

Umweltschonende Produktionsprozesse zur ressourceneffizienten Fertigung von Getriebekomponenten (ProGEAR)

Abschlussbericht über ein FuE-Projekt
gefördert unter dem Aktenzeichen AZ 33770
von der Deutsche Bundesstiftung Umwelt

Bewilligungsempfänger:

Fraunhofer IWU Chemnitz

Koordinator

Dr.-Ing. Udo Hellfritzsch

Reichenhainer Str. 88; 09126 Chemnitz

Tel.: 0371 5397 1334

Email: udo.hellfritzsch@iwu.fraunhofer.de

ICM Chemnitz

Kooperationspartner

Dr.-Ing. Sebastian Ortmann

Otto-Schmerbach-Straße 19; 09117 Chemnitz

Tel.: 0371 27836 101

Email: udo.hellfritzsch@iwu.fraunhofer.de

GT- Industrie-Service GmbH

Kooperationspartner

Rene Titscher

Heinrich-Hertz-Straße 12; 07629 Hermsdorf

Tel.: 036601 61600

Email: r.titscher@gt-industrie-service.de

EMA-TEC GmbH

Kooperationspartner

Thomas Walther

Am Kalkhügel 8; 99706 Sondershausen

Tel.: 03632 6651770

Email: thomas.walther@ema-tec.de

Oktober 2020

06/02		Projektkennblatt		
		der Deutschen Bundesstiftung Umwelt		
Az	33770/01	Referat	Fördersumme 548.404€	
Antragstitel	Umweltschonende Produktionsprozesse zur ressourceneffizienten Fertigung von Getriebekomponenten			
Stichworte	Materialeinsparung, Verzahnungswalzen, Rundkneten			
Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)	
2Jahre (verlängert bis 25.08.2020)	01.11.2017	25.08.2020	1	
Zwischenberichte	jährlich			
Bewilligungsempfänger	Fraunhofer IWU Chemnitz Reichenhainer Straße 88 09126 Chemnitz		Tel 0371 5397 1334	
			Fax 0371 5397 61334	
			Projektleitung Dr.-Ing. Udo Hellfritzsch	
Kooperationspartner	ICM Chemnitz Otto-Schmerbach-Straße 19, 09117 Chemnitz GT- Industrie-Service GmbH Heinrich-Hertz-Straße 12; 07629 Hermsdorf EMA-TEC GmbH Am Kalkhügel 8; 99706 Sondershausen		Bearbeiter Dipl.-Ing. Mike Lahl	

Zielsetzung und Anlass des Vorhabens

Das Vorhaben zielt auf eine signifikante Reduzierung der klimarelevanten Emissionen, die im Rahmen der Fertigung und Nutzung essentieller Getriebekomponenten einen Anteil von über einem Fünftel an den emissionsinduzierten Umweltbelastungen Deutschlands erzeugen. Dabei soll anhand der innovativen, umformtechnischen Herstellung einer verzahnten Getriebehohlwelle ein wesentlicher Beitrag zur ressourceneffizienten Automobilfertigung gegenüber der rein spanend ausgelegten Prozesskette, die den Stand der Technik repräsentiert, geleistet werden. Neben der umformtechnischen Umsetzung steht die Realisierung innovativer Leichtbaustrategien zur effektiven Massereduzierung im Fokus der wissenschaftlichen Arbeit. Ein wesentliches Charakteristikum dieser Verfahrensumsetzung definiert die reduzierte Masse an spanend erzeugten Werkstoffverlusten, die durch gezielte Substitution gegenwärtiger Fertigungsabläufe durch die innovativen Umformverfahren eingespart werden soll.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Das Vorhaben wurde in folgende 6 Arbeitsschwerpunkte unterteilt:

1) Auswahl des Typenvertreters

Innerhalb des Konsortiums wurde ein deutliches Interesse an einer Anwendung im elektrifizierten Fahrzeug identifiziert. Basierend auf bisherigen Entwicklungen des Kooperationspartners ICM Chemnitz wurde dabei eine Etablierung innerhalb des elektrifizierten Antriebs des Fahrzeugs „Innvelo“ vorgeschlagen. Um eine effektive Lösung für den Zielkonflikt zwischen Maximalgeschwindigkeit und Steifigkeit der elektrifizierten Fahrzeuge zu realisieren, ist für das „Innvelo“ der Einsatz eines Getriebes erforderlich. Da jedoch das Gewicht der einzelnen Komponenten in der Elektromobilität eine entscheidende Rolle spielt, soll das Vorhaben ProGEAR dazu beitragen, entsprechende Systeme ressourceneffizient und leichtbauoptimiert auszuliegen.

2) Umformbasierte Hohlwellenherstellung

3) Umformbasierte Verzahnungsherstellung

Im zweiten und dritten Arbeitsschwerpunkt wurde die Entwicklung und Umsetzung der innovativen Umformprozesse des Verzahnungswalzens und Rundknetens thematisiert. Neben der finalen, fertigungsgerechten Auslegung der Getriebehohlwelle, die eine belastungsgerechte und leichtbau-optimierte Bauteilgeometrie beinhaltet, erfolgten wesentliche FEM-basierte Untersuchungen der Produktionsregime auf Basis bestehender Prozessabläufe des Fraunhofer IWU. Zielstellung war dabei, die Einzelprozesse hinsichtlich der progressiven Produktionsbedingungen zu optimieren und eine ideale Ausbildung der vorgesehenen Maß- und Formgenauigkeiten zu erzielen.

4) Entwicklung und Optimierung der Wärmebehandlung

Im Rahmen der Eigenschaftsoptimierung sowie der vorgesehenen Lebensdauerverbesserung der finalen Bauteile, stellte die Entwicklung anwendungsoptimierter Wärmebehandlungsverfahren einen wesentlichen Entwicklungsschritt dar. Zielstellung dieses Arbeitspaketes war die Optimierung einer sowohl umform- als auch funktionsangepassten Wärmebehandlung und deren Anwendung auf die herzustellenden Prototypen.

5) Verifizierung der umformbasierten Gesamtprozesskette

Nach der Entwicklung und Optimierung der Einzelprozesse erfolgte die Verifizierung der ganzheitlichen Komponentenfertigung. Dabei wurde eine ökologische sowie ökonomische Mehrwertanalyse durchgeführt. Dies diente einer ganzheitlichen Definition der Ressourcen- und Energieeffizienz der umformtechnischen Gesamtprozesskette ProGEAR und ermöglicht damit die Darstellung des effektiven Umweltentlastungspotentials.

6) Untersuchung finaler Werkstoffeigenschaften

Die abschließende Verifikation der Systeminnovation sowie die Überprüfung der resultierenden Ist-Werte war ein wesentlicher Kernbestandteil dieses Arbeitspakets. Mit Hilfe metallographischer Untersuchungen und Bauteilprüfungen wurden die finalen Werkstoffeigenschaften getestet.

Ergebnisse und Diskussion

Die angestrebten Ziele konnten größtenteils erreicht werden. Es konnte eine spanend hergestellte, verzahnte Getriebewelle, die bisher im Zweistufengetriebe des Elektrofahrzeuges „Innvelo“ im Betrieb war, durch eine umformtechnisch gefertigte, verzahnte Hohlwelle substituiert werden. Für die neuentwickelte Welle wurde auf Basis eines dickwandigen Rohres aus Vergütungsstahl eine Prozesskette, bestehend aus den Fertigungsschritten zur Hauptformgebung Rundkneten und Verzahnungswalzen, entwickelt. Die umformintegrierte Prozesskette konnte im Vergleich zur spanende Fertigungsfolge signifikant verkürzt werden. Weiterhin wurde der Materialausnutzungsgrad von 66% auf 89% gesteigert und somit die Verlustmasse von 460g auf 100g gesenkt. Ein weiteres positives Ergebnis war, dass aufgrund der spezifischen Prozesskinematik beim Rundkneten, die Wellenwanddicke der Beanspruchung im Betrieb angepasst werden kann. Im Ergebnis konnte das Bauteileinsatzgewicht von 890g auf 760g gesenkt werden. Die Wärmebehandlung der umgeformten Hohlwellen erfolgte mittels induktiven Härstens. Dieser Härteprozess ist im Vergleich zur typischen Ofenhärtung schneller, umwelt- und gesundheitsverträglicher. Das Abschrecken der umgeformten Hohlwelle aus Vergütungsstahl erfolgte in wassermischbaren Polymerlösungen, welche sich unter einer Temperatur von 70°C in Wasser auflösen. Durch die Verwendung dieser Polymerchemikalien konnte eine umweltschädliche Ölabschreckung nach einer Ofenhärtung vermieden werden. Die am Projektende geplanten Ermittlungen der Werkstoffeigenschaften wurden durchgeführt und zeigten die typische Charakteristika umgeformter Bauteile, wie einen konturangepassten Faserverlauf und hohe Oberflächengüten. Ein realer Test im Elektrofahrzeug „Innvelo“ konnte im vorgegebenen Projektzeitraum nicht durchgeführt werden. Weiterhin fehlen genormte Lebensdauerests, um die Potentiale der umgeformten Komponenten und somit resultierend die Gesamtprozesskette den potentiellen Industrieunternehmen anbieten zu können. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass eine perspektivische Anwendung dieser neuentwickelten Prozesskette signifikante ökologische und ökonomische Vorteile bringt. Es kann Ausgangsmaterial bei der Nutzung der innovativen Umformprozesskette eingespart werden, Kosten für die Späneentsorgung entfallen und die Wärmebehandlung ist schneller und umweltverträglicher. Vor diesem Hintergrund eröffnen sich sehr große Marktpotentiale.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Die Ergebnisse des Vorhabens wurden gemeinsam mit den Partnern intensiv diskutiert. Weiterhin wurden die Verfahren aber auch die entwickelte Prozesskette potentiellen Kunden am Fraunhofer IWU und im ICM Chemnitz präsentiert. So wurde z.B. die Firma BENTELER Steel/Tube GmbH auf dieses Vorhaben aufmerksam und stellte ihre dickwandigen Rohre aus Vergütungsstahl 42CrMo4 kostenneutral zur Verfügung.

Fazit

Das abgeschlossene Projekt kann als Erfolg bewertet werden. Die Zielstellung der Entwicklung einer alternativen, umformintegrierten Prozesskette wurde erfolgreich umgesetzt und der Demonstrator konnte mit dieser Fertigungsfolge hergestellt werden. Es konnte aufgezeigt werden, dass schädliche Emissionen durch eine Materialeinsparung und Nutzung umweltverträglicher Härteverfahren reduziert werden können. Für eine breite Anwendung bzw. industrielle Überführung dieser Prozesskette, ist eine genormte Lebensdaueruntersuchung im Vergleich zu einer herkömmlich gefertigten Getriebewelle notwendig. Mit den herausgestellten Forschungsergebnissen, wie das wirtschaftliche Potential in Kombination mit den bisher analysierten verbesserten Bauteileigenschaften sowie die ökologischen Vorteile, wurde die Grundlage für eine perspektivische industrielle Anwendung gelegt.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	- 1 -
Tabellenverzeichnis	- 2 -
Kurzzeichenverzeichnis	- 3 -
1 Zusammenfassung	- 4 -
2 Einleitung	- 4 -
3 Arbeitsschwerpunkte und erzielte Ergebnisse	- 5 -
3.1 Auswahl Typenvertreter	- 5 -
3.2 Umformbasierte Hohlwellenherstellung.....	- 17 -
3.3 Umformbasierte Verzahnungsherstellung	- 21 -
3.4 Entwicklung und Optimierung Wärmebehandlung.....	- 31 -
3.5 Verifizierung der umformbasierten Gesamtprozesskette.....	- 33 -
3.6 Untersuchung finaler Werkstoffeigenschaften.....	- 35 -
4 Ökologische, technologische und ökonomische Bewertung	- 40 -
Literatur- und Quellenverzeichnis	- 47 -

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Elektrofahrzeug "Innvelo"	- 6 -
Abbildung 2: Querschnitt des "Innvelo"-Getriebes.....	- 7 -
Abbildung 3: aktuell eingesetzte Eingangswelle.....	- 7 -
Abbildung 4: IHU eines T-Stückes aus einem Rohr [01]	- 8 -
Abbildung 5: 3D-Modell der ausgewählten Hohlwelle	- 9 -
Abbildung 6: Gesenk-Kontur der Hohlwelle.....	- 9 -
Abbildung 7: Fließkurve (42CrMo4)	- 10 -
Abbildung 8: FEM-Analyse (1)	- 10 -
Abbildung 9: FEM-Analyse (2)	- 10 -
Abbildung 10: FEM-Analyse (3)	- 10 -
Abbildung 11: FEM-Analyse (4)	- 11 -
Abbildung 12: FEM-Analyse (5)	- 11 -
Abbildung 13: FEM-Analyse (6)	- 11 -
Abbildung 14: FEM-Analyse (7)	- 12 -
Abbildung 15: FEM-Analyse (8)	- 12 -
Abbildung 16: FEM-Analyse (9)	- 13 -
Abbildung 17: FEM-Analyse (10)	- 13 -
Abbildung 18: mögliche Fertigungsrouten der Welle.....	- 14 -
Abbildung 19: Maßangaben der Demonstrator-Hohlwelle.....	- 15 -
Abbildung 20: Formen- und Lagetoleranzen der Demonstrator-Hohlwelle.....	- 15 -
Abbildung 21: belastungsgerechter Wanddickenverlauf der Demonstrator-Hohlwelle	- 15 -
Abbildung 22: Einsatzstahl vs. Vergütungsstahl.....	- 16 -
Abbildung 23: Simulationsergebnis der neuen Wellengeometrie hinsichtlich Sicherheit.....	- 16 -
Abbildung 24: Verfahrenskinetik Rundkneten	- 17 -
Abbildung 25: Beispiele für Einstech-, Vorschubkneten und Kombination (v. l. n. r.).....	- 17 -
Abbildung 26: Rundknetoperationen an der „Innvelo“-Welle	- 18 -
Abbildung 27: Stadienplanung Rundkneten	- 18 -
Abbildung 28: FE-Modell Rundkneten OP1 (links: Beginn; rechts: Ende).....	- 19 -
Abbildung 29: FE-Modell Rundkneten OP2 (links: Beginn; rechts: Ende).....	- 19 -
Abbildung 30: FE-Modell Rundkneten OP3 (links: Beginn; rechts: Ende).....	- 19 -
Abbildung 31: FE-Modell Rundkneten OP4 (links: Beginn; rechts: Ende).....	- 19 -
Abbildung 32: Rundknetwerkzeuge für die einzelnen Stufen	- 20 -
Abbildung 33: CAD-Modell Knetbacke und Spannbacke für OP1	- 20 -
Abbildung 34: Umformstufen 1 und 2, Einbausituation in der Rundknetmaschine.....	- 21 -
Abbildung 35: Einteilung der Stirnradverzahnungen nach ihrem Zahnhöhenfaktor y	- 22 -
Abbildung 36: Entwicklung des Walzens von Hochverzahnungen.....	- 22 -
Abbildung 37: Phasen beim Walzen von Laufverzahnungen	- 23 -
Abbildung 38: ProGear Demonstrator mit 3 Verzahnungen	- 23 -
Abbildung 39: Prinzip des Profil-Querwalzens	- 24 -
Abbildung 40: Prinzip des Durchschubwalzens.....	- 24 -
Abbildung 41: Werkzeugkonstruktion Durchschubwalzen.....	- 25 -
Abbildung 42: Simulation Durchschubwalzen	- 25 -

Abbildung 43: Einstellparameter und Einstellkurve für die Walzversuche	- 26 -
Abbildung 44: Einspannsituation/Walzen der „Innvelo“-Welle	- 27 -
Abbildung 45: gewalzte „Innvelo“-Wellen mit den umgeformten Verzahnungen	- 27 -
Abbildung 46: Verzahnungsvermessung nach Zeiss mittels Messtaster.....	- 28 -
Abbildung 47: Messergebnisse Flankenlinien-Gesamtabweichung F_{β} (F_b)	- 28 -
Abbildung 48: Messergebnisse Profil-Gesamtabweichung F_f	- 29 -
Abbildung 49: Messergebnisse Rundlaufabweichung F_r	- 29 -
Abbildung 50: Messergebnisse Teilungs-Gesamtabweichung F_P	- 30 -
Abbildung 51: Induktionshärteanlage und Härten der Verzahnung mit $d=22,3\text{mm}$	- 32 -
Abbildung 52: Induktionshärteanlage und Härten der Verzahnung mit $d=33,4\text{mm}$	- 32 -
Abbildung 53: Schlitze der Verzahnungen $d=33,4\text{mm}$ und $d=22,3\text{mm}$	- 33 -
Abbildung 54: Bauteilauswahl zur Entwicklung einer umformbasierten Prozesskette.....	- 34 -
Abbildung 55: Vergleich der Faserverläufe gewalzter und zerspanter Verzahnungen	- 35 -
Abbildung 56: umgeformter Faserverlauf im Zahnfußbereich bei 140-fache Vergrößerung.....	- 36 -
Abbildung 57: umgeformter Faserverlauf im Zahnfußbereich bei 140-fache Vergrößerung.....	- 36 -
Abbildung 58: umgeformter Faserverlauf im Zahnflankenbereich bei 140-fache Vergrößerung	- 37 -
Abbildung 59: umgeformter Faserverläufe über gesamte (nicht gehärtete) Zahnkontur	- 37 -
Abbildung 60: Einhärtetiefenverlauf Verzahnung Wellenende	- 38 -
Abbildung 61: Einhärtetiefenverlauf Verzahnung Wellenmitte.....	- 38 -
Abbildung 62: Rauheitsmessung Schubflanke mittig / längs in x-Richtung	- 39 -
Abbildung 63: Rauheitsmessung Schubflanke mittig / quer in y-Richtung.....	- 39 -
Abbildung 64: Rauheitsmessung Zugflanke mittig / längs in x-Richtung	- 39 -
Abbildung 65: Rauheitsmessung Zugflanke mittig / quer in y-Richtung	- 40 -
Abbildung 66: ökologischer Ansatz bei der technologischen Umsetzung der „Innvelo-Welle“	- 41 -
Abbildung 67: Prognostizierte Anzahl E-Autos zur Einhaltung der vereinbarten CO_2 -Reduktion [02].....	- 41 -
Abbildung 68: Prognostizierte Anzahl von E-Autos und Plug-in-Hybriden weltweit [03].....	- 41 -
Abbildung 69: Reduzierung an CO_2 anhand der untersuchten Umformung der „Innvelo“-Welle.....	- 45 -

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: wesentliche Parameter der Wellengeometrie	- 9 -
Tabelle 2: Varianten zur Weichbearbeitung.....	- 14 -
Tabelle 3: Messergebnisse der Soll-Parameter (Verzahnungen 1, 2, 3).....	- 30 -
Tabelle 4: CO_2 -Reduzierung aufgrund Substitution Fräsmaschine durch Walzmaschine	- 42 -
Tabelle 5: CO_2 -Reduzierung aufgrund Masseeinsparung	- 43 -
Tabelle 6: CO_2 -Reduzierung durch Späne-Aufbereitung (KSS = Kühlschmierstoff).....	- 44 -
Tabelle 7: Zusammenfassung CO_2 -Einsparungen	- 44 -

Kurzzeichenverzeichnis

Kurzzeichen	Benennung
AP	Arbeitspaket
CAD	Computer Aided Design
CO ₂	Kohlendioxid
d	Durchmesser
d _a	Kopfkreisdurchmesser
d _f	Fußkreisdurchmesser
F _β	Flankenlinien-Gesamtabweichung
F _b	Flankenlinien-Gesamtabweichung
F _f	Profil-Gesamtabweichung
F _p	Teilungs-Gesamtabweichung
f _p	Teilungs-Einzelabweichung
F _r	Rundlaufabweichung
f _u	Teilungssprung
FEM	Finite-Elemente-Methode
Iges	Initial Graphics Exchange Specification
IHU	Innen-Hochdruck-Umformung
HV	Vickershärte
h _z	Zahnhöhe
KSS	Kühlschmierstoff
m _n	Normalmodul
OP1	Operation 1
R _a	Mittenrauwert
R _z	Rautiefe
VQ	Verzahnungsqualität
y	Zahnhöhenfaktor

1 Zusammenfassung

In diesem Bericht sind die Ergebnisse des Projektes zur Entwicklung umweltschonender Produktionsprozesse für eine ressourceneffiziente Fertigung von Getriebekomponenten dargestellt. Das Projekt wurde im Zeitraum vom 1.11.2017 bis 25.8.2020 durchgeführt.

Dabei ging es darum, eine herkömmlich gefertigte verzahnte Getriebewelle, welche nach Stand der Technik überwiegend mittels Zerspanprozessen hergestellt wird, durch moderne Umformverfahren ökonomisch und ökologisch zu verbessern. Hierfür sollte eine neue, umformintegrierte Prozesskette entwickelt werden und die bekannten resultierenden Vorteile bei der Anwendung von Umformverfahren, wie das Induzieren verbesserter Bauteileigenschaften, das Einsparen von Werkstückmaterial und eine verkürzte Fertigungszeit bzw. Gesamtprozesskette, nachgewiesen werden.

Diese Projektziele, inklusive der zu erreichenden Zielparameter, konnten realisiert werden.

Die technologische Entwicklung der Prozesskette bzw. der Einzelprozesse erfolgte am Fraunhofer IWU. Das ICM Chemnitz lieferte den Demonstrator bzw. die Referenzgetriebewelle aus ihrem eigens entwickelten Elektrofahrzeug, berechnete die Festigkeiten der umzuformenden Getriebewelle, unterstützte mit FE-Simulationen und ermittelte am Ende des Projektes die Bauteileigenschaften der umformtechnisch hergestellten Welle. Die Firma GT-Industrie-Service fertigte Werkstückausgangsformen, Rundknetzwerke und Vorrichtungen für die Umformverfahren Verzahnungswalzen und Rundkneten. Das induktive Härten der umgeformten Getriebewellen erfolgte durch Unterstützung der Firma EMA-TEC. Das Projekt wurde von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt gefördert (AZ 33770/01).

