

Gemeinschaftlicher Abschlussbericht

Verbundprojekt Stahl-Schnecke

**Kupfer- und zinnfreie Schneckenradgetriebe
hoher Effizienz und Leistungsdichte –
Technologische Substitution von Bronze durch Stahl**



GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Förderkennzeichen 03X3576

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren

Projektpartner und Ansprechpartner:

Bonfiglioli Vectron MDS GmbH Europark Fichtenhain B6 47807 Krefeld	Dipl.-Ing Daniel Chmill Tel.: +49 2151/8396121 Daniel.chmill@Bonfiglioli.com
Lehrstuhl für Industrie- und Fahrzeugantriebs- technik der Ruhr-Universität Bochum Universitätsstraße 150 44801 Bochum	Prof. Peter Tenberge <u>Projektbearbeiter:</u> Viacheslav Kliteynikov, M. Sc.
Getriebeabteilung des Lehrstuhls für Werk- zeugmaschinen am WZL der RWTH - Aachen Steinbachstraße 19 52056 Aachen	Prof. Christian Brecher <u>Projektbearbeiter:</u> Jens Brimmers M.Sc
Liebherr-Verzahntechnik GmbH Kaufbeurer Strasse 141 87437 Kempten	Dr. Oliver Winkel
ELTRO GmbH Arnold-Sommerfeld-Ring 3 52499 Baesweiler	Dr. Uwe Huchel
ALD Vacuum Technologies GmbH Wilhelm-Rohn-Str. 35 63450 Hanau	Dr. Thorsten Leist
Oerlikon Balzers Coating Germany GmbH Am Ockenheimer Graben 41 55411 Bingen	Dr. Matthias Janke
Klueber Lubrication Muenchen SE & Co. KG Geisenhausenerstraße 7 81379 München	Dr. Michael Hochmann <u>Projektbearbeiter:</u> Matthias Pfadt, M. Sc.
Elgeti Engineering GmbH Philipsstraße 8 52068 Aachen	Hagen Elgeti
Rösler Oberflächentechnik GmbH Vorstadt 1 96190 Untermerzbach	Florian Walter
ZeMA – Zentrum für Mechatronik und Automa- tisierungstechnik GmbH Gewerbepark Eschberger Weg 66121 Saarbrücken	Prof. Rainer Müller <u>Projektbearbeiter:</u> Leonie Schirmer, M. SC.
Hochschule Niederrhein Fachbereich Maschinenbau und Verfahrenstechnik Reinarzstraße 49 47805 Krefeld	Prof. Andreas Hoppermann
BGH Edelstahl Siegen GmbH Industriestraße 9 57076 Siegen	Dr. Frank Hippenstiel <u>Projektbearbeiter:</u> Dr. Karola Klenke

Inhaltsverzeichnis

1. Gesamtziel des Vorhabens.....	4
1.1. Bezug zu den förderpolitischen Zielen.....	4
2. Stand der Wissenschaft und Technik.....	8
3. Geometrieauslegung	15
3.1. Ergebnisse der Ruhr-Universität Bochum	15
3.1.1. Forschungsziel	15
3.1.2. Erzielte Ergebnisse	16
3.1.3. AP 1 Literaturrecherche	16
3.1.4. AP 3 Auslegung.....	18
3.2. Ergebnisse des WZL (RWTH Aachen)	39
3.2.1. Erzielte Ergebnisse im Forschungsvorhaben	39
3.2.2. Erweiterung der FE-basierten Zahnkontaktanalyse und des FE- Strukturgenerators um die Eigenschaften von Schneckengetrieben	39
3.2.3. Zwischenfazit.....	49
3.2.4. Sensitivitätsanalyse auf Basis realer Messdaten.....	50
3.2.5. Zwischenfazit.....	61
3.2.6. Anhang	61
4. Materialentwicklung (BGH)	66
4.1. Executive Summary	66
4.2. Einleitung und Zielsetzung	67
4.3. Vorgehensweise und Lösungsansätze	67
4.4. Fertigungsweg, Erprobung und Bereitstellung der Werkstoffe	71
4.4.1. Materialherstellung Phase 1 - Vorversuche:	72
4.4.2. Materialherstellung Phase 2 - Prototypen:.....	74
4.4.3. Materialherstellung Phase 2 - erweitert.....	75
5. Wälzfräsen (LIEBHERR)	76
5.1. Stand der Technik	76
5.2. Erzielte Ergebnisse	82
5.2.1. Werkzeugauslegung	83
5.2.2. Vorfräsen	85
5.2.3. Fertigfräsen	88
5.2.4. Hartfeinbearbeitung	92
5.2.5. Phase 2	99
5.3. Fazit.....	105
6. Vakuum Einsatzhärten und Hochdruck Gasabschrecken (ALD)	106
6.1. Aufgabenstellung	106
6.2. Erzielte Ergebnisse	107
7. Plasmanitrieren (Eltropuls)	118
7.1. Motivation	118
7.2. Ergebnisse.....	119
8. Oberflächenveredelung	121
8.1. Oberflächenstrahlen und Gleitschleifen (Rösler)	121
8.1.1. Strahlen	121
8.1.2. Gleitschleifen	122
8.1.3. Ergebnisse.....	123
8.1.4. Fazit.....	124

