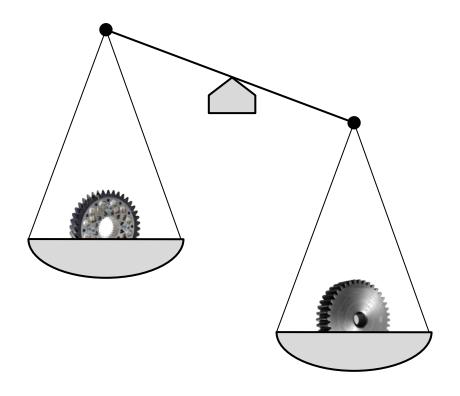




Leichtbaukonzepte für Zahnräder

Ziel → Aufzeigen von unterschiedlichen Leichtbaumöglichkeiten









Forschungsinstitute









Julian Diefenbach











Clemens Neipp

Dawid Nadolski Holger Surm

Forschungsvereinigungen



Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V.







Im Folgenden werden Ergebnisse aus den Forschungsprojekten Entwicklung von höchstfesten Stählen für alternative Wärmebehandlungen und für die Kaltmassivumformung von Bauteilen im Kfz-Antriebsstrang (P 1055 / IGF-Nr. 24 LN), Intelligenter Leichtbau durch Mehrkomponentenverfahren (P 1056 / IGF-Nr. 18189 N) und Erweiterung technologischer Grenzen bei der Massivumformung in unterschiedlichen Temperaturbereichen (P 1058 / IGF-Nr. 18229 N) präsentiert.





Leichtbaukonzepte für Zahnräder

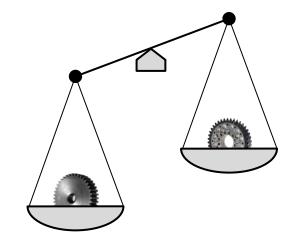
Stofflicher Leichtbau

Hochfester Stahlwerkstoff

Zahnradfertigung

Prüfung mechanischer Eigenschaften

Leichtbau durch Tragfähigkeitsgewinn bei gleicher Zahnradgeometrie

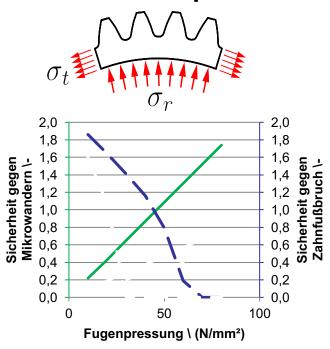




Weiteres Potential



Konzeptleichtbau



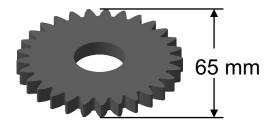
Leichtbau durch Zahnradkonstruktion, Tragfähigkeit wird bestimmt



Referenz und Vorgehensweise

Stofflicher Leichtbau

Gewichtsreferenz 0,200 kg

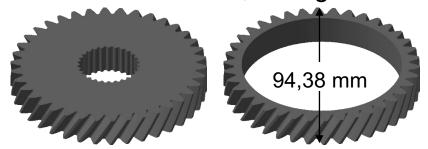


- Vorgehensweise
 - 1. Ersetzen des Zahnradmaterials
 - 2. Fertigung der Komponenten
 - 3. Prüfung d. mech. Eigenschaften
 - 4. Leichtbaupotenzial

Tragfähigkeitsgewinn → Zahnbreite ↓

Konzeptleichtbau

Gewichtsreferenz 0,617 kg



- Vorgehensweise
 - 1. Definition Zahnkranzgeometrie
 - 2. Leichtbaupotenzial
 - 3. Fertigung der Komponenten
 - 4. Prüfung d. mech. Eigenschaften

Mgl. leichtes Design → Tragfähigkeit \$

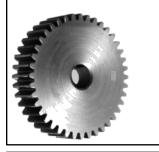


Stofflicher Leichtbau

Konzeptleichtbau

Fertigungsleichtbau

Ausgangssituation Vollzahnrad



Hochleistungszahnrad



Mehrkomponentenverfahren

Zahnkranz

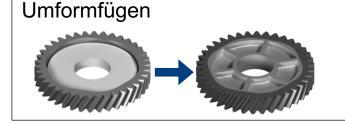


Spanen + Wärmebehandlung

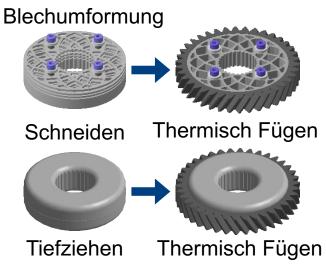


Schmieden

Radkörper





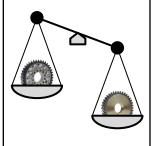


Prüfung

Tragfähigkeit Statisch und Dynamisch



Bewertung Leichtbaupotenzial





Stofflicher Leichtbau



Hochleistungszahnrad

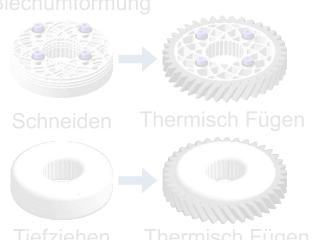


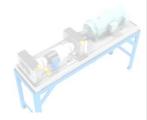




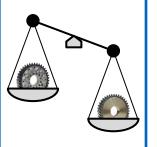








Bewertung Leichtbaupotenzial







Gliederung

- Einführung und Motivation
- Lösungsweg A: Benchmark
 - M50NiL: Einsatzhärten (Aufkohlen) + Plasmanitrieren
 - 16MnCr5: Einsatzhärten (Aufkohlen)
- Lösungsweg B: Alternative Wärmebehandlung konventioneller Stähle
 - C56E2: Borieren + Induktionshärten
- Lösungsweg C: Neue Stähle mit optimierter Wärmebehandlung
 - 18CrNiMoVNb7-6: Einsatzhärten (Carbonitrieren)
- Einordnung und Vergleich der Festigkeitskennwerte aller Lösungswege
- Abschätzung des Leichtbaupotentials



Leichtbaukonzepte

Quelle: fka, 2013

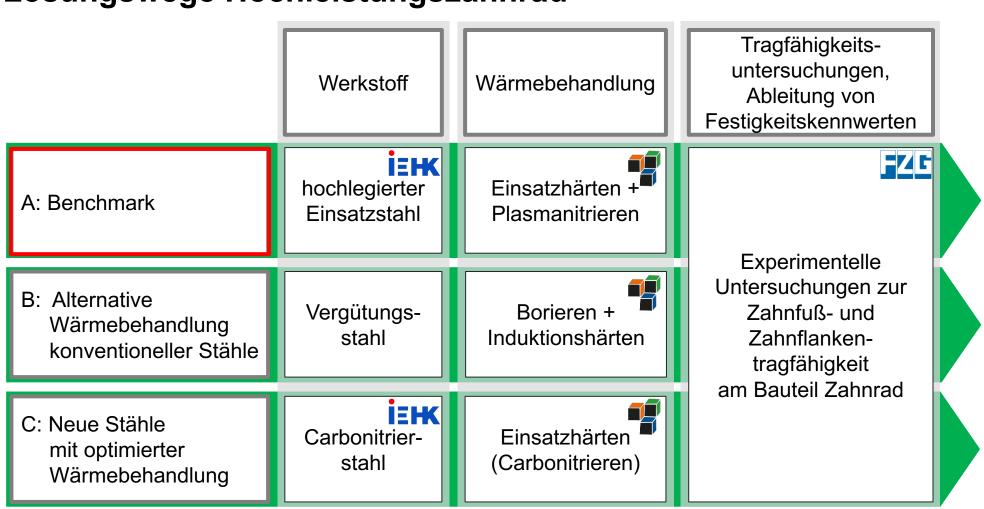
Stofflicher Leichtbau Konstruktiver Leichtbau Fertigungsleichtbau Konzeptleichtbau

- Ersetzen von konventionellen Materialien durch innovative, leichtere Werkstoffe:
 - Stahl durch höchstfesten Stahl (Werkstoffzustand)
 - Einsatz von Höchstleistungslegierungen
 - Substitution durch Leichtmetalle (Aluminium, Magnesium, ...)
 - Einsatz von faserverstärkten Kunststoffen
- Zielsetzung: Steigerung des Leichtbaupotenzials
 - Weiterentwicklung von Einsatzstählen
 - Leistungssteigerung durch Wärmebehandlungs-/Beschichtungsprozesse



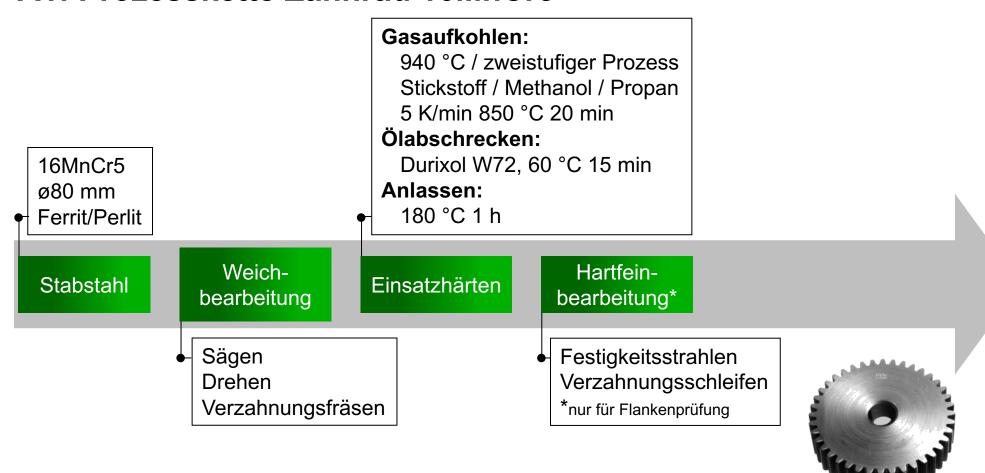


Lösungswege Hochleistungszahnrad



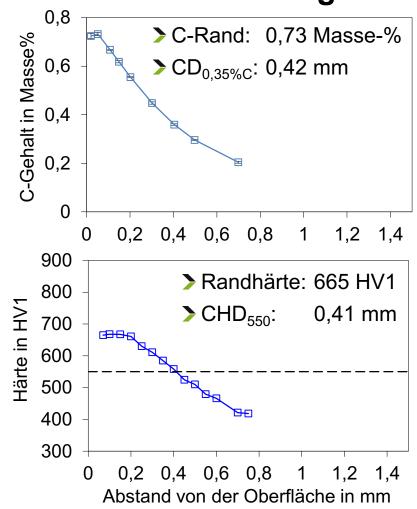


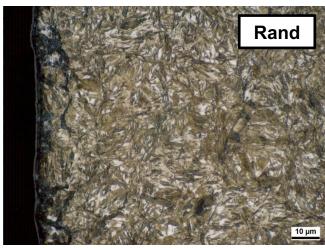
A1: Prozesskette Zahnrad 16MnCr5





A1: Charakterisierung







Werkstoff:

- 16MnCr5

Bauteil:

- Zahnrad

Wärmebehandlung

- Einsatzhärten

Martensit
Restaustenit

Martensit Bainit



A: Prozesskette Zahnrad M50NiL

Niederdruckaufkohlen: 980 °C / 2.10..1.10..1.10 C_2H_2 , 400 l/h, 4 mbar 5 K/min 1080 °C 5 min Ölabschrecken: Vakuumhärteöl, 60 °C 15 min 2x (Anlassen + Tiefkühlen): M50NiL 450 °C 2 h ø80 mm N₂ -196 °C Ferrit/Perlit Weich-Hartfein-Stabstahl Einsatzhärten bearbeitung bearbeitung* Sägen Verzahnungsschleifen Drehen *nur für Flankenprüfung Verzahnungsfräsen

Plasmanitrieren: 420 °C 40 h H_2/N_2 1:1, 8 mbar 460 V

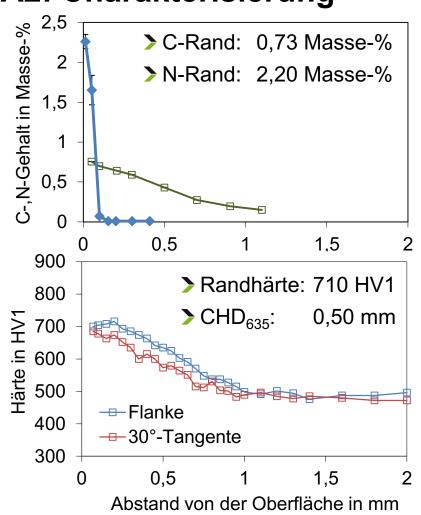
Nitrieren

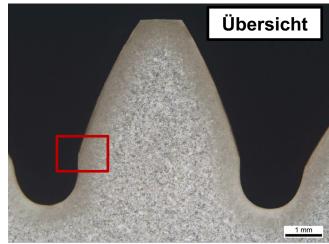






A2: Charakterisierung





Werkstoff:

- M50NiL

Bauteil:

- Zahnrad

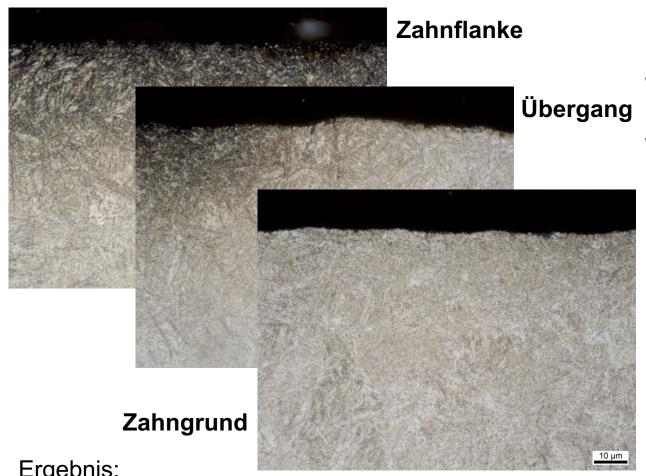
Wärmebehandlung

- Einsatzhärten
- Plasmanitrieren

Ergebnis:

