DEUTSCHE MASSIV UMFORMUNG

NEUE IDEEN SCHMIEDEN

Fraunhofer IWU

IMU @ CastForge, Stuttgart 04.06.2024

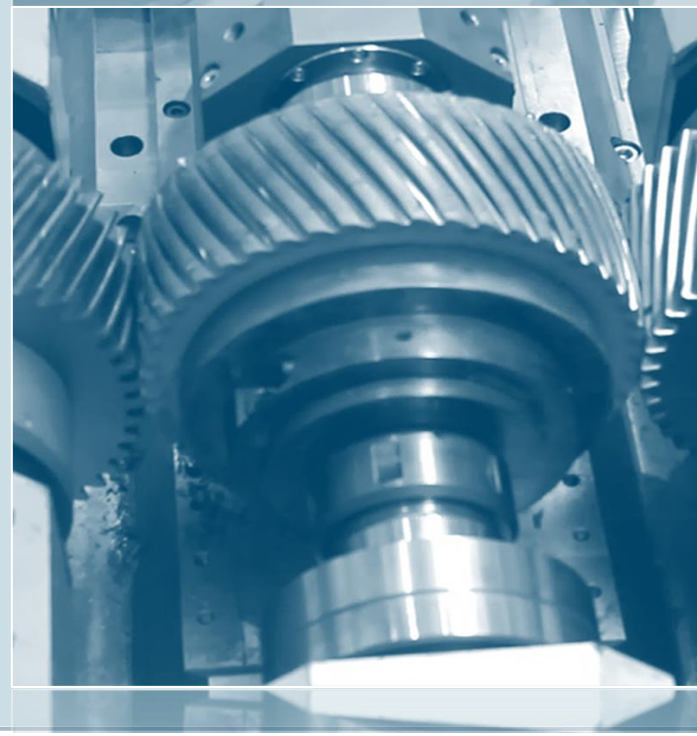
# Warmwalzen von Schrägverzahnungen (WWSV)

Matthias Milbrandt
Mike Lahl, Dr. Udo Hellfritzsch, Prof. Verena Kräusel, Prof. Martin Dix

# Agenda

## Warmwalzen von Schrägverzahnungen (WWSV)

1. **Informationen zum Fraunhofer IWU**
2. **Beschreibung der Walzprozesse für Demonstratoren ($D_1$ & $D_2$)**
3. **Umformintegrierte PK für Schrägverzahnungen ($m_n$ = 4 mm)**
4. **Steigerung Zahnfußfestigkeit / Materialeinsparungen**
5. **Ausblick**




© Fraunhofer IWU

# 1. INFORMATIONEN ZUM FRAUNHOFER IWU

## Standorte / Bereiche

### PARTNER FÜR INNOVATION IN DER PRODUKTIONSTECHNIK.

- gegründet am 1. Juli 1991
- aktuell ca. 700 Mitarbeiter
- rund 50 Mio. € Forschungsvolumen
- 3 Wissenschaftsbereiche – 3 ILs
  - Funktions- und Systemintegration – Prof. Drossel
  - Prozesstechnologie – Prof. Dix
  - Produktionssysteme und Fabrikautomatisierung – Prof. Ihlenfeldt

Dresden

Wolfsburg

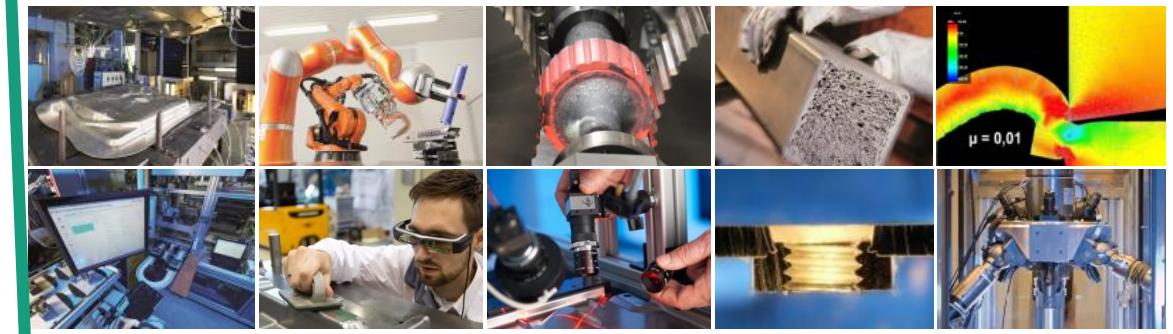
Zittau

Chemnitz


© Fraunhofer IWU
Fraunhofer IWU

# 1. INFORMATIONEN ZUM FRAUNHOFER IWU
## F&E Themenfelder

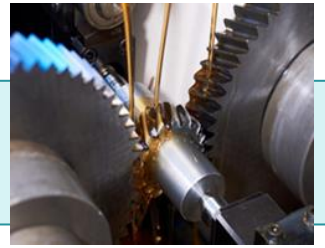
- Automatisierung und Industrie 4.0
- Zerspanende und Umformende Fertigungsverfahren
- Additive Fertigungsverfahren
- Technische Akustik
- Kennwertermittlung und Materialcharakterisierung
- Konstruktiver Leichtbau
- Werkzeugmaschinen
- Mechatronik and Adaptronik
- Medizintechnik
- Mikro- und Präzisionsfertigung
- Montagetechnik und Robotik
- Produktionsmanagement
- Wasserstoff- und Brennstoffzellenproduktion
- Simulation, VR und AR
- Produktionstechnologien für Antriebskomponenten
- Klimaneutraler Fabrikbetrieb
- Thermisches und mechanisches Fügen
- Werkzeug- und Formenbau
- Adaptive Prozessketten
- Kognitive Produktion




 © Fraunhofer IWU

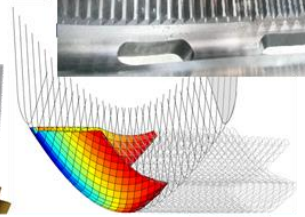
Fraunhofer IWU

# 1. INFORMATIONEN ZUM FRAUNHOFER IWU
## Forschung für die Zahnradfertigung



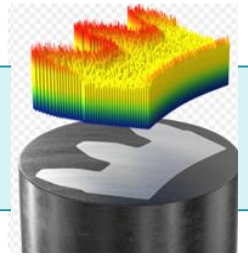
**Verzahnungswalzen**
*Fertigung mittels umformintegrierter Prozesskette (Welle-VZ)*

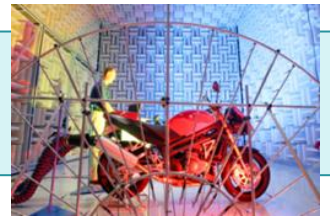
**Verzahnungsfräsen**
*Prozessintegration in Dreh-Fräs-Zentrum, Eigenschaftsanalyse WZ-Halter*



