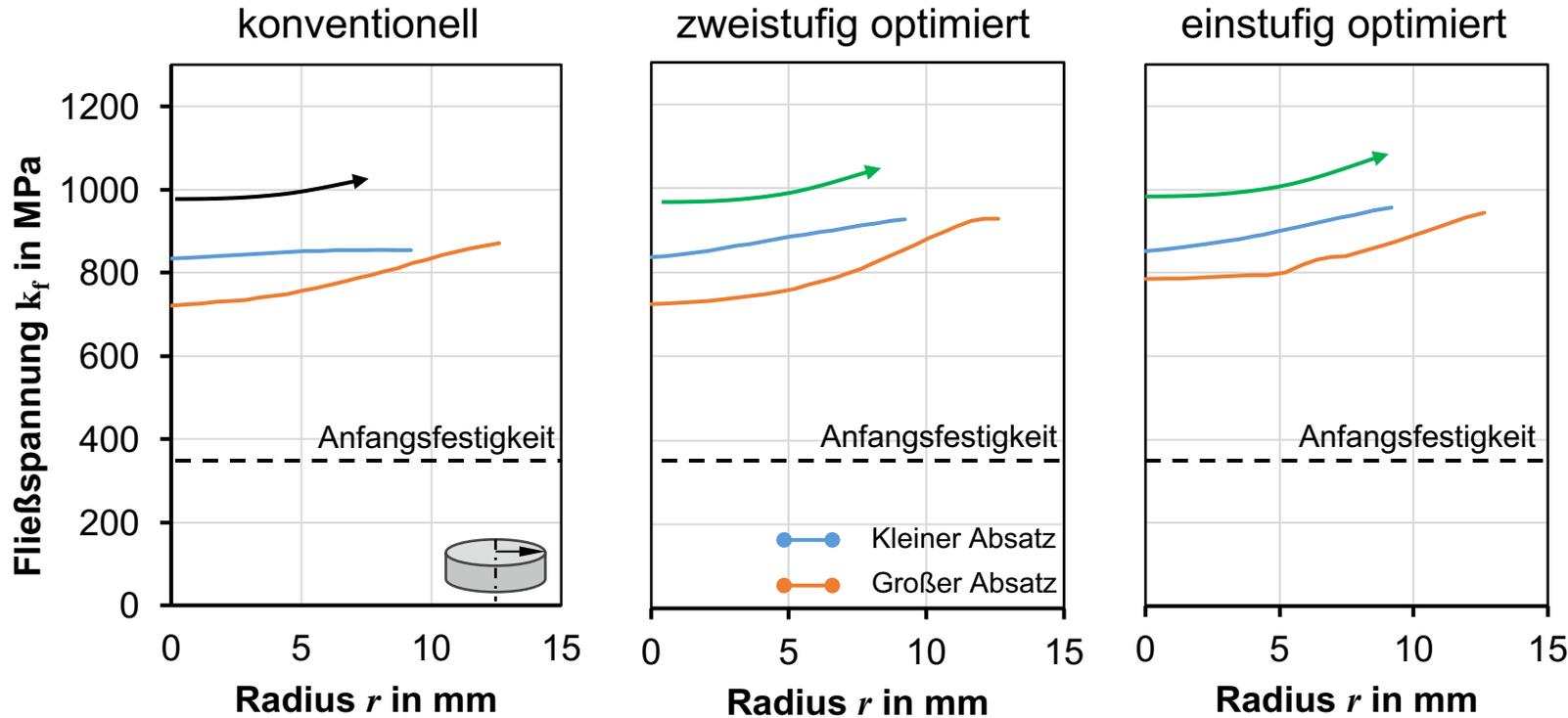
Versuchsreihe 3

Werkstoff	100Cr6		
Prozessroute	Zweistufig konv.	Zweistufig opt.	Einstufig opt.
Schmierstoff	MoS ₂	MoS ₂	MoS ₂



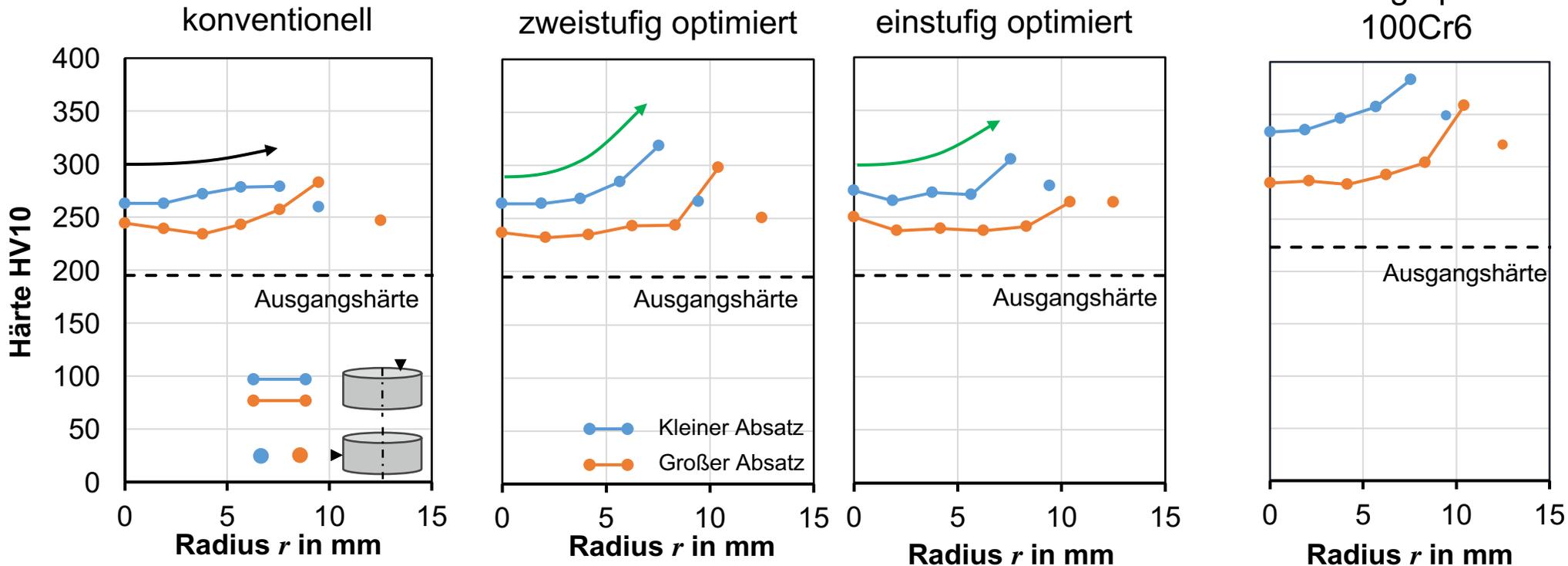
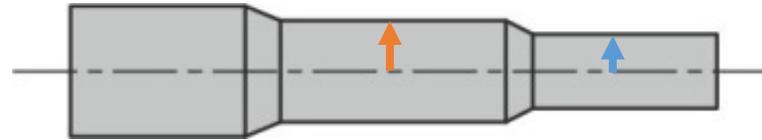
Hydraulische Ziehpresse
M+W BZE 1000-30.1.1