- durchgängig ausgebildete Randschicht (Einsatzhärtung)
- Auffälligkeiten im Anätzverhalten im Bereich der Randschicht





Bauteil:

Ritzel, Modul m = 2, ohne Flansch

Werkstoff:

M50NiL

Wärmebehandlung:

- Niederdruckaufkohlen
- Ölabschrecken
- Tiefkühlen / Anlassen
- Plasmanitrieren:
 - 420 °C 40 h
 - $-H_2/N_2$ 1:1, 8 mbar
 - 460 V

Metallographische Untersuchung:

Schlifflage: quer

Ätzung: 60 s Kalling I

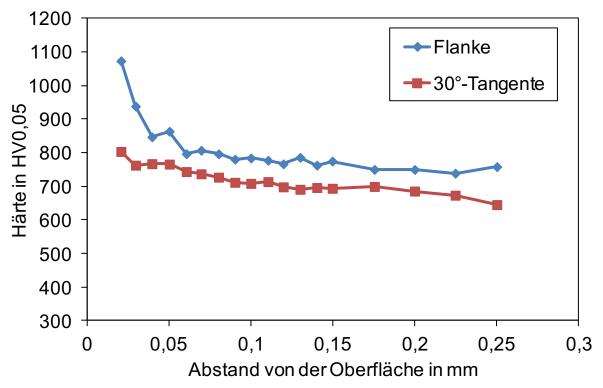
Ergebnis:

- Änderung des Anätzverhaltens auf der Zahnflanke
- > verminderte / keine Nitrierwirkung in Richtung Zahngrund





A2: Härteverlauf Verzahnung



Ergebnis:

- > unterschiedlicher Effekt auf Härteverlauf
- unterschiedliche Diffusionstiefe Stickstoff

Bauteil:

Ritzel, Modul m = 2, ohne Flansch

Werkstoff:

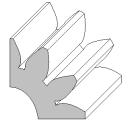
M50NiL

Wärmebehandlung:

- Niederdruckaufkohlen
- Ölabschrecken
- Tiefkühlen / Anlassen
- Plasmanitrieren

Metallographische Untersuchung:

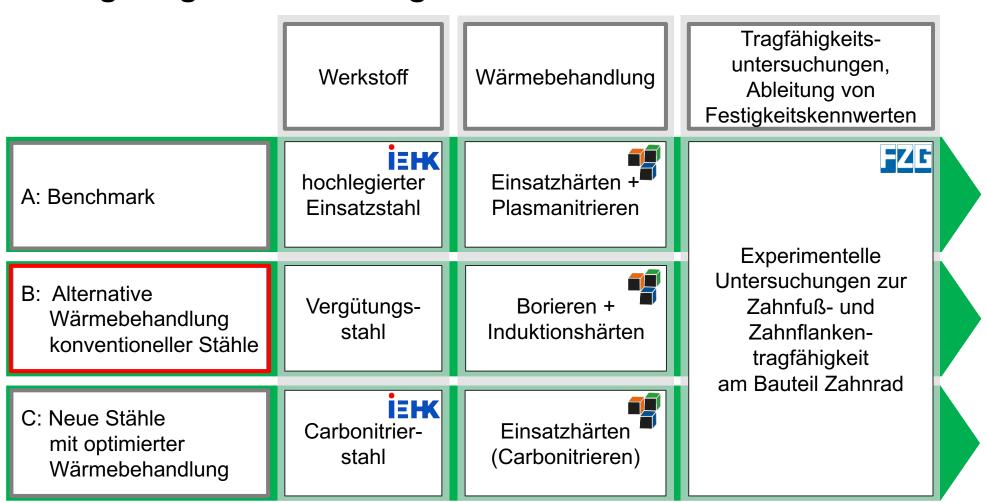
Härteverlauf







Lösungswege Hochleistungszahnrad





B: Fertigungskette

C56E2 ø80 mm Ferrit/Perlit

Stabstahl

Weichbearbeitung

Drehen Verzahnungsfräsen Schleifen Borodur®-Verfahren Fe₂B (35 - 50) µm

Borieren

Randschichthärten

Austenitisieren (induktiv):

- 80 % MF (10-15 kHz)
- 60 % HF (195 kHz)
- $t_{Heiz} = 0.5 s$

Abschrecken: Polymer



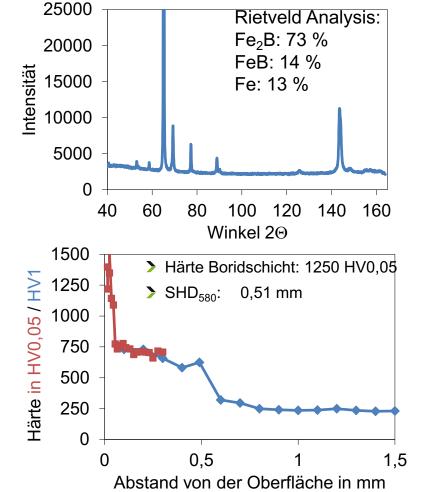




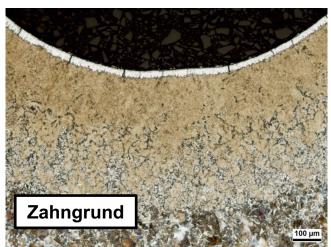




B: Charakterisierung







Werkstoff:

- C56E2

Bauteil:

- Zahnrad

Wärmebehandlung

- Borieren
- Randschichthärten
- keine Auffälligkeiten

Risse in der Boridschicht

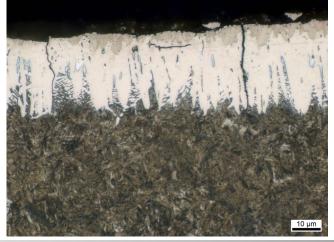


B: Charakterisierung Risse









Werkstoff:

- C56E2

Bauteil:

- Zahnrad

Wärmebehandlung

- Borieren
- Randschichthärten

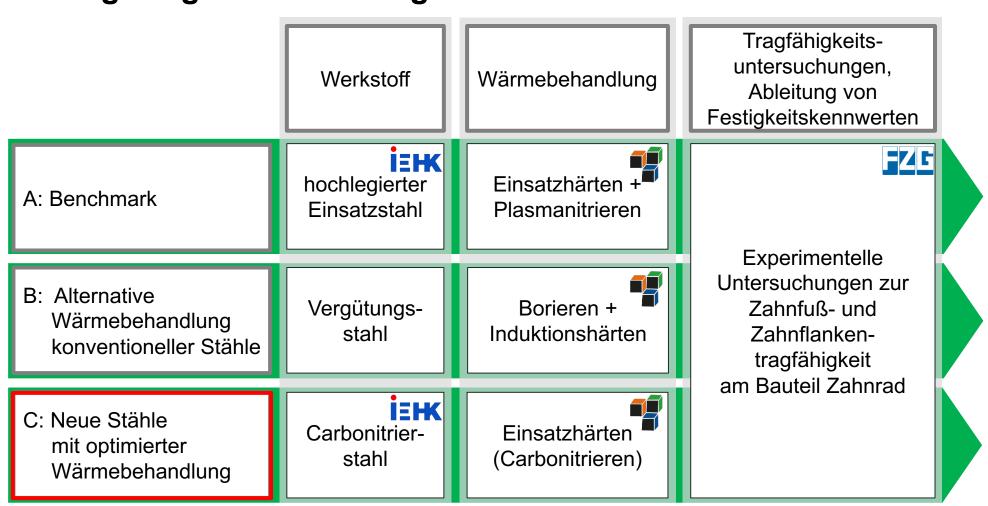
Risse:

- infolge des Randschichthärtens
- vermehrt in Richtung Zahngrund
- unabhängig von Prozessführung





Lösungswege Hochleistungszahnrad





C: Chemische Zusammensetzung 18CrNiMoVNb7-6

	С	Si	Mn	Р	S	Cr	Мо	Ni	Al	V	Ti	Nb	N	В
Labor	0,19	0,31	0,70	0,005	0,003	1,65	0,31	1,55	0,025	0,10	0,002	0,030	0,008	0,003
Industrie	0,19	0,29	0,88	0,006	0,012	1,62	0,30	1,53	0,027	0,09	0,004	0,033	0,016	-

Laborschmelze:

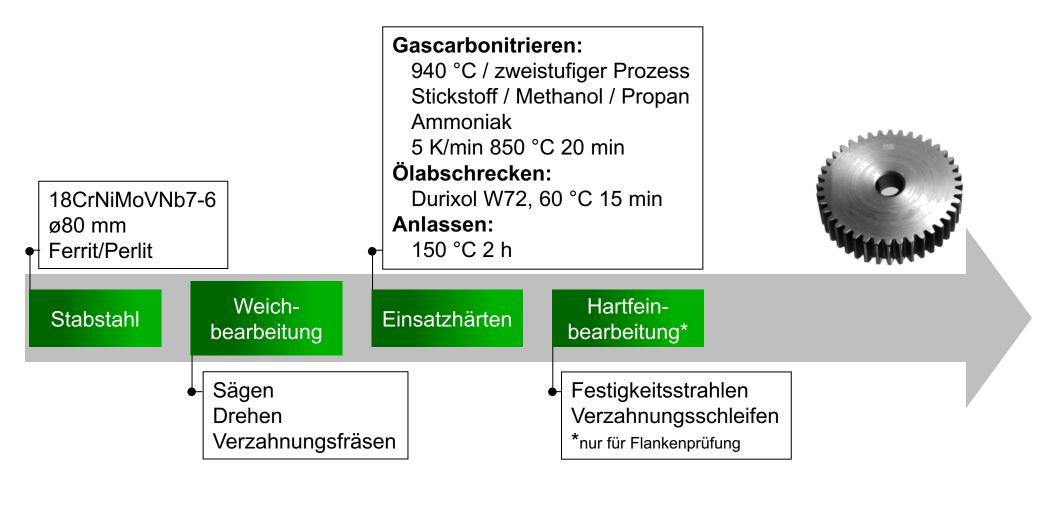
- 80 kg (VIM)
- Geschmiedet von 140 x 140 mm² auf 80 x 80 mm²
- F/P-geglüht bei 650 °C
- Verteilt auf die beteiligten Forschungsstellen

Industrieschmelze:

- 100 t / 10 t (Blockguss)
- Gewalzt auf 36,5 / 80 / 90 mm rund
- F/P-geglüht bei 650 °C
- Verteilt auf die beteiligten Forschungsstellen

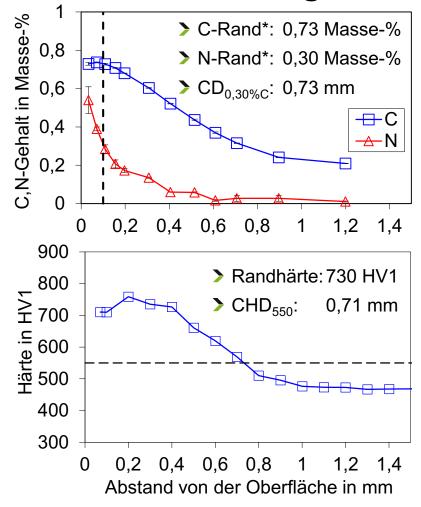


C: Prozesskette Zahnrad 18CrNiMoVNb7-6





C: Charakterisierung







Werkstoff:

- 18CrNiMoVNb7-6

Bauteil:

- Zahnrad

Wärmebehandlung

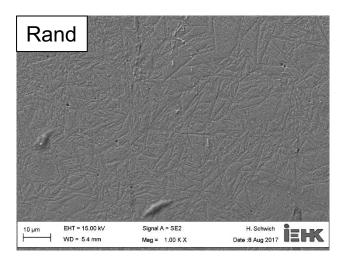
- Carbonitrieren
- Martensit Restaustenit Carbide Nitride

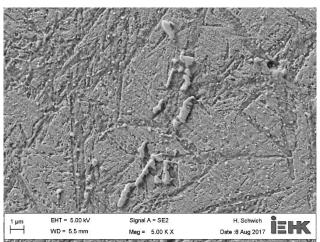
➤ Martensit (Bainit) * 100 µm Abstand zur Oberfläche