2 Einleitung

Der Klimawandel, welcher bereits jetzt einen wesentlichen Einfluss auf den Menschen sowie auf die Flora und Fauna ausübt, wird signifikant durch die Emission klimawirksamer Gase katalysiert, welche insbesondere im Rahmen der Erzeugung sowie Nutzung typischer Energieträger freigesetzt werden. Ein besonderer Stellenwert ist dabei dem Automotivsektor zuzuordnen, der auf Basis der fossilen Nutzungscharakteristik sowohl im Bereich des Kraftstoffverbrauchs als auch der Fertigung typischer Pkw-Komponenten wesentlich zur Entstehung der Treibhausgasemissionen beiträgt. Allein in Deutschland trägt der Straßenverkehr mit einem Anteil von 17,4% signifikant zu den CO₂-Emissionen bei. Im Rahmen gegenwärtiger Fertigung typischer Fahrzeugkomponenten, wie Getriebewellen, finden zudem vorwiegend Verfahrensvarianten Anwendung, die den Einsatz von spanenden Operationen beinhalten. Die Auslegung dieser Produktionsprozesse verringert die Ressourceneffizienz der Automobilfertigung und trägt damit in mittelfristiger Konsequenz zu einer zusätzlichen Katalyse der CO₂-Emission innerhalb der Wertschöpfungskette „Automobil“ bei. Die Gesamtheit der industriellen Erzeugung sowie Nutzung essentieller Getriebebauteile generiert somit einen erheblichen Anteil der national relevanten Klimaemissionen.

Die Innovationen dieses Forschungsvorhabens liefert dabei wesentliche Lösungsmöglichkeiten, indem durch eine ressourceneffiziente Fertigung deutlich Spanabfälle reduziert werden können und dabei gleichzeitig eine signifikante Material- sowie Masseinsparung des fertigen Bauteils realisiert werden kann. In direkter Konsequenz bedingt die geringere Masse der Getriebekomponente eine Verminderung des Kraftstoffverbrauchs. Durch die simultane Einsparung an Ausgangsmaterial und der damit verbundenen Reduktion an CO₂ im Bereich der emissionsintensiven Rohstahlerzeugung, kann somit ein ganzheitlicher Lösungsansatz definiert werden, der die Treibhausgasemissionen des Personenverkehrs sowie der Stahlindustrie maßgeblich mindert.

3 Arbeitsschwerpunkte und erzielte Ergebnisse

Nachfolgend werden die Arbeitsschwerpunkte des Förderprojektes ProGEAR sowie die daraus resultierenden Untersuchungsergebnisse dargestellt. Das Arbeitsprogramm umfasste dabei die Auswahl eines geeigneten Typenvertreter in Form einer verzahnten Hohlwelle für den Elektromobilitäts-Bereich, die Erarbeitung entsprechender ressourceneffizienter Umformprozesse für die verzahnte Hohlwelle, die Entwicklung und Optimierung einer verfahrensgerechten Wärmebehandlung, die Untersuchung des Bauteils bezüglich fertigungsbezogener Werkstoff- bzw. Bauteileigenschaften sowie die Entwicklung und Verifizierung einer umformbasierten Gesamtprozesskette für das ausgewählte Prototypen-Bauteil. Bei der Auswahl, Entwicklung und Optimierung von Einzelprozessen sowie der fertigungstechnischen Gesamtprozesskette, wurde sich explizit an ökologischen und ökonomischen Aspekten ausgerichtet. Ziel war es dabei, die neue Fertigungsroute so zu entwickeln, dass hinsichtlich Energie- und Ressourceneffizienz sowie CO₂-Emission signifikante Verbesserungen realisiert werden konnten. Es wurde der Nachweis erbracht, dass ressourcenschonende Umformprozesse einen erheblichen Beitrag hinsichtlich Materialeinsparungen und der Reduktion umweltschädlicher CO₂- Entstehung leisten können.

3.1 Auswahl Typenvertreter

Bei der Auswahl eines entsprechend relevanten Typenvertreter wurde eine spezielle Konzentration auf die Thematik Elektromobilität gelegt und einer Untersuchung des Antriebsstrangs des Fahrzeugs „Innvelo“ beim Projekt-Partners ICM:

- Überprüfung von zwei konkreten Getriebewellen auf umformtechnische Realisierbarkeit
- Bestimmung der Eingangswelle des Getriebes als ProGEAR -Typenvertreter
- Ausarbeitung und Analyse unterschiedlicher Fertigungsrouten und Wellengestaltungen
- Konzentration auf Massereduzierung und effiziente Fertigung
- Auswahl einer Prozesskette für die Umsetzung im Projekt
- Variante 3 - Fertigung ausgehend von nahtlosem Rohr
- Reduzierung der Bauteilmasse durch Anpassung der Wandstärke

- Belastungssimulation der neu gestalteten Wellengeometrie (Wanddickenreduzierung) mit Hilfe der TU Chemnitz
- mechanische Festigkeit rechnerisch bestätigt
- optionale Maßnahmen zur Festigkeitserhöhung werden geprüft

Im Projektkonsortium wurde demzufolge ein deutliches Interesse an einer Anwendung im elektrifizierten Fahrzeug identifiziert. Basierend auf bisherigen Entwicklungen des ICM wurde dabei eine Etablierung innerhalb des elektrifizierten Antriebs des Fahrzeugs „Innvelo“ vorgeschlagen, siehe Abbildung 1.



Abbildung 1: Elektrofahrzeug "Innvelo"

Um eine effektive Lösung für den Zielkonflikt zwischen Maximalgeschwindigkeit und Steifigkeit der elektrifizierten Fahrzeuge zu realisieren, ist für das „Innvelo“ der Einsatz eines Getriebes erforderlich. Da jedoch das Gewicht der einzelnen Komponenten in der Elektromobilität eine entscheidende Rolle spielt, kann das Vorhaben ProGEAR dazu beitragen, entsprechende Systeme ressourceneffizient und leichtbauoptimiert auszulegen. Basierend auf dieser Festlegung des anzuwendenden Fahrzeugsystems wurde auf Basis des vorhandenen Antriebsstrangs eine Auswahl möglicher Typenvertreter gefunden. Dabei wurden insbesondere die Geometrien der Eingangs- und Zwischenwelle auf ihre umformtechnische Umsetzbarkeit überprüft (Abbildung 2).

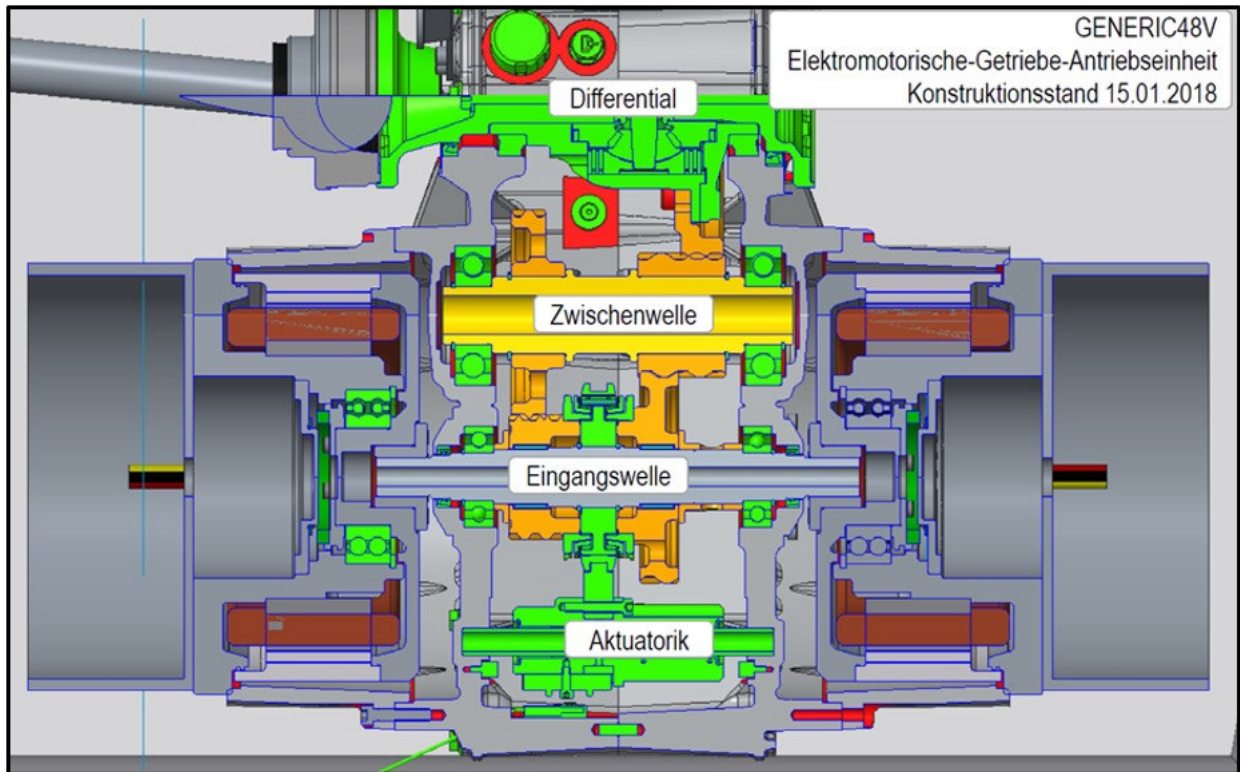


Abbildung 2: Querschnitt des "Innvelo"-Getriebes

Im Rahmen der Demonstrator-Analyse wurde die Eingangswelle des „Innvelo“ als optimaler Typenvertreter des Vorhabens ProGEAR bestimmt. Diese Welle besteht aus mehreren Wellenabsätzen, einer mittig angeordneten Passverzahnung, einer durchgängigen Bohrung sowie an den Wellenenden jeweils einer Passfedernut zur Übertragung der Drehbewegung aus den E-Motoren. Ziel ist es, dieses Bauteil (Abbildung 3) durch einer umformtechnische Prozesskette energie- und ressourceneffizient herzustellen.

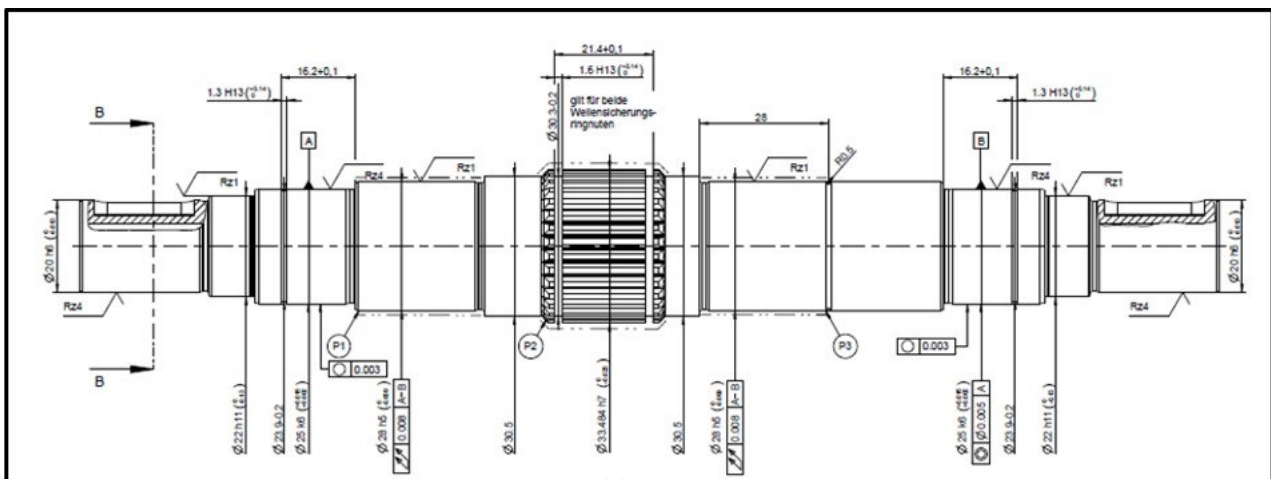


Abbildung 3: aktuell eingesetzte Eingangswelle

Um die ausgewählte Wellengeometrie effizienter fertigen zu können, wurden unterschiedliche Fertigungsrouten analysiert und auf die Umweltverträglichkeit hinsichtlich ihrer Fertigung untersucht.

Schwerpunkte bildeten die prinzipielle Machbarkeit einer Hohlwelle, die mögliche Wanddickenreduzierung und die damit verbundene Masse des Bauteils sowie die Reduzierung von Materialverlust in Form spanender Bearbeitungsschritte.

Fertigungsmöglichkeit A:

Eine erste Idee zur Realisierung der „Innvelo“-Welle war es, ausgehend von einem Rohr mittels Innenhochdruck-Umformung (IHU) die Wellengrundform herzustellen und die Verzahnung durch Profil-Querwalzen zu erzeugen. Bei der Innenhochdruck-Umformung (IHU) werden Rohre und geschlossene Profile mithilfe eines allseitig wirkenden Innendrucks an eine Werkzeugkavität angelegt und so definiert umgeformt. Die Werkzeuge bestehen zumeist aus einem Ober- und Unterteil mit entsprechender Trennebene. Die Einleitung des Wirkmediums erfolgt hierbei über die axialen Dichtstempel, die das Bauteil mittels Axialdruck zur Umgebung hin abdichten. Je nach Bauteilform und Abdichtkonzept kann zusätzlich über die Dichtstempel Werkstoff in die Umformzone nachgeschoben werden, um so das geometrisch umsetzbare Spektrum zu erweitern. Mithilfe dieses Verfahrens lassen sich einzigartige Bauteil-Geometrien erzeugen, die mit anderen Fertigungsverfahren zum Teil nicht oder nur unter erheblichem Aufwand herstellbar sind.

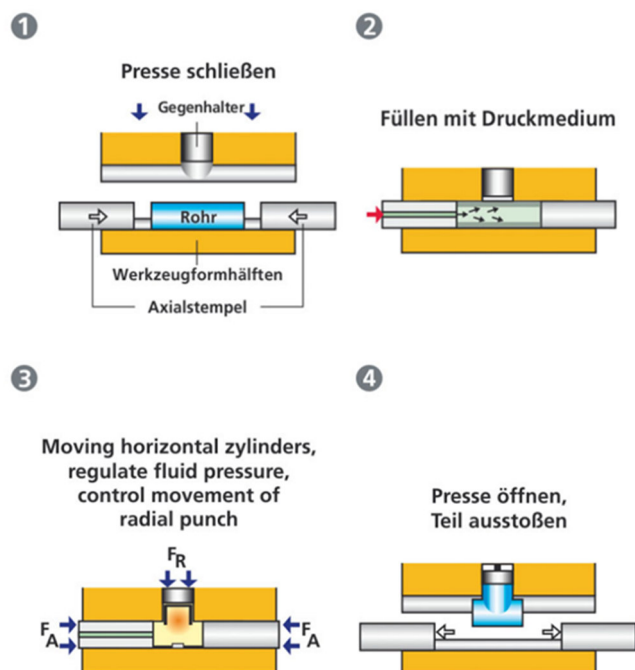


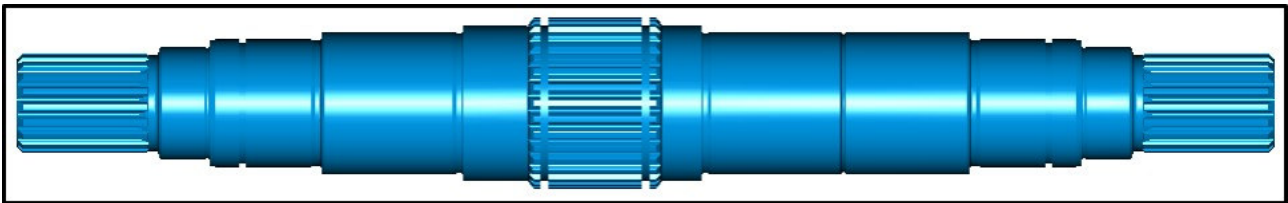
Abbildung 4: IHU eines T-Stückes aus einem Rohr [01]

Zur Prüfung der Machbarkeit wurden umfangreiche Simulationen zur Ermittlung der notwendigen Drücke und Analyse des Materialflusses durchgeführt. Die wesentlichen geometrischen Parameter sind folgendermaßen (Tabelle 1) definiert:

Tabelle 1: wesentliche Parameter der Wellengeometrie

Länge	248 mm
Innendurchmesser am Schaft	8,25 mm
Innendurchmesser (Mittelabschnitt)	17,7 mm
Außendurchmesser Verzahnung 1 + 3 (Rand)	17,25 mm
Außendurchmesser Verzahnung 2 (Mitte)	29,3 mm

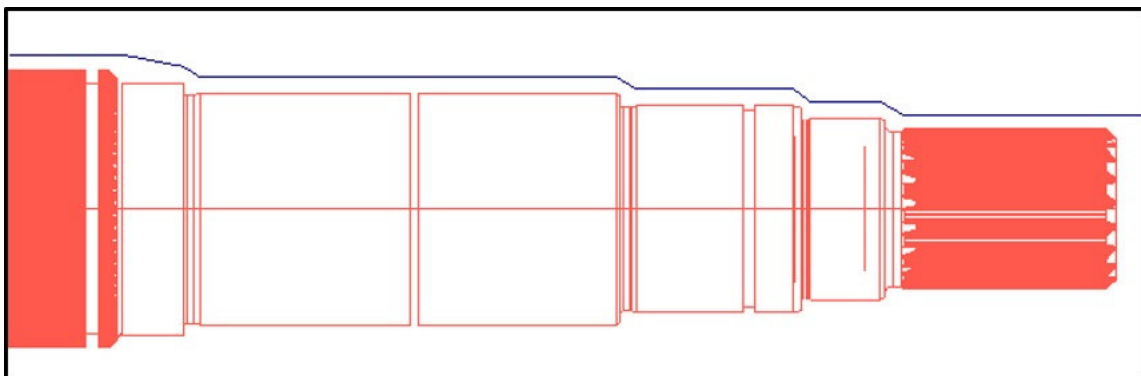
Das bereitgestellte CAD-Modell im Iges-Format umfasste 11.278 Flächen und 66.828 Linien. Nachfolgend das Flächenmodell (Abbildung 5):

**Abbildung 5:** 3D-Modell der ausgewählten Hohlwelle

Die Hohlwelle ist annähernd symmetrisch, nur die beiden durchmessergleichen Abschnitte in obiger Abbildung weisen unterschiedliche Längen auf; damit ist die linke Seite der Hohlwelle um 25 mm kürzer als die rechte Seite. Für die FEM-Modellerstellung bedeutet dies, dass ein Halbmodell der Welle, nämlich der längeren rechten Seite ausreichend ist. Die kürzere linke Seite ist dann mit den für die rechte Hälfte ermittelten Prozessdaten (Innendruck, Nachschiebeweg) ausformbar.

FEM-Modelle

Aufgrund der Zylinderform der Hohlwelle kann stets mit einem axialsymmetrischen Modell gearbeitet werden. Ausgehend von der Außenkontur der Welle wird ein gewisses Dreh- bzw. Schleifaufmaß beaufschlagt, um das Gesenk zu definieren. In der nachfolgenden Abbildung 6 ist dies prinzipiell dargestellt.

**Abbildung 6:** Gesenk-Kontur der Hohlwelle

Die FEM-Simulationen basierten auf einem elastisch-plastischen Werkstoffverhalten des verwendeten Werkstoffes 1.7225 (42CrMo4). Die Fließkurve (Abbildung 7) ist nachfolgend abgebildet.

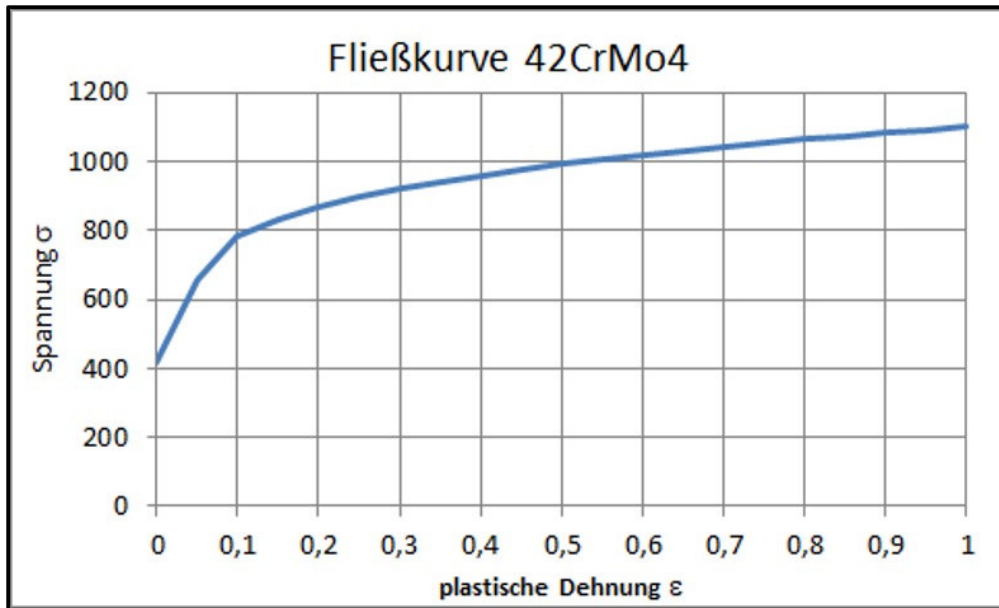


Abbildung 7: Fließkurve (42CrMo4)

Simulationsergebnisse mit unterschiedlichen Modellen

a) Rohrwandstärke 2 mm

Um das Ausformungsverhalten zu analysieren, wurde zunächst mit einem Rohr der Abmessung 19 mm x 2 mm (Innendurchmesser 15 mm, Außendurchmesser 19 mm) die FEM-Simulation begonnen (Abbildungen 11-17).

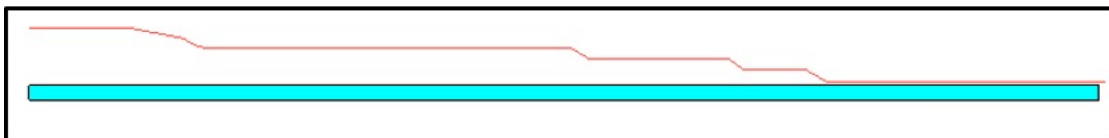


Abbildung 8: FEM-Analyse (1)

Das Modell umfasst 4000 Viereckelemente, davon 8 in der Wanddickenrichtung. Nachfolgend ein Ausschnitt aus der Vernetzung.

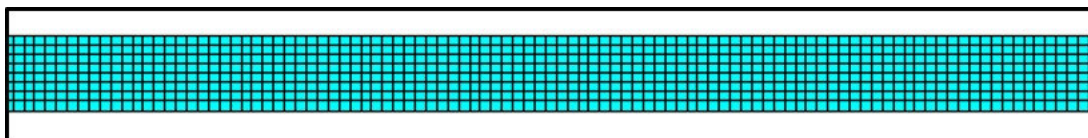


Abbildung 9: FEM-Analyse (2)

Um das Rohr auszuformen, ist ein Innendruck p von 3000 bar erforderlich. Ohne aktives Nachschieben (natürlicher Einzug) ergibt sich nach 3000 bar folgende Ausformung:



Abbildung 10: FEM-Analyse (3)

Der sich natürlich einstellende seitliche Einzug (am Stempel) beträgt 13,8 mm. Eine Simulation mit einem seitlichen Einzug von 130 % des natürlichen Einzugs (so würde man den Dichtstempel axial bewegen), ergibt nachfolgende Ausformung (Abbildung 11).