**Verzahnungsschälen**
*Prozessentwicklung, Entwicklung Schäl-Modul*

**Verzahnungsschleifen**
*Prozessentwicklung, WZ-Konzepte*





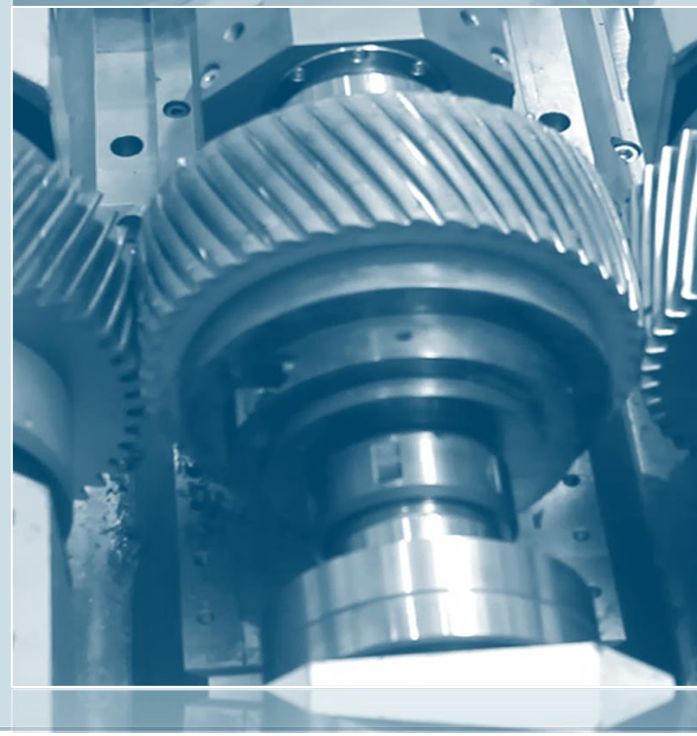
**Verzahnungsprüfung**
*Geometrie, Tragfähigkeiten, Akustik*

Jahr 1995 — 2005 — 2010 — 2015 — 2020


© Fraunhofer IWU
Fraunhofer IWU

# Agenda

## Warmwalzen von Schrägverzahnungen (WWSV)

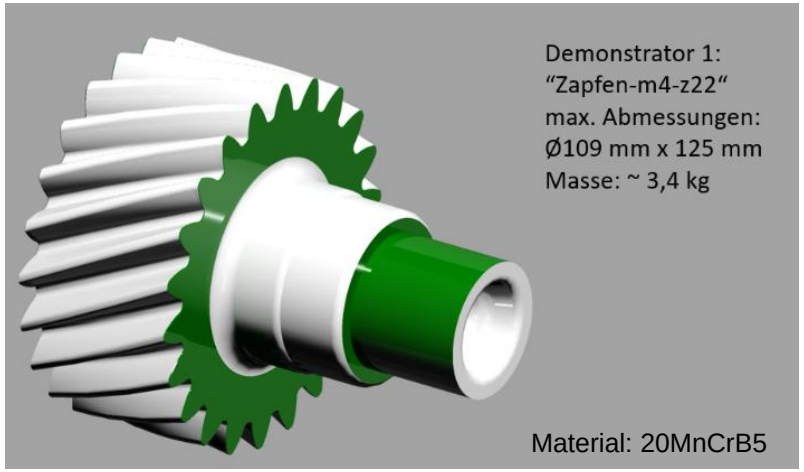


1. **Informationen zum Fraunhofer IWU**
2. **Beschreibung der Walzprozesse für Demonstratoren ($D_1$ & $D_2$)**
3. **Umformintegrierte PK für Schrägverzahnungen ($m_n$ = 4 mm)**
4. **Steigerung Zahnfußfestigkeit / Materialeinsparungen**
5. **Ausblick**


© Fraunhofer IWU

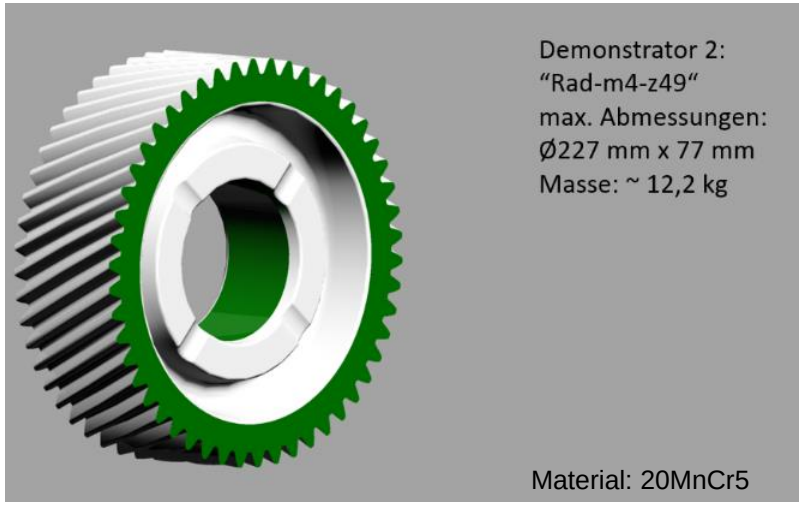
# 2. BESCHREIBUNG DER WALZPROZESSE FÜR DEMONSTRATOREN (D1 & D2)

## WWSV Team



Demonstrator 1:
“Zapfen-m4-z22“
max. Abmessungen:
Ø109 mm x 125 mm
Masse: ~ 3,4 kg

Material: 20MnCrB5



Demonstrator 2:
“Rad-m4-z49“
max. Abmessungen:
Ø227 mm x 77 mm
Masse: ~ 12,2 kg

Material: 20MnCr5

- Spannmittel Werkstücke (D1 & D2)
- Pulsatorvorrichtung (D1)

GT Industrie Service

Forschungsgesellschaft Stahlverformung e. V.

FSV AiF Mitglied

KMU

- Koordination
- WWSV (2 x UF-Prozesse) & Pulsatorprüfung (D1)
- Richtlinienerstellung / Downsizing

Fraunhofer IWU

- Schleifen Wze (2 x 2)
- Eht / Schleifen (20 x D1)

CHEMNITZER ZAHNRADFABRIK – eine Idee mehr!

KMU

SCHMIEDETECHNIK PLETTENBERG

- SV-Werkstück-Vorformen (50 x D1: Zapfen)

DEUTSCHE MASSIV UMFORMUNG – NEUE IDEEN SCHMIEDEN

Hammerwerk Fridingen

- SV-Werkstück-Vorformen (50 x D2: Räder)

KMU

- Erodieren WZ-Aufnahmen (2 x 2)

Funkenerosion Petzold & Emmrich

LINAMAR

- Werkzeug-Halbzeuge (2 x 2)

LUBRICANTS. TECHNOLOGY. PEOPLE. FUCHS

- Schmiermittel Werkzeuge
- Antioxidationsmittel Werkstücke

KMU

EMA-TEC GmbH
Induktions-Erwärmungs-Technologien

- Auslegung / Erwärmung Werkstücke (D1 & D2)
- Induktoren (I1 & I2)