Festigkeitsverlauf Simulation – 16MnCr5



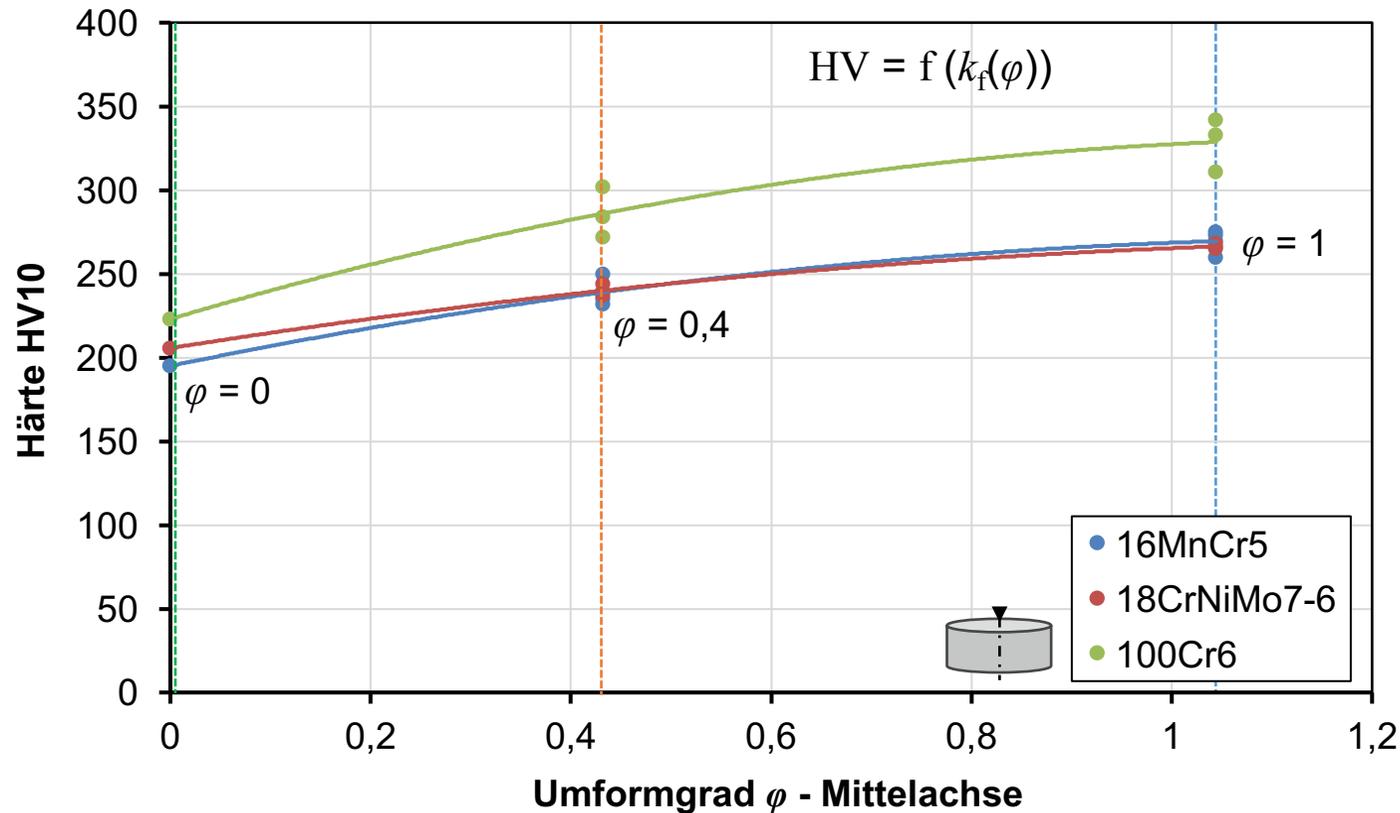
- Optimierte Prozessvarianten führen zu steileren Festigkeitsanstieg über Bauteilradius
- Experimentelle Validierung über Härtemessungen ($k_f \sim HV$)

Härte über Radius



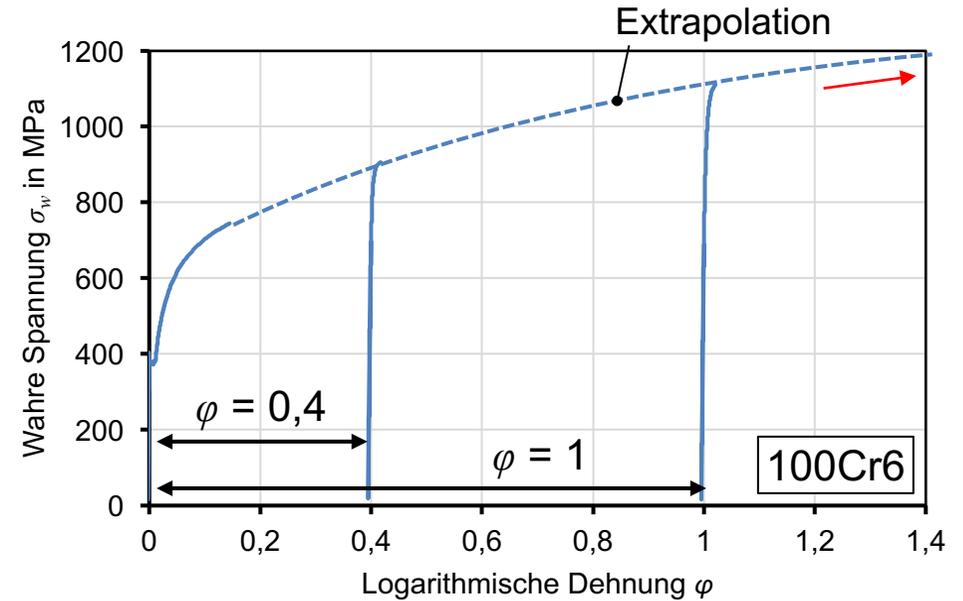
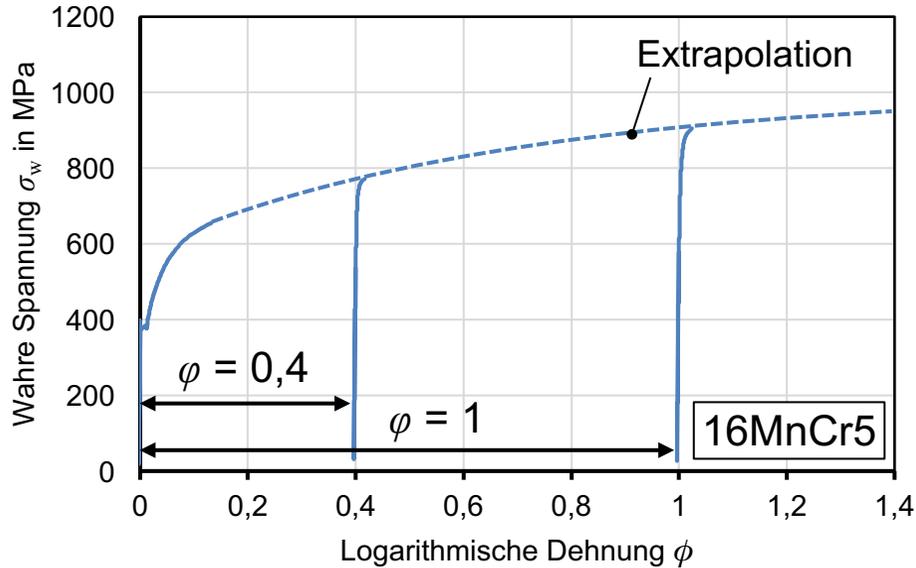
- Numerische Vorhersagen bzgl. Härtesteigerung bestätigt
- **ABER:** Kaltverfestigung kann Einsatzhärten nicht ersetzen (Grundlage.: 800 HV Oberflächenhärte)