Abbildung 11: FEM-Analyse (4)

Der vergrößerte Nachschiebeweg führt zu einer leichten Aufdickung in Stempelnähe. „Links“ (also in Wellenmitte ändert sich fast nichts). Generell ist zu konstatieren, dass nach der Ausformung die Wandstärke sowohl am Stempel, aber insbesondere in Wellenmitte die Wandstärke signifikant abnimmt (entsprechend dem Quadrat des Radiusunterschieds). Die aktuellen Wandstärken sind nachfolgend angetragen. In Wellenmitte ist eine Dickenabnahme um 42 % auf nur noch 1,16 mm zu konstatieren (Abbildung 12).

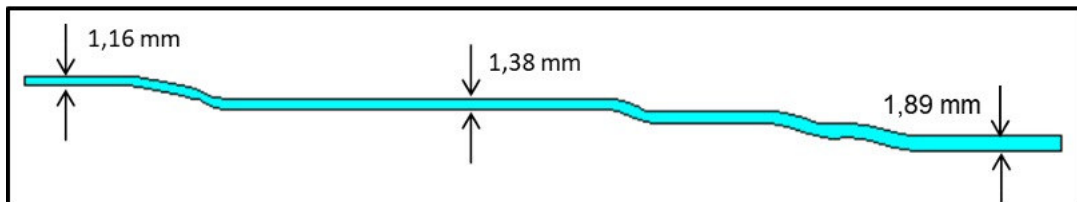


Abbildung 12: FEM-Analyse (5)

Diese Wandstärke der Hohlwelle in Wellenmitte, wo die Verzahnung 2 aufgebracht werden soll, ist zu gering und nicht durch Anstauchen mit einem Schiebesegment (geteiltes Werkzeug) deutlich zu verbessern. Daher erfolgten weitere Untersuchungen mit doppelter Wandstärke.

b) Rohrwandstärke 4 mm

Nunmehr wurde ein Ausgangsrohr mit Innendurchmesser 11 mm und Außenradius 19 mm verwendet. Die Vernetzungseinheit blieb gleich, so dass jetzt 16 Elemente über der Wanddicke angesetzt wurden, was zu insgesamt 8000 Elementen in FEM-Netz führte.



Abbildung 13: FEM-Analyse (6)

Leider erfordert die Ausformung dieses Rohres (Abbildung 13) sehr hohe Innendrucke. Das Rohr legt sich erst bei mehr als 5500 bar ans Gesenk an und würde zur Kalibrierung noch höhere Drücke erfordern.

Die nachfolgende Bildfolge (Abbildung 14) zeigt die Ausformung bei unterschiedlichen Druckstufen. Erst bei 3000 bar beginnt die Ausformung.

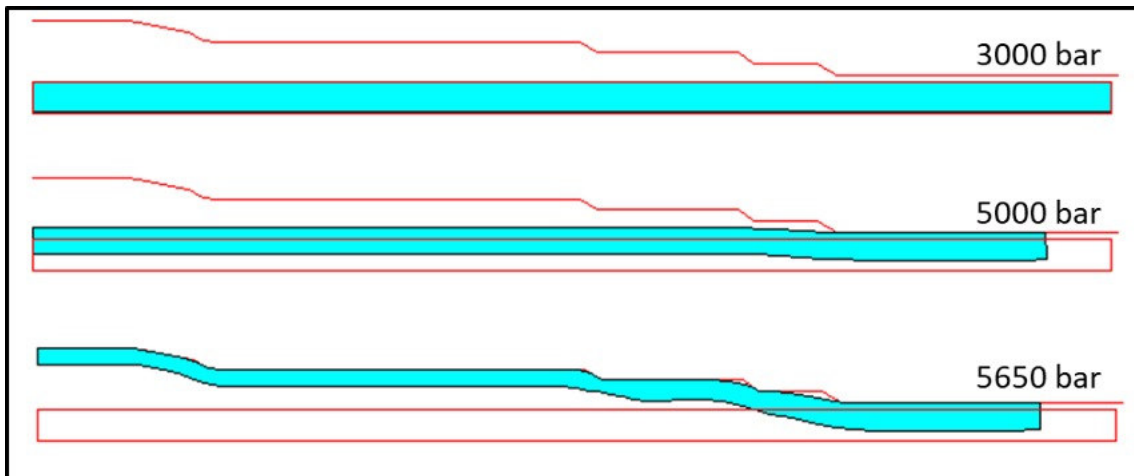


Abbildung 14: FEM-Analyse (7)

Die Wandstärkenverteilung ist nachfolgend an drei Stellen dargestellt (Abbildung 15). Wiederum ist in Wellenmitte („links“ im Modell) die Wanddickenreduktion mit 48,8 % am höchsten.

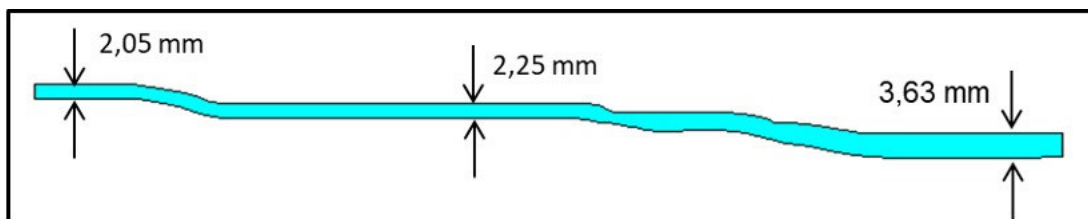


Abbildung 15: FEM-Analyse (8)

Abgesehen von den technologisch nicht umsetzbaren hohen Innendrücken ist außerdem zu bezweifeln, dass ein Aufdicken in der Wellenmitte auf die erforderliche Materialstärke gelingen kann. Das Fazit der durchgeführten Berechnungen ist eindeutig. Die Hohlwelle ist nicht durch IHU abbildbar. Ausgehend von den bisher durchgeführten Simulationsrechnungen erfolgten nunmehr noch Simulationsrechnungen mit im Durchmesser vergrößerten Wellen, um abschätzen zu können, ab welcher Rohr- bzw. Wellengröße ein IHU-Prozess sinnvoll sein könnte. Dargestellt wird der Fall mit verdoppelten Rohrdurchmesser (11 mm auf 22 mm).

c) Welle mit maximalem Außendurchmesser von 46,5 mm

Das Ausgangsrohr mit 4 mm Wandstärke umfasst einen Innendurchmesser von 22 mm und einen Außendurchmesser von 30 mm. Die Ausformungen mit natürlichem Einzug sind nachfolgend für zwei Druckstufen abgebildet. Unter 2400 bar ist kein Materialfluss zu erkennen. Erst danach beginnt die Ausformung. Bei 3000 bar legt sich das Rohr ans Gesenk an (Abbildung 16), ist aber noch nicht auskalibriert (vgl. die mit gekennzeichneten Stellen).

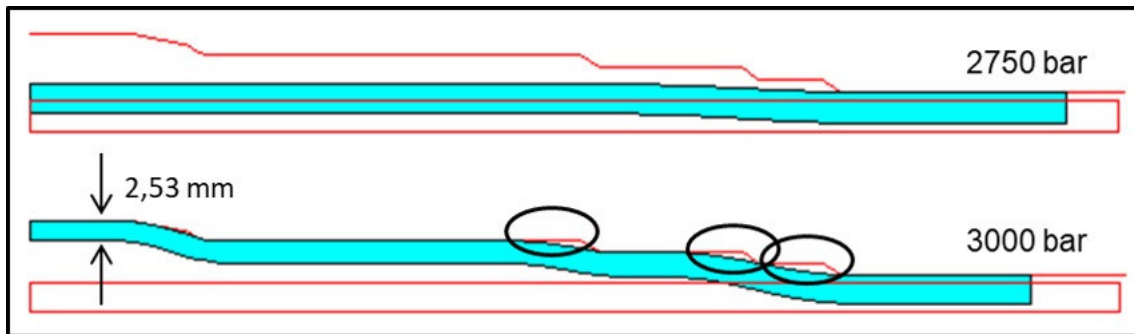


Abbildung 16: FEM-Analyse (9)

Erhöht man den Einzug (Stempelweg) auf 120 % bzw. 150 % des natürlichen Einzugs verbessert sich die Ausformung nicht wesentlich, allerdings nimmt die Wandstärke leicht zu. In der Mitte der Welle wächst die Wanddicke um 12 % von 2,53 mm auf 2,83 mm (Abbildung 17).

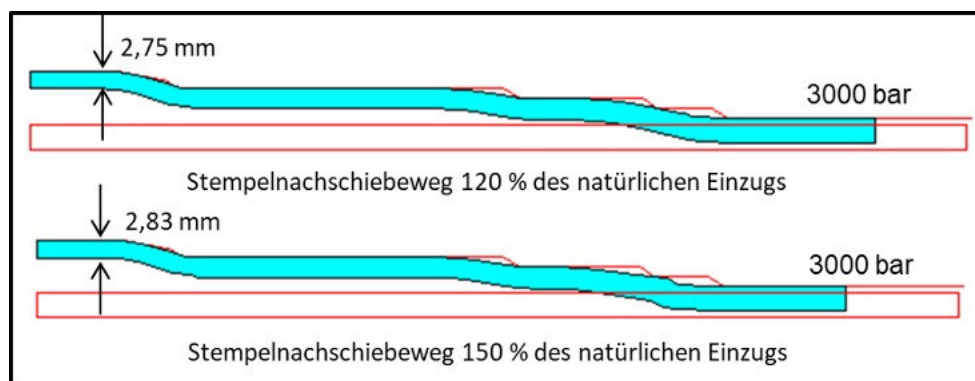


Abbildung 17: FEM-Analyse (10)

Die Ausformung erfolgt bei ca. 3000 bar, allerdings liegt die Welle noch nicht im Gesenk an. Eine Kalibrierung mit höheren Innendrücken erscheint notwendig. Die Dickenreduktion in Wellenmitte („links“) beträgt nunmehr 29,2 % von 4 mm auf 2,83 mm. Eine weitere Erhöhung der Durchmesserwerte (z.B. eine Verdreifachung des Innendurchmessers auf 33 mm – was einen Außendurchmesser des Rohres von 41 mm und einen maximalen Wellendurchmesser von ca. 57 mm impliziert), sollte den erforderlichen Innendruck noch etwas reduzieren. Erst für Wellen dieses Durchmessers sind Überlegungen zum Einsatz von IHU mit segmentierten Werkzeugen zur „Materialaufdickung“ sinnvoll und sollte Gegenstand weiterer Untersuchungen sein.

Fazit:

Eine Ausformung der „Innvelo“-Welle mittels IHU ist nicht darstellbar.

Fertigungsmöglichkeit B:

Zur Realisierung der Wellenhohlform wurden dabei drei unterschiedliche, auf Umformverfahren beruhende Fertigungsszenarien untersucht. In Abbildung 18 und Tabelle 2 sind die wesentlichen Hauptarbeitsschritte für die Weichbearbeitung dargestellt. Im Anschluss erfolgt das Härten und die finale Hartfeinbearbeitung die für alle Varianten mit Zerspanprozessen realisiert wurde.

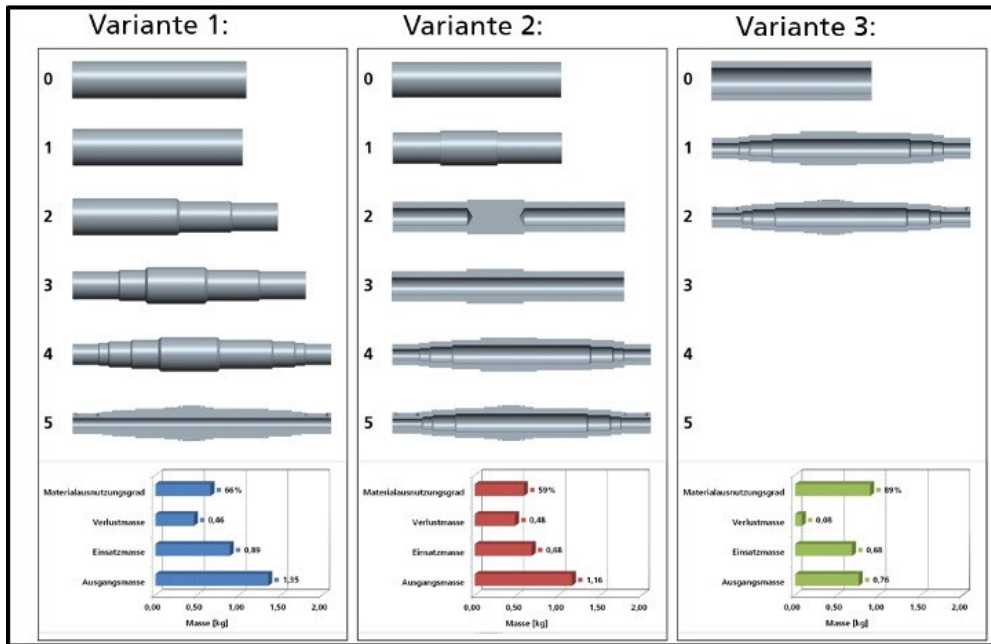


Abbildung 18: mögliche Fertigungsrouten der Welle

Tabelle 2: Varianten zur Weichbearbeitung

Variante 1	Variante 2	Variante 3
(0) Vollmaterial	(0) Vollmaterial	(0) Rohr
(1) Drehen	(1) Drehen	(1) Rundkneten
(2) Fließpressen Seite 1	(2) Bohrungsdrücken Seite 1	(2) Verzahnungswalzen
(3) Fließpressen Seite 2	(3) Bohrungsdrücken Seite 2	
(4) Drehen und Tieflochbohren	(4) Rundkneten	
(5) Verzahnungsfräsen	(5) Verzahnungswalzen	

Anhand der Konstruktionszeichnungen und Darstellungen (Abbildung 19 - 21) werden der Aufbau und die Abmessungen der Hohlwelle dargestellt.

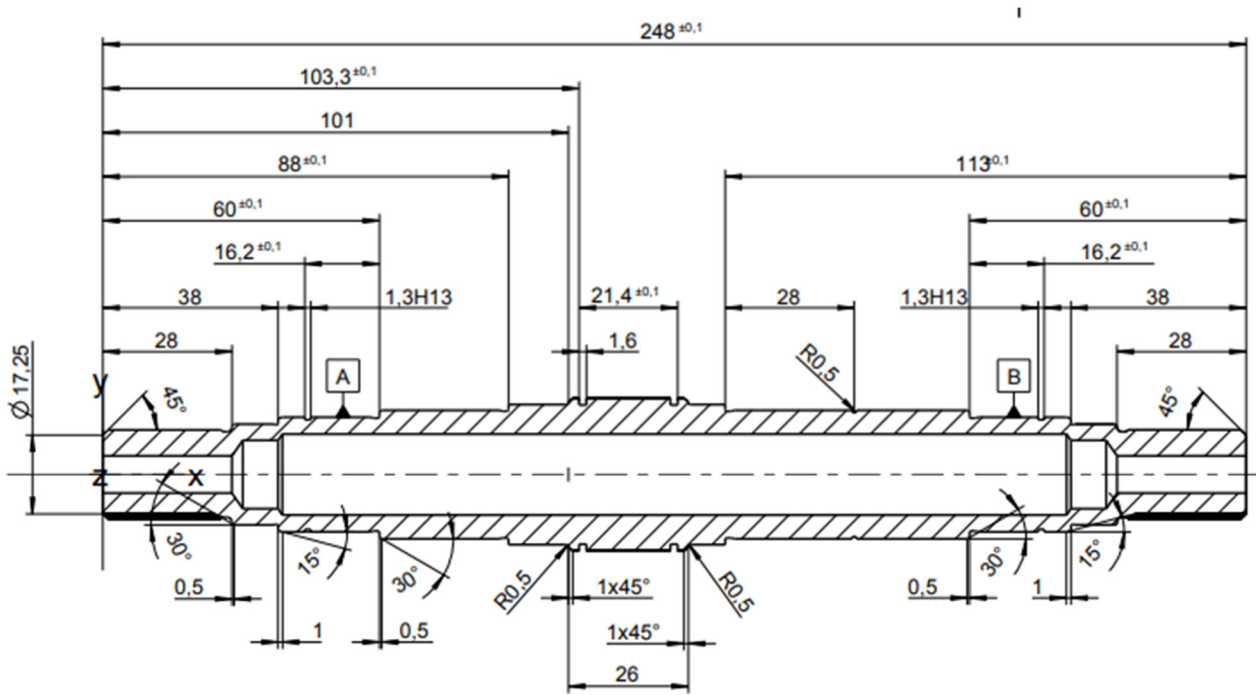


Abbildung 19: Maßangaben der Demonstrator-Hohlwelle

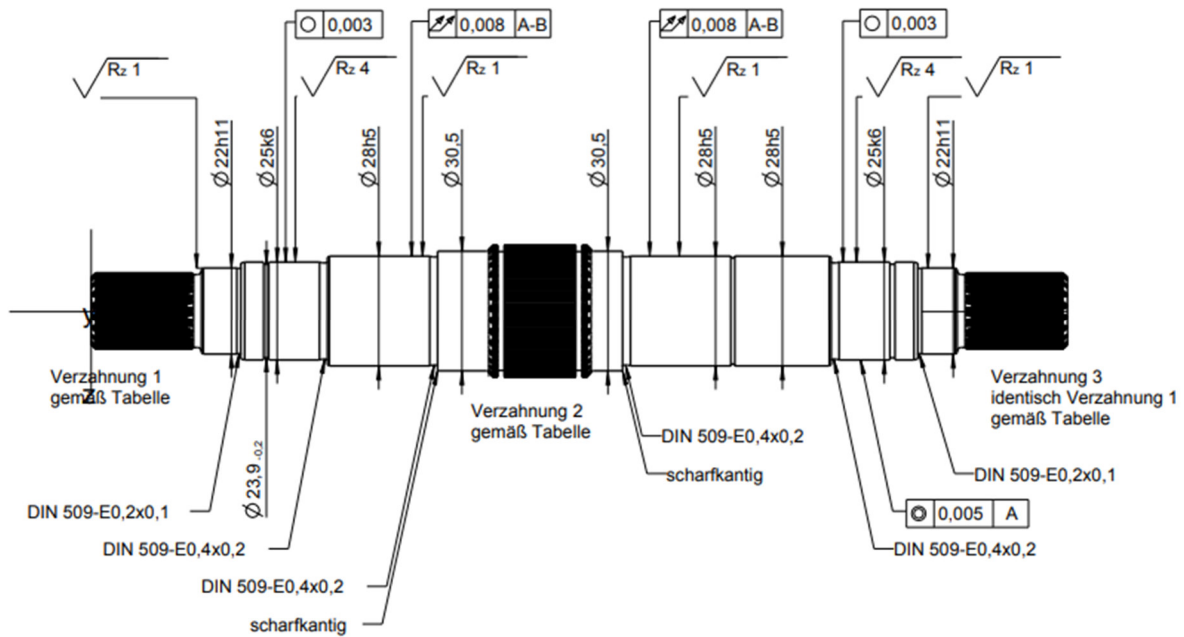


Abbildung 20: Formen- und Lagetoleranzen der Demonstrator-Hohlwelle

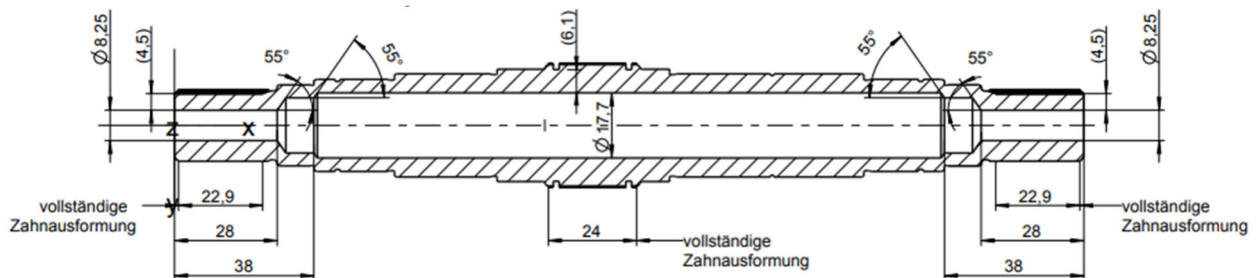


Abbildung 21: belastungsgerechter Wanddickenverlauf der Demonstrator-Hohlwelle

Aufgrund der geringen Zahl an Fertigungsschritten sowie des zu erreichenden Materialausnutzungsgrads von 89% wurde Variante 3 (Abbildung 18), ausgehend von der Form des nahtlosen Rohres, für die Fertigung der ProGEAR-Welle ausgewählt. Die Welle wurde entsprechend des Fertigungsverfahrens Rundkneten, mit einem angepassten Wanddickenverlauf umkonstruiert. Dadurch kann das Einsatzgewicht reduziert werden. Bisher wurde im „Innvelo“ die Eingangswelle aus Einsatzstahl und somit das Einsatzhärten als Wärmebehandlung gewählt. Für die zu entwickelnde hohle Getriebewelle wurde mit dem Werkstoff 42CrMo4 ein sogenannter Vergütungsstahl gewählt. In Abbildung 22 sind die Vorteile beim Induktionshärten eines Vergütungsstahls im Vergleich zum Einsatzhärten eines Einsatzstahls gegenübergestellt.