8.2.	Beschichten (Oerlikon Balzers)	125
9.	Schmierstoffentwicklung (Klüber Lubrication)	127
9.1.	Einleitung	127
9.2.	Schmierstoffentwicklung	127
9.2.1.	Screeningmethoden	128
9.2.2.	Ergebnisse Schmierstoff Screening	130
9.2.3.	Externe Bauteilprüfungen	132
10.	Montage (ZEMA)	135
10.1.	Ausgangslage und Motivation	135
10.2.	Ziele und Vorgehensweisen im Forschungsprojekt und im Arbeitspaket	136
10.3.	Produkt- und Prozessanalyse eines Bronze- Schneckengetriebes	138
10.4.	Toleranzgerechte Produkt- und Prozessgestaltung für Stahl- Schneckengetriebe	144
10.5.	Zusammenfassung und Ausblick	152
11.	Oberflächenanalyse (Hochschule Niederrhein)	154
11.1.	Einleitung	154
11.2.	Oberflächenanalyse der gefertigten Zahnräder	155
11.2.1.	Metallografische Analyse	155
11.2.2.	Ergebnisse der topografischen Analyse	156
11.3.	Oberflächenanalysen der tribologisch beanspruchten Schneckenrädern aus den Screeningtests	157
11.3.1.	Erstbeurteilung gelaufener Schneckenräder	157
11.3.2.	Metallografische Analyse der auf dem Prüfstand gelaufenen Schneckenräder	159
11.3.3.	Härtemessungen gelaufenen Schneckenräder	161
11.3.4.	AFM Analyse zur Qualifizierung physikalischer Änderungen im Grundgefüge	162
11.4.	Zusammenfassung „AP16 Oberflächenanalyse“	163
12.	Versuchsplanung (Bonfiglioli Vectron MDS GmbH)	165
12.1.	Fresstest (Elgeti Engineering)	167
12.1.1.	Einleitung	167
12.1.2.	Lebensdauertests - Methodik	167
12.1.3.	Parameter	170
12.1.4.	Ergebnisse	170
12.2.	Weiterführende Tests a=49 mm; a=63 mm	179
12.2.1.	Bonfiglioli Prüfstand	179
12.2.2.	Ergebnisse der weiterführenden Tests	181
12.2.3.	Zusammenfassung	183
12.3.	Weiterführende Tests mit a = 100 mm	184
12.3.1.	Prüfstandsuntersuchungen	184
12.3.2.	Verzahnungsmessung	201
12.3.3.	Zusammenfassung und Ausblick	204
13.	Prozesskettenbewertung	206
13.1.	Ergebnisse	206
13.1.1.	Kosten/ Nutzen Analyse	207
13.1.2.	Erfolgsaussichten und Verwertung	209

1. Gesamtziel des Vorhabens

Gegenstand dieses Forschungsantrages ist die Technologieentwicklung zur Substitution von Bronze (CuSn12Ni) aus Schneckengetrieben durch einen niedrig legierten Stahl. Bronze übernimmt in Schneckenradgetrieben die Funktion eines Einlaufwerkstoffes und gleicht so Fertigungs- und Montagetoleranzen aus. Kupfer und Zinn als Bestandteile der Bronze übernehmen aufgrund ihrer hohen Leitfähigkeit in innovativen Gebieten wie Erneuerbaren Energien und Elektromobilität wichtigere Funktionen als die Abriebfunktion in Schneckenradgetrieben. Zudem bringt die Verwendung von Bronze weitere im Folgenden beschriebene Nachteile.