© Fraunhofer IWU

# 2. BESCHREIBUNG DER WALZPROZESSE FÜR DEMONSTRATOREN (D1 & D2)

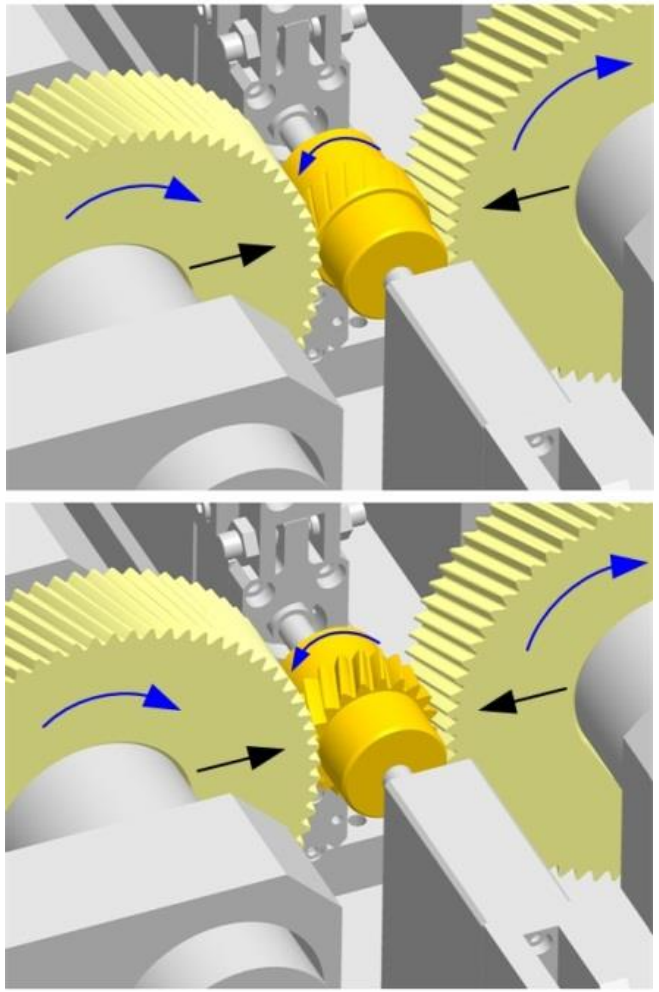
## Verzahnungen aus Einsatzstählen (kalt & warm)

### Vorteile des Walzprozesses (mit 2 Walzwerkzeugen)

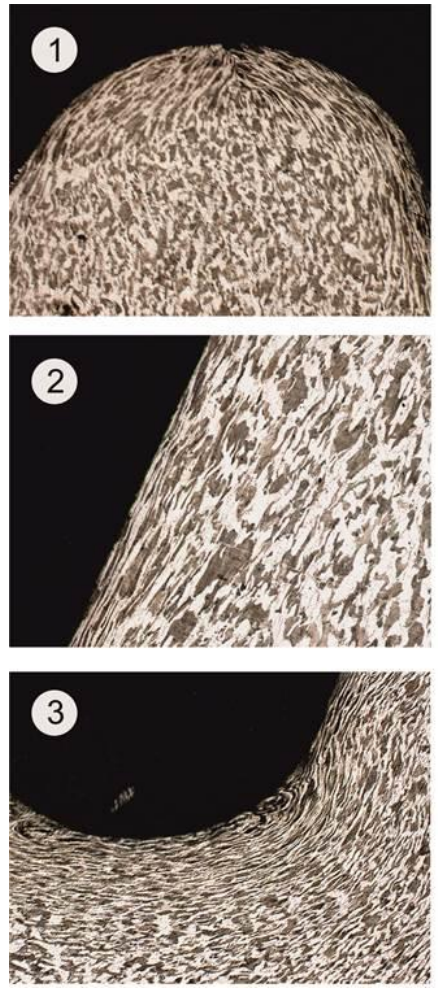
- schnelle Prozesszeit
- ununterbrochener Faserverlauf
- hohe Oberflächenqualität (Zahnfuß $R_z \leq 0{,}8$ µm)
- belastungskonforme Gefügestruktur
- Erhöhung der Zahnfuß(-biegewechsel)festigkeit
- Walzen von benachbarten Verzahnungsbereichen auf ein Werkstück (einteilige Wellengestaltung)

(1 - Zahnkopf / 2 – linke Flanke / 3 – Zahnfuß einer gewalzten Verzahnung)

Maschinenkinematik



Materiafluss




 © Fraunhofer IWU

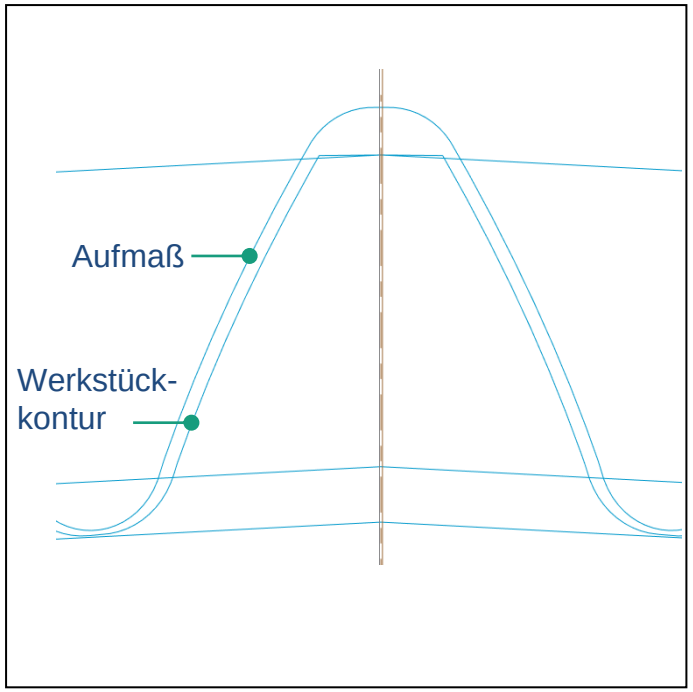
Fraunhofer IWU

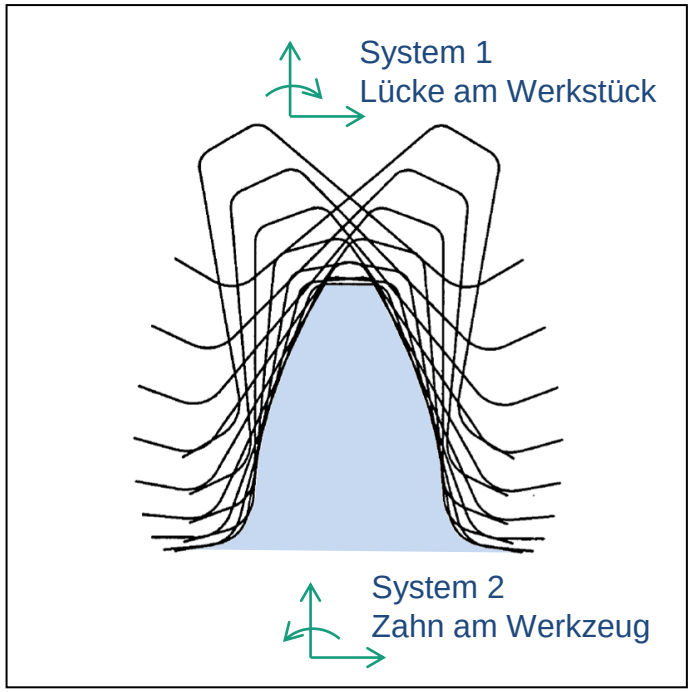
# 2. BESCHREIBUNG DER WALZPROZESSE FÜR DEMONSTRATOREN (D1 & D2)