Eigenschaft	Einsatzstahl + Einsatzhärten	Vergütungsstahl + Induktionshärten
WBH	<ul style="list-style-type: none"> Thermochemisch, Abgasemissionen durch <u>Aufkohlen</u> größere <u>Verzüge</u>, dadurch Folgeoperationen Ökonomisch sinnvoll bei großer Stückzahl lokale Härtung nur durch aufwendige Vorbearbeitung 	<ul style="list-style-type: none"> Thermisch, keine Zusätzlichen Abgasemissionen und geringer Wärmeverlust verzugsarm, deshalb entfällt Richten entfällt bzw. geringeres Schleifaufmaß Ökonomisch sinnvoll bei kleinen Stückzahlen lokal gezielte Härtung möglich
Mechanisch	<ul style="list-style-type: none"> Randschicht mit sehr guten Festigkeitseigenschaften und zähem Kern 	<ul style="list-style-type: none"> lokale Durchhärtung höhere Härten möglich
Einsatz	<ul style="list-style-type: none"> Verlust der umformtechnisch eingebrachten Eigenschaften 	<ul style="list-style-type: none"> Erhalt der umformtechnisch eingebrachten Vorteile (Verfestigungen, Gefüge)

Abbildung 22: Einsatzstahl vs. Vergütungsstahl

Um die Belastbarkeit der ausgewählten Geometrie mit entsprechender Wanddickenreduzierung zu verifizieren, wurde der Einsatz innerhalb des Getriebes des „Innvelo“-Automobils simuliert, siehe Abbildung 23. Dabei wurden dieselben Belastungsszenarien wie bei der Auslegung des ursprünglichen Getriebes berechnet. In diesem Zusammenhang konnte die Umsetzbarkeit der geänderten Konstruktion aus mechanischer Sicht (Beachtung der Mindestsicherheit $s > 1,5$) bestätigt werden.

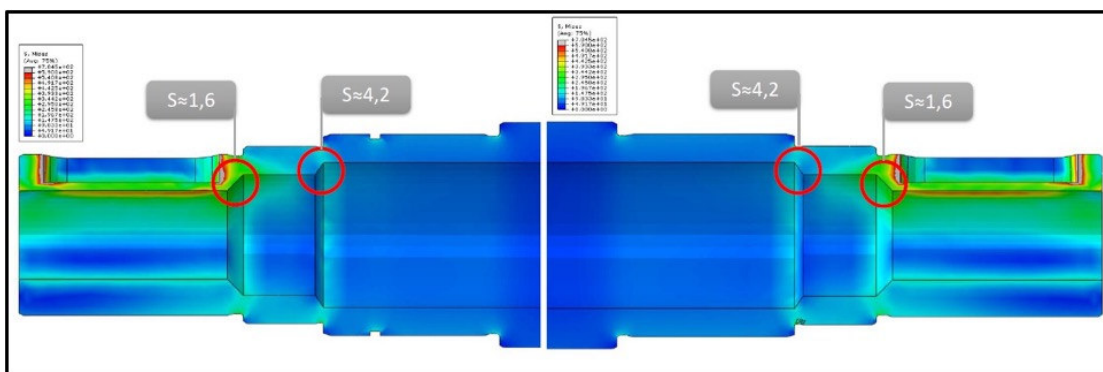


Abbildung 23: Simulationsergebnis der neuen Wellengeometrie hinsichtlich Sicherheit

3.2 Umformbasierte Hohlwellenherstellung

Getriebewellen werden derzeit oft als Vollwellen spanend oder durch Schmieden, Fließpressen und Querwalzen hergestellt. In der Regel werden dabei bisher massiv ausgeführte Wellen nachträglich vollständig oder teilweise aufgebohrt. Dazu werden häufig Tiefbohrtechniken den bestehenden Fertigungslinien hinzugefügt. Als ressourcen- und energieeffiziente Methode zur Hohlwellenfertigung stehen das rotatorische, inkrementelle Bohrungsdrückverfahren zum Erzeugen einer Bohrung sowie das Rundkneten zum Generieren verschiedener Wellenquerschnittsreduktionen, als Vorzugsoption zur Verfügung. Da in der vorliegenden ProGear-Prozesskette (siehe Abbildung 18 bzw. Tabelle 2) ein Rohr als Ausgangsform eingesetzt wird, kann zur Herstellung der Wellenabsätze das Rundkneten angewandt werden. Das Rundknetverfahren ist ein inkrementelles Umformverfahren zur Generierung von Durchmesserreduktionen von Querschnitten an Voll- und Hohlwellen. In Abbildung 24 ist die Verfahrenskinematik dargestellt. Der Rollenkäfig rotiert, wodurch der Stößel zwischen zwei Rollen geöffnet und unter einer Rolle geschlossen ist. Diese Hubbewegung erfolgt bei einer Frequenz von 30-50 Hz.

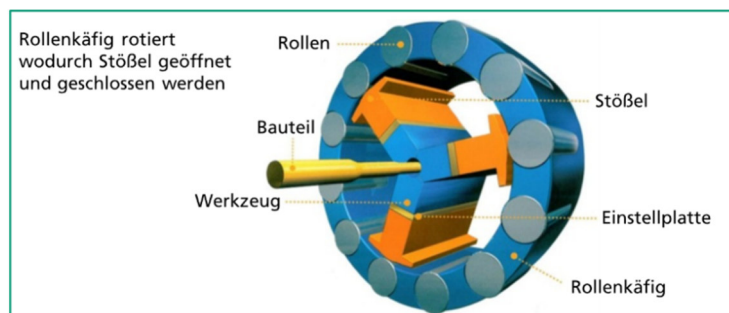


Abbildung 24: Verfahrenskinematik Rundkneten

Beim Rundkneten wird zwischen folgenden kinematischen Prozessoptionen unterschieden:

- Vorschubrundkneten:
axiale Zustellung des Werkstückes → Umformung Wellenenden
- Einstechrundkneten:
Werkstück wird in geöffnete Knetbacken eingeführt → Umformung von Hinterschnitten
- Kombination:
Querschnittreduktionen in Bauteilmitte

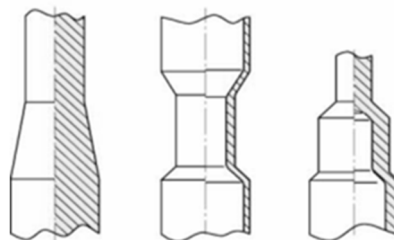


Abbildung 25: Beispiele für Einstech-, Vorschubkneten und Kombination (v. l. n. r.)

An der „Innvelo“-Welle sind 3 Durchmesserreduzierungen mit dem Rundknetprozess herzustellen, wobei die einzelnen Durchmesser auf beiden Seiten identisch sind (Abbildung 26).

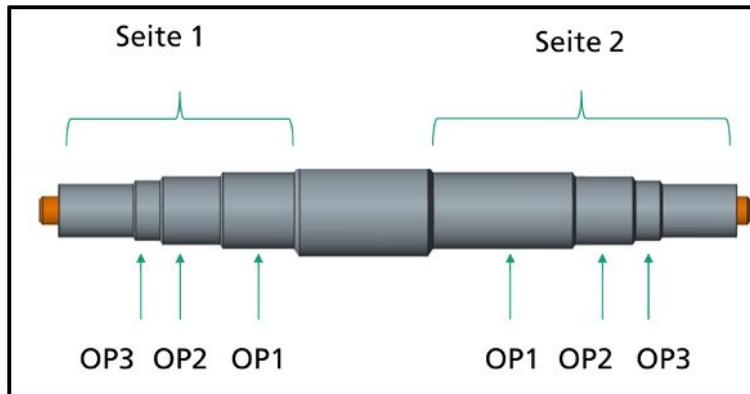


Abbildung 26: Rundknetoperationen an der „Innvelo“-Welle

Lediglich auf Seite 2 ist die Länge der Operation 1 etwas länger. In Summe sind 8 Umformoperationen durchzuführen. In Abbildung 27 ist die detaillierte Stadienplanung (Gesamtprozesskette) dargestellt.

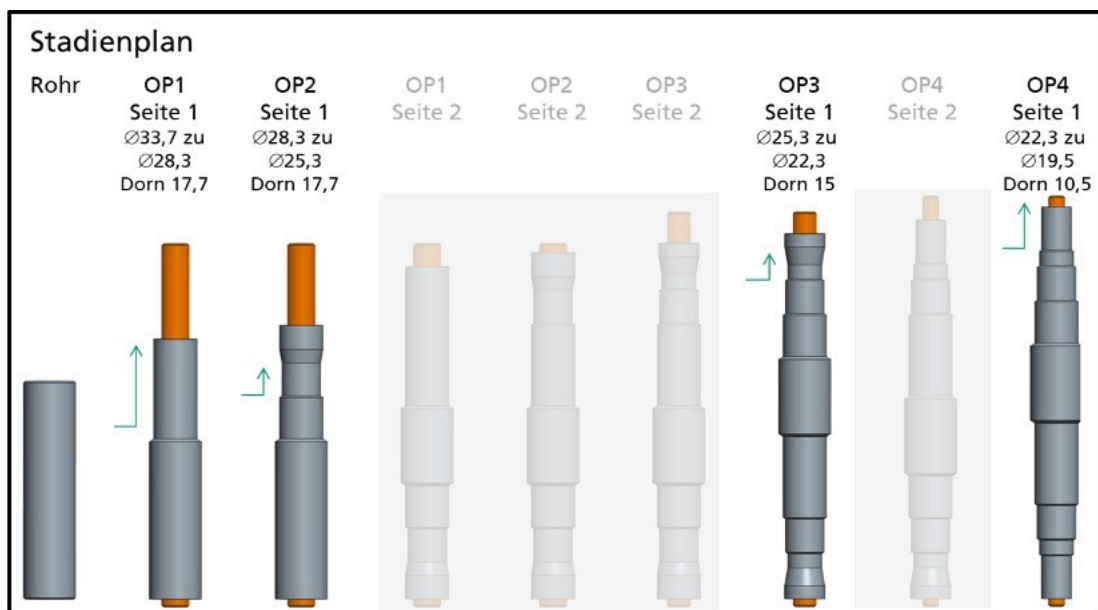


Abbildung 27: Stadienplanung Rundkneten

Den Abbildung 28 bis Abbildung 31 können die einzelnen Querschnittsreduzierungen entnommen werden. Für alle 4 Umformoperationen wurden FE-Modelle erstellt und der Materialfluss simuliert sowie die korrekte Werkzeugauslegung überprüft. In den Abbildungen ist links der Zustand vor und rechts nach der Umformoperation dargestellt.

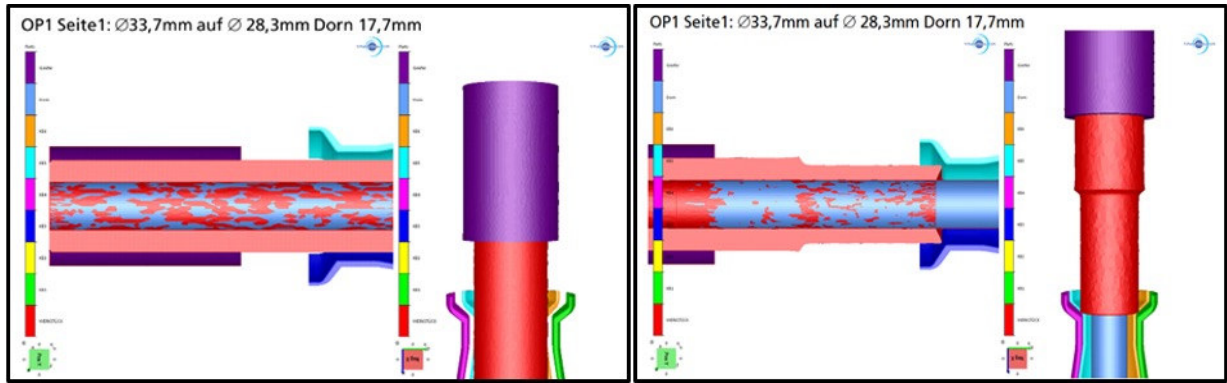


Abbildung 28: FE-Modell Rundkneten OP1 (links: Beginn; rechts: Ende)

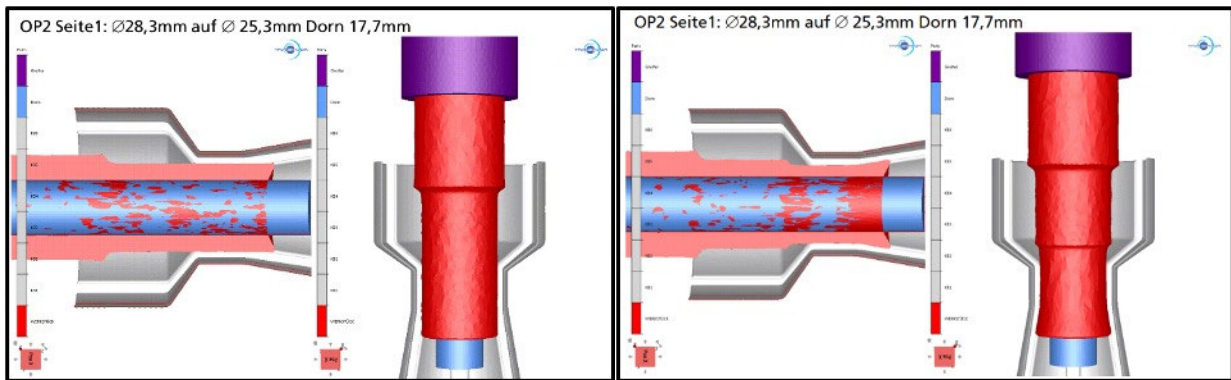


Abbildung 29: FE-Modell Rundkneten OP2 (links: Beginn; rechts: Ende)

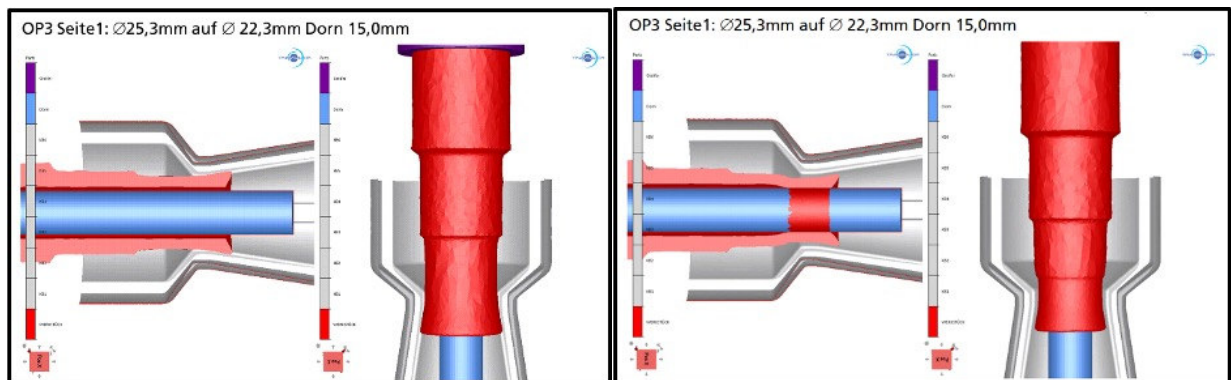


Abbildung 30: FE-Modell Rundkneten OP3 (links: Beginn; rechts: Ende)

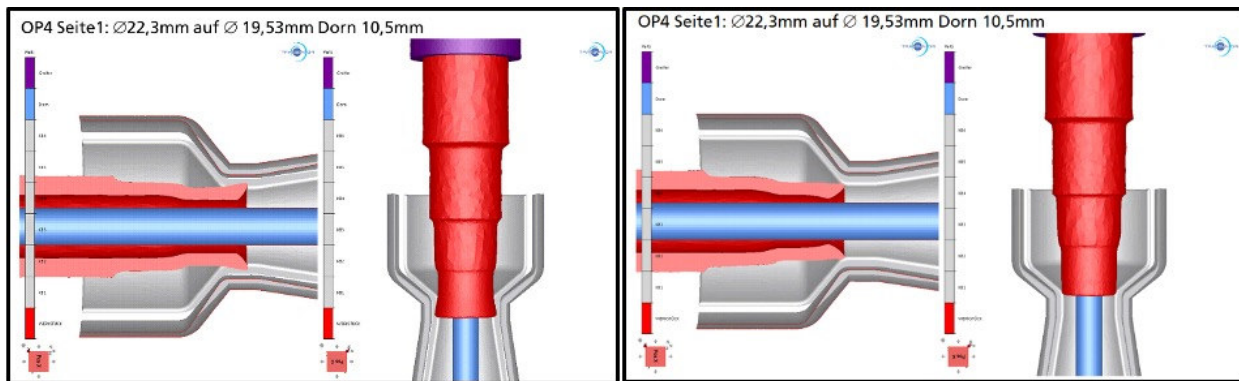


Abbildung 31: FE-Modell Rundkneten OP4 (links: Beginn; rechts: Ende)

Aus den Ergebnissen der Simulation wurden die Rundknetwerkzeugkonstruktionen abgeleitet (siehe Abbildung 32).

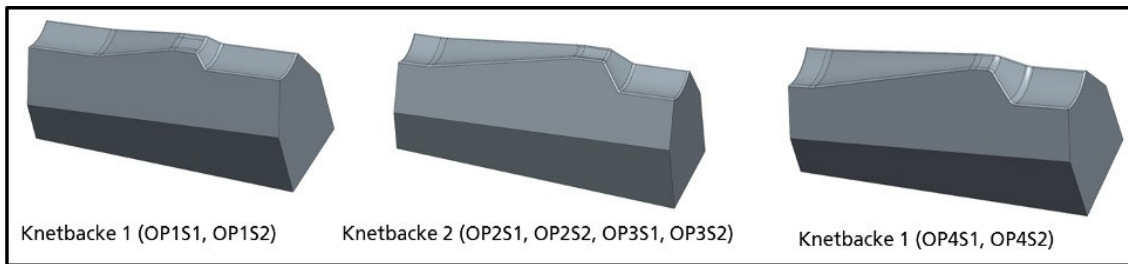


Abbildung 32: Rundknetwerkzeuge für die einzelnen Stufen

Für den Rundknetprozess werden weiterhin folgende Werkzeuge und Spannmittel benötigt:

- Spannbacken (2 Stück), Knetdorn und Knetbackensatz (6 Stück) für OP1.1 bis OP1.4
- Spannbacken (2 Stück), Knetdorn und Knetbackensatz (6 Stück) für OP2.1 bis OP3.2

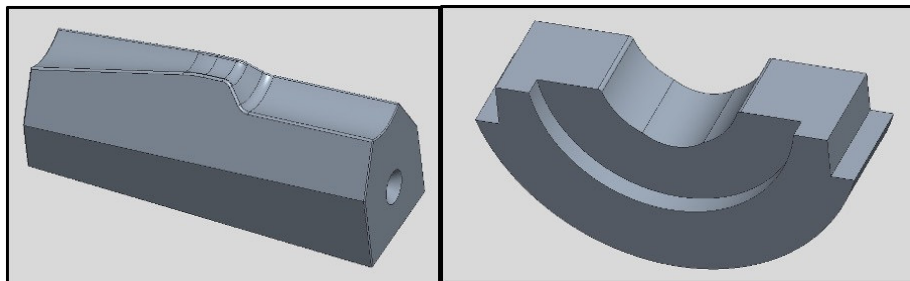


Abbildung 33: CAD-Modell Knetbacke und Spannbacke für OP1

Für die Versuchsdurchführung wurden die Rundknetbacken gefertigt, die Rohr-Halbzeuge vorbereitet und die Rundknetmaschine gerüstet. Für den Rundknetprozess (OP1) wurden folgende Prozessparameter variiert, um ein Optimum hinsichtlich der geometrischen Genauigkeit, Oberflächenqualität und Umformkräfte zu erzielen:

- Variation und Optimierung der Prozessparameter
 - Knetfrequenz
 - Vorschub Einstecken und axialer Vorschub
 - Spannzangendruck (Spannkraft)
 - Knetzeit zum Kalibrieren auf Enddurchmesser
 - stehender/bewegter Dorn beim Rückwärtshämmern

In Abbildung 34 ist exemplarisch das Umformergebnis der OP1 und OP2 dargestellt.

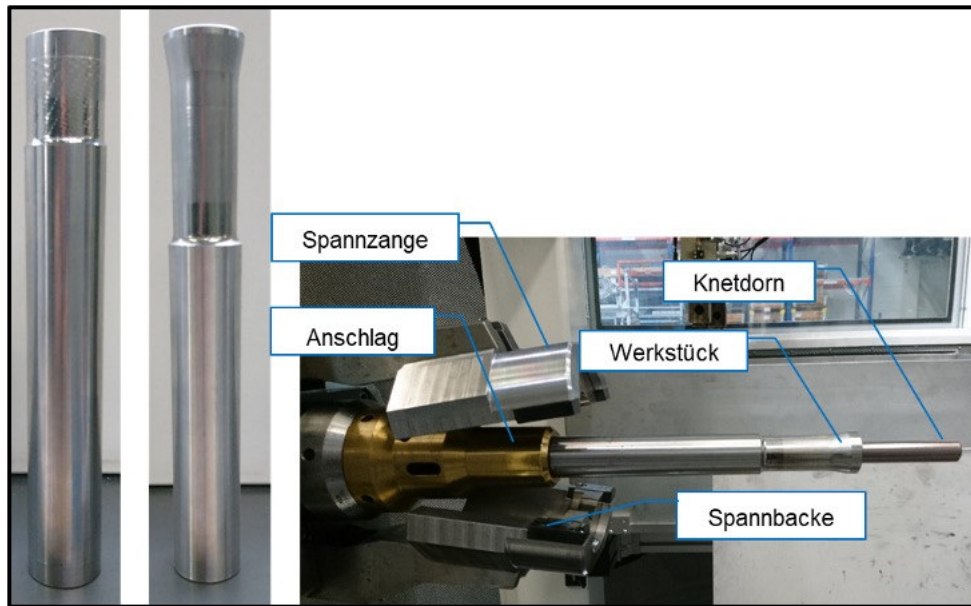


Abbildung 34: Umformstufen 1 und 2, Einbausituation in der Rundknetmaschine

3.3 Umformbasierte Verzahnungsherstellung

Die Fertigung von Laufverzahnungen für den Einsatz im Fahrzeugbau erfolgt nicht durch die Nutzung nur eines Verfahrens, sondern als Folge mehrerer Fertigungsoperationen. Dies gilt vor allem dann, wenn wie in Pkw-Getrieben, die Stirnräder im getriebetechnischen Eingriff hohen Belastungen ausgesetzt sind. Nach erfolgter Weichvorbearbeitung und anschließender Wärmebehandlung folgt eine Hartfeinbearbeitung der Zahnflanken. Die Weichbearbeitung von Laufverzahnungen wird von den spanenden Verfahren Wälzfräsen und Wälzstoßen dominiert. Im Bereich kleinerer Zahnräder und Module wird aus Kostengründen oftmals keine Hartfeinbearbeitung der Zahnflanken nach erfolgter Wärmebehandlung durchgeführt. Dies wird dann möglich, wenn die Weichbearbeitung mit hoher Genauigkeit erfolgt und die Maßabweichungen durch den Wärmebehandlungsprozess klein sind. Aus diesem Grund werden Verzahnungen, die nach der Wärmebehandlung keine weitere Zahnflankenbearbeitung erfahren, in der Regel im weichen Zustand noch geschabt. Wegen der auftretenden Belastungen und den hohen Anforderungen an den geräuscharmen Lauf von Zahnradpaarungen im Getriebe ist es immer häufiger unerlässlich, nach der Wärmebehandlung auch eine Hartfeinbearbeitung durchzuführen. Aus wirtschaftlichen Gründen wird angestrebt, mit einem einzigen Hartfeinbearbeitungsverfahren auszukommen. Dies ist aber nicht immer möglich, da nach dem Schleifen als dominierendem Verfahren oft zur Verbesserung der Oberfläche noch ein Hon- oder Schabschleifvorgang nachgeschaltet werden muss.