Härte über Umformgrad

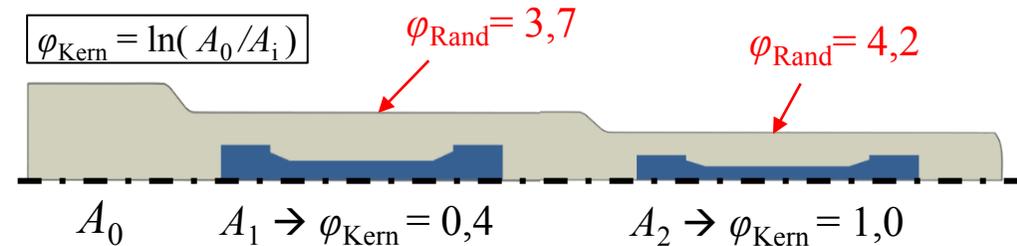


Härte ist bei $\varphi = 1$ für alle Werkstoffe nahezu gesättigt

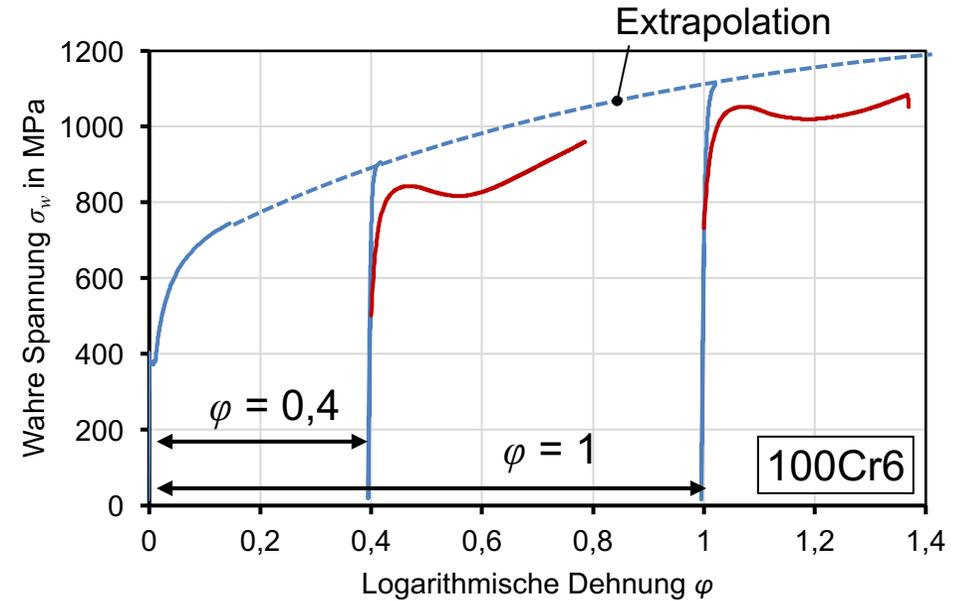
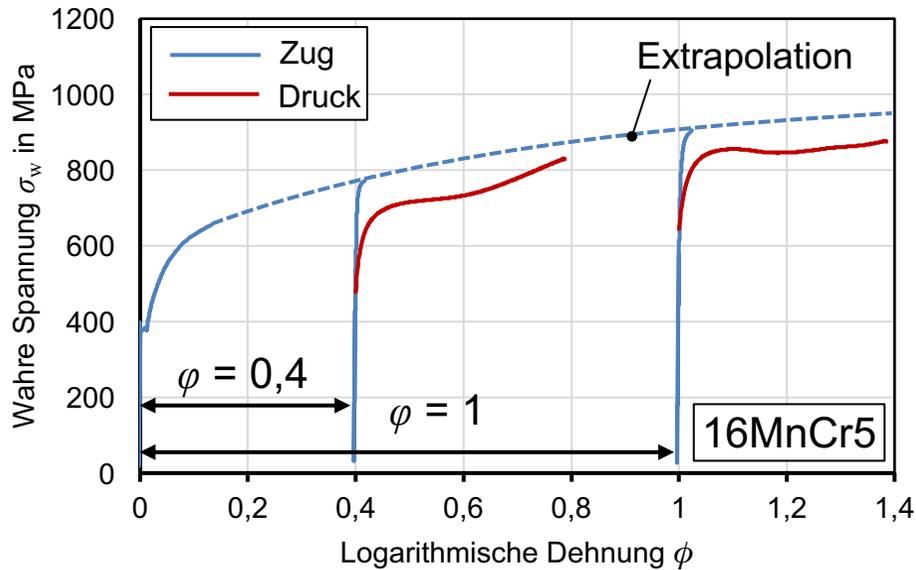
Festigkeit



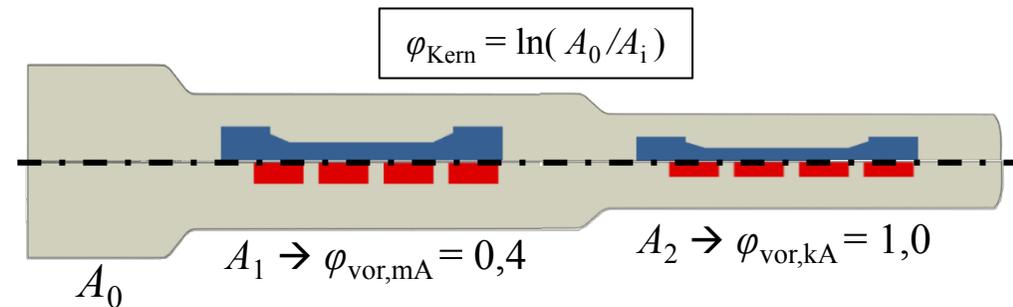
- Werkstoffe zeigen Verfestigungspotential, selbst für $\phi \geq 1,0$
- Zugfestigkeit steigt, trotz Sättigung der Härte
- Unterschied zwischen Zug- und Druckfestigkeit → Bauschingereffekt



Festigkeit



- Werkstoffe zeigen Verfestigungspotential, selbst für $\phi \geq 1,0$
- Unterschied zwischen Zug- und Druckfestigkeit → Bauschinger Effekt
- Zugfestigkeit steigt, trotz Sättigung der Härte



Zusammenfassung: Ergebnismatrix

Zielgröße

16MnCr5	Härte		Rauheit		Eigenspannungen		Mikrostruktur	
	Groß	Klein	Groß	Klein	Groß	Klein	Groß	Klein
konventionell	Referenz							
zweistufig optimiert	+	+	--	+	o	--	+	+
einstufig optimiert	+	+	++	++	+	+	-	+

18CrNiMo7-6	Härte		Rauheit		Eigenspannungen		Mikrostruktur	
	Groß	Klein	Groß	Klein	Groß	Klein	Groß	Klein
konventionell	Referenz							
zweistufig optimiert	o	+	--	++	-	-	+	+
einstufig optimiert	+	+	+	++	+	+	+	+

100Cr6	Härte		Rauheit		Eigenspannungen		Mikrostruktur	
	Groß	Klein	Groß	Klein	Groß	Klein	Groß	Klein
konventionell	Referenz							
zweistufig optimiert	+	+	--	+	--	--	+	+
einstufig optimiert	++	++	o	-	++	++	-	+

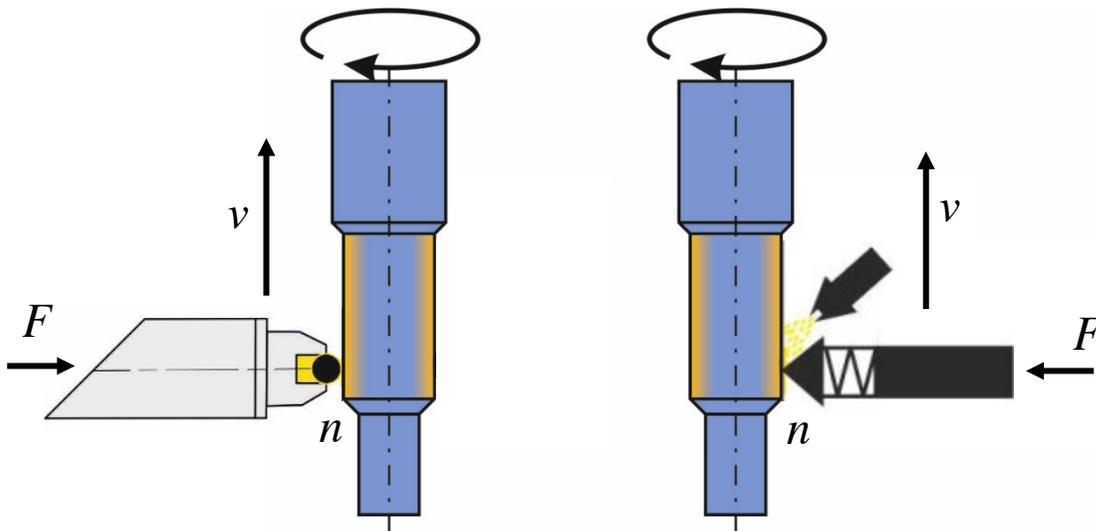
Zwischenfazit

- Einflüsse auf die Oberflächenfestigkeit fließgepresster Getriebewellen
 - Werkstoff (16MnCr5, 18CrNiMo7-6, 100Cr6)
 - Werkzeuggeometrie (Schulteröffnungswinkel, Werkzeugradien)
 - Prozessroute (einstufig / zweistufig)
 - Schmierstoff (Wachs / MoS₂)
- Optimierte Prozessvarianten führen zu besseren Ergebnissen bzgl.
 - Härte
 - Rauheit
 - Festigkeitim Vergleich zu konventioneller Methode
- **ABER:** Prozessvarianten mit optimierter Kaltverfestigung können Wärmenachbehandlung (z.B. Einsatzhärten) nicht ersetzen!
 - Alternative (lokale) Wärmebehandlungsstrategien (z.B. Induktionshärten)?
 - Übertragung der Erkenntnisse auf Verfahren ohne Wärmebehandlung oder Bauteilen bei denen konventionell Vergütungsstähle zum Einsatz kommen

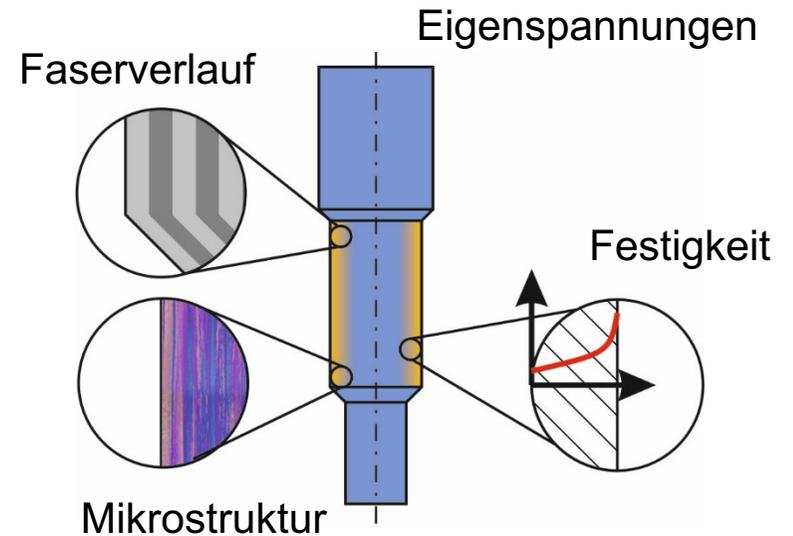
Oberflächenfestwalzen fließgepresster Wellen