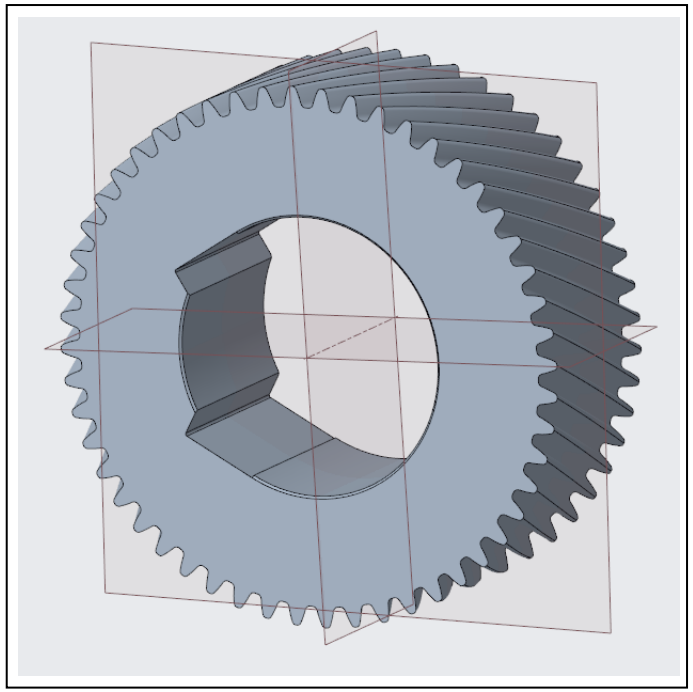
## Werkzeugauslegung I

Prozess der Walzwerkzeugauslegung (abhängig vom Temperaturbereich / WBH / Schleifaufmaß)

Ableitung des Walzaufmaßes → Abwälzen der WZ-Zahn-Geometrie → Werkzeugdesign / Konstruktion



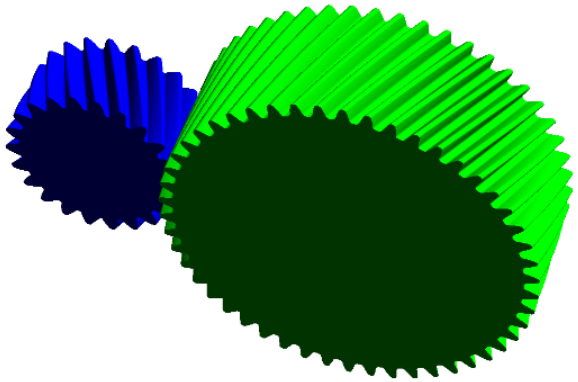

© Fraunhofer IWU

# 2. BESCHREIBUNG DER WALZPROZESSE FÜR DEMONSTRATOREN (D1 & D2)

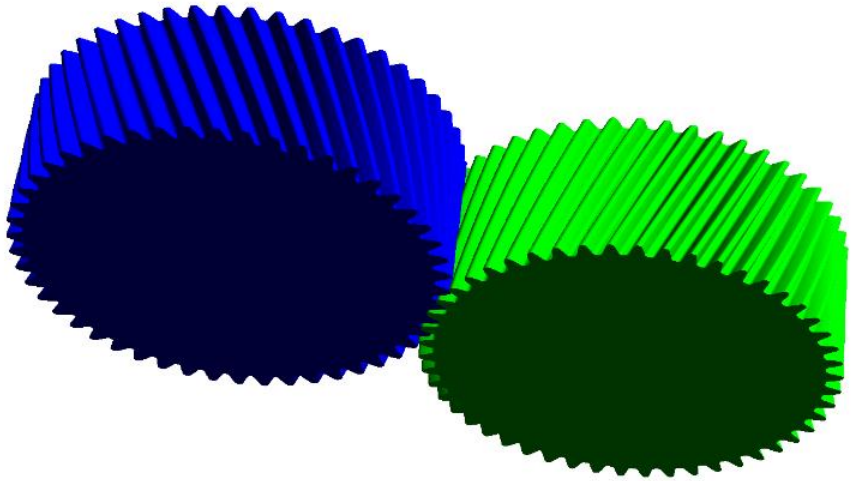
## Prozess- und Werkzeugauslegung II

- **Temperaturübergang von Werkstück auf Werkzeug:**
  - Verkürzung der Gesamtkontaktzeit
  - Reversieren der Drehrichtung / symmetrisches Schrumpfen
  - Minimierung des Gleitgeschwindigkeitsanteils

- **konstruktive Möglichkeiten (WZ):**
  - Erhöhung der Modulgröße
  - Erhöhung der Zahnhöhe
  - Vergrößerung Eingriffswinkel
  - Vergrößerung der Gesamtüberdeckung (Werkzeugbreite, wenn möglich)



D1-WZ-Paar

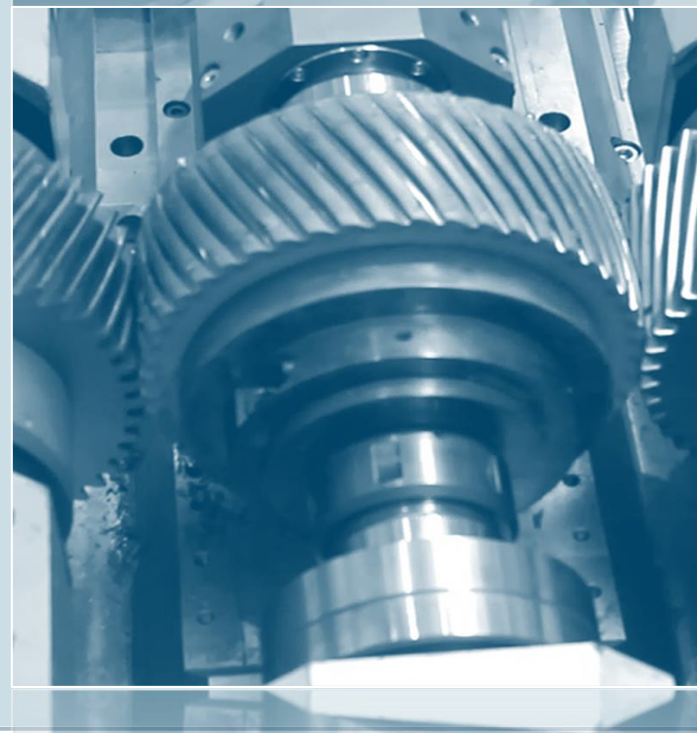


D2-WZ-Paar


© Fraunhofer IWU

# Agenda

## Warmwalzen von Schrägverzahnungen (WWSV)



1. **Informationen zum Fraunhofer IWU**
2. **Beschreibung der Walzprozesse für Demonstratoren ($D_1$ & $D_2$)**
3. **Umformintegrierte PK für Schrägverzahnungen ($m_n$ = 4 mm)**
4. **Steigerung Zahnfußfestigkeit / Materialeinsparungen**
5. **Ausblick**


© Fraunhofer IWU

# 3. UMFORMINTEGRIERTE PK FÜR SCHRÄGVERAHNUNGEN

## Prozesskettenvergleich D1

### Referenz-Prozesskette: SdT

- Drehen (Schmiedeteil)
- Wälzfräsen (Vorverzahnung)
- Einsatzhärten (Gesamtbauteil)
- Verzahnungsschleifen (Fertigverzahnung)