Eine umformende Herstellung von Verzahnungen blieb bisher auf die Fertigung so genannter Steck- und Normalverzahnungen beschränkt. Laufverzahnungen mit Zahnhöhenfaktoren größer 2 galten

als walztechnisch nicht realisierbar (Abbildung 35), auf Grund der großen Zahnhöhen und der komplizierten kinematischen Abwälzbedingungen. Am IWU Chemnitz konnten in Forschungsarbeiten Hochverzahnungen für Getriebeanwendungen walztechnisch erzeugt werden.

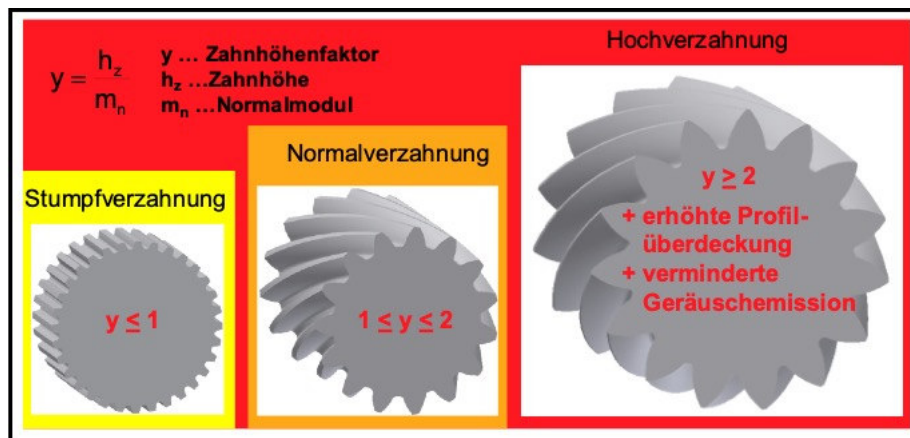


Abbildung 35: Einteilung der Stirnradverzahnungen nach ihrem Zahnhöhenfaktor y

In Abbildung 36 wird die Entwicklung des Kaltwalzens vom Stand der Technik bis hin zur perspektivischen Zielstellung, dem Walzen von Hochverzahnungen mit Zahnhöhenfaktor größer 2 sowie in Verzahnungsqualität 8-9, dargestellt.

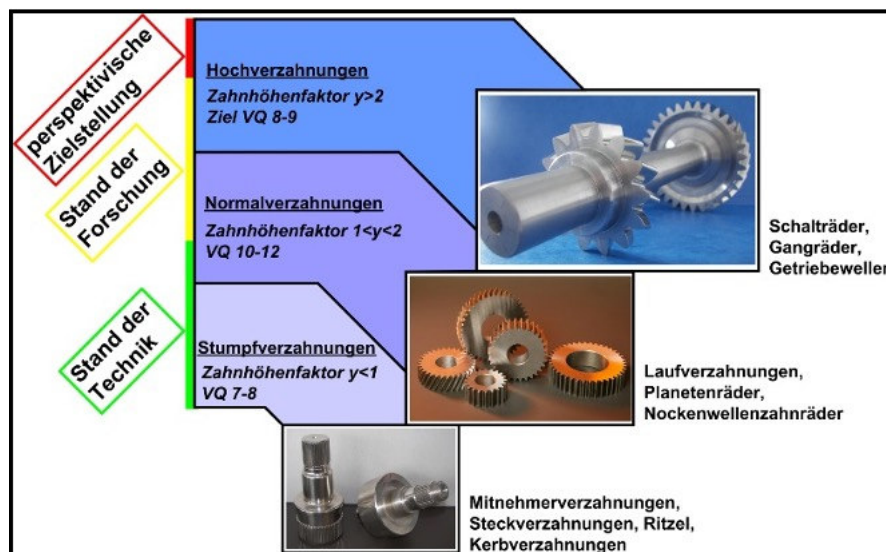


Abbildung 36: Entwicklung des Walzens von Hochverzahnungen

Das am IWU Chemnitz zum Einsatz kommende Verzahnungswalzen, zählt zu den abwälzenden Querwalzverfahren speziell zum Profil-Querwalzen mit außenverzahnten, runden Werkzeugen. Hierbei wird der Umformvorgang durch eine Achsabstandreduzierung zwischen zwei symmetrisch ausgebildeten und synchron laufenden Zahnwalzen eingeleitet.

Die Abwälzbewegung zwischen dem Werkzeugprofil und der zu walzenden Evolventenflanke realisiert die Formgebung des zu walzenden Zahnrades. Der Walzprozess im Rundrollenverfahren wird in drei Phasen gegliedert.

- **Anwalzen** der Werkzeugkopfteilung auf den Vordrehdurchmesser des Werkstückes
- **Eindringen** der Walzwerkzeuge in den Rohling bis zum geforderten Parameterbereich (Fußkreis- und Kopfkreisdurchmesser) der Verzahnung
- **Kalibrieren** der fertigen Verzahnung, um eine vollständige Ausformung der Verzahnung zu erreichen

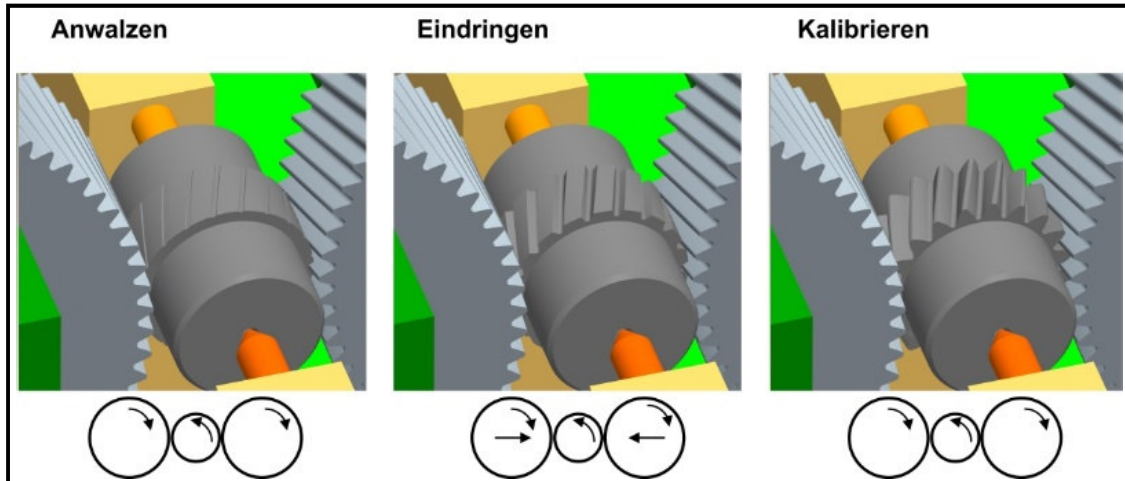


Abbildung 37: Phasen beim Walzen von Laufverzahnungen

Das Rundrollenverfahren (Abbildung 37) kann, aufgrund der Möglichkeit des mehrmaligen Überwalzens, als Umformung mit unendlicher Werkzeuglänge betrachtet werden. Die Komplexität der Verfahrensbeherrschung besteht darin den Vordrehdurchmesser des Walzteilens, den Werkzeug- und Werkstückwerkstoff, die Profilform des Werkzeuges sowie die axiale Zustellung der Walzrollen so aufeinander abzustimmen, dass die Sollverzahnung in optimaler Qualität ausgewalzt werden und fertigungsbedingte Flankenform-, Flankenrichtungs- sowie Teilungsabweichungen minimiert werden. Prinzipiell sind die Verzahnungstoleranzen bei umformender Verzahnungsherstellung größer als bei spanend gefertigten Zahnrädern. Entgegenzuhalten sind die hohen Oberflächengüten, der konturangepasste Faserverlauf und die Härtesteigerungen im Flankenbereich als weitere wesentliche Verfahrensvorteile der umformenden Fertigung. Diese umformtechnisch bedingten und nicht geometrischen Qualitätsparameter führen bei verzahnten Bauteilen zu einer höheren dynamischen Belastbarkeit sowie zu verbesserten Tragfähigkeiten.

In Abbildung 38 ist der Demonstrator in Abstimmung mit allen Projektpartner gemeinsam festgelegt worden. Für das Arbeitspaket 4 sind drei Passverzahnungen von Bedeutung.



Abbildung 38: ProGear Demonstrator mit 3 Verzahnungen

Die beiden äußeren Verzahnungen dienen zur Anbindung an den Elektromotor und ersetzen die ursprüngliche Passfederverbindung. Auf der mittleren Verzahnung sitzt ein Kupplungskörper der das zweistufige Getriebe schaltet. Für die Herstellung der drei Verzahnungen wurde das Einstechwalzen bzw. Profil-Querwalzen mit Rundwerkzeugen (Abbildung 39) angewandt.

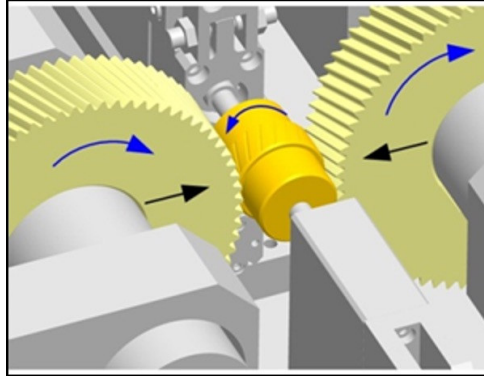


Abbildung 39: Prinzip des Profil-Querwalzens

Bei diesem Verfahren rotieren zwei verzahnte Rundwerkzeuge mit gleicher Drehrichtung und dringen unter einer Achsabstandsreduzierung in das Bauteil ein. Dabei wird der Werkstoff plastifiziert und fließt in die Walzwerkzeuglücken auf. Um einen symmetrisch ausgebildeten Zahn zu erreichen, wird während des Walzprozesses die Drehrichtung gezielt geändert.

Die Herausforderung bezogen auf den Demonstrator, besteht zum einem an der dünnwandigen Wellenkontur vor allem in den Randbereichen und zum anderen in der geforderten Zielstellung, die Fertigungszeit und Kosten im Vergleich zur Referenzprozesskette zu reduzieren.

Um einem Ovalisieren oder Ausknicken beim Walzen aufgrund der geringen Wanddicken der beiden Passverzahnungen an den Wellenenden entgegenzuwirken, besteht die Möglichkeit der Nutzung des Durchschubwalzens (siehe Abbildung 40).

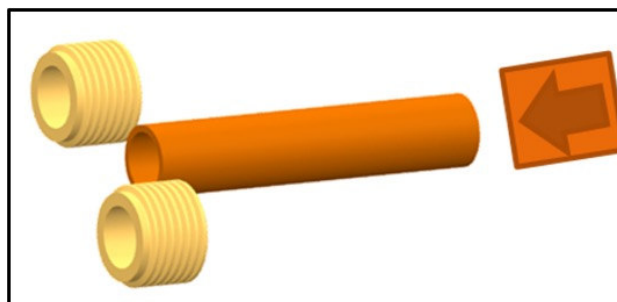


Abbildung 40: Prinzip des Durchschubwalzens

Hier wird nicht, wie beim Einstechwalzen (Abbildung 39), von Prozessbeginn an über die gesamte Werkstückbreite eingestochen, sondern die Walzteilverform wird axial durch die beiden Werkzeuge geschoben. Der Vorteil besteht dabei, dass die Kontaktflächen zwischen Werkzeug und Werkstück reduziert werden, die Umformkräfte werden minimiert und die Gefahr der Ovalisierung verringert.

In Abbildung 41 ist die Werkzeugkonstruktion eines kombinierten Einstech- und Durchschubwalzwerkzeuges dargestellt. Der mittige Bereich des Werkzeuges kann zum Einstechwalzen als auch als Kalibrierzone für das Durchschubwalzen genutzt werden. Weiterhin wurde an der Stirnseite eine Einlaufschräge angebracht. Abbildung 42 zeigt das Simulationsergebnis bzw. den Kraftbedarf beim Durchschubwalzen an.

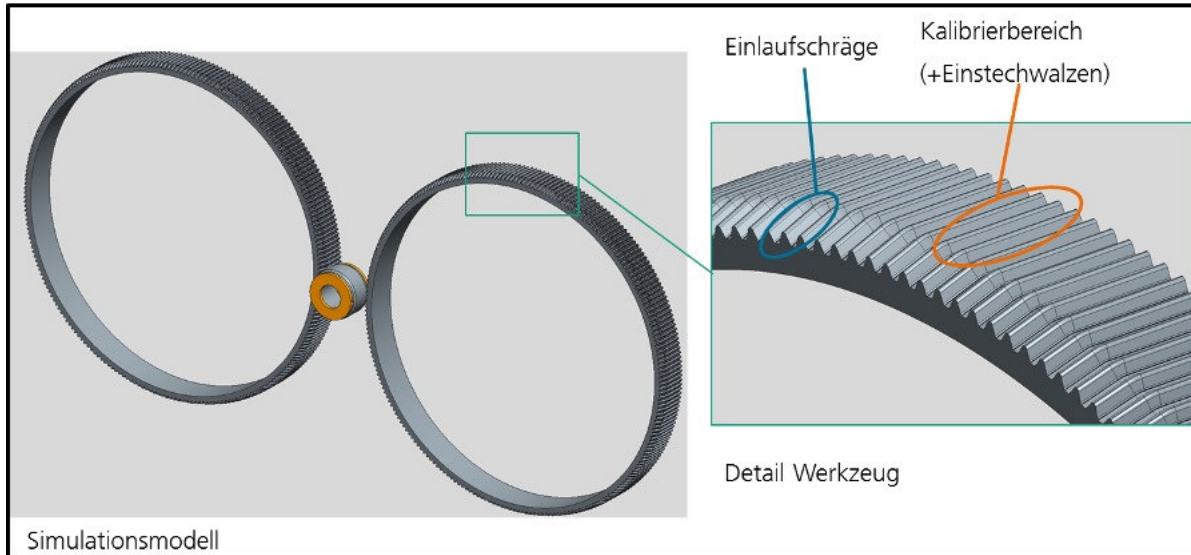


Abbildung 41: Werkzeugkonstruktion Durchschubwalzen

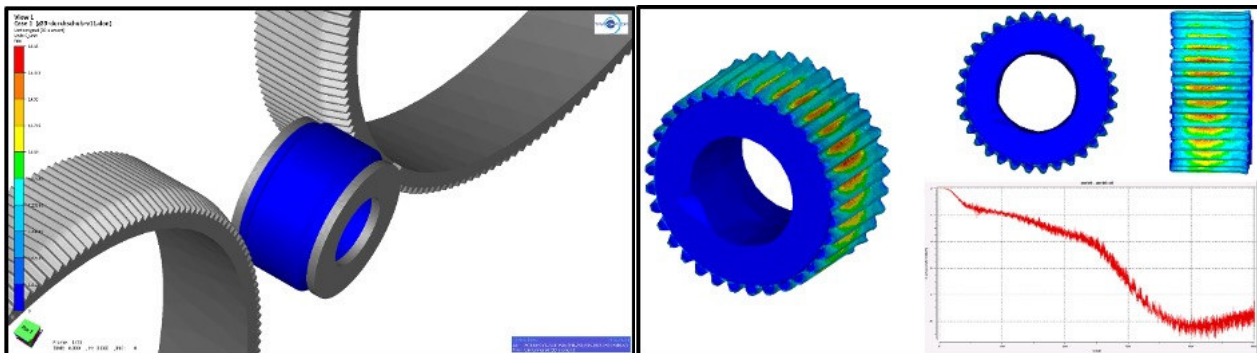


Abbildung 42: Simulation Durchschubwalzen

Die zweite Zielstellung, Kosten und Fertigungszeit zu senken, wurde dadurch gelöst, dass alle drei Passverzahnungen mit einer Walzwerkzeuggeometrie gewalzt werden konnten. Dazu wurde zunächst das Walzwerkzeug für die mittlere Verzahnung ausgelegt, da diese Verzahnungsgeometrie nicht verändert werden darf, um keinen zu großen Eingriff in die Schnittstellen bzw. gesamte Getriebekonstruktion zur Folge zu haben. Die abgeleitete Werkzeuggeometrie der mittleren Verzahnung wurde mit Hilfe spezielle Berechnungsmethoden und dazugehöriger Software abwälzkinematisch für die Herstellung der beiden Verzahnungen an den Wellenenden abgeleitet. Somit können mit einem Walzwerkzeug alle drei Verzahnungen, trotz unterschiedlicher Zähnezahlen, umformtechnisch hergestellt werden.

Weiterhin wurde der Walzprozess hinsichtlich einer Fertigungszeitoptimierung so programmiert, dass alle drei Verzahnungen in einer Aufspannung direkt in Folge gewalzt werden können.

Im Ergebnis dieses Arbeitspaketes konnten auf mehreren Hohlwellen die Passverzahnungen gewalzt werden und dabei die Kosten durch Reduzierung der notwendigen Werkzeuge, Senkung der Fertigungszeit und Einsparung an Material gesenkt werden. Eine Materialeinsparung bzw. Ressourcenschonung geht stets mit der Senkung von umweltschädigendem CO₂ einher und kann somit einen Beitrag zur Erreichung der Klimaziele leisten.

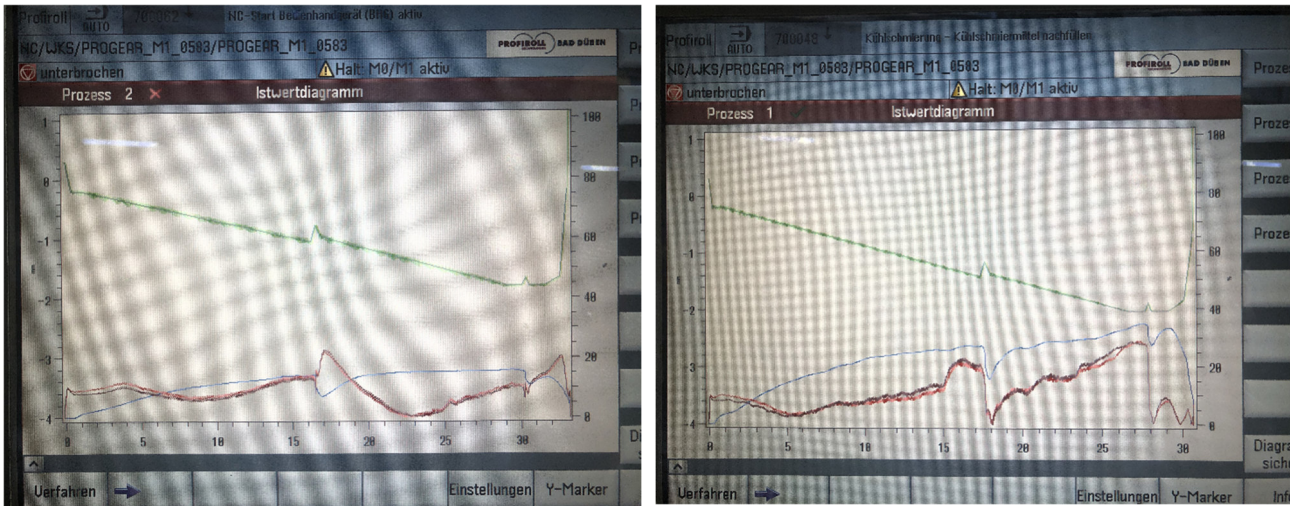


Abbildung 43: Einstellparameter und Einstellkurve für die Walzversuche

In den dargestellten Einstellkurvenverläufen (Abbildung 43) für die Walzversuche der „Innvelo“-Welle auf der Spezialwalzmaschine Rollex XL, können folgende Randbedingungen definiert werden:

- Einsack-Werte beim Anwalzen zwischen 0,1-0,2mm;
- 2 Reversierpunkte (Drehrichtungswechsel), jeweils beim Eindringen und Kalibrieren;
- Eindringtiefe 2mm;
- Überrollzahl 30.

Die aus dem Walzprozess (Abbildung 43) resultierenden Kräfte und Momente lagen im Bereich von 20-40 Prozent der maschinellen Leistung. Auf dem linken Bild konnten die auftretenden Kräfte und Momente auf ca. 20 Prozent reduziert und damit der Walzprozess in einer Versuchsreihe von 20 differierenden Einstellungen hinsichtlich der auftretenden Kräfte und Momente optimiert werden.

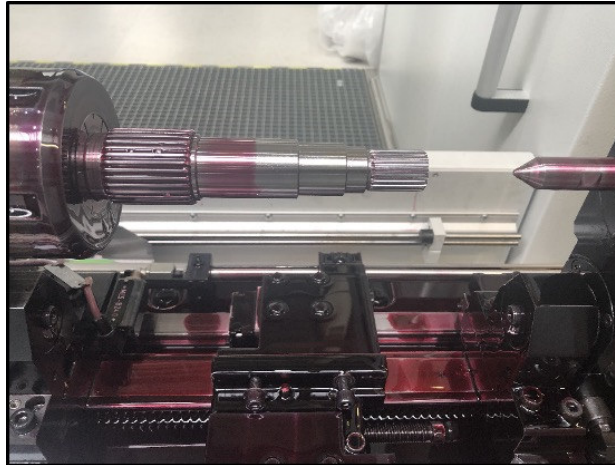


Abbildung 44: Einspannsituation/Walzen der „Innvelo“-Welle



Abbildung 45: gewalzte „Innvelo“-Wellen mit den umgeformten Verzahnungen

Die gewalzten Verzahnungen (Abbildung 45) wurden auf der Verzahnungsmessmaschine Zeiss Prismo am Fraunhofer IWU vermessen, hinsichtlich ihrer geometrische Verzahnungsqualitäten. Die Zeiss-Vermessung (Prinzipdarstellung - Abbildung 46) von jeweils 10 auszuwertenden Werkstücken unterteilte sich in die konstruktiv, fertigungstechnisch und messtechnisch relevanten und erfassbaren Verzahnungsabweichungen nach DIN 3960-3962:

- Teilungs-Gesamtabweichung F_P
- Teilungs-Einzelabweichung f_p
- Teilungssprung f_u
- Profil-Gesamtabweichung F_f
- Flankenlinien-Gesamtabweichung F_β
- Rundlaufabweichung F_r



Abbildung 46: Verzahnungsvermessung nach Zeiss mittels Messtaster

Beim Walzen der Verzahnungen lag die oberste Priorität auf einer möglichst hochgenauen Umformung der Soll-Verzahnungen, daher wurde mit einem Walzwerkzeug nach Stand der Technik sowie einem Walzwerkzeugsatz mit teilungsdynamischer Auslegung gewalzt, um eine möglichst minimale Abweichung hinsichtlich der Soll-Parameter Teilung, Flankenlinie, Flankenform und Rundlauf generieren zu können. Nachfolgend sind in den Abbildung 47 bis Abbildung 50 die realisierten Verzahnungsqualitäten mit den entsprechenden Werkzeugsätzen dargestellt, immer bezogen auf die Soll-Qualität.