Das Ziel ist die Substitution von Bronze (CuSn12Ni) durch niedrig legierten Stahl als Werkstoff für Schneckenräder in Schneckenradgetrieben.

Die Verwendung von Stahl anstelle von Bronze hat drei wesentliche Vorteile. Erstens wird Stahl in Deutschland hergestellt und macht die Industrie importunabhängig. Zweitens ist der Wirkungsgrad von Schneckenradgetrieben mit einer Stahl-Stahl-Paarung höher als bei einer Stahl-Bronze-Paarung. Aufgrund der Wirkungsgradsteigerung ergeben sich Downsizing - Potentiale bei der elektrischen Maschine, die das Getriebe antreibt. Drittens ist die Tragfähigkeit der Stahl-Stahl-Paarung höher, wodurch Downsizing - Effekte beim Getriebe erzielt werden können, die wiederum Materialeinsparungen ermöglichen.

Die technologische Motivation für dieses Vorhaben liegt in den Versuchsergebnissen zurückliegender Untersuchungen. Es zeigte sich, dass die Substitution von Bronze bei Schneckenrädern durch Stahl unter bestimmten Randbedingungen und innerhalb bestimmter Einsatzgrenzen funktionierte. Jedoch hat sich keine allgemeingültige Lösung herauskristallisiert. Die Schäden waren nicht reproduzierbar. Die Divergenz in den Ergebnissen ist auf ungenügende Verzahnungsqualitäten, Montagetoleranzen, Oberflächengüten und Schmierstoffe zurückzuführen. Diese Ungenauigkeiten werden heute durch den Einsatz von Bronze als Einlaufwerkstoff ausgeglichen.

Die erfolgreichen Versuche zeigen jedoch auch das Potential der Stahl-Stahl-Paarung. Die Wirkungsgrade und die Tragfähigkeiten der Stahlräder liegen höher als die der Bronzeräder. Die mangelnde Stringenz der bisherigen Versuchsergebnisse verhindert heute jedoch die Überführung in die Praxis.

1.1. Bezug zu den förderpolitischen Zielen

Beitrag zur Ressourceneffizienz

Bronze als Abriebwerkstoff einzusetzen, ist auf lange Sicht nicht ressourcenschonend. Die Elemente der Bronze, Kupfer und Zinn, übernehmen in zukunftsweisenden Produkten elementare Funktionen. In den Bereichen der Elektromobilität, Windenergiegewinnung und Elektronik tragen Kupfer und Zinn aufgrund Ihrer guten Leitfähigkeit zu einer Verringerung des CO₂-Ausstoßes bei.

Zusätzlich werden CO₂-Emissionen unmittelbar durch die Substitution von Bronze in Schneckenradgetrieben reduziert. Die Reibpaarung Stahl-Stahl hat einen niedrigeren Reibwert als die Reibpaarung Stahl-Bronze. Zudem wird bei einer Stahl-Stahl Paarung der Abrieb fast eliminiert. Bei Bronzerädern kontaminiert der Abrieb das Getriebeöl

und führt zu Reibungserhöhung. Durch die Verwendung von Stahl ist in vorangegangenen Untersuchungen eine Wirkungsgradsteigerung von ca. 10% erreicht worden. Dies führt bei 2,5 Millionen pro Jahr neu angeschafften Schneckenradgetrieben in Deutschland zu einer Einsparung von 440 Tausend MWh im ersten Jahr, vgl. Kapitel 5.

Durch die Wirkungsgradsteigerung bietet sich darüber hinaus die Möglichkeit zur Verkleinerung des Elektromotors. Abhängig von der geforderten Leistung kann durch die Verbesserung des Wirkungsgrades ein kleinerer Elektromotor gewählt werden (downsizing).