Ziel → Gezielte Einstellung der Prozessparameter (Werkzeug, Werkstoff, Walzkraft, Vorschub, Überrollungszahl) zur Einsparung von Gewicht oder Substitution von Wärmebehandlungen

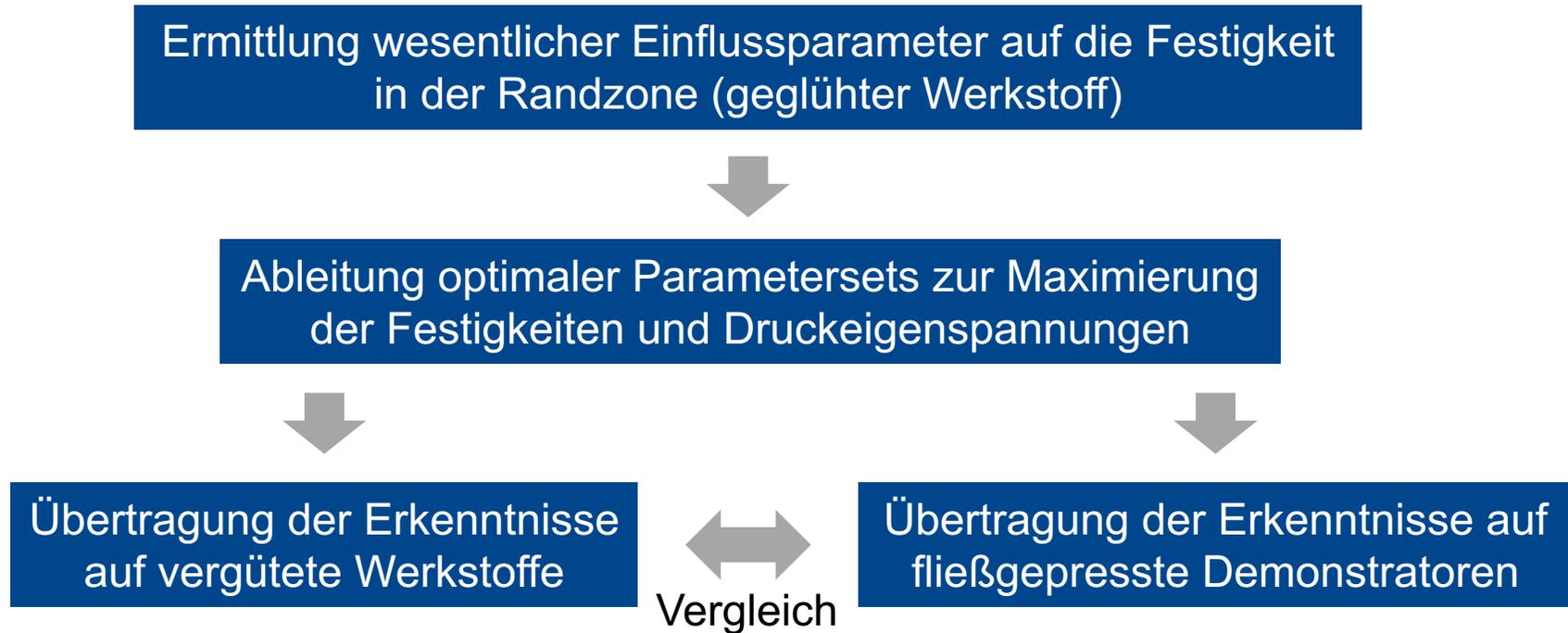
Werkzeugkonzepte/ Prozessparameter



Eigenschaften



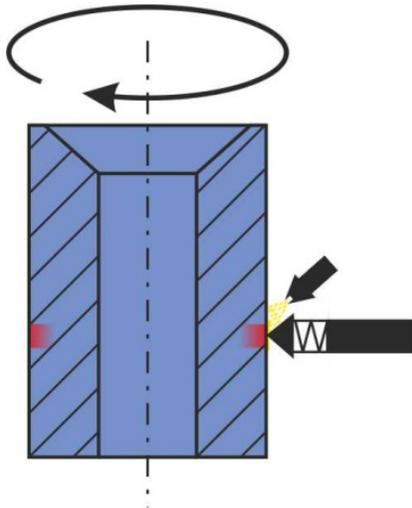
Vorgehen



Vergleich Werkzeugkonzepte

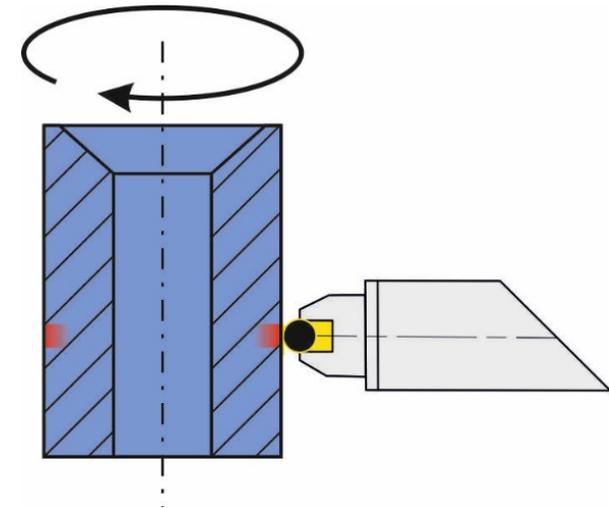
Diamant-Glättwerkzeug

- Federnd gelagert
- Walzkraft zwischen 50-570 N
- Bearbeitbare Werkstoffe mit Härten bis 64 HRC
- Einstellung über Zustellung und Feder
- Schmierung über MMKS mit Schneidöl