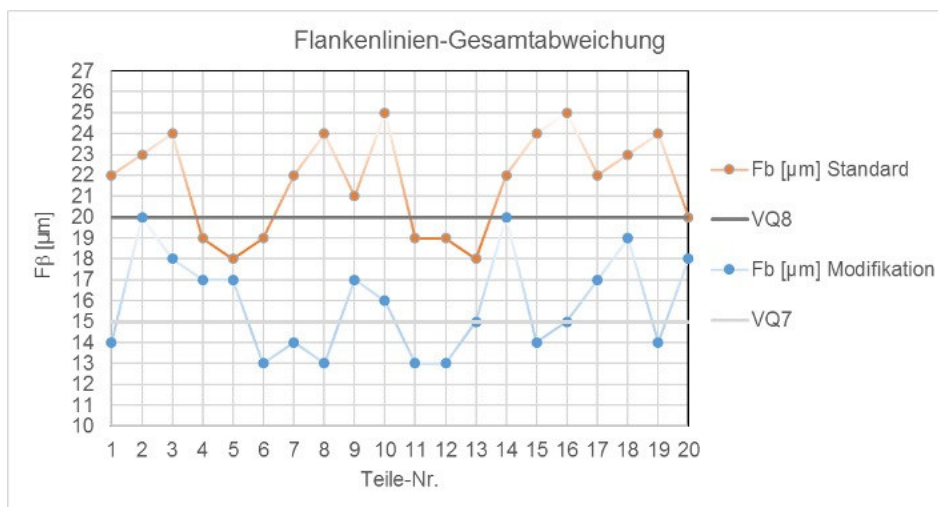


Abbildung 47: Messergebnisse Flankenlinien-Gesamtabweichung F_{β} (F_b)

In Abbildung 47 kann man erkennen, dass bei einer Sollvorgabe von Verzahnungsqualität 8 (20µm Abweichung) für die Flankenlinien-Gesamtabweichung sowohl mit dem herkömmlichen Walzwerkzeug als auch dem teilungsflexiblen Walzwerkzeug die geforderten Genauigkeiten erreicht werden konnten. Die Abweichungen in der Flankenlinie lagen bei den vermessenen Bauteilen zwischen 13 und 25µm. Die besten Ergebnisse garantierte die teilungsflexible Auslegung (blaue Messwerte) der Walzwerkzeuge, wobei dort stets die geforderte Soll-Qualität erreicht werden konnte. Beide Ergebnisse lagen im Bereich von Verzahnungsqualitäten 7-9, wobei der Werkzeugsatz mit modifizierter Teilungsauslegung klar priorisiert wurde.

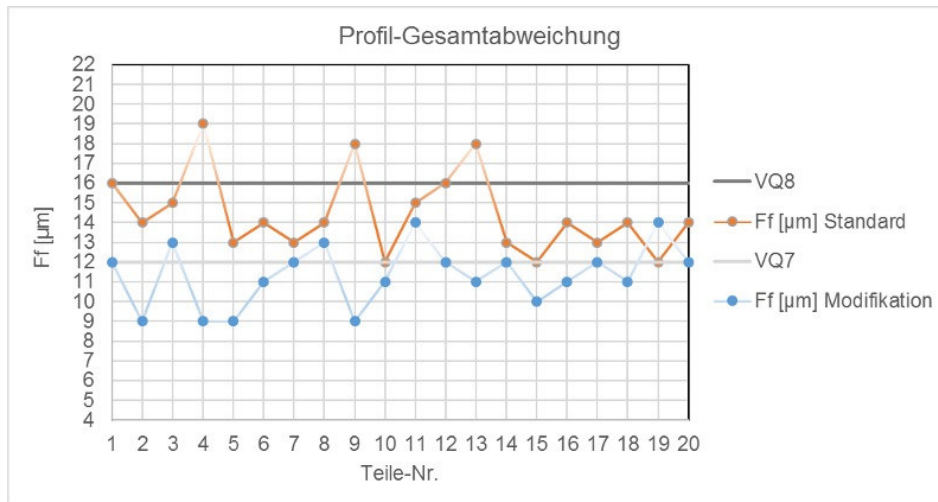


Abbildung 48: Messergebnisse Profil-Gesamtabweichung F_f

In Abbildung 48 kann man erkennen, dass bei einer Sollvorgabe von Verzahnungsqualität 8 ($16\mu\text{m}$ Abweichung) für die Profil-Gesamtabweichung mit dem herkömmlichen Walzwerkzeug (rote Messwerte) als auch dem teilungsflexiblen Walzwerkzeug (blaue Messwerte) die geforderten Genauigkeiten erreicht werden konnten. Nur marginal kam es zu Überschreitungen der zulässigen Abweichungen. Die Abweichungen in der Profil-Gesamtabweichung lagen bei den vermessenen Bauteilen zwischen 9 und $19\mu\text{m}$. Die besten Ergebnisse garantierte wiederum die teilungsflexible Auslegung der Walzwerkzeuge (blaue Messwerte). Beide Walzergebnisse lagen im Bereich von Verzahnungsqualitäten 6-8.

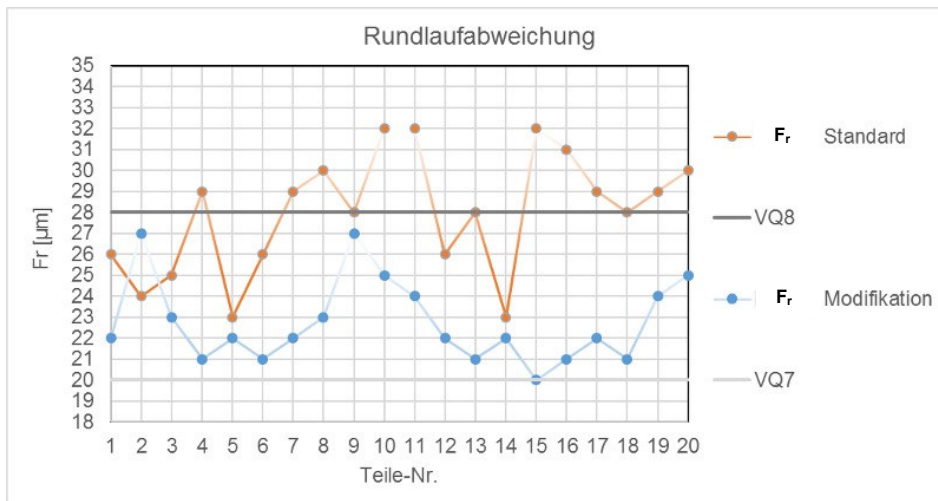


Abbildung 49: Messergebnisse Rundlaufabweichung F_r

In Abbildung 49 kann man erkennen, dass bei einer Sollvorgabe von Verzahnungsqualität 8 ($28\mu\text{m}$ Abweichung) im Rundlauf mit dem herkömmlichen Walzwerkzeug als auch dem teilungsdynamischen Walzwerkzeug die geforderten Genauigkeiten bei den Bauteilen größtenteils erreicht werden konnten. Die Abweichungen im Rundlauf lagen bei den vermessenen Bauteilen zwischen 20 und

32µm. Die deutlich besten Ergebnisse garantierte die teilungsflexible Auslegung der Walzwerkzeuge (blaue Messwerte). Beide Walzerggebnisse lagen im Bereich von Verzahnungsqualitäten 7-9.

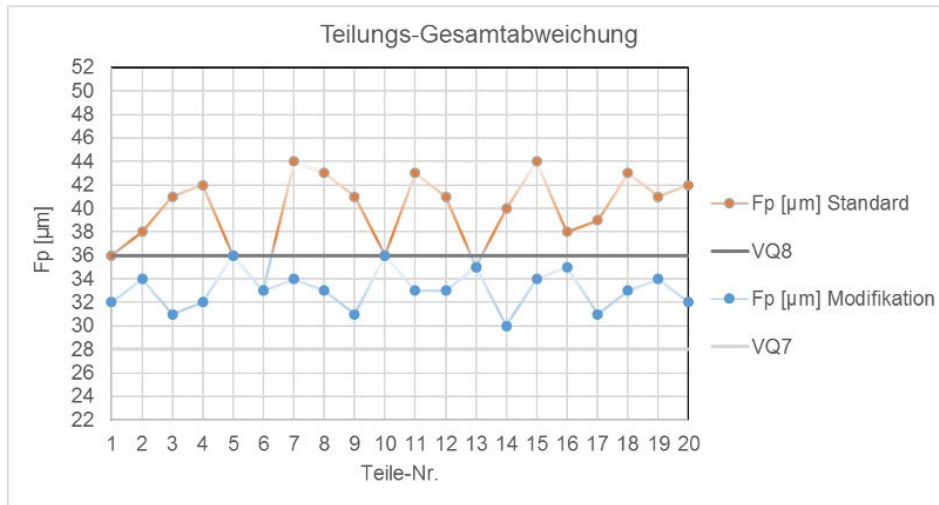


Abbildung 50: Messergebnisse Teilungs-Gesamtabweichung F_P

Der Abbildung 50 ist zu entnehmen, dass bei einer Sollvorgabe von Verzahnungsqualität 8 (36µm Abweichung) für die Teilungs-Gesamtabweichung mit dem teilungsdynamischen Walzwerkzeug die geforderten Genauigkeiten bei allen Bauteilen erreicht werden konnten. Die Standard-Werkzeuge konnten die geforderten Qualitäten nur punktuell realisieren. Die Abweichungen lagen bei den vermessenen Bauteilen zwischen 30 und 44µm. Die deutlich besten Ergebnisse garantierte die teilungsflexible Auslegung der Walzwerkzeuge (blaue Messwerte). Beide Walzerggebnisse lagen im Bereich von Verzahnungsqualitäten 7-9.

Des Weiteren wurden die geforderten Soll-Maße für Kopf- und Fußkreisdurchmesser sowie das Maß über Messkreise ermittelt. Dabei konnten alle Bauteile in den geforderten Toleranzfeldern umformtechnisch realisiert werden (siehe Tabelle 3). Die umgeformten Ist-Werte wurden als grüne Mess-Ergebnisse in der Tabelle dargestellt.

Tabelle 3: Messergebnisse der Soll-Parameter (Verzahnungen 1, 2, 3)

Verzahnungsparameter	Verzahnung 1 und 3 Soll-Wert	Verzahnung 1 und 3 Ist-Wert	Verzahnung 2 Soll-Wert	Verzahnung 2 Ist-Wert
Kopfkreisdurchmesser d_a [mm]	19.484 <small>(0/-0.025)</small>	19.483	33.484 <small>(0/-0.025)</small>	33.483
Fußkreisdurchmesser d_f [mm]	17.275 <small>(-0.021/-0.055)</small>	17.273	31.610 <small>(-0.021/-0.055)</small>	31.606
Maß über Messkreise max. M_{max} [mm]	22.080	22.078	36.178	36.177
Maß über Messkreise min. M_{min} [mm]	22.061	22.060	36.159	36.157

3.4 Entwicklung und Optimierung Wärmebehandlung

Bei der Auswahl des spezifisch, idealen Wärmebehandlungsverfahrens für die Hohlwellen, wurde auf das Induktions- oder Randschichthärten zurückgegriffen. Dabei funktioniert das Grundprinzip folgendermaßen:

Alle Werkstoffe bzw. Materialien, welche elektrischen Strom leiten, lassen sich induktiv erwärmen. Wird also der zu erwärmende Metallkörper, in unserem Falle die Verzahnung, dem Einfluss eines elektromagnetischen Feldes ausgesetzt, so wird in ihm ein elektrischer Strom induziert. Die mit dem Stromfluss verbundenen Verluste (Wirbelstrom- und Hystereseverluste) bewirken im Metall ein Erwärmen. Um das notwendige periodisch veränderliche Magnetfeld zu erzeugen, wird eine Induktionsspule (Induktor) an eine Wechselstromquelle (Generator) angeschlossen. Die mit Wechselstrom durchflossene Spule erzeugt ein magnetisches Feld mit wechselnder Richtung. Dieses induziert berührungslos einen Strom im Werkstück. Bedingt durch den Widerstand im Metallkörper wird ein Teil der eingebrachten Leistung in Wärme umgewandelt (Wirbelstrom). Somit entsteht beim induktiven Erwärmen die Wärme im Werkstück/Bauteil selbst und wird nicht, wie bei anderen Verfahren, durch Wärmeleitung, Konvektion oder Wärmestrahlung übertragen. Zu beachten ist, dass der Widerstand und die Permeabilitätszahl des Werkstoffes temperaturabhängig sind und die Permeabilitätszahl außerdem noch von der magnetischen Feldstärke abhängt. Von grundlegender Bedeutung ist also der Zusammenhang zwischen Frequenz, Induktorstrom und Eindringtiefe in das Bauteil (in unserem Fall die Verzahnungs-Oberfläche). Der Zusammenhang lässt sich vereinfacht wie folgt beschreiben:

Bei hohen Frequenzen ist die (Strom-)Eindringtiefe gering.

Bei niedrigen Frequenzen ist die (Strom-)Eindringtiefe hoch.

Die Wärmebehandlung der umgeformten Hohlwellen erfolgte also mittels induktiven Härtens. Dieser Härteprozess ist im Vergleich zur typischen Ofenhärtung schneller, umwelt- und gesundheitsverträglicher. Das Abschrecken der umgeformten Hohlwelle aus Vergütungsstähle erfolgte in wasser-mischbaren Polymerlösungen, welche sich unter einer Temperatur von 70°C in Wasser auflösen. Durch die Verwendung dieser Polymerchemikalien konnte eine umweltschädliche Ölabschreckung vermieden werden. Die verwendete Induktionshärteanlage kann man dabei in vier Funktionsbereiche unterteilen, von denen jeder einzelne wichtig für die Funktion der Gesamtanlage ist:

- Energiequelle (Generator),
- Werkzeuge (Induktor, Abschreckeinrichtung),
- Führungsmaschine mit Steuerung,
- Kühlaggregate für Generatoren und Werkzeuge (ggf. Abschreckmedium).

Die Komponenten der Induktionshärteanlage sowie das Härten der beiden Verzahnungen auf der Welle sind in Abbildung 51 (Induktionshärten $d=22,3\text{mm}$) und Abbildung 52 (Induktionshärten $d=33,4\text{mm}$) dargestellt.

Beide Erwärmungsvorgänge erfolgten in derselben Anlage in direkt nacheinander folgenden Prozessen, was eine effiziente, kostenminimale und umweltfreundliche Erwärmungsmethode darstellt. Die vorliegende induktive Randschichthärtung ist im Vergleich zum ursprünglichen Erwärmungsverfahren für Verzahnungen, dem Einsatzhärten, wesentlich ökonomischer und ökologischer und wurde explizit, aufgrund der Projektzielstellungen, ausgewählt und eingesetzt.



Abbildung 51: Induktionshärteanlage und Härten der Verzahnung mit $d=22,3\text{mm}$

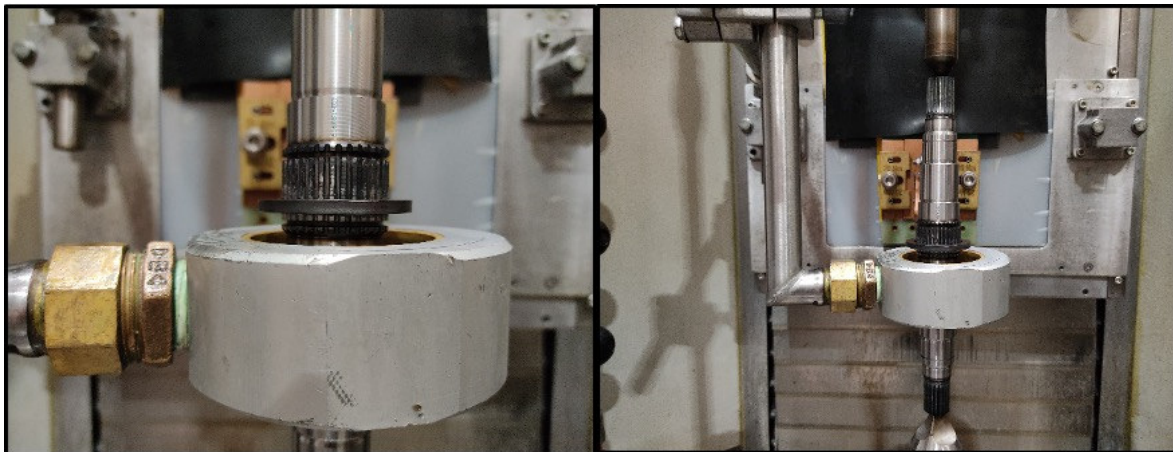


Abbildung 52: Induktionshärteanlage und Härten der Verzahnung mit $d=33,4\text{mm}$

Nachfolgend dargestellt (Abbildung 53) sind die entsprechenden Schiffe der induktiv erwärmten Verzahnungen, welche seitens EMA-TEC untersucht wurden. Es erfolgten durchgängige Tests mit verschiedenen Varianten und Eindringtiefen.

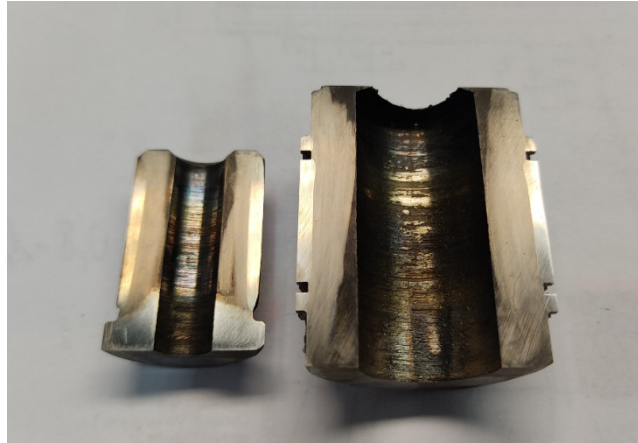


Abbildung 53: Schliffe der Verzahnungen $d=33,4\text{mm}$ und $d=22,3\text{mm}$

3.5 Verifizierung der umformbasierten Gesamtprozesskette

Das Gewicht der einzelnen Komponenten des untersuchten Bauteils Hohlwelle (Elektromobilität) spielt bei der wirtschaftlichen und ökologischen Bewertung der realisierten Projektergebnisse die entscheidende Rolle, da Material- und Ressourceneffizienz eine Kernproblematik in Gegenwart und Zukunft darstellen. Das Vorhaben ProGEAR soll dazu beitragen, entsprechende Systeme ressourceneffizient und leichtbauoptimiert auszulegen und zu fertigen. Dabei wurde, in Bezug auf die fertigungstechnische Umsetzung der Projektidee in vier relevante Themenfelder unterteilt:

- *Umformbasierte Hohlwellenherstellung (AP2),*
- *Umformbasierte Verzahnungsherstellung (AP3),*
- *Entwicklung/Optimierung Wärmebehandlung (AP4),*
- *Zusammenführung zu einer umformbasierten Gesamtprozesskette (AP5).*

Neben der finalen, fertigungsgerechten Auslegung der Getriebehohlwelle, die eine belastungsgerechte und leichtbau-optimierte Bauteilgeometrie (Abbildung 54) beinhaltet, erfolgten wesentliche FEM-basierte Untersuchungen der Produktionsregime auf Basis bestehender Prozessabläufe des Fraunhofer IWU. Zielstellung war dabei, die Einzelprozesse hinsichtlich der progressiven Produktionsbedingungen zu optimieren und eine ideale Ausbildung der vorgesehenen Maß- und Formgenauigkeiten zu erzielen. Nach erfolgter Entwicklung und Optimierung der Einzelprozesse erfolgte die Verifizierung der ganzheitlichen Komponentenfertigung. Dabei wurde eine ökologische sowie ökonomische Mehrwertanalyse durchgeführt. Dies diente einer ganzheitlichen Definition der Ressourcen- und Energieeffizienz der umformtechnischen Gesamtprozesskette ProGEAR und ermöglicht damit die Darstellung des effektiven Umweltentlastungspotentials.

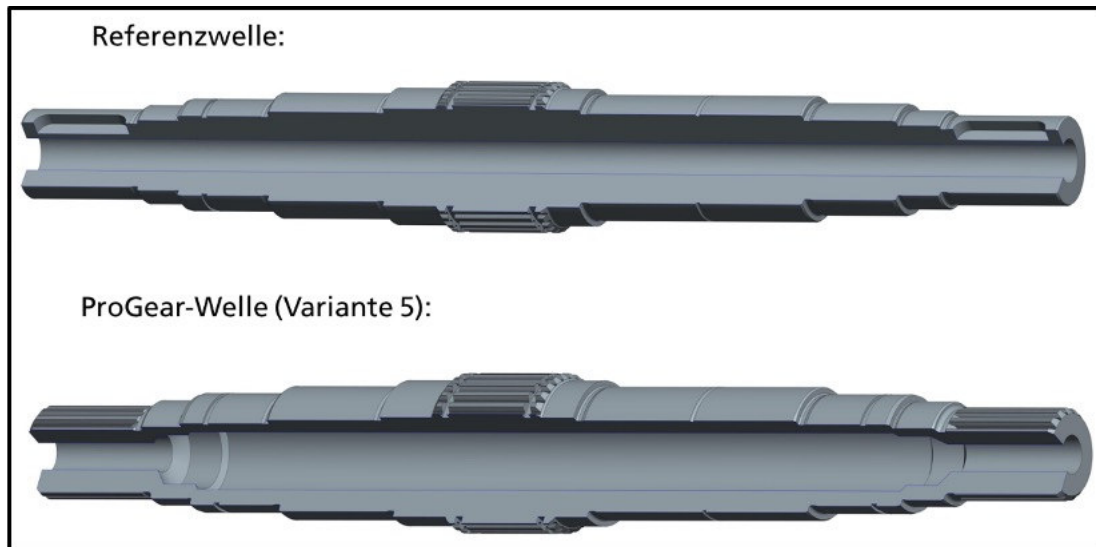


Abbildung 54: Bauteilwahl zur Entwicklung einer umformbasierten Prozesskette

Es wurde in AP1 festgelegt, dass die Wellenzwischenform, ausgehend von einem nahtlosen Rohr, durch Rundkneten hergestellt wird. Diese Fertigungsauswahl verspricht den minimalsten Zerspanungsaufwand und trägt somit zum Ziel, eine ressourceneffiziente Prozesskette zu entwickeln, maßgeblich bei. Die notwendigen Rohrabmessungen wurden unter anderem durch simulative Berechnungen und Auslegung der einzelnen Fertigungsstufen bestimmt. Das Ausgangsrohr hat einen Außendurchmesser von 33,5 mm und einen Innendurchmesser von 17,7 mm. Dieses Rohr wurde durch einen dreistufigen Rundknetprozess zur geforderten Wellenzwischenform umformtechnisch gefertigt.