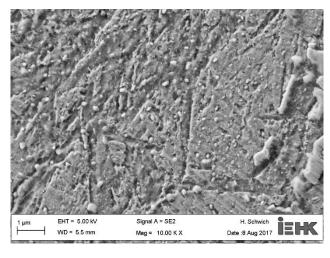


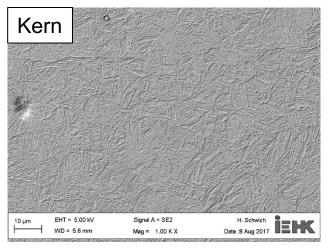


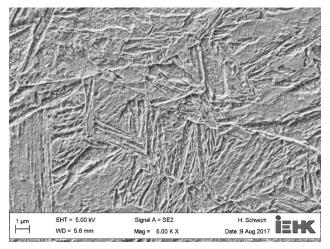
C: Gefügeuntersuchung durch REM

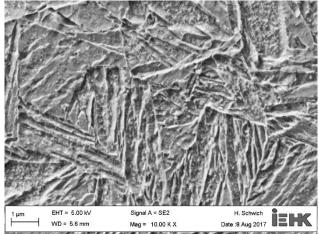








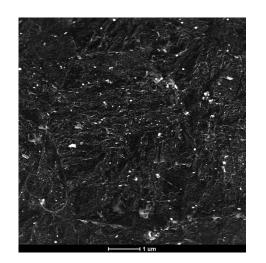


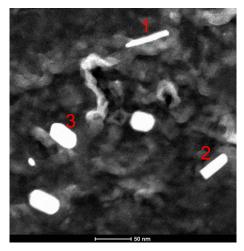


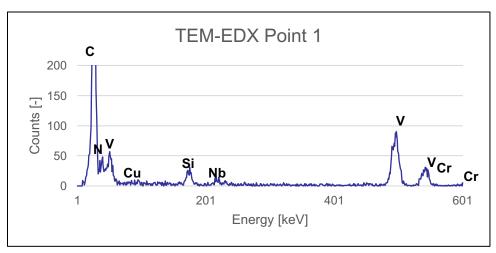


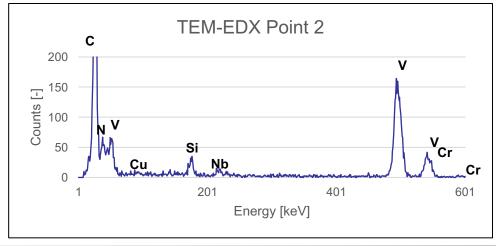


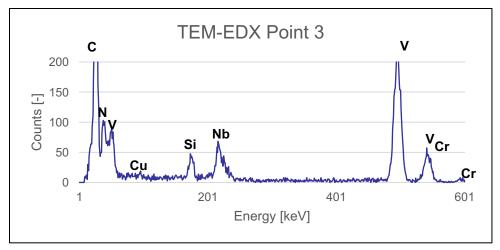
C: Gefügeuntersuchung durch TEM-EDX





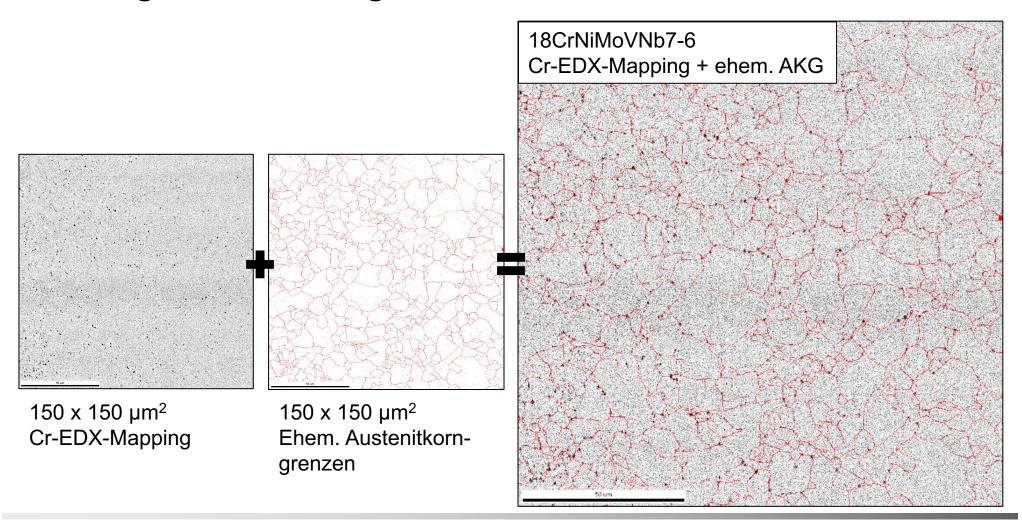








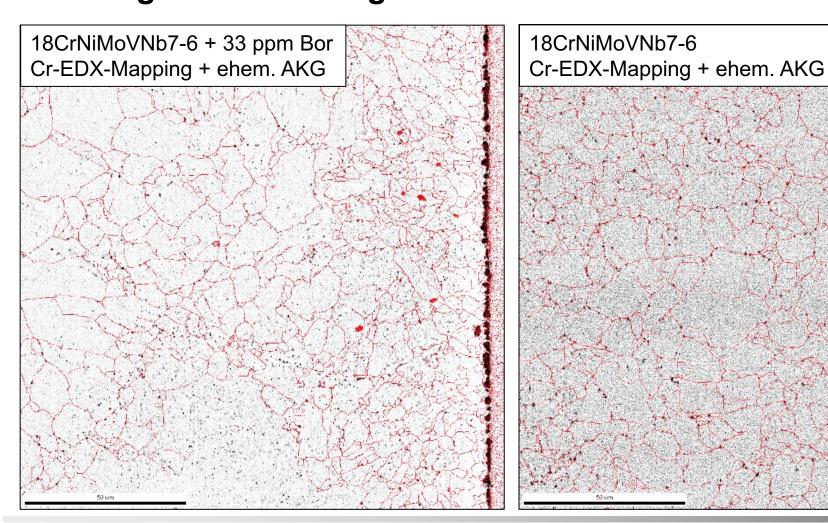
C: Gefügeuntersuchung durch REM-EBSD







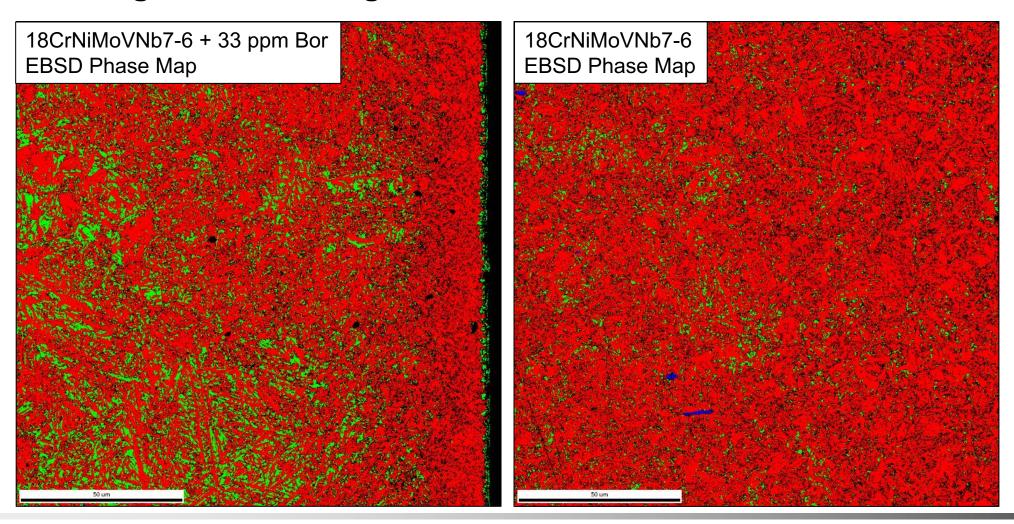
C: Gefügeuntersuchung durch REM-EBSD







C: Gefügeuntersuchung durch REM-EBSD

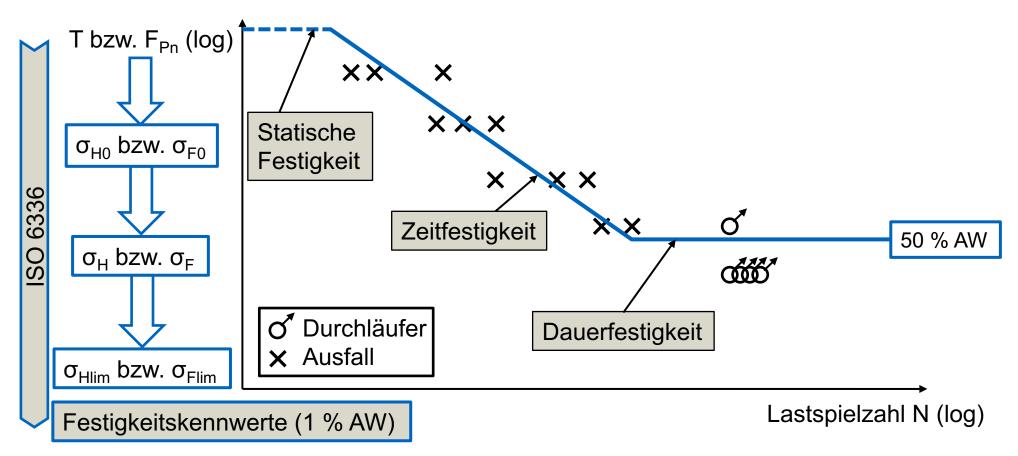






Untersuchungen zur Zahnfuß- & Grübchentragfähigkeit

Basis: Ermittlung von Wöhlerlinien





Untersuchungen zur Zahnfußtragfähigkeit

Charakterisierung:

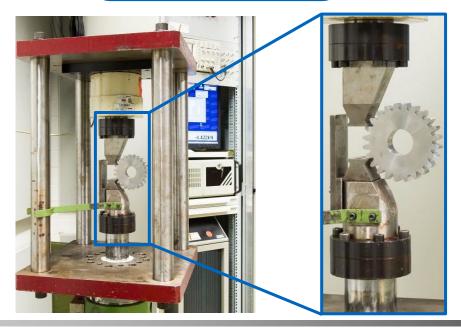
- Überschreitung des Festigkeitswertes im kritischen Zahnfuß-Querschnitt
- In der Regel Totalausfall des Getriebes



Untersuchung:

- Annähernd schwellende Belastung im Pulsatorprüfstand
- Wiederholte Einstufenversuche im Bereich der Dauer- & Zeitfestigkeit
- Grenzlastspielzahl: 6·10⁶ Lastwechsel
- Verzahnungsgeometrie:

$$m_n = 2.0 \text{ mm}; z = 29$$

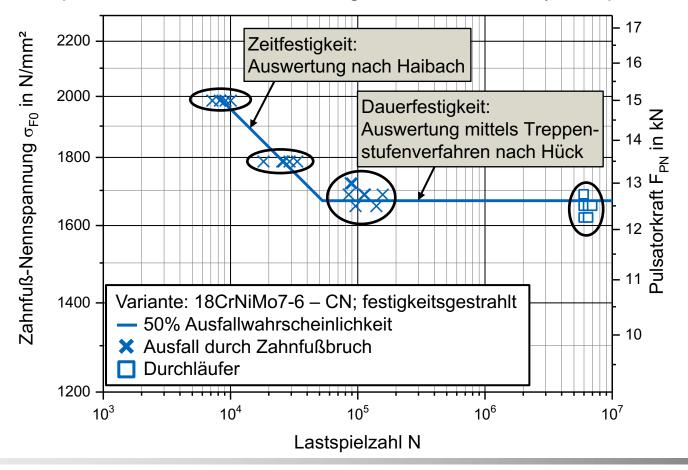






Untersuchungen zur Zahnfußtragfähigkeit

<u>Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen – Wöhlerlinie (exemplarisch)</u>

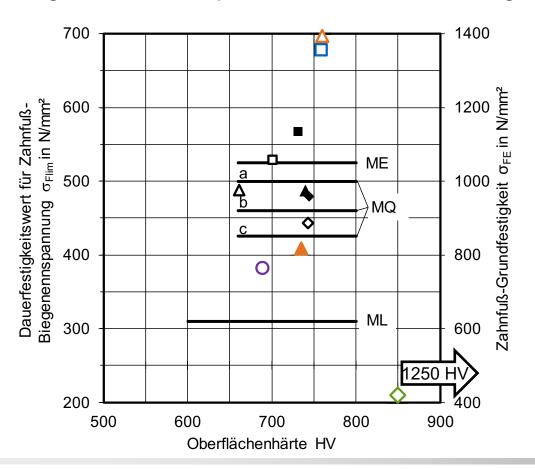






Untersuchungen zur Zahnfußtragfähigkeit

<u>Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen - Festigkeitskennwerte</u>



▲ 16MnCr5 - EH; ungestrahlt ▲ 16MnCr5 - EH; festigkeitsgestrahlt (Referenz) ● M50NiL - Duplexgehärtet; ungestrahlt ◆ C56E2 - Boriert & induktivgehärtet; ungestrahlt

■18CrNiMoVNb7-6 - CN; festigkeitsgestrahlt

- ▲ 20MnCr5 EH

 18CrNiMo7-6 EH

 ◆ 20MoCr4 EH

 Einsatzgehärtete, festigkeitsgestrahlte Varianten Literaturwerte (FVA 513 I)
- △20MnCr5 CN
 □18CrNiMo7-6 CN
 →20MoCr4 CN

 Carbonitrierte, festigkeitsgestrahlte Varianten
 Literaturwerte (FVA 513 I)



Untersuchungen zur Grübchentragfähigkeit

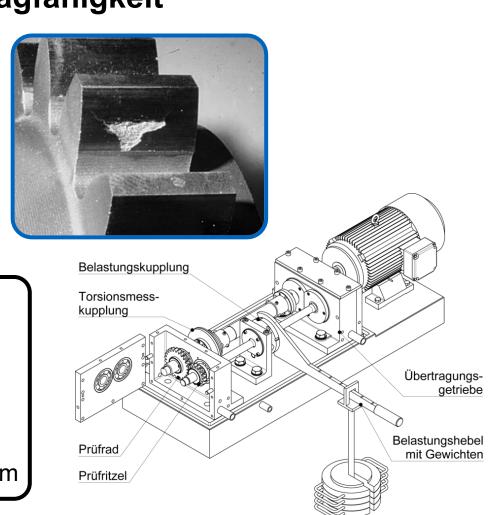
Charakterisierung:

- Ermüdungsschaden der Zahnflanke
- Rissinitiierung an/nahe der Oberfläche
- Haupteinflussgrößen:
 - → Zahnflankenrauheit + Schmierstoff
 - → Werkstoffeigenschaften Randzone

Untersuchung:

- FZG-Zahnradverspannungsprüfstand
- Funktionsprinzip: Wirkungskreislauf mit Verspannprinzip
- Verzahnungsgeometrie:

 $m_n = 2.0 \text{ mm}$; $z_1/z_2 = 21/29$; a = 52 mm

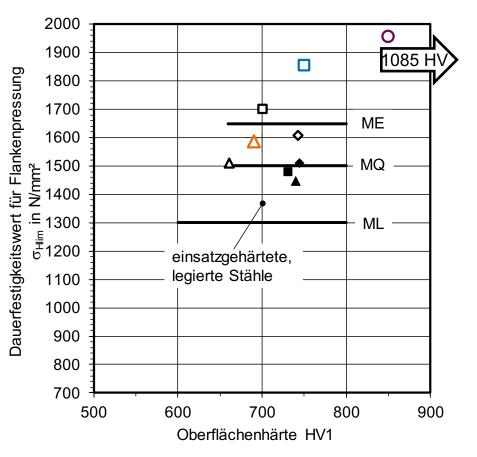






Untersuchungen zur Grübchentragfähigkeit

Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen - Festigkeitskennwerte



- △ 16MnCr5 EH (Referenz)