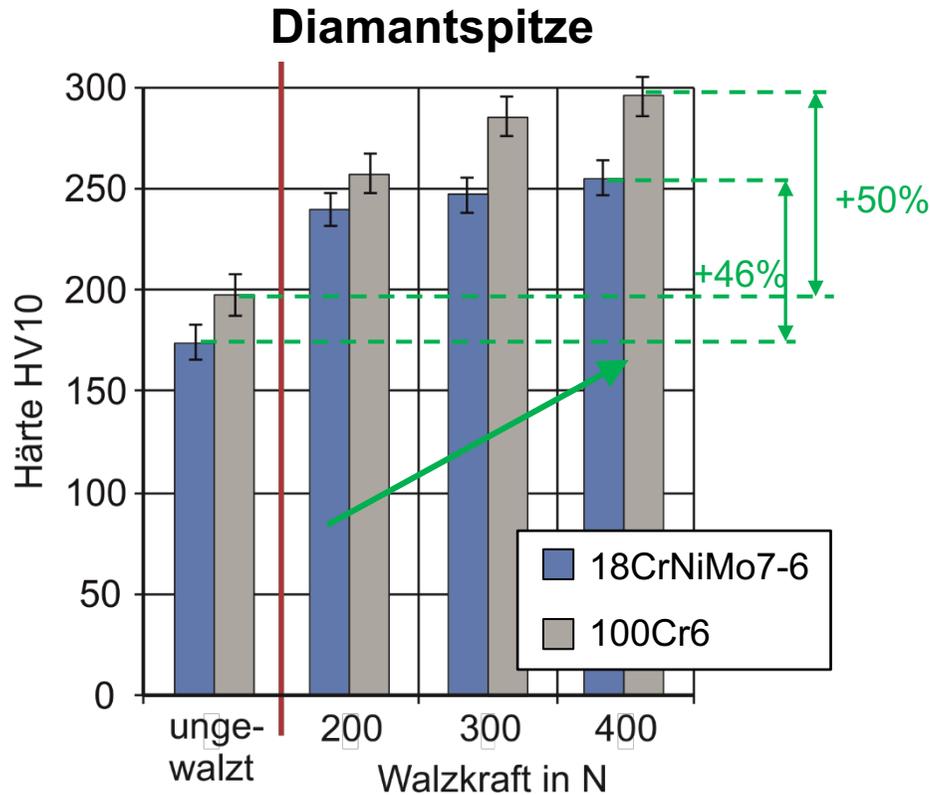


Hartmetallkugel

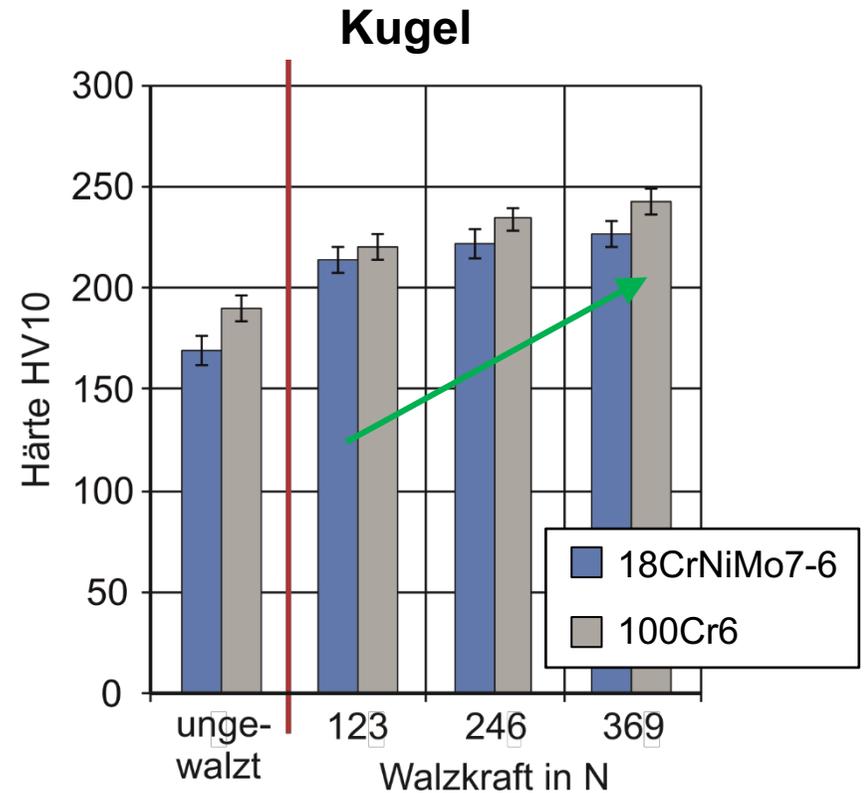
- Hydrostatisch gelagert
- Walzkraft zwischen 0-1,4kN (600 bar)
- Bearbeitbare Werkstoffe mit Härten bis 65 HRC
- Einstellung über Druckregelung
- Selbstschmierung der Kugel (HG6)



Einfluss der Walzkraft

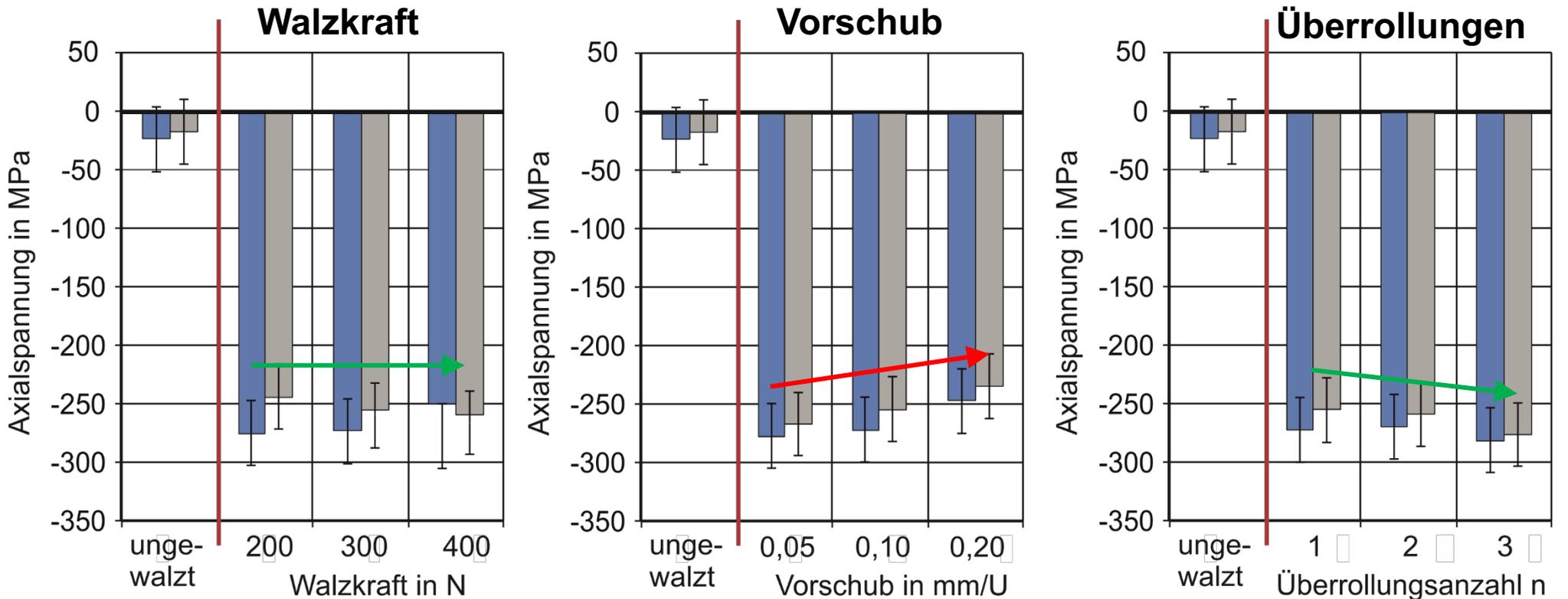


Vorschub: 0,10 mm/U
 Drehzahl: 385 U/min
 Überrollung: 1

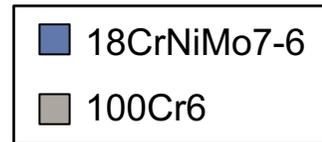


Vorschub: 0,10 mm/U
 Drehzahl: 385 U/min;
 Überrollung: 1

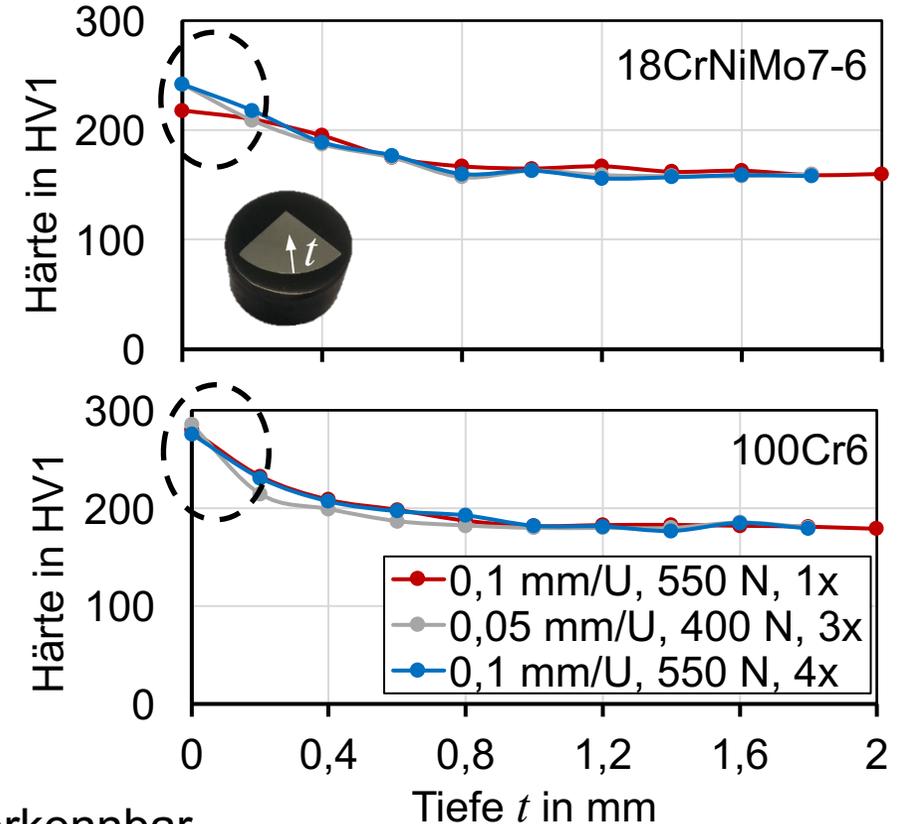
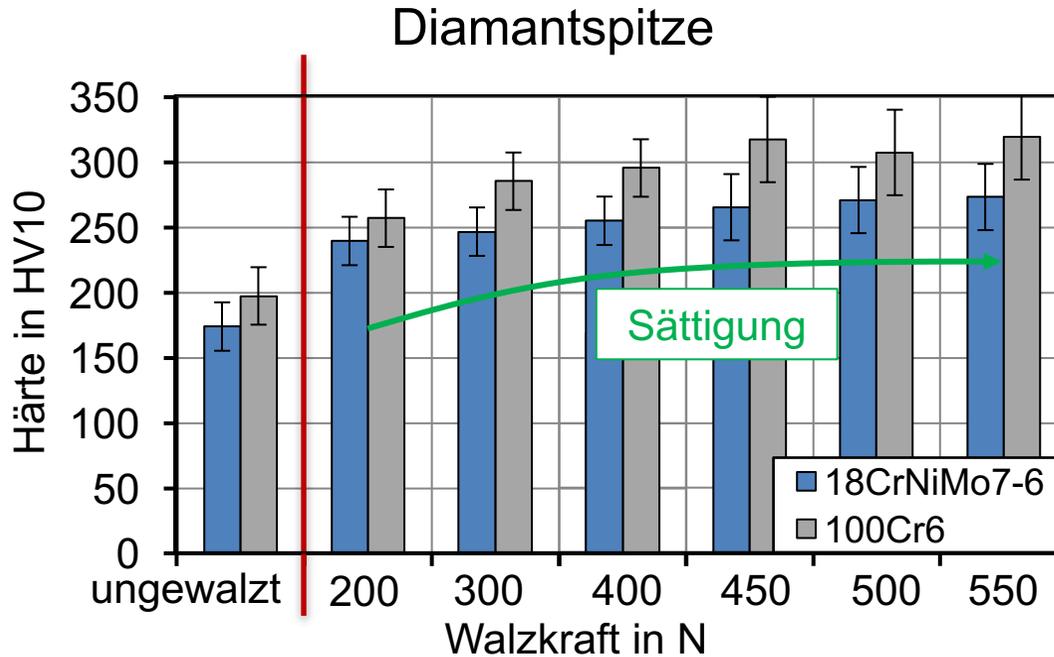
Eigenspannungen (Diamantspitze)