### Umformintegrierte Prozesskette: F&E

- Drehen (Schmiedeteil)
- Warmwalzen (Vorverzahnung)
- Einsatzhärten (Gesamtbauteil)
- Verzahnungsschleifen (Fertigverzahnung)

© Fraunhofer IWU

# 3. UMFORMINTEGRIERTE PK FÜR SCHRÄGVERAHNUNGEN

## Warmumformprozesse D1 & D2

**Warmwalzprozess D1:** m4 z22

**Prozesszeit D1:** 184 sec.

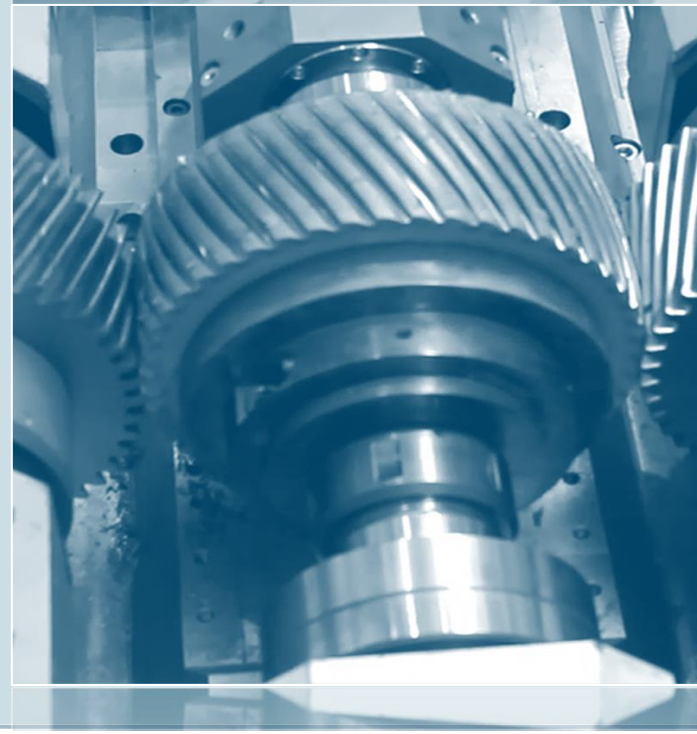
**Warmwalzprozess D2:** m4 z49

**Prozesszeit D2:** 185 sec.

© Fraunhofer IWU

# Agenda

## Warmwalzen von Schrägverzahnungen (WWSV)

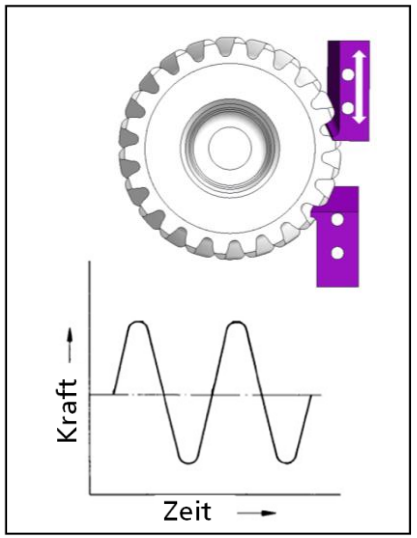


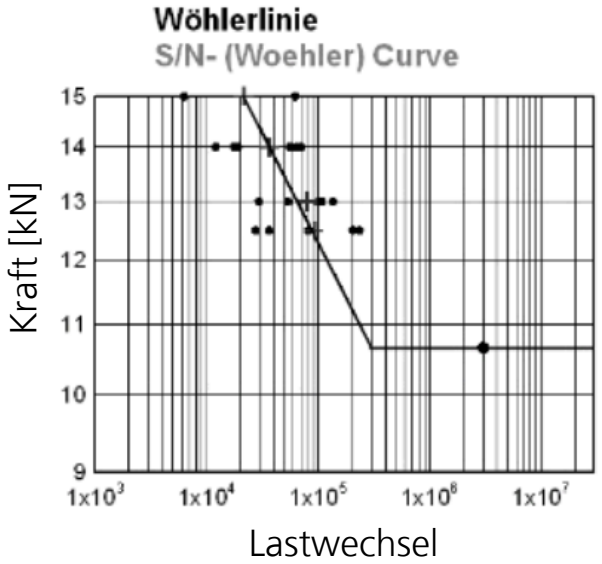
1. **Informationen zum Fraunhofer IWU**
2. **Beschreibung der Walzprozesse für Demonstratoren ($D_1$ & $D_2$)**
3. **Umformintegrierte PK für Schrägverzahnungen ($m_n$ = 4 mm)**
4. **Steigerung Zahnfußfestigkeit / Materialeinsparungen**
5. **Ausblick**


© Fraunhofer IWU

# 4. STEIGERUNG ZAHNFUSSFESTIGKEIT / MATERIALEINSPARUNGEN

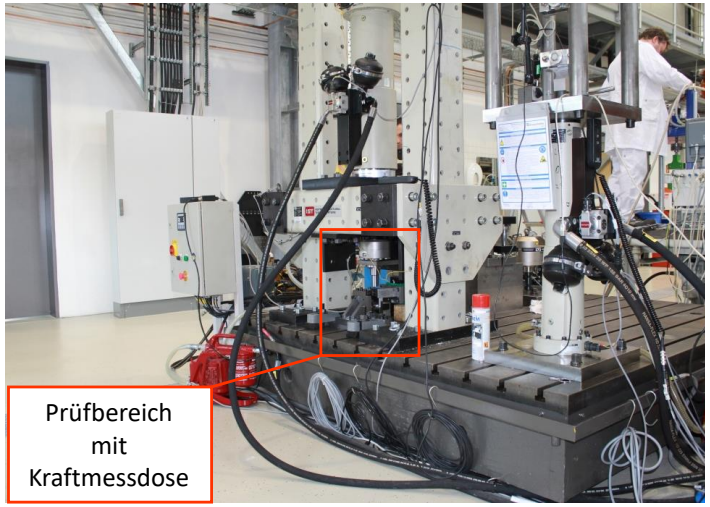
## Demonstratoren D1




- Instron Hydropulser (50 Hz) / dynamische Oberkraft (25 kN)
- Symmetrische Zahnradeinspannung zwischen Stempeln
- Sinusförmig definiertes Kraftverhältnis (Druck schwellend R = 0,1)
- Testende: max. $6 \cdot 10^6$ Lastwechsel bzw. Zahnfußbruch
- Erstellung 2 Wöhlerkurve aus 15 Prüfrädern (5 Einstellteile)

- 2 Fertigungsprüfreihen m4 z22 (10x ZR-Walzteil / 5x ZR-Frästeil)
- pro ZR → 5 Prüfzyklen möglich
- konstante Unterkraft: Fu = 2000 N
- Variation der Oberkraft/Schwingbreite: Fo-Fu = 2000 bis 25000 N
- Bsp.: Laststufe 8000 N: Fu = 2000 N, Fo = 10000 N