 O M50NiL Duplexgehärtet

 □ 18CrNiMoVNb7-6 CN (Industrieschmelze)
- ▲ 20MnCr5 EH

 18CrNiMo7-6 EH

 ◆ 20MoCr4 EH

 Einsatzgehärtete,
 Varianten Literaturwerte
 (FVA 513 I)
- △20MnCr5 CN

 □ 18CrNiMo7-6 CN

 △20MoCr4 CN

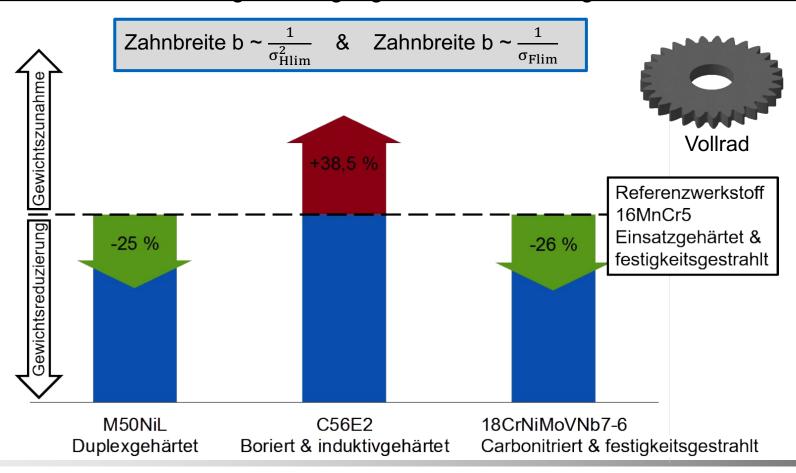
 Carbonitrierte, Varianten
 Literaturwerte (FVA 513 I)





Ableitung Leichtbaupotential

Relative Gewichtsveränderung – Auslegungskriterium: Übertragbares Drehmoment





Stofflicher Leichtbau

Konzeptleichtbau

Fertigungsleichtbau









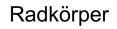
Zahnkranz

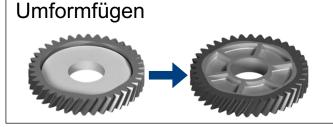


Spanen + Wärmebehandlung



Schmieden

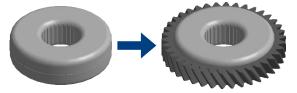




Blechumformung



Schneiden Thermisch Fügen



Tiefziehen Thermisch Fügen

Prüfung

Tragfähigkeit Statisch und Dynamisch



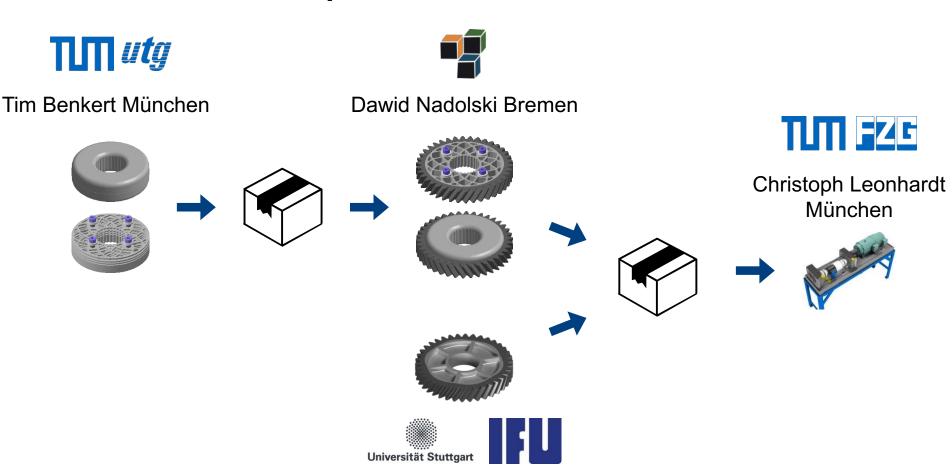
Bewertung Leichtbaupotenzial







Materialfluss Mehrkomponentenverfahren



Robert Meißner Stuttgart



Konzeptleichtbau



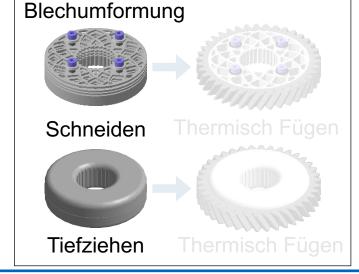




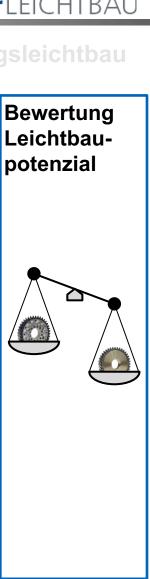




Radkörper











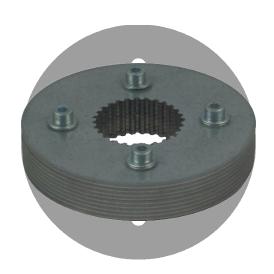
Blechpaketierter Radkörper - Geometrie

Referenz

- Unterschiede zum vollen Radkörper darstellbar
- Erprobung der Fertigungsschritte
- Preisgünstige Herstellung

Leichtbaustruktur

- Aufzeigen des Leichtbaupotenzials
- Quantifizierung der Drehmomentverluste am gebauten Zahnrad
- Beurteilung Dauerfestigkeit

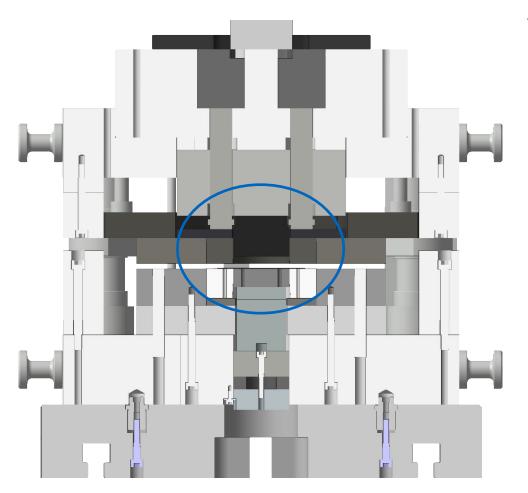




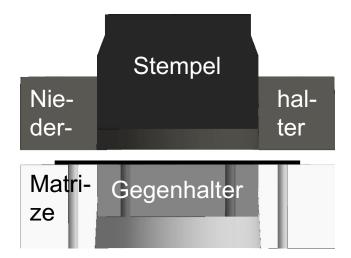




Werkzeug Radkörper Blechbauweise



Werkzeugkonfiguration Feinschneiden



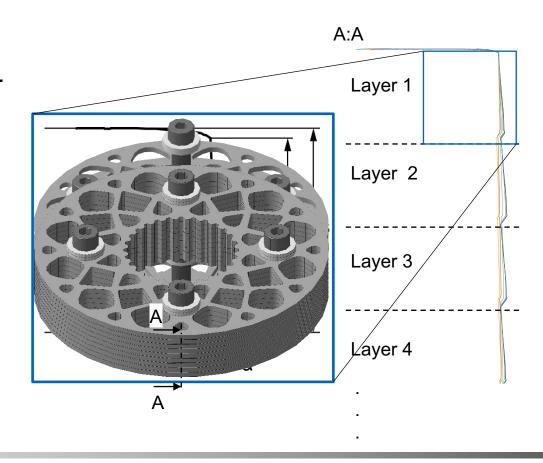




Blechpaketierter Radkörper - Herstellung

- Feinschneiden der einzelnen Lagen
- Stapeln von neun Blechlagen
- Positionieren der Blechlagen zueinander über Außengeometrie
- Fixieren mit Verbindern

- Entstehung einer gleichmäßig strukturierten Außengeometrie
 - Ursache: Feinschneiden
 - Auswirkungen: positiv

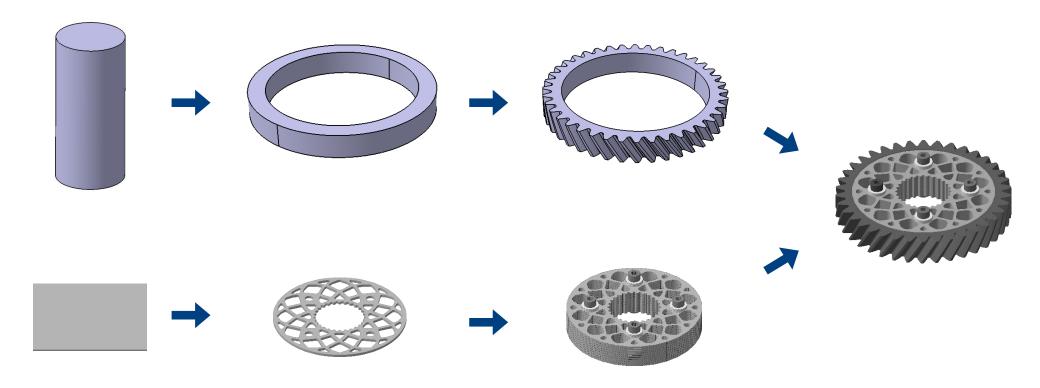






Prozesskette Zahnrad

Radkörper blechpaketiert, Fügen aus der Kohlungshitze bzw. aus der Anlasshitze







Tiefgezogener Radkörper - Geometrie

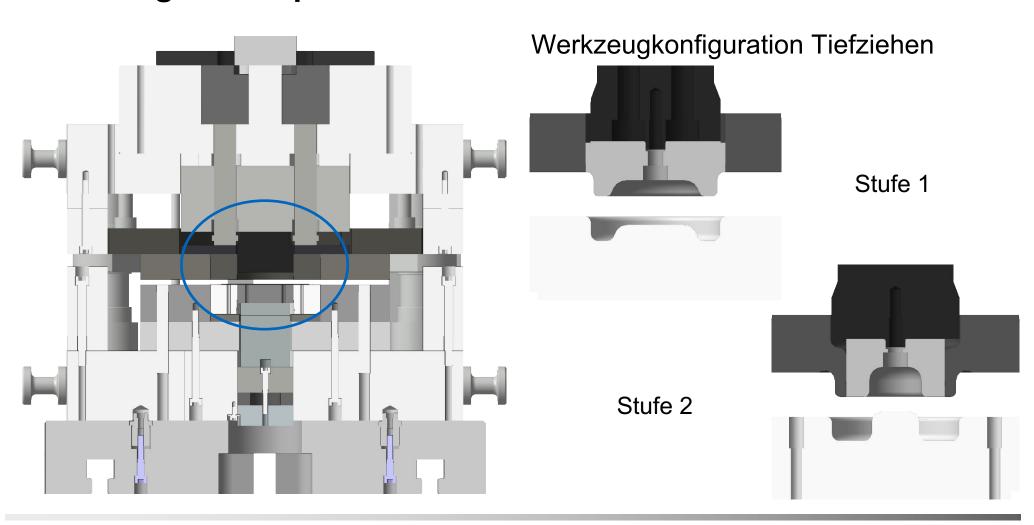
- Topologie ist erfahrungsbasiert erstellt
- Namensgebung nach Querschnitt
- Berücksichtigung der Umformbarkeit bei der Topologieauswahl
- Randbedingungen durch Zahnkranz und Welle vorgegeben
- Auswahl basierend auf Steifigkeit und Gewicht des Zahnrades







Werkzeug Radkörper Blechbauweise

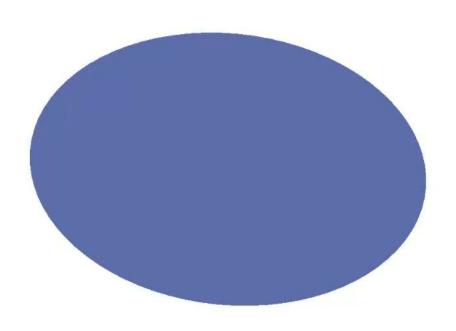






Tiefgezogener Radkörper - Herstellung

- Methodenentwicklung in AutoForm^{plus} R6
- Herstellung nur im mehrstufigen
 Tiefziehen möglich → Ziehverhältnis
- Bewertung der Herstellbarkeit an
 - Umformbarkeit
 - Ausdünnung
 - Bauteildicke
- Iterative Variation von
 - Stufenanzahl und –folge
 - Stufengeometrie
 - Platinengeometrie (Form und Größe)