- Durchweg Einbringung von hohen Druckeigenspannungen
- Einfluss der variierten Parameter generell gering



Fazit (Einzelparameter-Variation)

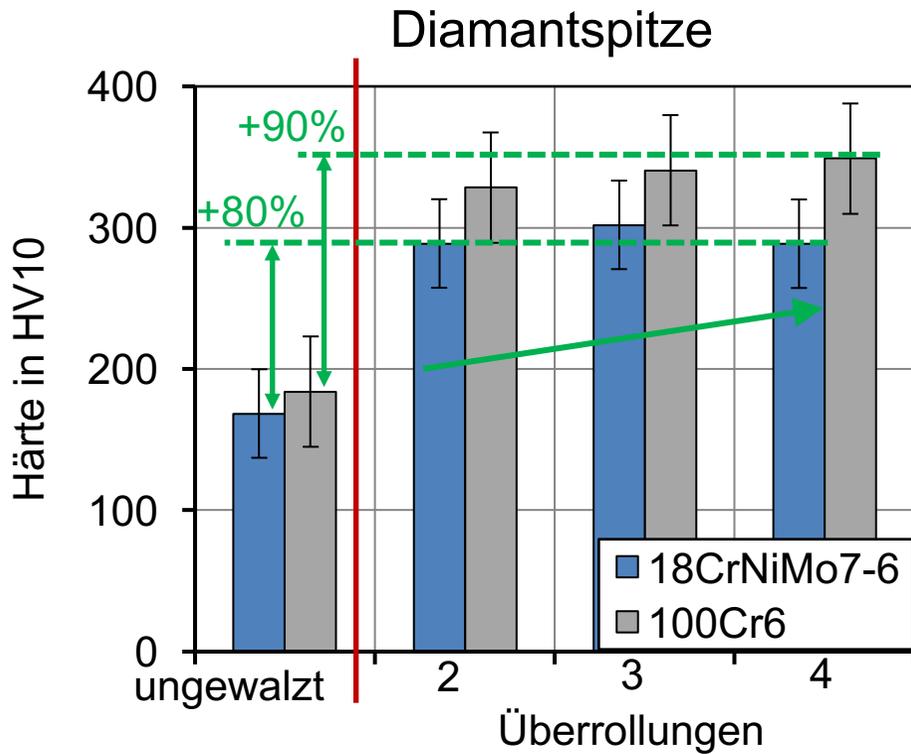


Kein Härtemaximum unterhalb der Oberfläche erkennbar

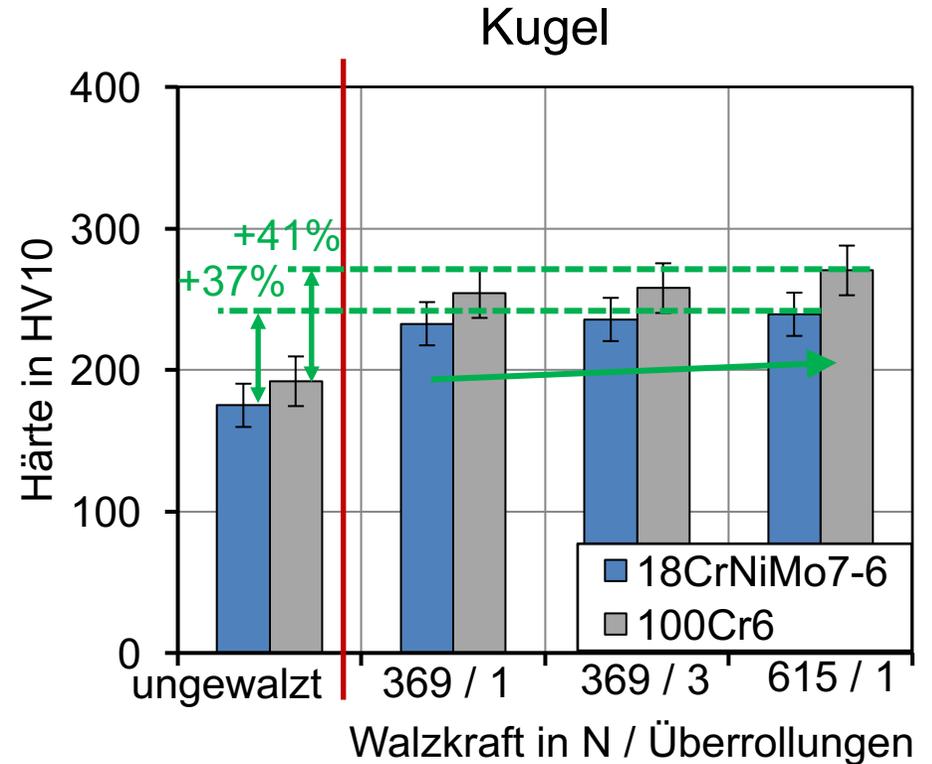
→ Verfestigungspotential noch nicht ausgeschöpft!

→ Weitere Härtesteigerung nur durch Kombination verschiedener Parameter möglich

Maximal erzielte Härtesteigerungen (Mehrparameter-Variation)