Weiterhin ergeben sich durch Schneckengetriebe mit Stahlrädern Einsparungen beim Recyclingprozess. Ein Getriebe mit einem Bronze-Schneckenrad kann nicht als Stahlschrott behandelt werden. Die Bronze führt bei der Herstellung von Stählen zu unzulässigen und unerwünschten „Verunreinigungen“. Die Bronze muss vor dem Verschrotten sehr aufwendig aus dem Schneckengetriebe entfernt werden.

Die Stahl-Stahl-Paarung erhöht zudem die Materialeffizienz. Stahlschneckenradgetriebe können kleiner konstruiert werden und mehr Leistung übertragen (Steigerung der Leistungsdichte). Stahl hat eine höhere Festigkeit als Bronze. Durch eine kompaktere Bauweise können zusätzliche Ressourcen bei den Gehäusen und weiteren Peripheriekomponenten eingespart werden. Der vernachlässigbare Verschleiß steigert die Lebensdauer und reduziert zusätzlich Wartung und Wiederbeschaffungsaufwände.

Beitrag zur High Tech Strategie

Der Lösungsansatz Bronze als Einlaufwerkstoff einzusetzen ist industriell seit Jahrzehnten etabliert und leicht zu kopieren. Die Fertigungsprozesse zur Schneckenradherstellung sind seit Jahrzehnten nicht weiter entwickelt worden, so dass Bronze heute nicht substituiert werden kann.

Die Substitution der Bronze setzt einen High Tech Ansatz voraus. Entweder die Einlaufeigenschaften werden durch die Kombination von Stahl und Wärmebehandlung substituiert oder die Fertigungs- und Montagegenauigkeit werden gesteigert, so dass die Einlaufeigenschaften der Bronze unnötig werden.

Das Projekt setzt eine innovative ganzheitliche Betrachtung der Wertschöpfung und Anwendung von Schneckengetrieben als Lösung an, beginnend mit der geometrischen Auslegung, Werkstoffwahl, Wärmebehandlung sowie Optimierung der Zahnflankenoberflächen und des Tribosystems. Der Ansatz berücksichtigt die Fertigungshistorie des Werkstoffes, dessen Gefüge durch jeden einzelnen Schritt der Wertschöpfungskette geprägt wird. Das Projekt soll durch ein interdisziplinäres Team von Technologieführern aus der Industrie und Hochschulen bearbeitet werden. Frühere Forschungsprojekte zur Substitution der Bronze sind im Wesentlichen gescheitert, weil die Betrachtungen nicht ganzheitlich waren und Synergien zwischen den verschiedenen Disziplinen zu wenig ausgenutzt wurden. Die Chance dieses Vorhaben in einem geförderten Verbundprojekt durchzuführen und die Fortschritte der letzten 15

Jahren auf den einzelnen Teilgebieten stärken die Aussichten auf eine erfolgreiche Projekt-Durchführung enorm.

Strategische Relevanz von Kupfer und Zinn

Kupfer und Zinn als Bestandteile der Bronze müssen aus dem Ausland importiert werden. Die Förderländer sind Chile, China, Indonesien und andere, siehe **Abbildung 1**. Deutschland ohne eigene Kupfer- und Zinnförderung ist heute und in Zukunft auf Importe angewiesen, die sehr stark von den politischen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen beeinflusst werden. Eine globale Verknappung aufgrund von Nachfragesteigerung und strategischer Exportbeschränkungen ist zu befürchten. Die Substitution der Bronze durch Stahl verringert die Importabhängigkeit.