 © Fraunhofer IWU

Fraunhofer IWU

# 4. STEIGERUNG ZAHNFUSSFESTIGKEIT / MATERIALEINSPARUNGEN

## Demonstratoren D1

**D1 - Walz**

| | 50% | | 10% | |
|---|---|---|---|---|
| | N | $\sigma_{F0}$ | N | $\sigma_{F0}$ |
| Eckpunkte Zeitfestigkeit | 4000 | 1195 | 4000 | 1077 |
| | 18977 | 1004 | 13835 | 927 |
| Eckpunkt Dauerfestigkeit | 10000000 | 1004 | 10000000 | 927 |

**D1 - Fräs**

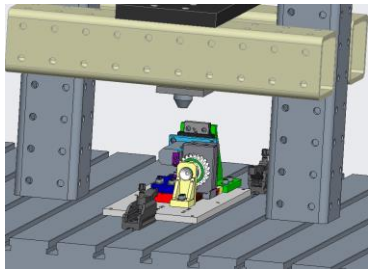
| | 50% | | 10% | |
|---|---|---|---|---|
| | N | $\sigma_{F0}$ | N | $\sigma_{F0}$ |
| Eckpunkte Zeitfestigkeit | 4000 | 1151 | 4000 | 1036 |
| | 49471 | 881 | 32792 | 813 |
| Eckpunkt Dauerfestigkeit | 10000000 | 881 | 10000000 | 813 |

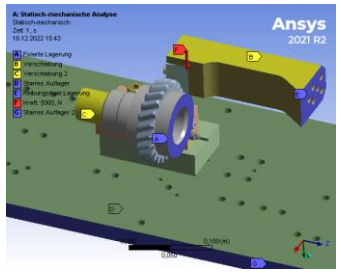
**Dauerfestigkeitsvergleich**

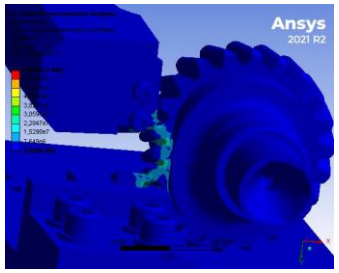
| Ausfallwahr. | 50% | 10% |
|---|---|---|
| Quot. | 1,1396141 | 1,1402214 |
| Anstieg | + 14% | + 14% |

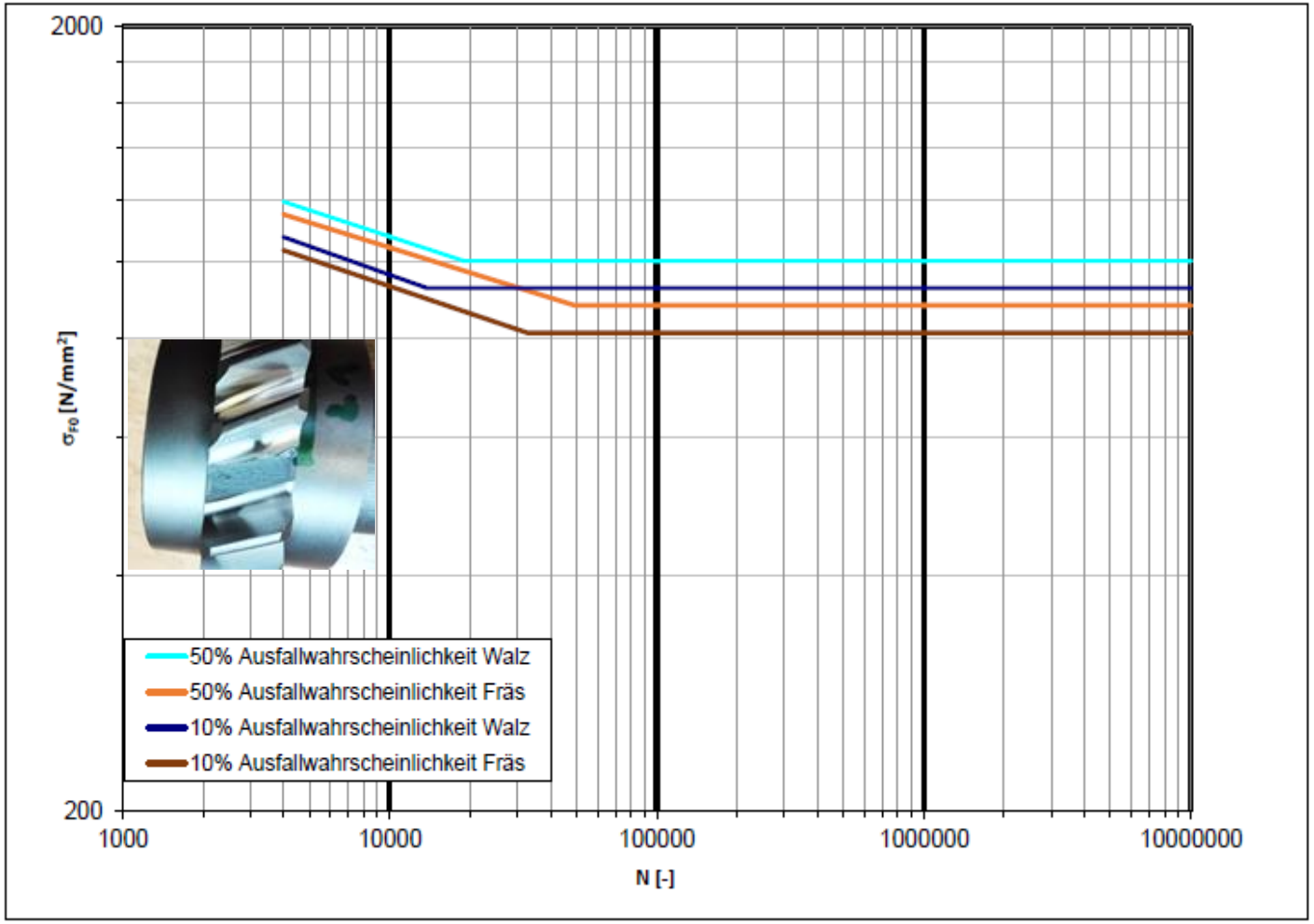
**Zeitfestigkeitsvergleich**

| Ausfallwahr. | 50% | 10% |
|---|---|---|
| Quot. | 1,0382276 | 1,0395753 |
| Anstieg | + 4% | + 4% |






 © Fraunhofer IWU

Fraunhofer IWU

# 4. STEIGERUNG ZAHNFUSSFESTIGKEIT / MATERIALEINSPARUNGEN

## Demonstratoren D1 & D2

- Materialeinsparung D1: 0,703 kg
- Materialeinsparung D2: 0,851 kg
- Zahnfußfestigkeit D1: + 14%
- Downsizing-Potential D1: Modul 4 mm → 3,51 mm bzw. Breite 55 mm → 48,25 mm