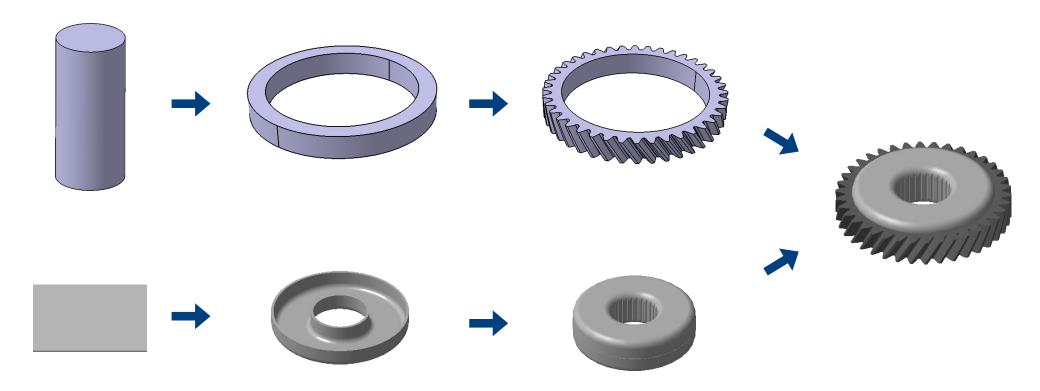






Prozesskette Zahnrad

Radkörper tiefgezogen, Fügen aus der Kohlungshitze bzw. aus der Anlasshitze





Konzeptleichtbau

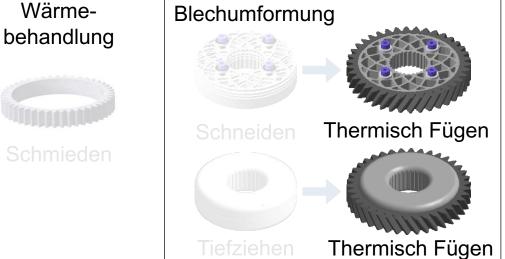
Radkörper



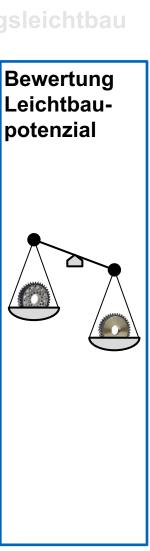






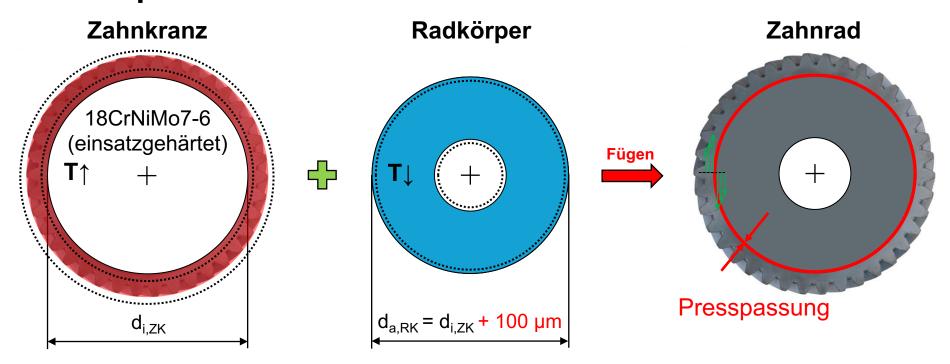








Mehrkomponentenzahnräder

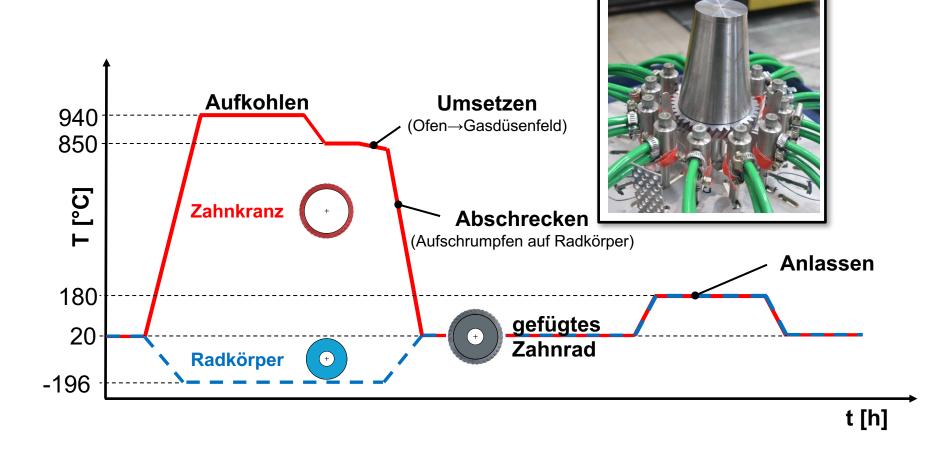


- Fügen während der Wärmebehandlung
 - Einstellung einer Presspassung zwischen Zahnkranz und Radkörper
 - Ausnutzung der thermischen Dehnungen für das Fügespiel
 - Maß- und Formänderungen müssen berücksichtigt werden













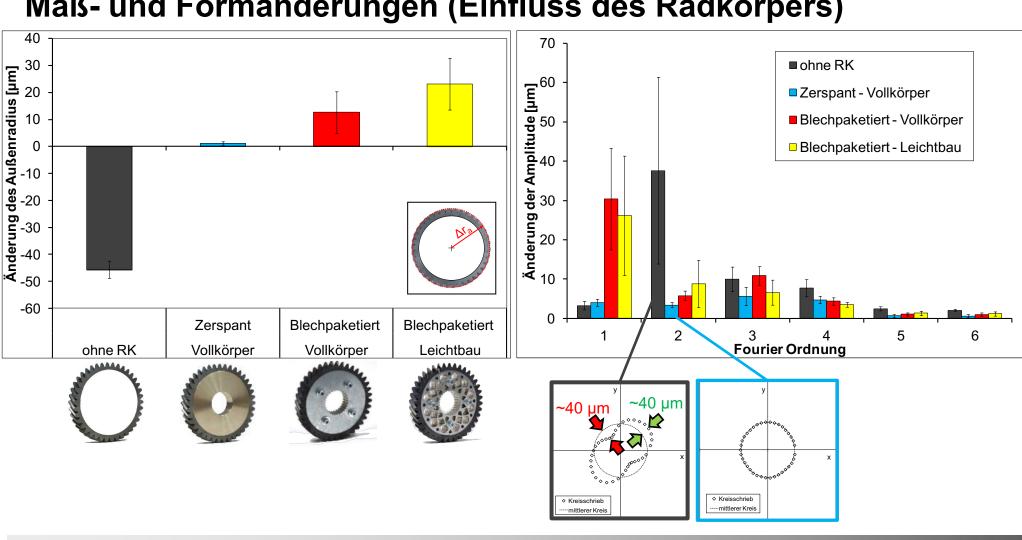
Film (Fügen beim Abschrecken)







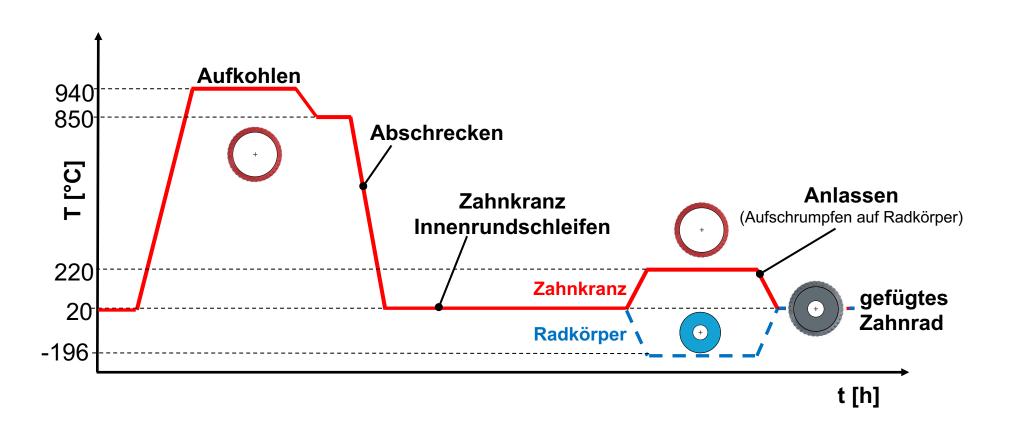
Maß- und Formänderungen (Einfluss des Radkörpers)







Fügen beim Anlassen







Film (Fügen beim Anlassen, blechpaketierter Radkörper)





Leichtbaupotenzial

Werkstoff Radkörper Geometrie Fertigungsverfahren

18CrNiMo7-6 Vollkörper gedreht



18CrNiMo7-6 4 x Bohrungen gedreht/gefräst



18CrNiMo7-6 Umfangsnut gedreht/gefräst



Gewichtsreduktion:

Werkstoff Radkörper Geometrie Fertigungsverfahren

0 %

Dualphasenstahl Leichtbaustruktur geschnitten/paketiert



-30 %

-25 %

DC04 (Blech) Leichtbaustruktur tiefgezogen



-25 %

Aluminium Vollkörper gedreht



-45 %

Gewichtsreduktion:



Konzeptleichtbau



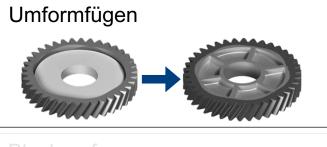


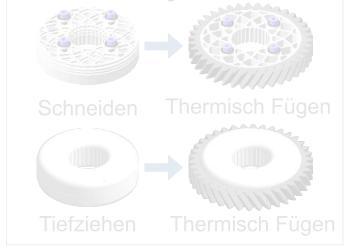








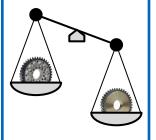








Bewertung Leichtbaupotenzial



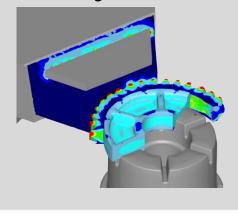


Untersuchungen zum umformgefügten Zahnrad

Herstellung eines gebauten Zahnrades durch Fließpressen des Zahnradkörpers und gleichzeitigem Fügen mit einem Zahnkranz bzw. einem Zahnkranz und einer Welle

Simulation

- Prozessablauf
- Definition Zahnkranzinnenprofile
- Werkzeugkonstruktion



Experimente

- Werkzeugfertigung
 - Herstellung von Zahnrädern in drei Ausbaustufen
 - Statische und dynamische Drehmomenttests



Optimierung

- Aufbau einer automatisierten CAE-Optimierungskette
- Ermittlung des Gewichtseinsparung
- Experimentelle Validierung



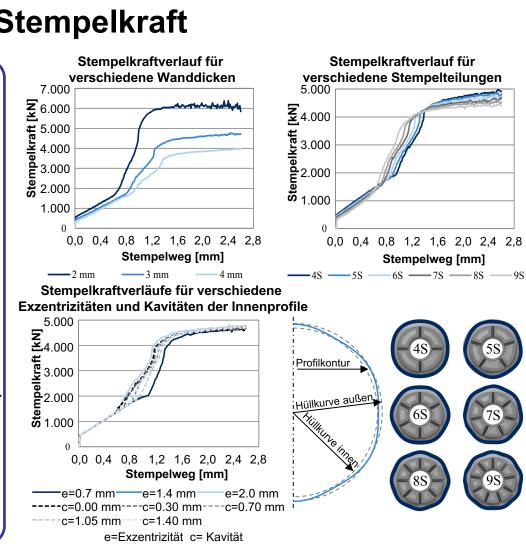




Simulation: Einflüsse auf die Stempelkraft

Untersuchung der Einflüsse auf die Stempelkraft/ -spannung und Materialfluss

- Wanddickenverhältnisse
 - Leichtbau, WZ-Belastung, Steifigkeit
- Stempelteilung/ Zahnkranzinnenprofil
- Exzentrizität und Kavität des Zahnkranzinnnenprofils
- Reibungsverhältnisse
- Positionierung d. Komponenten zueinander
- Rohteilgeometrien
 - Einfluss bzgl. gleichmäßiger Bauteilhöhe
- Werkstoffe (C15, Al 1070A)

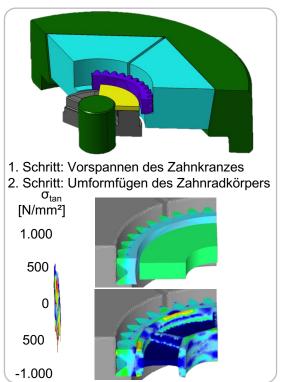


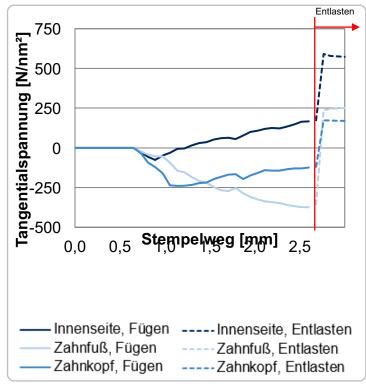


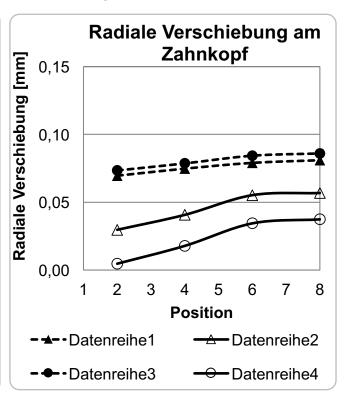


Simulation: Spannungen im Zahnkranz beim Fügeprozess

- Tangentiale Zug- und Druckspannungen während Fügevorgangs
- Reine tangentiale Zugspannungen nach der Bauteilentlastung



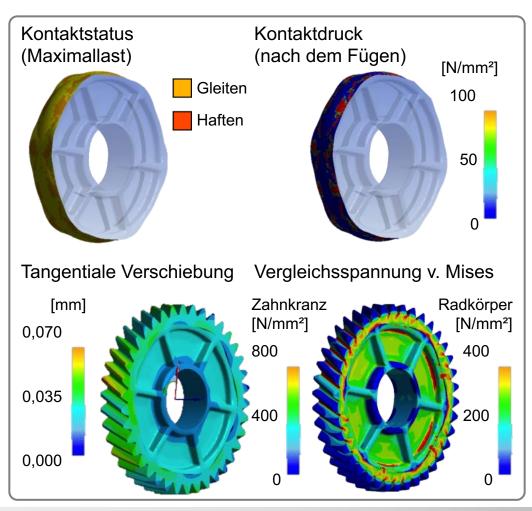


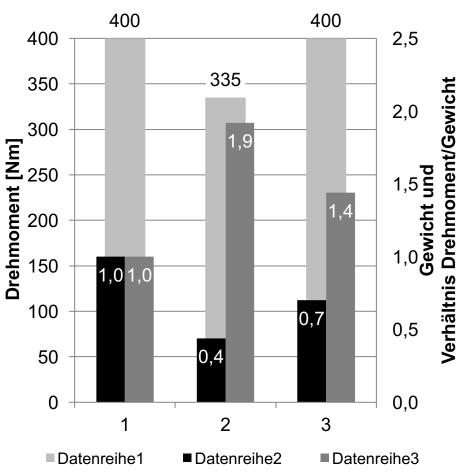






Simulation: Strukturmechanische Untersuchung in ANSYS





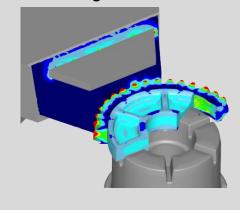


Untersuchungen zum umformgefügten Zahnrad

Herstellung eines gebauten Zahnrades durch Fließpressen des Zahnradkörpers und gleichzeitigem Fügen mit einem Zahnkranz bzw. einem Zahnkranz und einer Welle