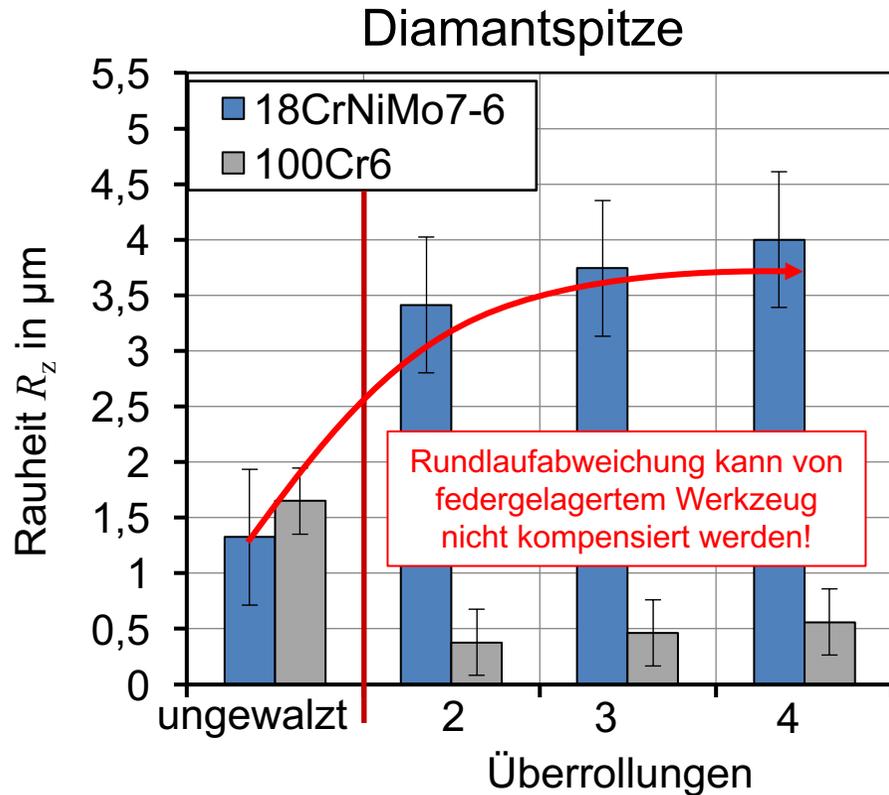


Vorschub: 0,1 mm/U
Kraft: 550 N

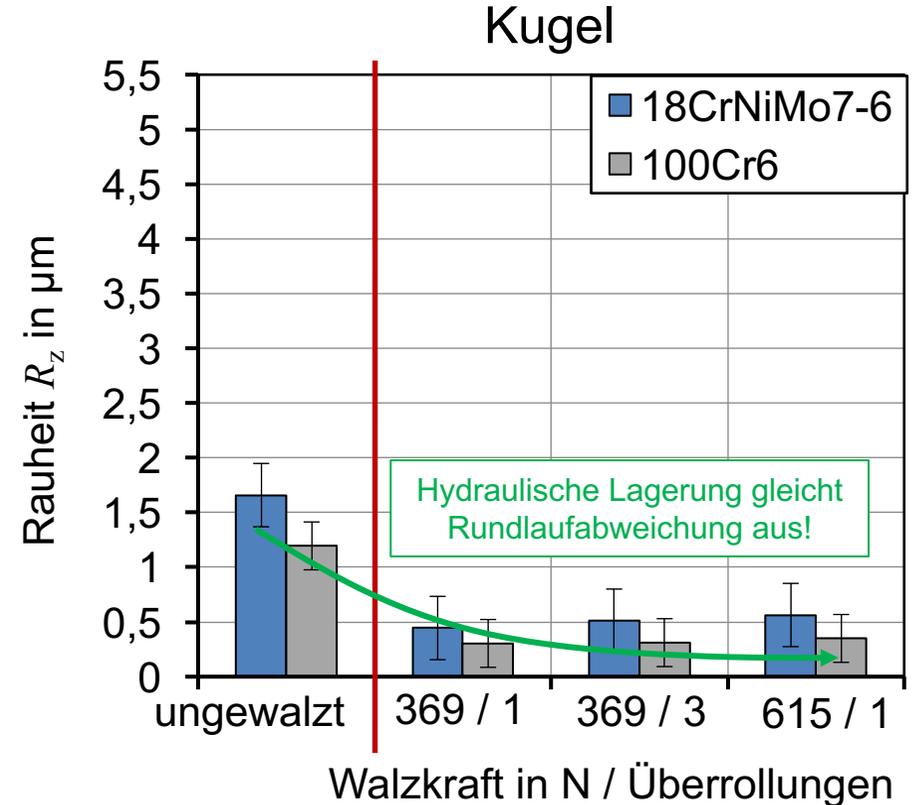


Vorschub: 0,05 mm/U
Kugeldurchmesser: 6 mm

Einfluss der Rundlaufabweichung (40 μm) auf die Rauheit

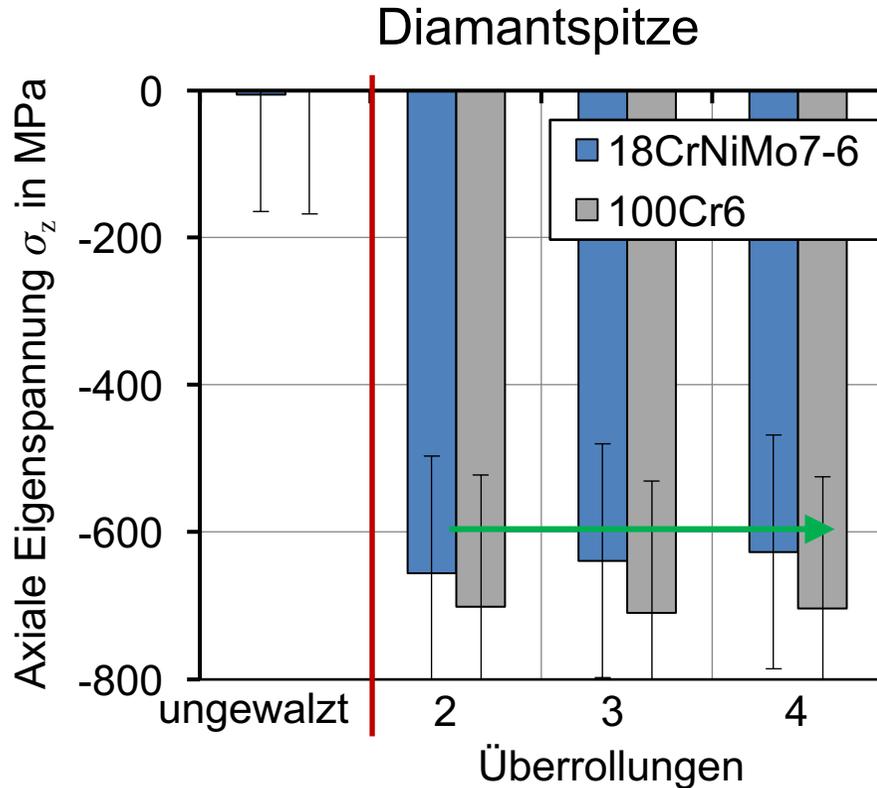


Vorschub: 0,1 mm/U
Kraft: 550 N

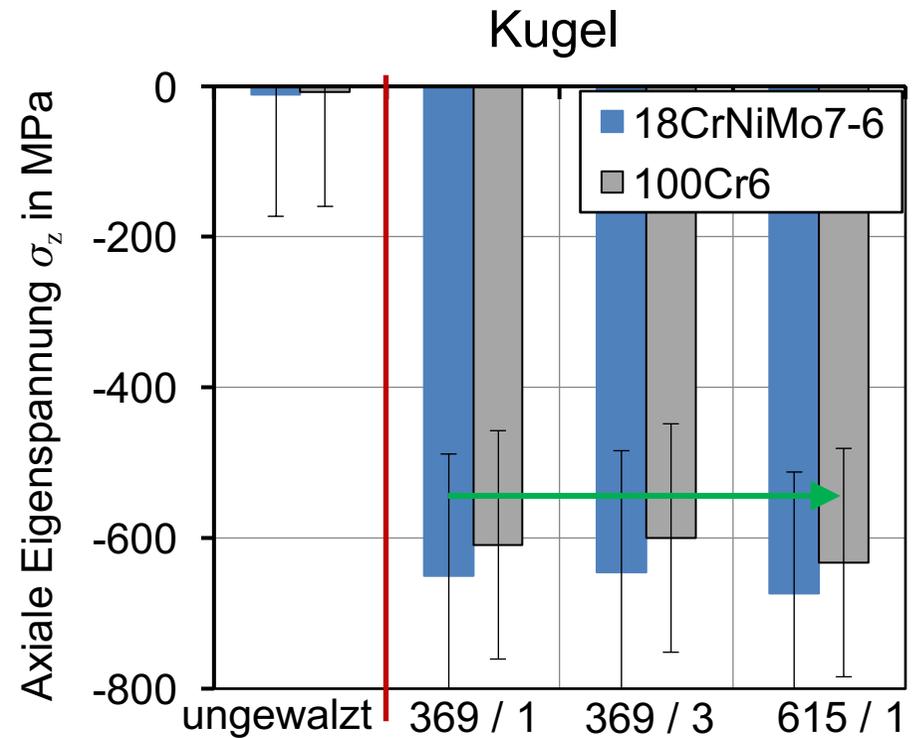


Vorschub: 0,05 mm/U
Kugeldurchmesser: 6 mm

Einfluss auf Eigenspannungen



Vorschub: 0,1 mm/U
Kraft: 550 N



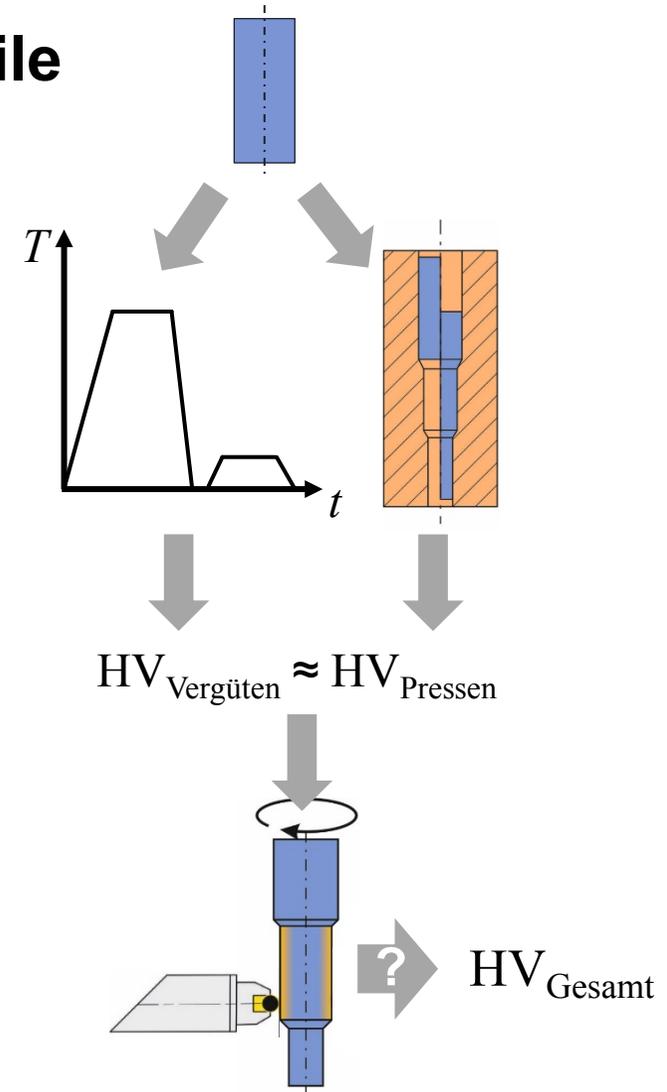
Vorschub: 0,05 mm/U
Kugeldurchmesser: 6 mm