Die Wellenzwischenform aus AP2 wurde in AP3 walztechnisch weiterbearbeitet. Es wurden drei auf der Welle zu fertigenden Passverzahnungen so ausgelegt, dass mit lediglich einer Walzwerkzeugkontur alle Verzahnungen auf die Zwischenform kaltgewalzt werden konnten.

Dies wurde abwälzkinematisch umgesetzt, indem die Werkzeugkontur auf die entsprechend herzustellenden Durchmesser am Bauteil abgewälzt wird. Damit war es möglich, alle Passverzahnungen in einer Aufspannung direkt nacheinander und somit prozesszeit- und kostenoptimiert umzuformen. Neben der Materialeinsparung infolge der Nutzung des Kaltwalzverfahrens anstatt eines materialineffizientem, spanabhebenden Fräsprozesses, können perspektivisch Fertigungszeit, Herstell-, Werkzeugkosten und CO₂-Ausstoß reduziert werden.

Die rundgeknetete und kaltgewalzte, verzahnte Welle wurde aus 42CrMo4, aus der Gruppe der Vergütungsstähle, hergestellt. Da die vorliegende Welle sehr dünnwandig ist, bietet sich dieser Werkstoff aufgrund seiner höheren Festigkeit an. Dieser Vergütungsstahl beinhaltet genügend Kohlenstoff, um die notwendigen Härteeigenschaften auch durch eine Wärmebehandlung, wie dem induktiven Härten zu realisieren.

Das induktive Härten impliziert den Vorteil zum einem hochproduktiv zu sein und zum anderen, die umformtechnisch eingebrachten Festigkeitsvorteile nicht gänzlich umzuwandeln. Eine Durchhärtung des Zahnkopfes wurde dabei vermieden, des Weiteren sollte die induktive Erwärmung der Verzahnung das Auftreten großer Härteverzüge vermeiden.

Durch die Substitution von Zerspanungsprozessen konnte der Materialausnutzungsgrad von 66% auf 89% gesteigert und die Verlustmasse von 460g auf 100g gesenkt werden. Aufgrund der Möglichkeit beim Rundkneten, die Wellenwanddicke der Beanspruchung im Betrieb anzupassen, konnte das Bauteilgewicht von 890g auf 680g gesenkt werden. Dies entspricht einer Gewichtsreduktion von 23 Prozent, eine signifikante Reduzierung des Materialeinsatzes. Eine Prototypen-Welle wird dem Fördergeber als Referenz- bzw. Vorzeigebauteil inklusive des Abschlussberichtes mitgeliefert.

3.6 Untersuchung finaler Werkstoffeigenschaften

Bei der Untersuchung der umformtechnisch bedingten Werkstoffeigenschaften wurden die Faserverläufe der gewalzten Verzahnungen, die umformbedingten Härtesteigerungen im Zahnformbereich sowie die walzbedingt resultierenden Oberflächentopographien der Verzahnungen untersucht und dargestellt.

Faserverläufe

Zur Ermittlung des umformbedingten Faserverlaufes wurde die Verzahnung im Stirnschnitt getrennt. Nach dem Schleifen der Querschnittsoberfläche erfolgte das Aufätzen der Oberflächenstruktur. Dabei wird der Faserverlauf, also die Umorientierung der Kristallkörner, sowie die Reckung und Anpassung der Werkstofffasern an die Fließrichtung erkennbar. Im Gegensatz zu spanend gefertigten Verzahnungskonturen, kommt es beim Umformen zu einem nicht unterbrochene und an den Verzahnungsumriss angepasste Verlauf der Materialfasern (Vergleich spanend, umformend; siehe Abbildung 55).

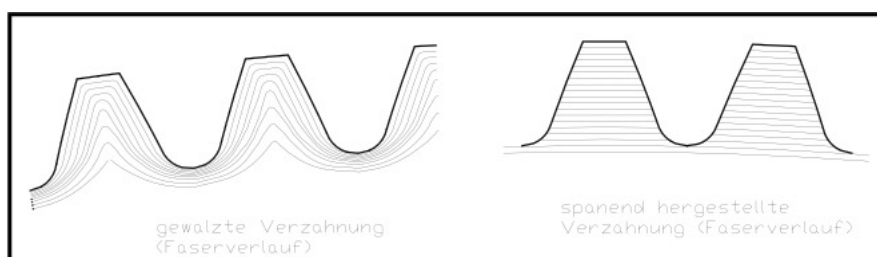


Abbildung 55: Vergleich der Faserverläufe gewalzter und zerspanter Verzahnungen

Die Materialfasern an den Randzonen, werden explizit im Zahnfußbereich (Abbildung 56) stark gestreckt, verdichtet und orientieren sich an die Zahnfußkontur. Dagegen bleiben sie in der Zahnmitte in fast unveränderter Form erhalten. Es wird kaum eine Verdichtung des Ausgangsgefüges festgestellt.

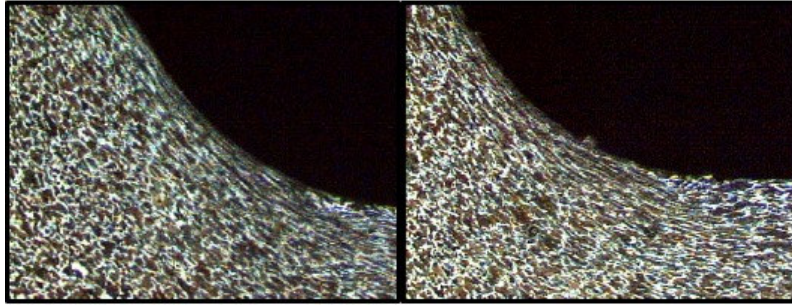


Abbildung 56: umgeformter Faserverlauf im Zahnfußbereich bei 140-fache Vergrößerung

Es ist erkennbar, dass der Faserverlauf über das gesamte Zahnprofil symmetrisch zur Zahnmitte orientiert ist. Der konturangepasste Faserverlauf wirkt sich vorteilhaft auf die Biegewechselbeanspruchung im Zahnfuß (Zahnfußtragfähigkeit) aus, da hierbei überwiegend Zug / Druckbelastungen auftreten, die vorzugsweise in der widerstandsfähigen Faserlängsrichtung verlaufen. Der Eindringvorgang der Werkzeugzähne in das Walzteil bewirkt eine erkennbare, allerdings einsatzspezifisch nicht relevante Verwirbelung des Faserverlaufes, speziell im Zahnfußbereich der Verzahnung. Ein teilungsgenauerer Walzprozess durch einen langsameren und gleichmäßigeren Eindringvorgang realisiert einen homogenen, unverwirbelten Faserverlauf (Abbildung 57). Dies verdeutlicht aus der Spezifik des ablaufenden Werkstoffflusses, die Sinnfälligkeit eines möglichst teilungsgenauen Eindringvorganges beim Verzahnungswalzen. Die herstellungsbedingte Beeinflussung des Werkstoffes (Kaltverfestigung, Fließstruktur) und des Walzteiles (Oberflächenqualität) wirkt sich tragfähigkeitsbegünstigend auf die Fertigverzahnung aus.

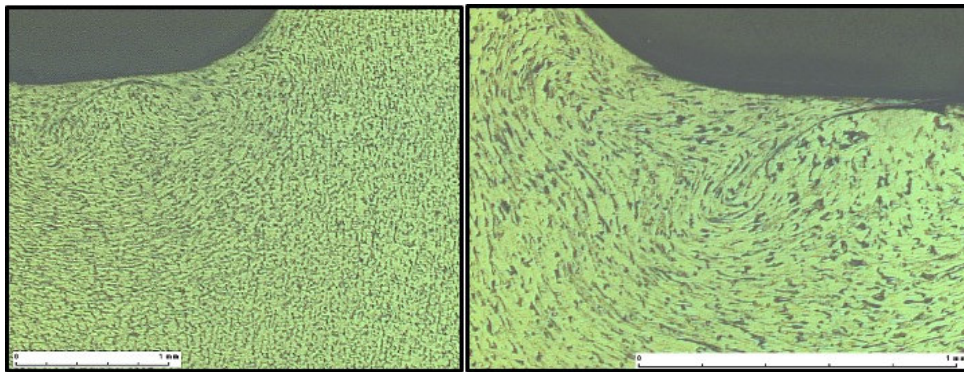


Abbildung 57: umgeformter Faserverlauf im Zahnfußbereich bei 140-fache Vergrößerung

Im Zahnflankenbereich ist der konturangepasste Faserverlauf in Abbildung 58 für linke und rechte Zahnflanke in ebenfalls 140-facher Vergrößerung dargestellt.

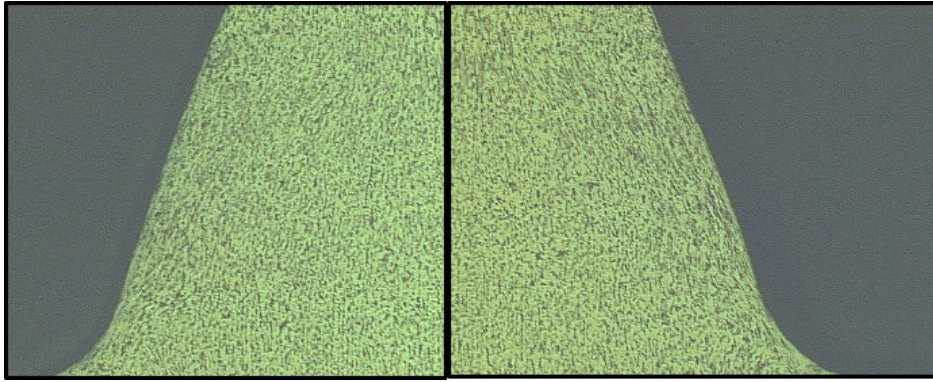


Abbildung 58: umgeformter Faserverlauf im Zahnflankenbereich bei 140-fache Vergrößerung

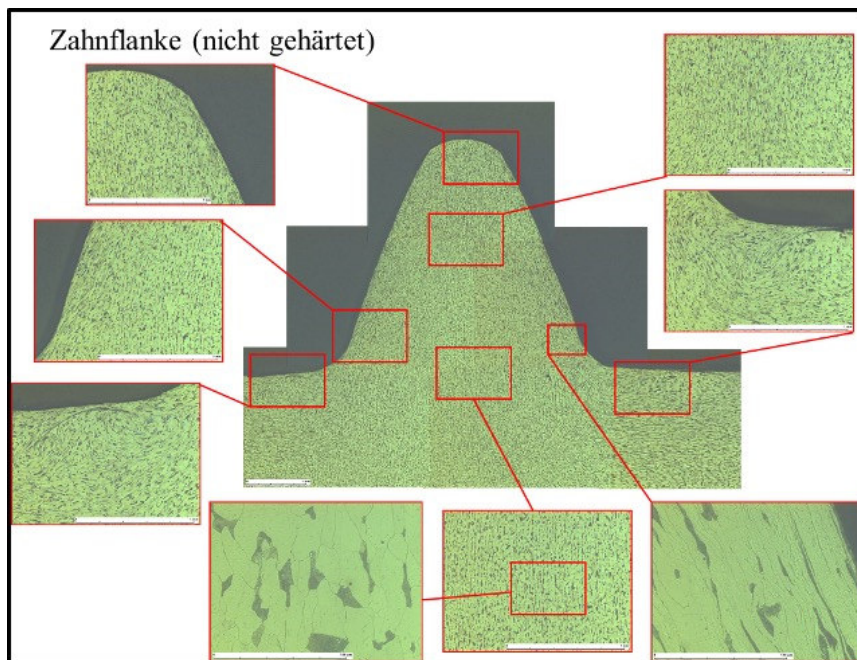


Abbildung 59: umgeformter Faserverläufe über gesamte (nicht gehärtete) Zahnkontur

Die wesentlichen Zahnkonturbereiche wurden bezüglich der Gefüge-Ausbildungen in den Abbildung 57 bis Abbildung 59 nochmals detailliert dargestellt und verdeutlichen den untersuchten Fakt, dass speziell in den tragenden Bereichen der Verzahnung (Zahnflanke, Evolvente) und den belasteten Bereichen der Verzahnung (Zahnfuß) eine signifikante Verdichtung der Materialfasern sowie eine konturangepasste Ausbildung dieser Fasern an die Verzahnungskontur vorliegt. Diese konturangepasste Faserausbildung beim Walzen hat sich als ein enormer Vorteil der walztechnischen Umformtechnik erwiesen. Dies haben die Untersuchungen hinsichtlich der technologiebedingten Härteverläufe bestätigt.

Härteverläufe

Für die „Innvelo“-Welle wurde eine Randhärte von 640-740HV sowie eine Einhärtetiefe von 0,8-1,2mm bei einer Grenzhärte von 525 HV festgelegt. Diese Zielparmeter, welche durch die Festigkeitsrechnung (siehe Abbildung 23) definiert wurden, sind durch das induktive Härten einzustellen.

Dazu wurden zunächst an mehreren zur Verfügung gestellten Probeteilen eine Parameterstudie (Frequenz, Leistung, Zeit) durchgeführt. Im Ergebnis wurden an der „Innvelo“-Welle folgende Einhärtetiefenverläufe ermittelt.

Abbildung 60 zeigt das Härteergebnis der Verzahnungen an den beiden Wellenenden. An der Randschicht im Abstand von 0,2mm wurde eine Härte von 740HV gemessen. Die Einhärtetiefe bei einer Grenzhärte von 525HV liegt bei 0,87mm.

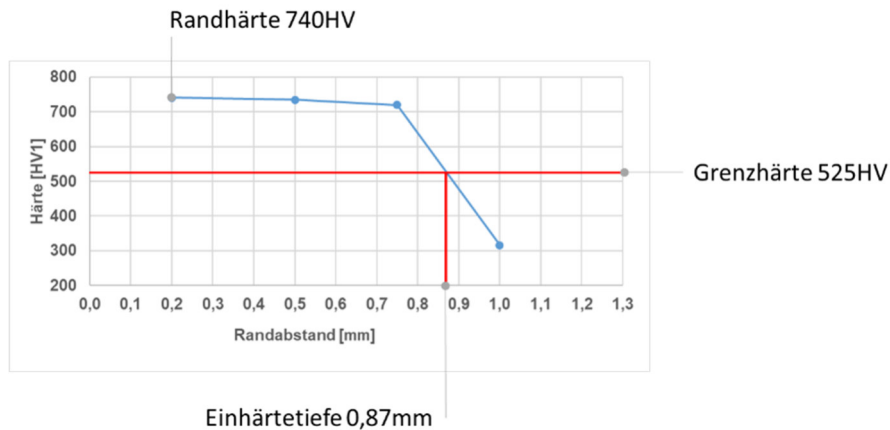


Abbildung 60: Einhärtetiefenverlauf Verzahnung Wellenende

In Abbildung 61 ist das Ergebnis der Verzahnung in Wellenmitte dargestellt. Hier wurde eine Randhärte von 732HV und eine Einhärtetiefe von 1,13mm erzielt.

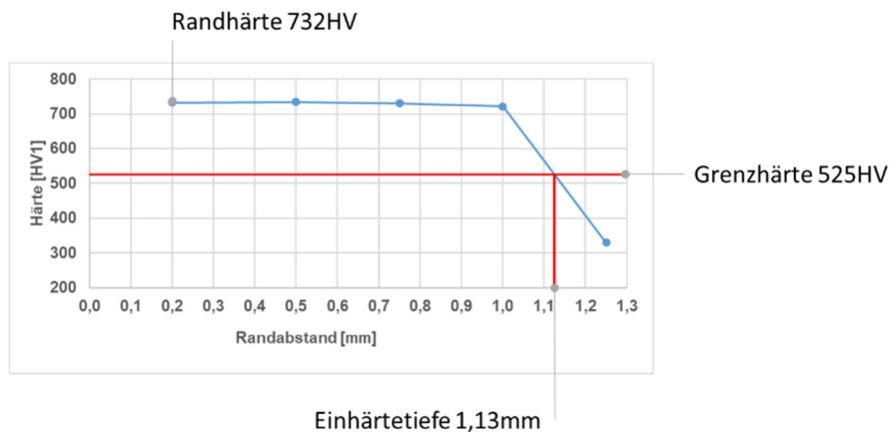


Abbildung 61: Einhärtetiefenverlauf Verzahnung Wellenmitte

Die aus der Festigkeitsrechnung ermittelten Sollparameter Randhärte und Einhärtetiefe wurden erfolgreich durch das induktive Härten realisiert.

Oberflächentopographie

Die Bestimmung der Oberflächenqualitäten der gewalzten Verzahnungen erfolgte optisch mittels eines Raster-Elektronen-Mikroskops, unterteilt in den Mittenrauwert R_a sowie die gemittelte Rauhtiefe R_z . Vermessen wurden jeweils Schub- und Zugflanke der Verzahnung, unterschieden nach der letzten im Walzprozess auftretenden Werkzeugbelastung. Nach Festlegung eines Messfeldes wurde

sowohl in Längs- als auch in Querrichtung gemessen. Die Mittenrauwerte R_a auf der Schubflanke lagen zwischen $0,1$ und $0,2\mu\text{m}$ (Abbildung 62, Abbildung 63) sowie $0,6$ und $0,9\mu\text{m}$ (Abbildung 64, Abbildung 65) auf der Zugflanke.

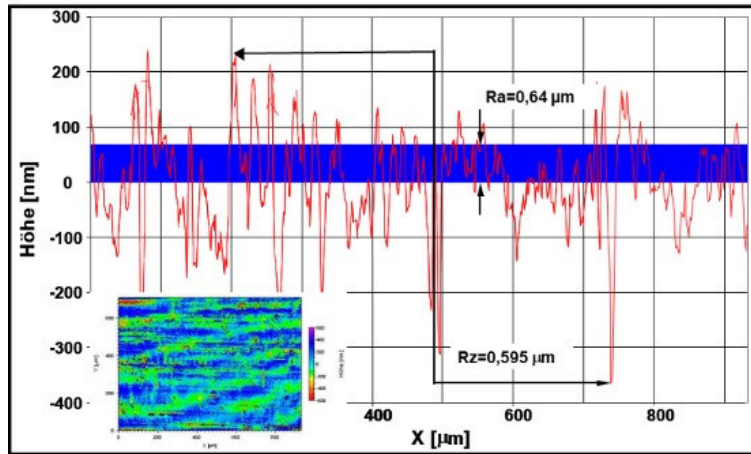


Abbildung 62: Rauheitsmessung Schubflanke mittig / längs in x-Richtung

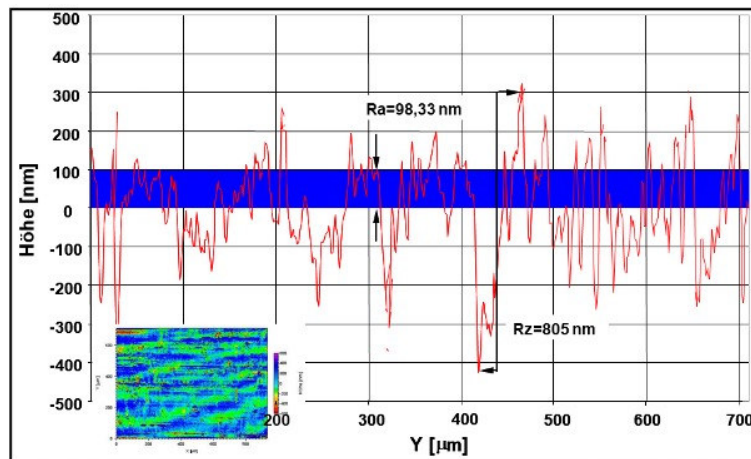


Abbildung 63: Rauheitsmessung Schubflanke mittig / quer in y-Richtung

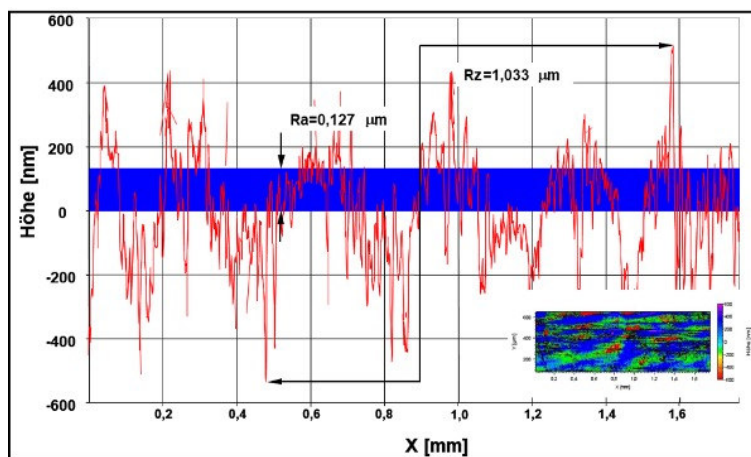


Abbildung 64: Rauheitsmessung Zugflanke mittig / längs in x-Richtung

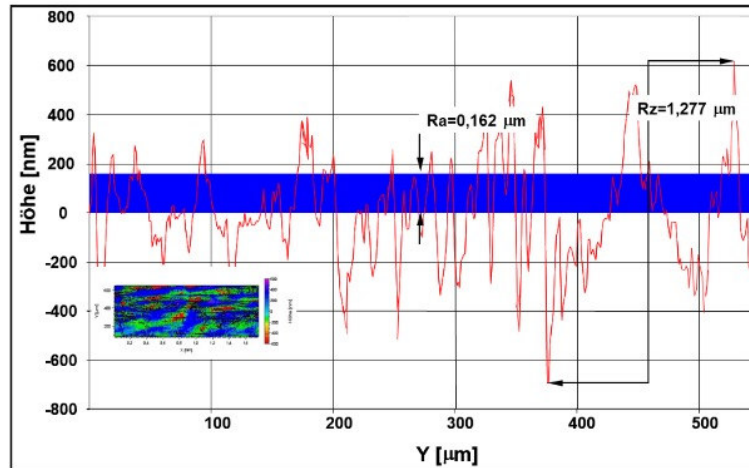


Abbildung 65: Rauheitsmessung Zugflanke mittig / quer in y-Richtung

Diese Differenzen in der Rauheit beider Zahnflanken lassen sich mit dem in der letzten Walzphase voneinander abweichenden Reibbedingungen erklären. Die geschobene Flanke war am Walzende direkt mit der Werkzeugverzahnung im Eingriff und wurde dementsprechend beim Auskämmen des Werkzeuges höher auf Reibung beansprucht. Bei den Walzergebnissen der gemittelten Rautiefe R_z wies die Zugflanke höhere Rauheitswerte (1 bis $1,4\mu\text{m}$) als die Schubflanke ($0,6$ bis $0,8\mu\text{m}$) auf, da in diesem Bereich größere Maximas auftraten.