Simulation

- ••Prozessablauf
- ••Definition Zahnkranzinnenprofile
- ••Werkzeugkonstruktion



Experimente

- ••Werkzeugfertigung
- ••Herstellung von Zahnrädern in drei Ausbaustufen
- ••Statische und dynamische Drehmomenttests



Optimierung

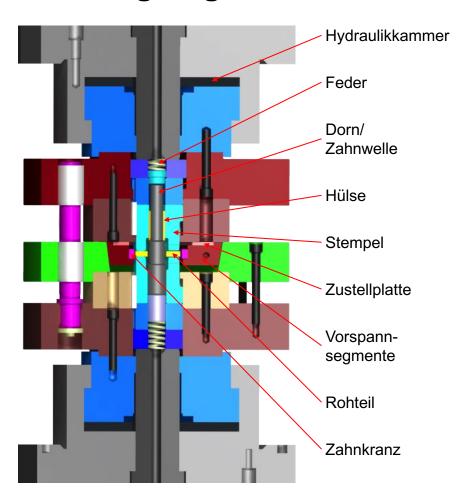
- ••Aufbau einer
 automatisierten CAEOptimierungskette
 - ••Ermittlung des Gewichtseinsparung
 - •• Experimentelle Validierung

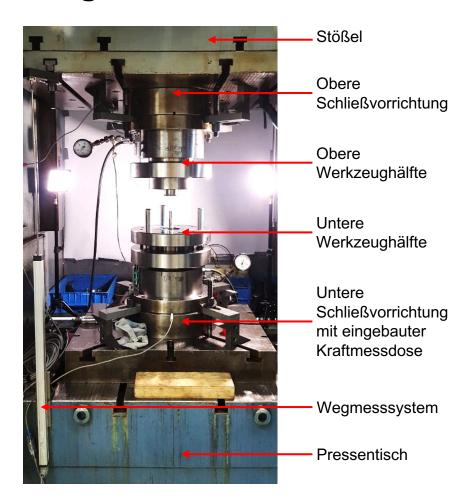






Umformgefügtes Zahnrad- Werkzeug









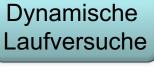
Umformgefügtes Zahnrad- Herstellung



- Werkstoffe Zahnradkörper
 - Stahl C15
 - Aluminium EN-AW 6082, T4
- Schmierstoffe
 - Beruforge 120D (Carl Bechem)
 - Glubricant O159 (Carl Bechem)
- Zahnkranzinnenprofile
 - Exzentrizität: 0,7 mm; Kavität 0,7 mm
 - Exzentrizität: 2,0 mm; Kavität 0,7 mm
 - Exzentrizität: 2,0 mm; Kavität 2,0 mm

Varianton

- Varianten
 - Ohne Innenverzahnung
 - mit Innenverzahnung
 - Mit verzahnter Welle



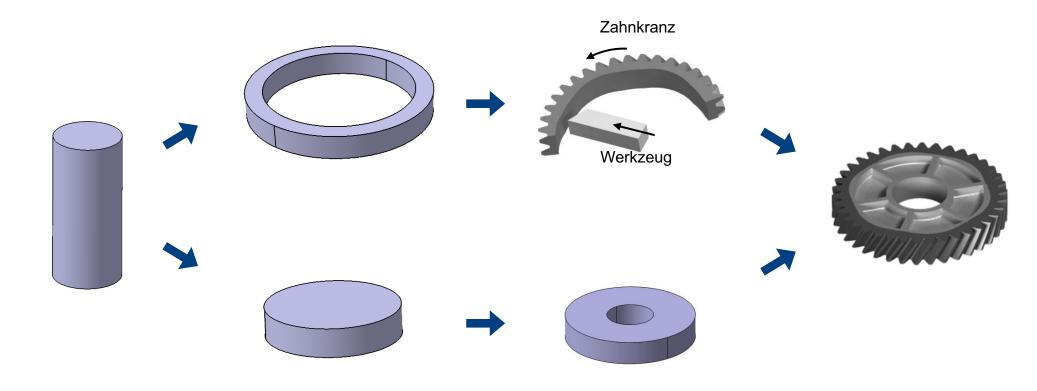






Prozesskette Zahnrad

Radkörper fließgepresst und gefügt

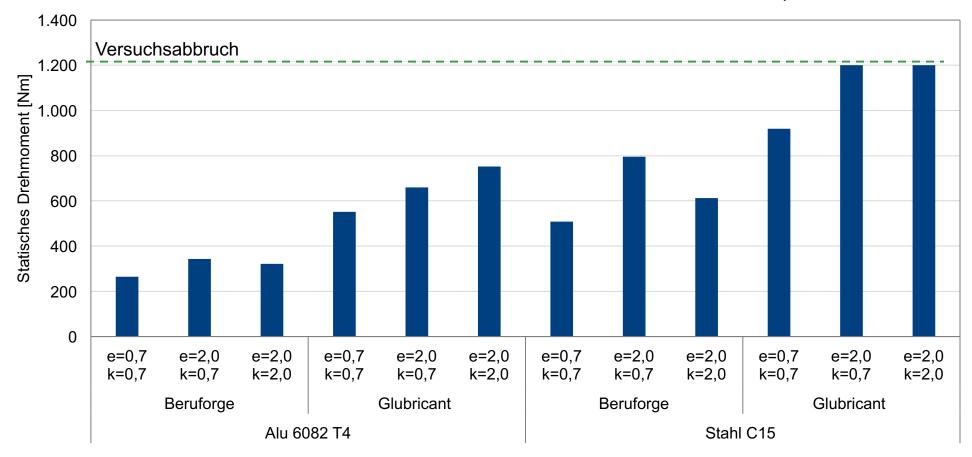






Experiment: Ergebnisse statisches Drehmoment

Statisches Drehmoment nach Werkstoff, Schmierstoff und Zahnkranzinnenprofil

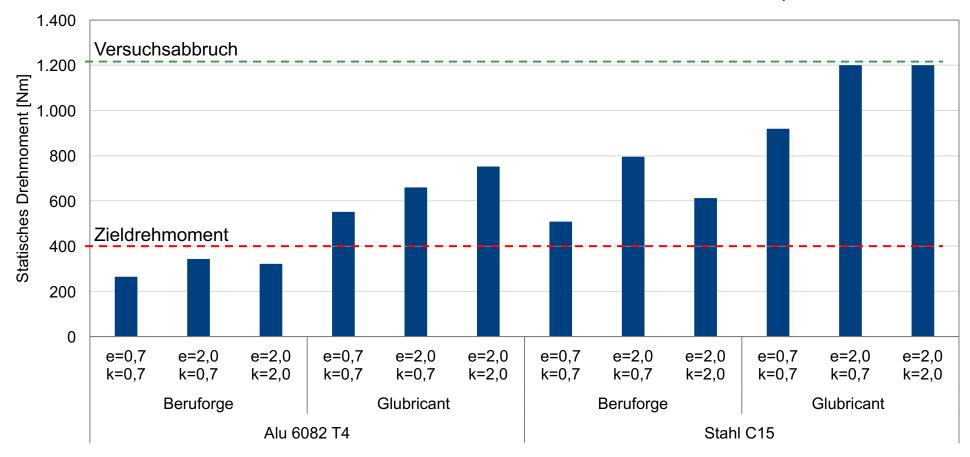






Experiment: Ergebnisse statisches Drehmoment

Statisches Drehmoment nach Werkstoff, Schmierstoff und Zahnkranzinnenprofil



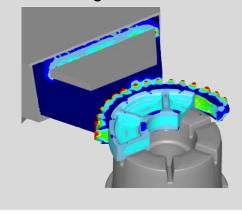


Untersuchungen zum umformgefügten Zahnrad

Herstellung eines gebauten Zahnrades durch Fließpressen des Zahnradkörpers und gleichzeitigem Fügen mit einem Zahnkranz bzw. einem Zahnkranz und einer Welle

Simulation

- ••Prozessablauf
- ••Definition Zahnkranzinnenprofile
- ••Werkzeugkonstruktion



Experimente

- - ••Herstellung von Zahnrädern in drei Ausbaustufen
 - ••Statische und dynamische Drehmomenttests



Optimierung

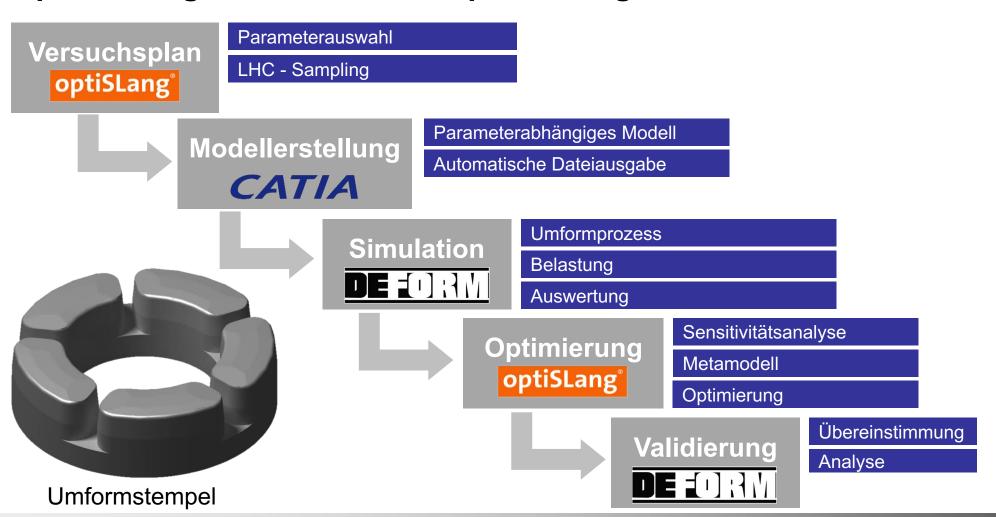
- ••Aufbau einer automatisierten CAE-Optimierungskette
 - Ermittlung des Gewichtseinsparung
 - ••Experimentelle Validierung







Optimierung: CAE-basierter Optimierungsablauf







Optimierung: Geometrieergebnis

Parameter	Optimierung	
Rippenzahl	3	
Rippenbreite	3,5 mm	
Wanddicke Außen	2,5 mm	
Wanddicke Innen	3,0 mm	
Bodendicke	3,0 mm	
Füllung	90 %	



Antworten	Vollkörper	Ausgangsdesign	Optimierung
Max. Spannung	52,3 MPa	111,7 MPa	90,6 MPa
Umformkraft	-	5.506 kN	4.754 kN
Volumen	55.296 mm ³	30.281 mm³	21.595 mm ³

Weitere 29% Gewichtseinsparung möglich



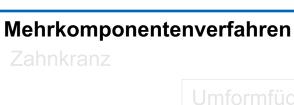
Stofflicher Leichtbau

Konzeptleichtbau

Fertigungsleichtbau



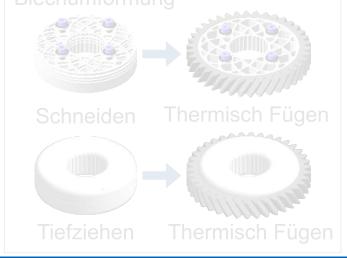










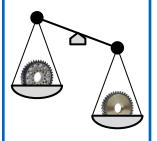


Prüfung

Tragfähigkeit Statisch und Dynamisch



Bewertung Leichtbaupotenzial

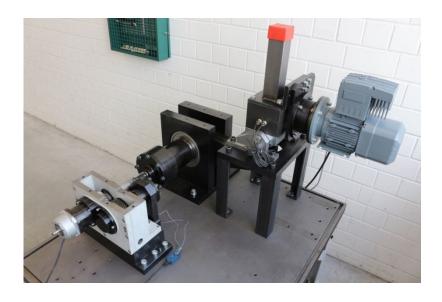






Übersicht Prüfstände

Statischer Überlastprüfstand



Screeningversuche:

- maximal übertragbares Drehmoment
- auftretende Schadensarten

Zahnrad-Verspannungsprüfstand



Laufversuche:

- Drehmoment hohe Zeitfestigkeit
- auftretende Schadensarten



Prüfprogramm statisch

Screening-Versuche bei statischer Last

- Über 100 geprüfte Zahnräder
- Identifizierung der tragfähigsten Varianten für umfangreichere Untersuchungen



- Lokales Abdecken
- Abschreckprozess
- Fügeprozess
- Radkörpergeometrie
- Zahnkranzinnendurchmesser



- Fügeprozess
- Radkörpergeometrie
- Radkörperwerkstoff



- Zahnkranzinnengeometrie
- Radkörperwerkstoff
- Schmierstoff beim Fügen
- Welle-Nabe-Verbindung





Prüfprogramm dynamisch

Tragfähigkeit unter dynamischer Belastung

- Untersuchung der tragfähigsten Varianten aus dem statischen Versuch
- Prüfung von Ritzel und Rad (30 Zahnräder)