Festwalzen vergüteter / fließgepresster Teile

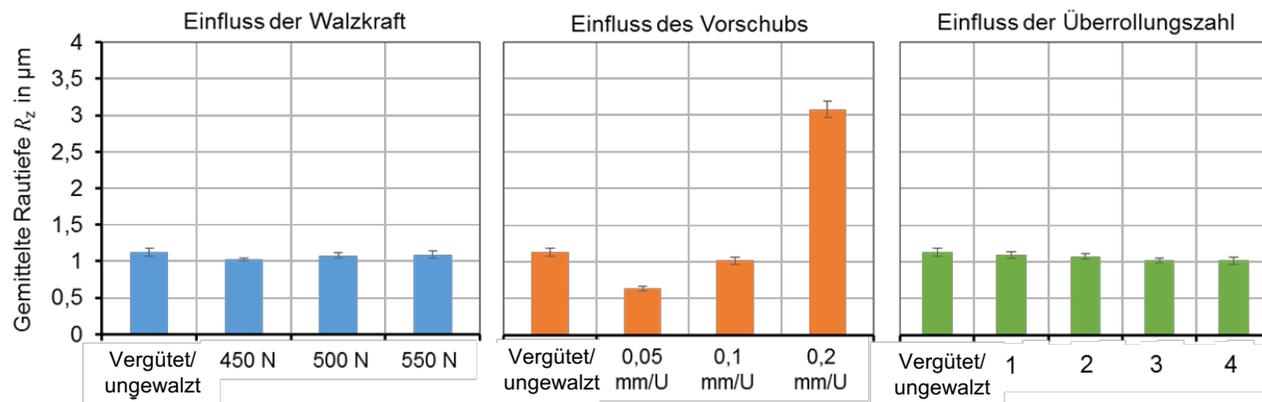
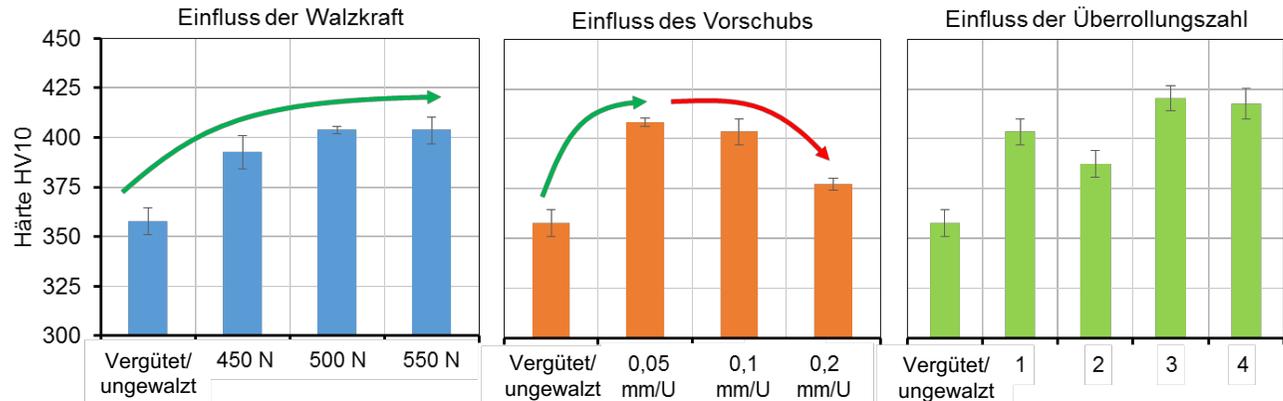
- Festwalzen gehärteter Wellen aus 100Cr6
 - Proben vergütet bis 340 HV10

- Festwalzen fließgepresster Demonstratoren
 - Getriebewellen (IUL)
Kaltverfestigt 336-368 HV10
 - Kolbenbolzen (IFU)

- Optische Untersuchungen zum Werkzeugverschleiß



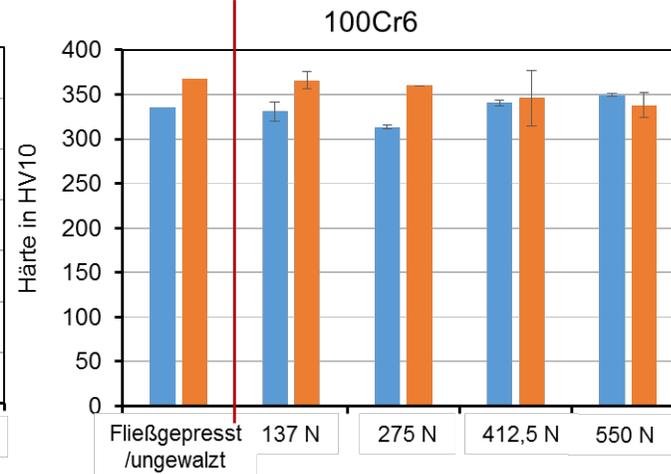
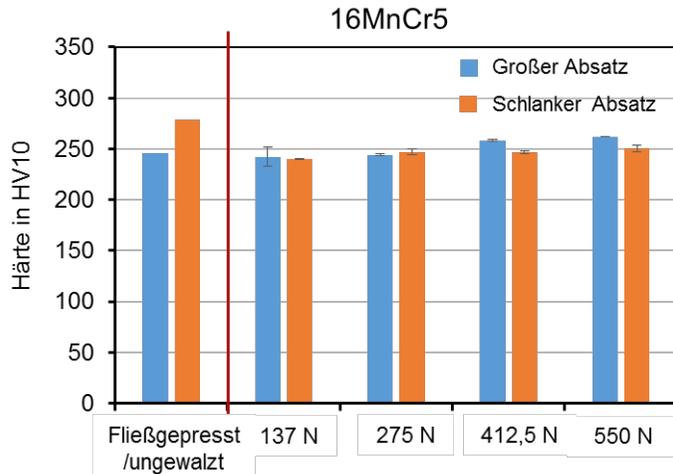
Festwalzen vergüteter Teile



Ausgangsparameter:

Walzkraft: 550 N	Überrollungszahl: 1	Werkstoff: 100Cr6 (vergütet)
Vorschub: 0,1 mm/U	Kugeldurchmesser: 4 mm	Federgelagerte Diamantspitze

Festwalzen fließgepresster Teile



Ausgangsparameter:
 Vorschub: 0,075/0,057 mm/U Hydrostatisch gelagerte Kugel
 Überrollungszahl: 1 Kugeldurchmesser: 4 mm

Werkstoff: 16MnCr5
 Napf-Rückwärts-Fließgepresst
 Härte n.d. Fließpressen: 200 HV10
 Vorschub $v = 0,06$ mm/U
 Überrollungen $n = 1$



Werkstoff: 16MnCr5
 Härte n.d. Fließpressen: 279 HV10
 Vorschub $v = 0,057$ mm/U
 Überrollungen $n = 1$

Zusammenfassung

Grundlagen

- Ideale Werkzeugauswahl abhängig von
 - Werkstoff
 - Probengeometrie (Zugänglichkeit)
 - Formabweichungen (z.B. Rundlaufabweichung)
- Walzkraft hat den größten Einfluss auf die Randhärte
→ Alleinige Steigerung der Walzkraft führt nicht zum Härtemaximum
- Mehr-Parameter-Variation → nahezu Verdopplung der Härte
(ohne negative Beeinflussung sekundärer Eigenschaften)

Festwalzen gehärteter und fließgepresster Bauteile

- Vergütete Wellen können durch Festwalzen weiter verfestigt werden
- Umformvermögen fließgepresster Wellen ist ausgeschöpft → Oberflächenversagen

Danksagung



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie



Forschungsnetzwerk
Mittelstand



Industrielle
Gemeinschaftsforschung



Forschungsvereinigung
Stahlanwendung e. V.