Die gegenüber zerspanender Herstellung ($R_z = 4$ bis $6\mu\text{m}$) wesentlich besseren Oberflächengüten gewalzter Verzahnungen bewirken eine Verringerung des Auftretens von Graufleckigkeit beim Abwälzen der Fertigverzahnungen, wodurch das Auftreten von Pittingbildung stark reduziert werden kann. Weiterhin weisen gewalzte Räder aufgrund der höheren Oberflächengüten eine gesteigerte Dauerfestigkeit gegenüber vorgefrästen / geschliffenen Verzahnungen auf.

4 Ökologische, technologische und ökonomische Bewertung

Hinsichtlich der ökologischen Bewertung der neu zu entwickelnden, umformbasierten Fertigungsfolge der „Innvelo-Welle“ wurden die spezifischen Randbedingungen einer umweltfreundlichen, ressourcenschonenden Produktion sowohl in der präventiven Phase (Konstruktion/Design), der fertigungsspezifischen Phase (Fertigung/Produktion) als auch der Recycling-Phase angepasst und optimiert (Abbildung 66). Zielstellung war es dabei, sowohl in der konstruktiven als auch fertigungsseitigen Umsetzung der Projektaufgaben, eine maximale Ressourceneffizienz und eine höchstmögliche Reduzierung der auftretenden CO_2 -Emission zu generieren und dies sowohl in der Maschinennutzung als auch in der Materialausnutzung und Bearbeitung. Durch die Substitution material- und ressourcenintensiver Zerspanprozesse durch ressourceneffiziente Umformprozesse inklusive der realisierenden Maschinenteknik, konnten ökonomisch und ökologisch relevante Ergebnisse (Tabelle 4-7) realisiert werden.



Abbildung 66: ökologischer Ansatz bei der technologischen Umsetzung der „Innvelo-Welle“

Dabei basieren die Untersuchungen im ProGear auf die perspektivische Umsetzung der Elektromobilität speziell in Europa. Rund sechs Millionen Elektro-Neuwagen mehr sind dabei laut einer Prognose aus dem Jahr 2019 im Jahr 2030 vonnöten, um die von den Institutionen der Europäischen Union vereinbarte Reduktion der CO₂-Emissionen zu erfüllen (Abbildung 67).

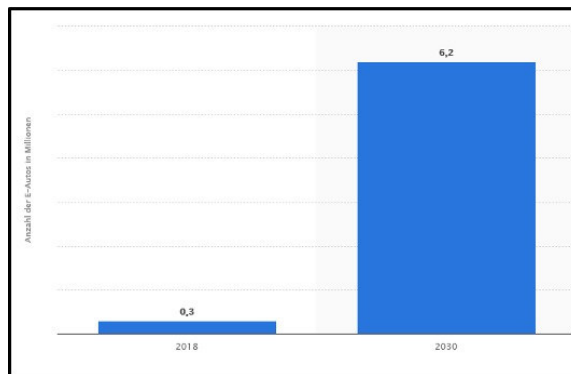


Abbildung 67: Prognostizierte Anzahl E-Autos zur Einhaltung der vereinbarten CO₂-Reduktion [02]

Die folgende Statistik (Abbildung 68) zeigt die prognostizierte Anzahl der Neuzulassungen von Elektroautos weltweit in den Jahren 2020 bis 2030. Bei den Werten handelt es sich um Prognosen. Laut der Quelle soll sich die Anzahl der Neuzulassungen allein in China im Jahr 2025 auf 14 Millionen belaufen. Bis zum Jahr 2030 soll die Anzahl weiter ansteigen.

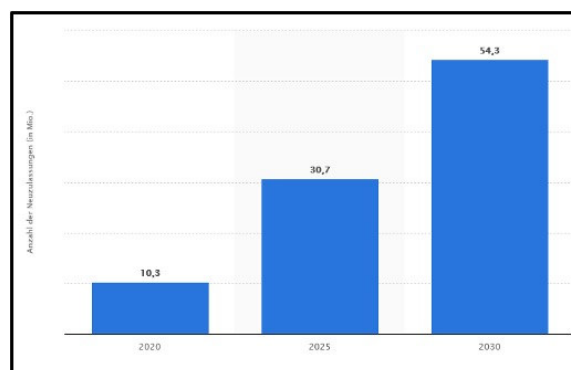


Abbildung 68: Prognostizierte Anzahl von E-Autos und Plug-in-Hybriden weltweit [03]

Diese Zahlen notwendiger Neuzulassungen von Elektroautos in den nächsten 10 Jahren zeigt zum einen den europa- und weltweiten Trend auf, speziell im Automobilbau die zwingende Notwendigkeit einer signifikanten CO₂-Einsparung endlich konsequent und zielführend umzusetzen, zum anderen eröffnen sich auch für die Automobilhersteller neue Chancen und Märkte.

Im Förder-Projekt ProGEAR wurde daher untersucht, welchen Einfluss eine umformbasierte Fertigung von Einzelkomponenten des E-Antriebes auf die Reduzierung des produktionsbedingten CO₂-Ausstoßes hat. Hintergrund ist dabei der Fakt, dass bei einer fast ausschließlichen Fertigung der Wellengeometrie für ein beispielhaftes Elektro-Fahrzeug („Innvelo“) durch Umformprozesse, eine signifikante Material- und Energieeinsparung realisiert werden kann. Fortführend kann man eine deutliche CO₂-Reduzierung darstellen, zum einen durch die energieeffizienteren Maschinen, zum anderen durch die Gewichtsreduktion der Komponente Getriebewelle und der daraus resultierenden CO₂-Einsparung. Nachfolgend ist die CO₂-Reduzierung im Herstellprozess der „Innvelo-Welle“ bezüglich relevanter Werkzeugmaschinen dargestellt. Vergleichend wurden die zerspanende Fräsmaschine GMX Linear von Gildemeister mit der umformenden Walzmaschine Rollex XL (3-Schicht-System a 21h Laufleistung pro Tag und 75 Prozent Maschinenauslastung) vergleichend betrachtet (Tabelle 4), in Bezug auf die Herstellung der wellenintegrierten Verzahnungen. Es wurde für die folgenden Hochrechnungen davon ausgegangen, dass 5% (310.000 Stück) der 6,2Mio. E-Fahrzeuge (Abbildung 67) mit der ProGear-Fertigungsroute realisiert werden. Wichtig ist, dass die im Projekt umgesetzte umformbasierte Fertigungsfolge der Getriebewelle auch für andere Bauformen und Fahrzeugtypen anwendbar ist und nicht auf die untersuchte „Innvelo-Welle“ beschränkt bleibt.

Tabelle 4: CO₂-Reduzierung aufgrund Substitution Fräsmaschine durch Walzmaschine

Parameter	Einheit	Fräsen	Walzen
Betriebsstunden pro Tag	h	21	
Arbeitstage pro Jahr	Tage	230	
Betriebsstunden pro Jahr bei Maschinenauslastung von 75%	h/a	3.622,5	
Nennleistung Maschine	kW	75	49
Energieverbrauch pro Jahr	MWh/a	271,7	177,5
Energieeinsparung pro Jahr	MWh/a	94,2	
CO ₂ -Emissionsfaktor aus Strommix 2019 [04]	g/kWh	401	
CO ₂ Emission pro Jahr	t	109	71,2
Einsparung an CO ₂ pro Jahr	t	37,8	
Stückzahl pro Jahr	-	310.000	
Produktionszeit pro Jahr (2min/Welle)	h	10.333,3	
notwendige Maschinen	-	3	
Einsparung an CO₂ pro Jahr	t	113,4	

Aus resultierend 3.622,5 Betriebsstunden (bei einer 75-prozentigen Auslastung) der Vergleichsmaschinen pro Jahr und den zugrundeliegenden Nennleistungen beider Maschinen, ergibt sich ein Energieverbrauch von 271,7MWh/a für die Fräsmaschine und 177,5MWh/a für die Walzmaschine. Daraus resultiert eine Energieeinsparung von 94,2MWh/a für die maschinelle Substituierung des herkömmlichen Fräsprozesses durch das innovative und ressourceneffizientere Walzen. Bei einem CO₂-Emissionsfaktor von 401g/kWh resultiert, bezogen auf die zu vergleichenden Werkzeugmaschinen, eine Reduzierung des CO₂-Verbrauches von 37,8t pro Jahr und einer Maschine. Bezogen auf den Großserieneinsatz von 3 Werkzeugmaschinen (notwendige Anzahl zu Herstellung der Wellen-Anzahl pro Jahr), würde die CO₂-Einsparung pro Jahr 113,4t betragen. Die Annahme die relevante CO₂-Reduzierung auf 3 Maschinen zu beziehen, resultierte aus den umsetzbaren Stückzahlen für die nachfolgend dargestellte Serienproduktion der Wellengeometrie. Nachfolgend wird in Tabelle 5 die CO₂-Reduzierung aufgrund der Masseeinsparung infolge des Einsatzes der ProGear-Fertigungsroute (Variante 3) dargestellt. Dabei ist zu betrachten, dass die Ausgangsform für die Zerspannung Stabstahl, die Ausgangsform für die Umformung Rohrmaterial war.

Tabelle 5: CO₂-Reduzierung aufgrund Masseeinsparung

Parameter	Einheit	Zerspannung	Umformung
Masse Vorform	g	1350	760
Stückzahl pro Jahr	-	310.000	
Masse Vorform pro Jahr	t	418,5	235,6
Graue Energie [05] hochlegierter Stahl (95,7 MJ/kg) [06]	kWh/kg	26,6	
Energieverbrauch Stahlherstellung pro Jahr	GWh/a	11,1	6,3
Energieeinsparung pro Jahr	GWh/a	4,8	
CO ₂ -Emissionsfaktor aus Strommix 2019	g/kWh	401	
CO ₂ Emission pro Jahr	t	4.451,1	2.526,3
Einsparung an CO₂ pro Jahr	t	1.924,8	

Tabelle 5 stellt die CO₂-Reduzierung aufgrund der Masseeinsparung respektive bei der Stahlherstellung der „Innvelo“-Welle dar. Bei der herkömmlich zerspannten Welle wird mit einem Stabstahl als Ausgangsform gearbeitet, die entsprechende Vorform wiegt 1,35kg. Bei der umformenden Bearbeitung gehen wir von einer rohrförmigen Ausgangsform aus, welche 0,76kg wiegt. Aus der resultierenden Energieeinsparung pro Jahr und dem CO₂-Emissionsfaktor ergibt sich, bei Anwendung der ProGear-Prozesskette, eine Einsparung an CO₂ von 1.924,8t pro Jahr.

Tabelle 6: CO₂-Reduzierung durch Späne-Aufbereitung (KSS = Kühlschmierstoff)

Parameter	Einheit	Zer-spanung	Umfor-mung
Masse Vorform	g	1350	760
Einbaugewicht	g	890	680
Masse Späne	g	460	80
Stückzahl pro Jahr	-	310.000	
Masse an Spänen pro Jahr	t	142,6	24,8
10% KSS [07] haftet an Spänen pro Jahr	t	14,3	2,5
8% KSS [07] ist durch Späneaufbereitung rückgewinnbar pro Jahr	t	11,4	2,0
2% KSS [07] ist nicht erfassbar bzw. geht verloren pro Jahr	t	2,9	0,5
Energieaufwand zur KSS-Herstellung [08]	kWh/kg	877,5	
Energieverbrauch zur KSS-Herstellung pro Jahr	MWh	2.544,8	438,8
CO ₂ -Emissionsfaktor aus Strommix 2019	g/kWh	401	
CO ₂ Emission zum Ausgleich der KSS- Menge pro Jahr	t	1.020,5	175,9
Einsparung an CO₂ pro Jahr	t	844,6	

In Tabelle 6 ist die CO₂-Reduzierung der beiden Prozessketten (zerspanend, umformend) durch die differierende Späne-Aufbereitung dargestellt. Bezüglich der differierenden Massen für die Vorformen und die ermittelte Masse an anfallenden Spänen pro Prozesskette, resultiert bei einer angenommenen Stückzahl von 310.000 Wellen pro Jahr, eine signifikante Materialeinsparung von 117,8t Stahl. Bei Annahme des Anhaftens von 10% Kühlschmierstoff an den Spänen und der optionalen Rückgewinnung des Kühlschmierstoffes von 8%, resultiert ein Verlust von 2% Kühlschmierstoff pro Jahr. Dies ergibt, bei einem Energieaufwand zur Kühlschmierstoff-Herstellung von 877,5kWh/kg signifikant abweichende Energieverbräuche für beide Prozessketten. Bei einem Emissionsfaktor von 401g/kWh ergibt sich für die umformbasierte Prozesskette durch den geringeren Aufwand für die Späne-Aufbereitung, eine CO₂-Einsparung von 844,6t pro Jahr.

Tabelle 7: Zusammenfassung CO₂-Einsparungen

Bereich	Einsparung CO ₂ in t/Jahr
Einsatz Walzmaschine	113,4
Ressourcenschonung durch umformintegrierte Prozesskette	1.924,8
Reduzierung Späneaufbereitung und reduzierte KSS-Menge durch Einsatz umformintegrierte Prozesskette	844,6
Gesamt	2.882,8

Tabelle 7 stellt die resultierende Gesamteinsparung der CO₂-Emission für den Gesamtprozess aus Maschineneinsatz, Materialeinsparung und Späne-Entsorgung dar.

In Summe können dabei 2.882,8t CO₂ pro Jahr eingespart werden, bei einer angenommenen Stückzahl zu fertiger Wellen von 310.000, entsprechend einer 5-prozentigen Fertigung für Wellen im Jahr 2030.

Vergleichend zu diesen Werten für die CO₂-Einsparung im Fertigungs- und Post-Fertigungsprozess inklusive der resultierenden Späne-Entsorgung für entsprechende Getriebe(hohl)wellen zum Einsatz in Elektro-Autos, kann beispielsweise die Pro-Kopf-CO₂-Emission in Deutschland herangezogen werden. Bei einem Durchschnittswert in Deutschland von 8,7t CO₂-Verbrauch Pro-Kopf bzw. pro Person, könnte bei der neuen, umformbasierten Prozesskette allein für die Fertigung nur einer Getriebehohlwelle, der CO₂-Verbrauch von 331 Personen im Jahr substituiert werden. Bei Annahme einer 10prozentigen Fertigungstiefe, entsprechend einer Fertigung von 620.000 Wellen im Jahr 2030, könnte der CO₂-Verbrauch von 662 Personen eingespart bzw. substituiert werden.

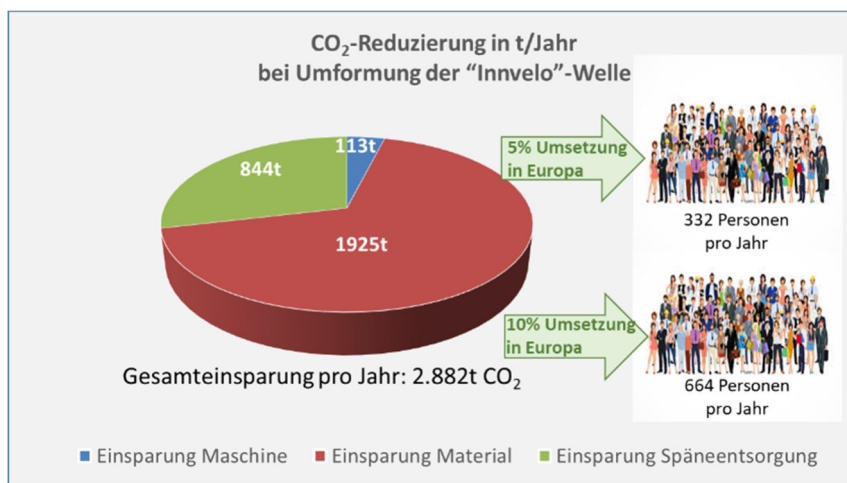


Abbildung 69: Reduzierung an CO₂ anhand der untersuchten Umformung der „Innvelo“-Welle

Aus Abbildung 69 und resultierend aus Abbildung 67 kann man ableiten, dass die umformtechnische Umsetzung nur einer Welle (am Beispiel „Innvelo“) einen signifikanten Beitrag zur CO₂-Emission leisten kann. Konservativ wurde in der vorliegenden Projekt-Auswertung von der Umsetzung einer Welle und einer 5...10-prozentigen Umsetzung in der europäischen Herstellung von Elektrofahrzeugen (Prognose für 2030) ausgegangen.

Natürlich ist die umformtechnische Herstellung von verzahnten Getriebe(hohl)wellen für Elektroanwendungen im Fahrzeugbereich auch auf einen höheren Anteil und eine größere Anzahl zu fertiger Wellen anwendbar.

Der ökologische Mehrwert des ProGEAR-Vorhabens ist dementsprechend durch eine energie- und ressourceneffiziente Realisierung der Fertigungsprozesse typischer Getriebekomponenten zu definieren, die in wartungsarmen Funktionsbauteilen auf Basis eines geringeren Materialeinsatzes sowie effektiver Leichtbauweise hergestellt werden können. Die Umsetzung konstruktiver Leichtbauinnovationen wurde durch den Einsatz progressiver Umformtechnik ermöglicht, die durch ein nahezu

massekonstantes Fertigungsregime eine deutliche Verminderung konventionell notwendiger Spannsorgungsvorgänge generiert wird.

Das Forschungsvorhaben ProGEAR erarbeitet demzufolge einen signifikanten ökologischen wie auch ökonomischen Mehrwert, wobei der ökonomische Mehrwert nachfolgend auf die Herstellung herkömmlicher Getriebewellen bezogen werden soll. In Anbetracht der gegenwärtigen deutschen Automobilfertigung von ca. 5,7 Millionen konventionellen Fahrzeugen pro Jahr und der Annahme, dass zukünftig zunächst 10% der hergestellten Pkws von ProGEAR profitieren könnten, ergibt sich allein in Deutschland ein Marktpotenzial von 570.000 Systemen. Beispielhaft konnte für die zu untersuchende „Innvelo“-Welle eine Masseeinsparung am Bauteil von 23,6% realisiert werden, da das Gewicht der Welle von 890g auf 680g reduziert werden konnte. Eine Verallgemeinerung der Projektergebnisse auf herkömmliche Getriebevollwellen, inklusive einer bezogenen Masse von ca. 4kg, würde demzufolge ein Einsparpotenzial von nahezu 1kg pro Bauteil nach sich ziehen.

Die geplante Zielvorgabe bei Projektstart war eine Massereduktion von 20% für das zu untersuchende und umzuformende Bauteil-Gewicht der „Innvelo“-Welle. Diese Zielvorgabe konnte also mit 23,6% deutlich übertroffen werden.

Insgesamt ist damit die Ressourceneffizienz bei herkömmlichen PkW mit nahezu 570t quantifizierbar, die im Rahmen konventioneller Verfahren in Form von Spänen zu entsorgen wären.

Eine entsprechende Kostenreduktion bei herkömmlichen PkW und einer 10-prozentigen Anwendungstiefe (570.000 Wellen pro Jahr, Material 42CrMo4), würde demzufolge bei einem Preis von ca. 3 Euro je kg, rund 1,71 Mio. Euro betragen.

Die optionale Möglichkeit Antriebskomponenten wie Getriebewellen und Verzahnungen umformend zu fertigen, definiert die energieeffiziente Prozesskette mit integrierter Umformung als Basisinnovation mit hohem wirtschaftlichem Potenzial. Durch die positiven Projekt-Ergebnisse ist davon auszugehen, dass die neu gestaltete Prozesskette sich nicht nur für den vorliegenden Anwendungsfall durchsetzt. Vielmehr ist davon auszugehen, dass aufgrund wirtschaftlicher, ökologischer und vor allem energieeffizienter Effekte auch der Bedarf besteht, die Lösung auf andere Branchen und Produkte bzw. Produktgruppen zu übertragen. Hier können beispielsweise die Luft- und Raumfahrt und der Maschinenbau partizipieren.

Literatur- und Quellenverzeichnis

Nummer	Quelle
01	https://www.autoform.com/de/glossar/hydroforming/
02	https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1036377/umfrage/benoetigte-e-autos-zur-einhaltung-der-co2-emissionsziele-in-der-eu/
03	https://de.statista.com/statistik/daten/studie/973273/umfrage/prognostizierte-anzahl-der-neuzulassungen-von-elektroautos-weltweit/
04	https://de.statista.com/statistik/daten/studie/38897/umfrage/co2-emissionsfaktor-fuer-den-strommix-in-deutschland-seit-1990/
05	https://www.energie-lexikon.info/graue_energie.html
06	https://nachhaltiges-bauen.de/baustoffe/Stahl
07	DBU Abschlussbericht: „Entwicklung einer Kleinzentrifuge zur dezentralen Trocknung von Kühlschmierstoffen behafteten Spänen“ AZ 11024
08	VDI Studie: „Ökologische und ökonomische Bewertung des Ressourcenaufwands - Wassermischbare Kühlschmierstoffe“
09	Heinz Linke: „Stirnradverzahnungen“ Carl Hanser Verlag 2010
10	Mike Lahl: „Eigenschaftsanalyse bei umformintegrierter Prozesskette zur Verzahnungsherstellung“ Forschungsvorhaben Nr. 642 I