- Fügeprozess
- Radkörpergeometrie



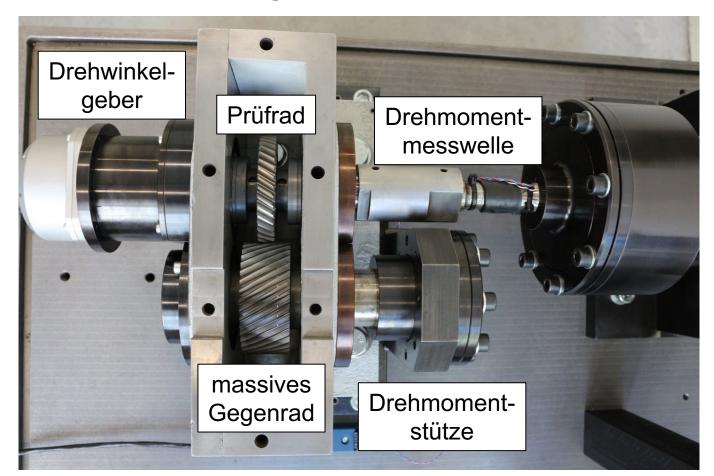
- Fügeprozess
 - Fügen aus der Kohlungshitze
 - Fügen nach dem Anlassen



Radkörperwerkstoff



Statische Prüfung





Versuchsbedingungen:

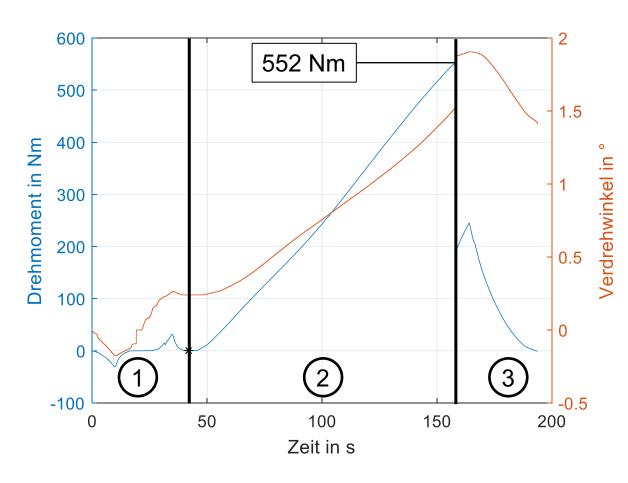
- Leichtbauzahnrad im Eingriff mit massivem Gegenrad
- quasistatische Lastaufbringung
- Messgrößen
 - Drehmoment
 - Drehwinkel





Versuchsablauf

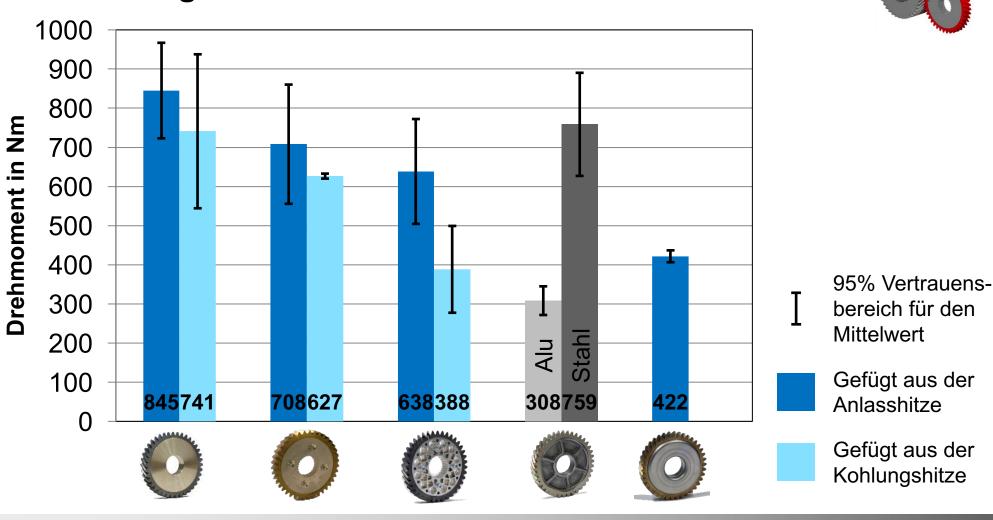




- (1) Initialisierungsphase:
 - Nullpunkt der Messtechnik setzen
 - Spiel entfernen
- (2) Belastungsphase:
 - rampenförmig steigendes Drehmoment
 - Schadenseintritt
- (3) Entlastungsphase:
 - Reduktion des Drehmoments



Versuchsergebnisse: statische Versuche





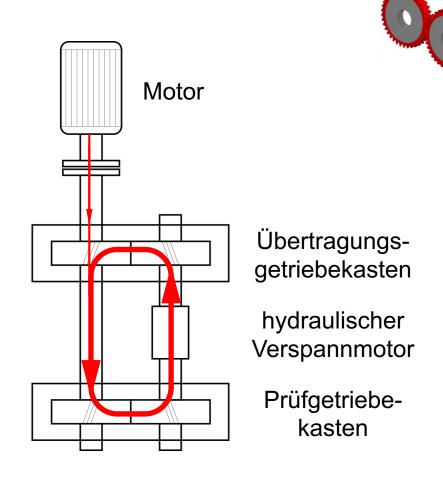


Dynamische Prüfung

Versuchsbedingungen

- Ritzel und Rad im Eingriff
- konstantes Verspannmoment
- angestrebte Lastwechselzahl zwischen 10⁴ und 10⁵

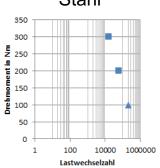




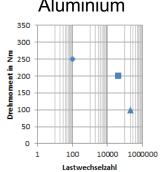


Ergebnisse: dynamische Laufversuche

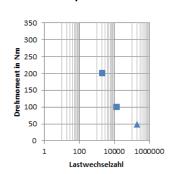




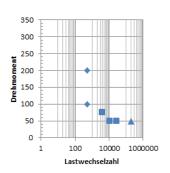
massiv umgeformt Aluminium



blechpaketiert



zerspant







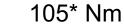


220* Nm









50* Nm

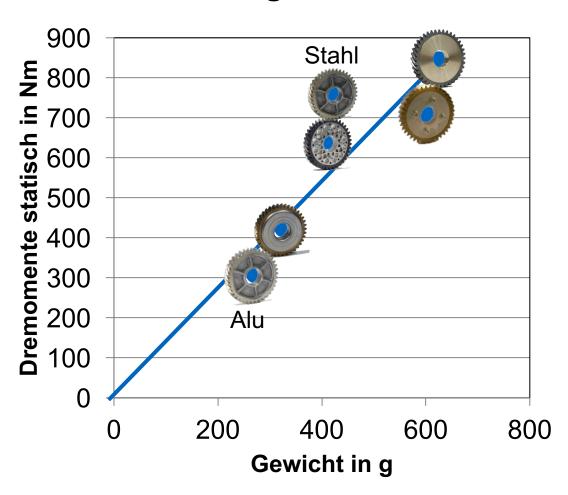
^{265*} Nm

^{*} umgerechnet auf 25.000 Lastwechsel





Zusammenfassung



- Gefügte Räder übertragen hohe statische Momente
- Innovative Zahnradkonzepte erreichen im Laufversuch höhere dynamische Drehmomente als das zerspante Vollscheibenrad*
- Konstruktive Optimierungspotenziale vorhanden um Tragfähigkeit weiter zu steigern

^{*} gefügt aus der Aufkohlungshitze





Ergebnisse: Übersicht

- Hohe statisch übertragbare Momente
- Innovative Zahnradkonzepte zeigen h\u00f6here dynamische Tragf\u00e4higkeit als zerspantes Vollscheibenrad
- Optimierungspotenziale vorhanden um Tragfähigkeit weiter zu steigern

	massiv umgeformt		bloobpokationt	zoronont	tiofgozogon
	Stahl	Alu	blechpaketiert	zerspant	tiefgezogen
statisch	759 Nm	308 Nm	708 Nm	845 Nm	433 Nm
dynamisch	265* Nm	220* Nm	105* Nm	50* Nm	ausstehend

^{*} umgerechnet auf 25.000 Lastwechsel

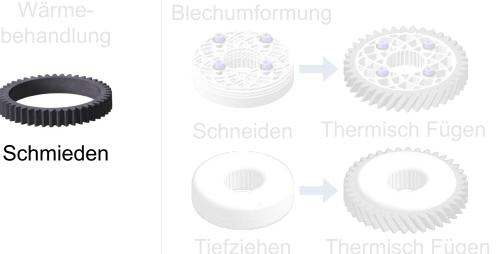


Fertigungsleichtbau

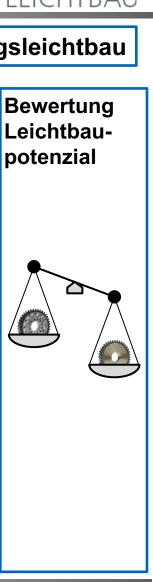








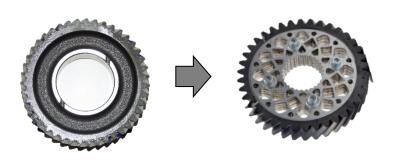






Fertigungsalternative geschmiedeter Zahnkranz

Mehrkomponentenzahnrad



Mehrstufiges Präzisionsschmieden



Zerspanter Zahnkranz (Standard)



Präzisionsgeschmiedeter Zahnkranz

Anforderung

- Aufteilung in Funktionsgruppen: Verzahnung, Radkörper
- Leichtbauoptimierter Radkörper
- Hohe Beanspruchung des Zahnkranzes aufgrund von Fügeverbindung und Wälzkontakt

Zielsetzung

- Erhöhte Belastbarkeit des Zahnkranzes und verbesserte Zahnfußtragfähigkeit aufgrund des belastungsgerechten Faserverlaufes
- Verbesserte Mikrostruktureigenschaften aufgrund thermomechanischer Behandlung (TMB)



Agenda

Präzisionsgeschmiedeter Zahnkranz

Lösungsweg

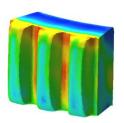
- Prozess/Simulation
- Thermische Prozessführung
- Mechanische Prozessführung