**Gestaltung der Drehteilvorformen**

Bei der Gestaltung der Bauteilgeometrie ist jene Lösung optimal, die einerseits die technisch einwandfreie Funktion dieses Teils sicherstellt und andererseits dessen wirtschaftlichste Herstellung ermöglicht. Bei den im Vorhaben untersuchten Demonstratoren: D1 - Zapfen sowie D2 - Losrad handelte es sich um Präzisionsschmiedebauteile aus Einsatzstahl 20MnCr(B)5. Im Gegensatz zum heutigen Stand der Technik wurde für das Weichvorverzahnen statt dem Wälzfräsen das Warmwalzen mit zwei außenverzahnten Rundrollenwerkzeugen eingesetzt. Dieses Verfahren bietet dem Anwender ein großes Bauteilsortiment - in Größe und Dimension - was durch die beiden Demonstratoren nachgewiesen wurde. Der charakteristische Vorformdurchmesser bildet sich dabei abhängig vom axialen Material-Klemmkonzept sowie der Profilverschiebung in der Nähe des Mittenkreisdurchmessers der zu erzeugenden Verzahnung ab:

$$d_v \approx d_m = \frac{d_a + d_f}{2}.$$

**Material- / Energieeinsparungen**

Bezogen auf eine charakteristische Serie der Demonstratoren D1 von 50.000 Stück könnten insgesamt ca. 35 t Stahl eingespart werden. Dies würde gleichermaßen zu einer Reduzierung von 59,5 t $CO_2$ führen, außerdem könnte ein dazugehöriger Energiebedarf von 623 MJ eingespart werden [*]. Bezogen auf eine charakteristische Serie der Demonstratoren D2 von 30.000 Stück könnten insgesamt ca. 25 t Stahl eingespart werden. Dies würde gleichermaßen zu einer Reduzierung von 43,2 t $CO_2$ führen, außerdem könnte ein dazugehöriger Energiebedarf von 452 MJ eingespart werden [*].

*FfE München: CO2-Verminderung in der Metallerzeugung, www.ffe.de/wp-content/uploads/2021/08/CO2-Verminderung_in_der_Metallerzeugung.pdf, 27.11.2019.

Bild 1 zeigt schematisch für die zwei untersuchten Demonstratorbeispiele D1 (links) und D2 (rechts), welche Materialeinsprung beim Warmwalzen im Vergleich zum Wälzfräsen an den jeweiligen Vorformen erreicht werden konnten: $m_{1,e} = 0{,}703$ kg sowie $m_{2,e} = 0{,}851$ kg.

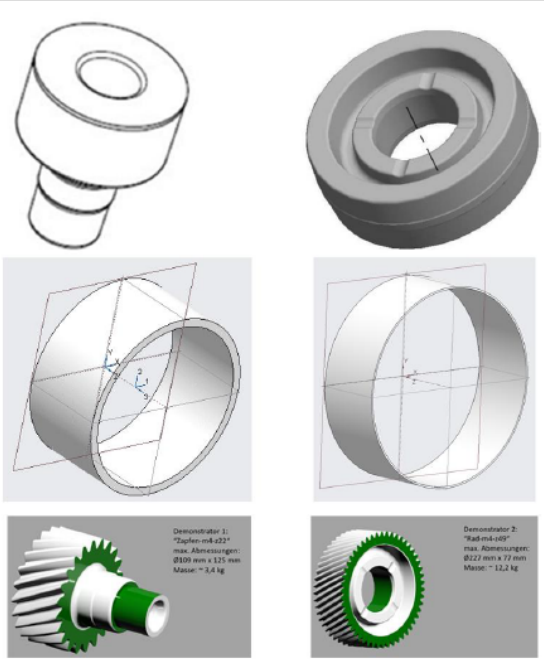


**Bild 1:** Abhängigkeit des Einsparvolumens an den Schmiedeteilen abhängig von den Demonstratorvorformen D1 sowie D2

In den folgenden zugrundeliegenden Patenten mit Bezug zur Werkzeugauslegung wurden Gestaltungsregeln für unterschiedliche Rundrollen- bzw. Flachbackenkonzepte bzw. Hohlformteile angegeben. Diese gelten für den Kalt-, Halbwarm- und Warmumformbereich.

DE000010066177A1 — Werkzeug und Verfahren zum Querwalzen von Verzahnungen sowie Verfahren zur Herstellung eines Walzwerkzeuges Grundlagen für die Konstruktion

DE102006016099A1 — Verfahren zur Herstellung einer Getriebehohlwelle

**Klemmscheiben / Konzepte**

Speziell bei der Warmumformung von Schrägverzahnungen ergibt sich aufgrund der größeren Axialkraft und geringerer Fließspannung ein steigender axialer Materialflussanteil an beiden Demonstratoren D1 und D2. Bezogen auf die vorliegenden Materialwandstärken, Innenaussparungen bzw. Aushebeschrägen, müssen beim Verzahnungswarmwalzen neben den Klemmkonzepten folgende Randbedingungen beachtet werden:

- Werkstückaufnahme über Spannzange und Gegenzentrierspitze,
- Werkstückantrieb / -drehzahl entsprechend der zu erzeugenden Zähnezahlverhältnisse:

$$i_{1,2} = \frac{z_{WZ}}{z_{1,2}} = \frac{n_{1,2}}{n_{WZ}},$$

- Freischaltung des Werkstückantriebs während des Kalibrierens.

**Bild 2:** Optionen zur Minimierung axialen Werkstoffflusses; links - werkzugseitig beim Demonstrator D1 (Außenklemmscheiben); rechts - werkstückseitig beim Demonstrator D2 (Innenkonturscheiben)

Bild 2 zeigt sowohl die konstruktiven (oben) als auch die gefertigten Umsetzungen für die beiden axialen Klemmkonzepte für die zwei untersuchten Demonstratorbeispiele D1 (links) und D2 (rechts). Bezogen auf die eigesetzte Walmaschine mit einem maximalen Werkzeugachsendrehmoment von $M_{max} = 1400$ Nm sowie einer maximalen, hydraulischen Walzschlittenkraft von $F_{max} = 400$ kN wurde am Demonstrator D1 die 55 mm breite Verzahnung bei einer Maschinenauslastung von 85 % (Moment) ausgeformt. Beim Demonstrator D2 sowie einer Breite von 77 mm ergab sich für die Ausformung eine Maschinenauslastung von 65 % (Kraft).

**Prozesszeiten**

Aufgrund der idealerweise identisch zu wählenden Umfangsgeschwindigkeiten beim Warmwalzen der Demonstratoren D1 und D2, wurde mittels Werkzeugdrehzahlerhöhung (~ Faktor 2) bei den Demonstratoren D2 die gleichen Walzzeiten sowie die gleichen Gesamtzykluszeiten, wie bei den Demonstratoren D1 erreicht:

$$t_{w1} \approx t_{w2} \approx 62\,s \text{ sowie } t_{zyk1} \approx t_{zyk2} \approx 190\,s.$$

**Downsizing**

Bei den Demonstratoren D1 wurden vergleichende Pulsatorversuche zur Zahnfußtragfähigkeit durchgeführt und eine um 14% höhere Tragfähigkeit an warmgewalzten im Vergleich zu gefrästen Zahnrädern bei anschließender identischer Wärmebehandlung sowie Fertigbearbeitung (mit geschliffenem Zahngrund) ermittelt:

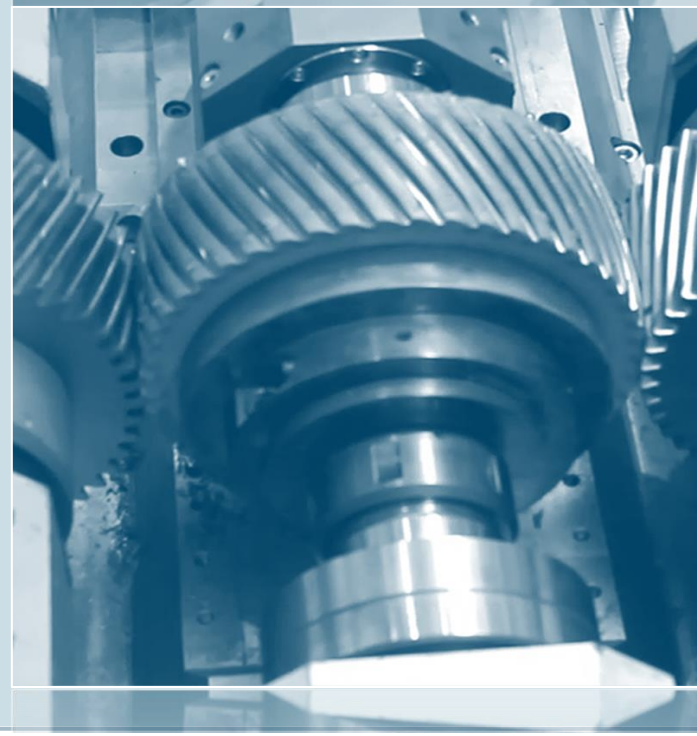
$$\frac{\sigma_{F0,50\%,w1}}{\sigma_{F0,50\%,f1}} = \frac{1004\,N/mm^2}{881\,N/mm^2} = 1{,}14\,.$$

Bezüglich der Rückrechnung der Bauteildimension bei Berücksichtigung identischer Mindestwandstärken sowie Kerbfälle am Demonstrator D1, könnte das Modul $m_1$* bzw. die Verzahnungsbreite $b_1$*, wie folgt reduziert werden:

$$m_1^* = \frac{m_1}{1{,}14} = \frac{4\,mm}{1{,}14} = 3{,}51\,mm \text{ bzw. } b_1^* = \frac{b_1}{1{,}14} = \frac{55\,mm}{1{,}14} = 48{,}25\,mm\,.$$


© Fraunhofer IWU

# Agenda
## Warmwalzen von Schrägverzahnungen (WWSV)

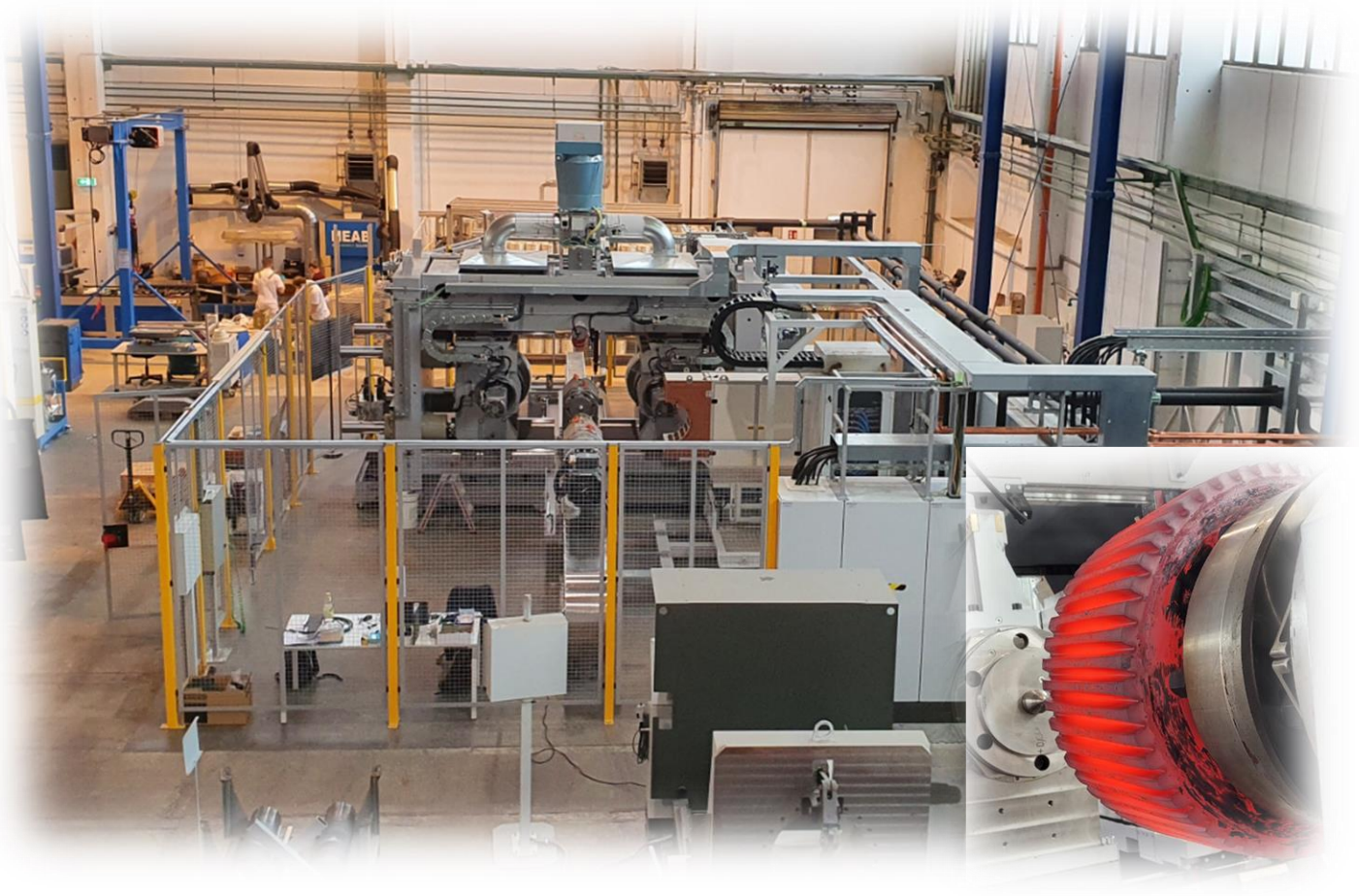


1. **Informationen zum Fraunhofer IWU**
2. **Beschreibung der Walzprozesse für Demonstratoren ($D_1$ & $D_2$)**
3. **Umformintegrierte PK für Schrägverzahnungen ($m_n$ = 4 mm)**
4. **Steigerung Zahnfußfestigkeit / Materialeinsparungen**
5. **Ausblick**


© Fraunhofer IWU

# 5. AUSBLICK

## Potential für zukünftige Märkte / Großverzahnungs-Bauteile



- Definition von innovativen Prozessketten für Großräder
- Werkzeugfertigung
- Prototypenherstellung
- Geometrieoptimierung für Schrägverzahnungen
- Prototypenprüfung
- Vorschläge für neue Richtlinien / Standards


© Fraunhofer IWU

# Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit

## Kontakt

**Dipl.-Ing. Matthias Milbrandt**
Fraunhofer Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU
Tel.: +49 371 5397 1215
E-Fax: +49 371 5397 6 1215
E-Mail: matthias.milbrandt@iwu.fraunhofer.de

**www.iwu.fraunhofer.de**

Fraunhofer IWU

**Gefördertes IGF-Projekt 21698 BR "WWSV" (3/2021 - 8/2023) durch:**

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz

FSV Mitglied AiF
Forschungsgesellschaft Stahlverformung e. V.