Schmiedeversuche

- Anlangen und Randbedingungen
- Prozessablauf

Ergebnisse

- Geometrie- und Oberflächenanalyse
- Metallografie
- Härte und Wärmebehandlung

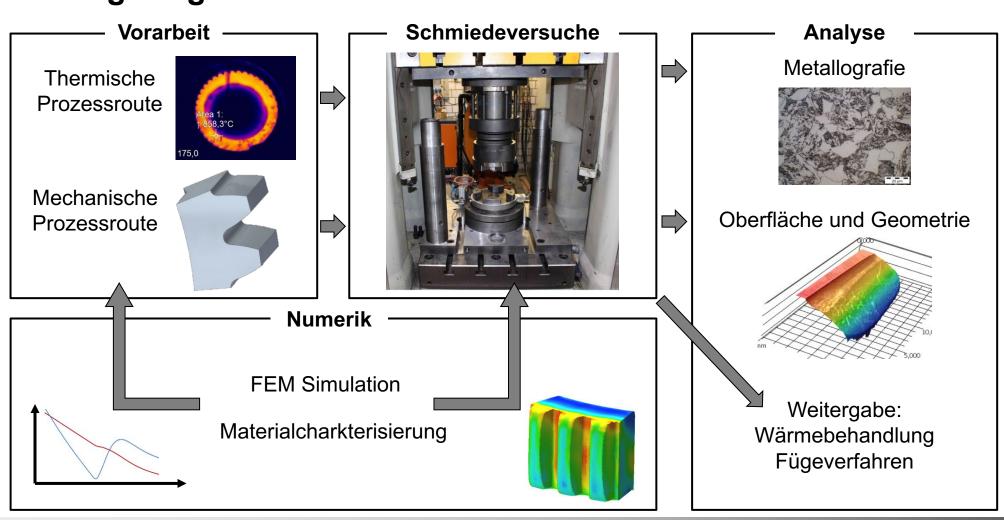






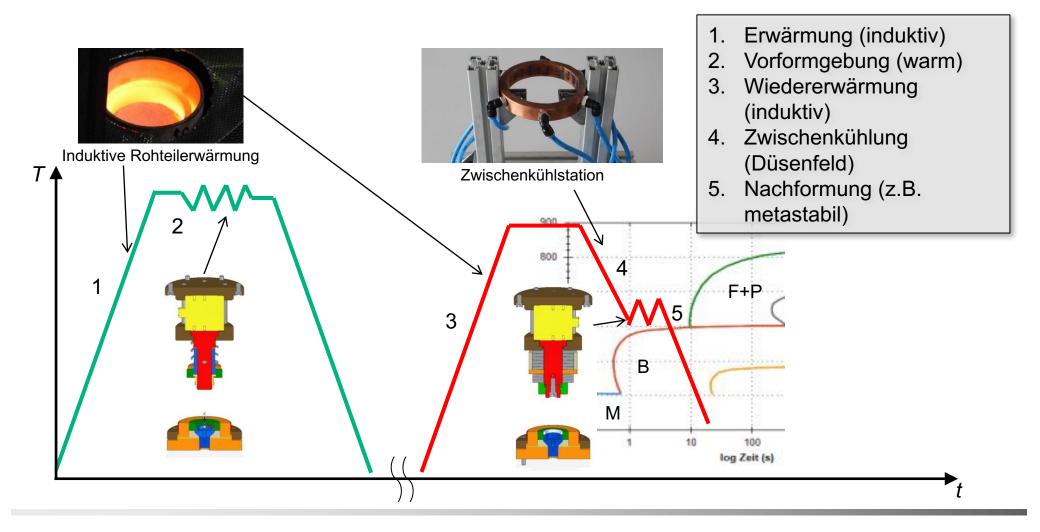


Lösungsweg



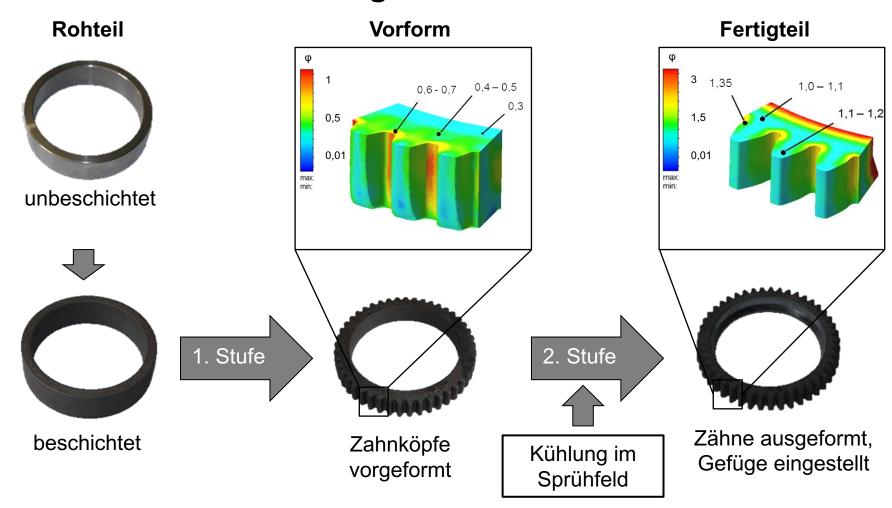


Thermomechanische Prozessführung





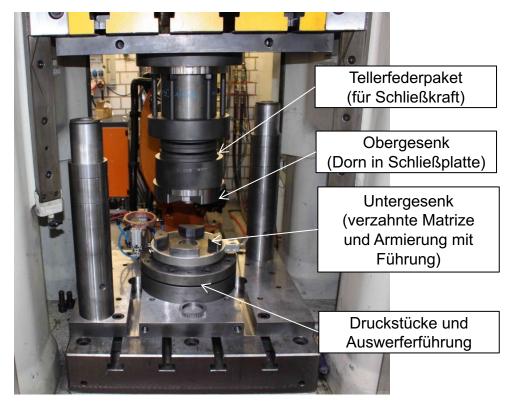
Mechanische Prozessführung





Schmiedeversuche

- Flexibles Werkzeugsystem mit zwei einstufigen Einbauten
- Fertigung durch Fa. Ossenberg Edelstahl (nicht als VAW)
- Beschichtung der Rohteile mit: Berulit 936 (Carl Bechem)
- Kühlschmierung der Matrizen mit Wasser-Grafitsuspension Berulit 906 HP (Carl Bechem)
- Umformmaschine Lasco SPR 500
 Spindelpresse (40 kJ / 5MN)
- Erwärmung induktiv mit TruHeat 3040 (Mittelfrequenzumrichter 40 kW)
- Teilehandling mit Industrieroboter Fa.
 Kuka



Umformwerkzeug (Fertigstufe) in der Umformmaschine





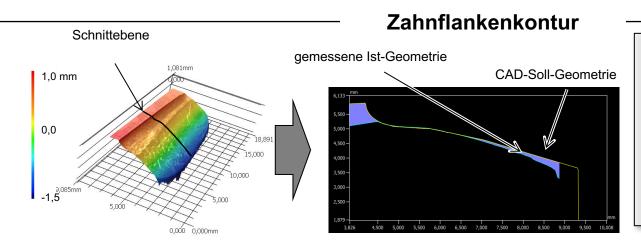
Prozessvideo Vorformschmieden



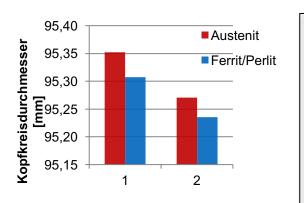




Geometrieanalyse

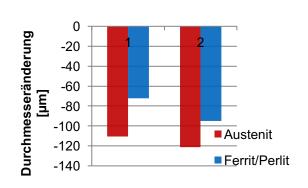


- Keyence VR3200 (Digitales 3D Mikroskop)
- Kein einheitlicher Trend bei der Abweichung der Zahnflankenkontur
- M50Nil liefert zu große Volumina, übrige zu geringe



Zahnkranzdurchmesser

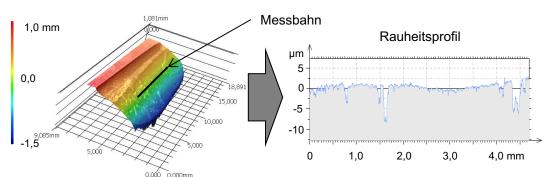
- Geschmiedete Zahnkränze vor und nach dem Einsatzhärten
- Größere Konturtreue bei Umformung im metastabilen Austenit (95,35 mm)
- Aber größere Schrumpfung (110 μm >72 μm)



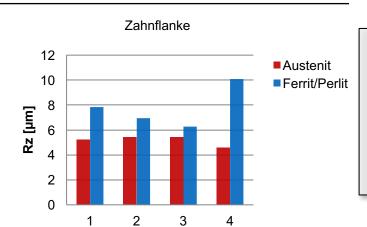


Oberflächenanalyse

Oberflächenerfassung

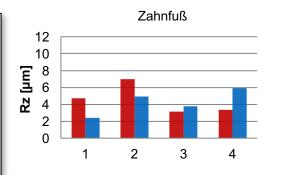


- Taktile Erfassung T8000RC (Jenoptik/Hommel-Etamic)
- Messung auf Zahnflanke und zwischen der Zähnen
- Ermittlung von Rz und Ra



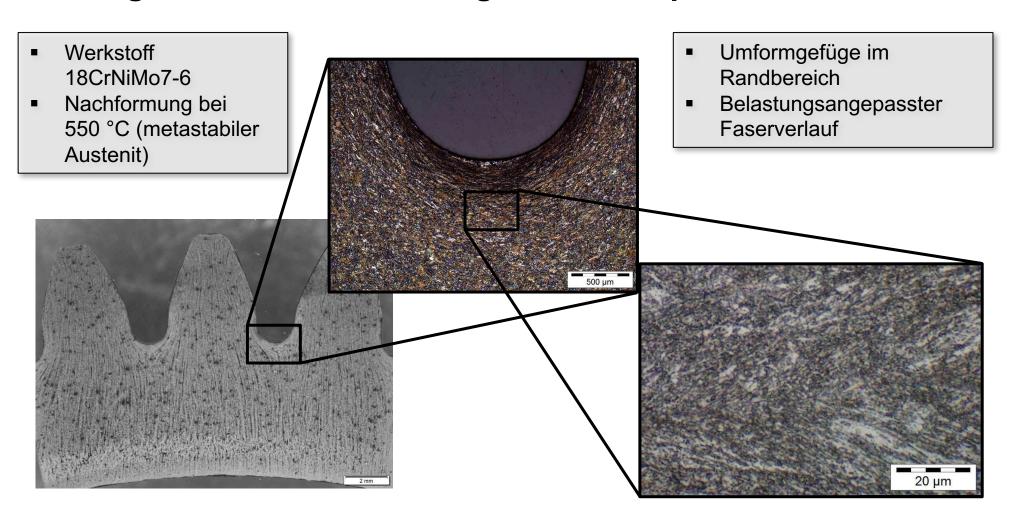
Rauheitskennwerte

- Bessere Rautiefe bei Nachformung im Austenit auf der Zahnflanke für alle Werkstoffe
- Kein einheitlicher Trend im Bereich des Zahnfußes





Metallografische Untersuchung: Aufnahmepositionen







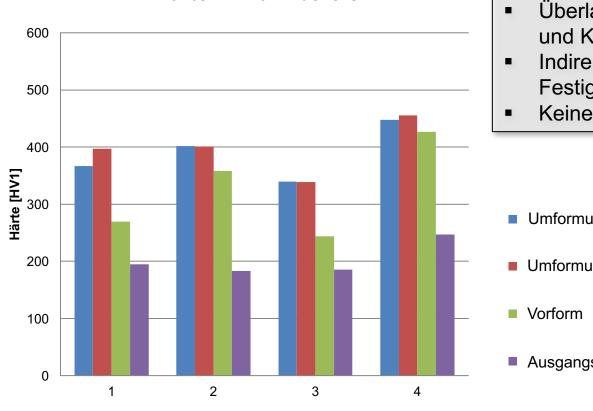
Metallografische Untersuchung: Mikrostrukturentwicklung

Rohteil **Vorform Fertigteil** Im Ferrit/Perlit nachgeformt 392 HV Nr. 66 Werkstoff: 16MnCr5 Probennummer Härte Nr. 0-5 275 HV 275 HV 3,6 µm Im metastabilen Austenit nachgeformt 355 HV Nr. 59 $2,7 \mu m$ 16,7 µm Reduzierung der Korngröße Korngröße Feine Verteilung der Gefügebestandteile NN µm





Härtemessung



Härte im Zahnbereich

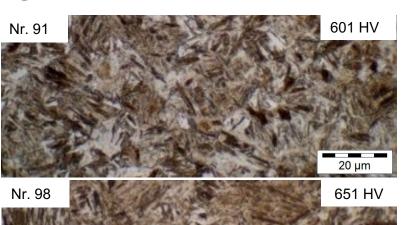
- Härtesteigerung durch Umformung
- Überlagernde Effekte: Feinkornhärtung und Kaltverfestigung
- Indirekte Aussage über statische Festigkeit
- Keine Aussage über Duktilität

- Umformung im metastabilen Austenit
- Umformung im Ferrit/Perlit

Ausgangswerkstoff



Eigenschaften nach der Wärmebehandlung



- Werkstoff: 18CrNiMo 7-6
- Einsatzgehärtet und angelassen am IWT Bremen
 - Oben: Nachformung in Austenit
 - Mitte: Nachformung im Ferit/Perlit
 - Unten: Referenzbauteil zerspant (Schliffbild und Härtemessung IWT)

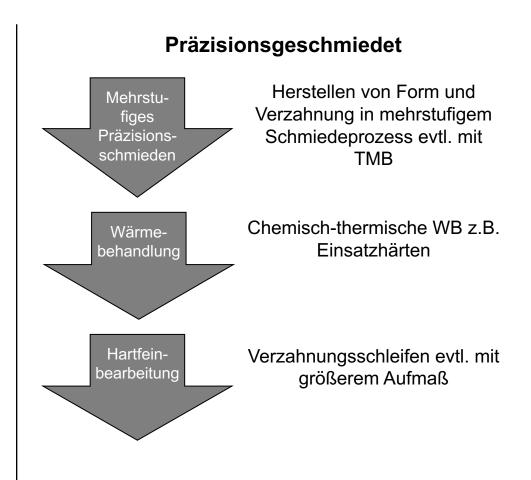


- Ref. 568 HV
- Kein wesentlicher Einfluss der Herstellungsroute auf die Eigenschaften nach der chemisch-thermischen Wärmebehandlung (Einsatzhärten und Anlassen)
- Nutzung der Vorteile der Mikrostruktur nur in Verbindung mit anderen Wärmebehandlungsverfahren z. B. Induktionshärten möglich



Prozessroutenvergleich

Konventionell Herstellen von Rohlingen mit Vorform grober Vorform Schmieden Spanende Wälzfräsen der Verzahnung Weichund Bearbeitung der übrigen bearbeitung Funktionsflächen Wärmebehandlung Chemisch-thermische WB z.B. Einsatzhärten Hartfeinbearbeitung Verzahnungsschleifen



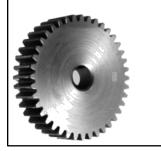


Stofflicher Leichtbau

Konzeptleichtbau

Fertigungsleichtbau

Ausgangssituation Vollzahnrad



Hochleistungszahnrad



Mehrkomponentenverfahren

Zahnkranz

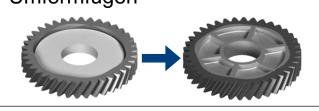


Spanen + Wärmebehandlung



Schmieden

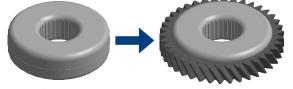




Blechumformung



Thermisch Fügen Schneiden



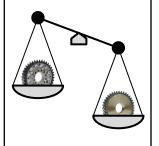
Thermisch Fügen Tiefziehen

Prüfung

Tragfähigkeit Statisch und Dynamisch



Bewertung Leichtbaupotenzial

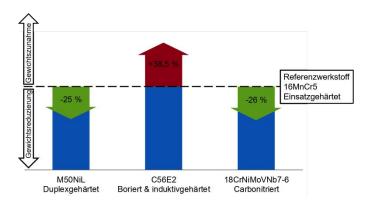






Zusammenfassung

stofflicher Leichtbau



Steigerung des Leichtbaupotentials durch Werkstoff mit höherer spezifischer Festigkeit

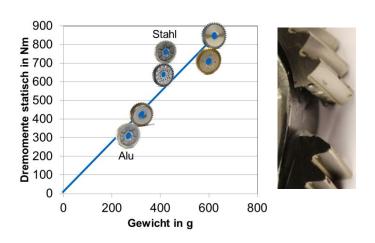




Geschmiedeter Zahnkranz



konstruktiver Leichtbau



Leichtbaupotenzial durch Mehrkomponentenbauweise



Weitere Steigerung des Leichtbaupotenzials durch Kombination von **stofflichem** und **konstruktivem Leichtbau**



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Das Team um das Hochleistungszahnrad wünscht Ihnen viel Erfolg und nun viel Freude mit den Kollegen des Kolbenbolzens.



Stofflicher Leichtbau

Konzeptleichtbau

Fertigungsleichtbau

Ausgangssituation Vollzahnrad



Hochleistungszahnrad



Mehrkomponentenverfahren

Zahnkranz

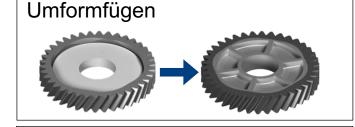


Spanen + Wärmebehandlung



Schmieden

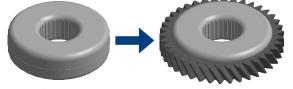
Radkörper



Blechumformung



Schneiden Thermisch Fügen



Tiefziehen Thermisch Fügen

Prüfung

Tragfähigkeit Statisch und Dynamisch



Bewertung Leichtbaupotenzial