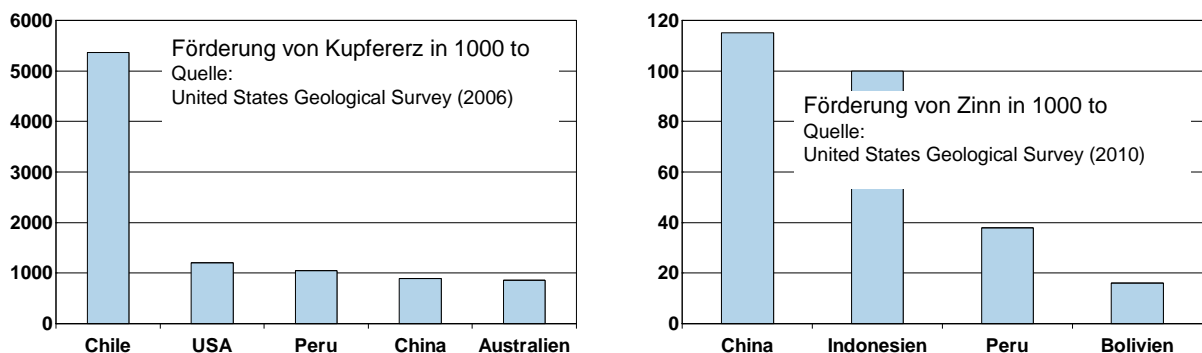


Abbildung 1: Förderländer von Kupfererz und Zinn

Kupfer besitzt nach Silber die höchste spezifische Leitfähigkeit und wird deshalb bevorzugt in der Elektroindustrie eingesetzt. Bis 2030 ist laut dem Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung ISI ein um 162 % steigender Bedarf an Kupfer zu erwarten. Die Nachfragesteigerung ist getrieben vom Ausbau der Elektromobilität und der Windenergienutzung sowie der steigenden globalen Nachfrage nach Elektronikartikeln. Zudem tritt ab 2015 im Rahmen der gesetzlichen Durchführungsmaßnahme nach EuP die IE3 Pflicht für Motoren in Kraft, die es beispielsweise notwendig macht Kupferrotoren anstelle von Aluminium-Rotoren einzusetzen.

Bei Zinn unterteilt sich der Jahresweltverbrauch fast zu gleichen Teilen auf Weichlot (z. B. für Leiterplatten), Weißblech sowie Chemikalien & Pigmente. Aufgrund der Umstellung von Zinn-Blei-Lote auf bleifreie Lote mit Zinnanteilen > 95 % und der steigenden globalen Nachfrage nach Elektronikartikeln wird laut ISI ebenfalls ein steigender Zinnbedarf erwartet.

Ein Indiz für die strategische Relevanz ist nicht zuletzt der Rohstoffpreis. Die Kupfer- und die Zinnpreise haben sich am London Exchange Stock in den letzten 10 Jahren annähernd verzehnfacht, siehe **Abbildung 2**.

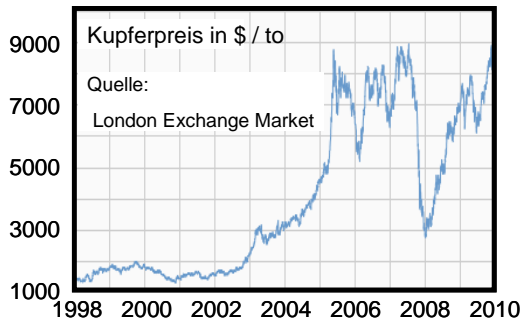


Abbildung 2: Preisentwicklung von Zinn und Kupfer

Bedarf bei den Unternehmen

Schneckengetriebe werden aufgrund ihrer hohen Übersetzung, Laufruhe und eines geringen Anschaffungspreises in allen Bereichen der Antriebstechnik eingesetzt. Typische Anwendungen für Schneckengetriebe sind Drehantriebe in der Fördertechnik für Automobilindustrie, Lebensmittelindustrie, Chemieindustrie, Flughafentechnik und Holzindustrie. Zusätzlich werden Schneckengetriebe für Stellantriebe verwendet z.B. für Solaranlagen. Schneckengetriebe werden in Deutschland hauptsächlich von KMUs produziert. Ein Projekterfolg würde ihre Wettbewerbsfähigkeit schnell steigern und auf lange Sicht erhalten.

Wissenschaftlich und technische Arbeitsziele

Die bisherigen Ausführungen zeigen, dass für die Substitution der Bronze entweder ein einlauffähiger Stahl entwickelt werden muss (Teilziel 1) oder der Bedarf des Einlaufs eliminiert werden muss (Teilziel 2).

In Anlehnung an die Teilziele geht die Projektidee von zwei neuen, bisher nicht verfolgten Lösungsansätzen aus. Es soll ein einlauffähiger Stahl entwickelt werden und/oder die Notwendigkeit des Einlaufens reduziert bzw. eliminiert werden. Dafür werden die in **Abbildung 3** als Pfeile dargestellten konkreten Lösungsansätze verfolgt. Die Ansätze werden auch kombiniert, um die Erfolgsaussichten zu steigern.

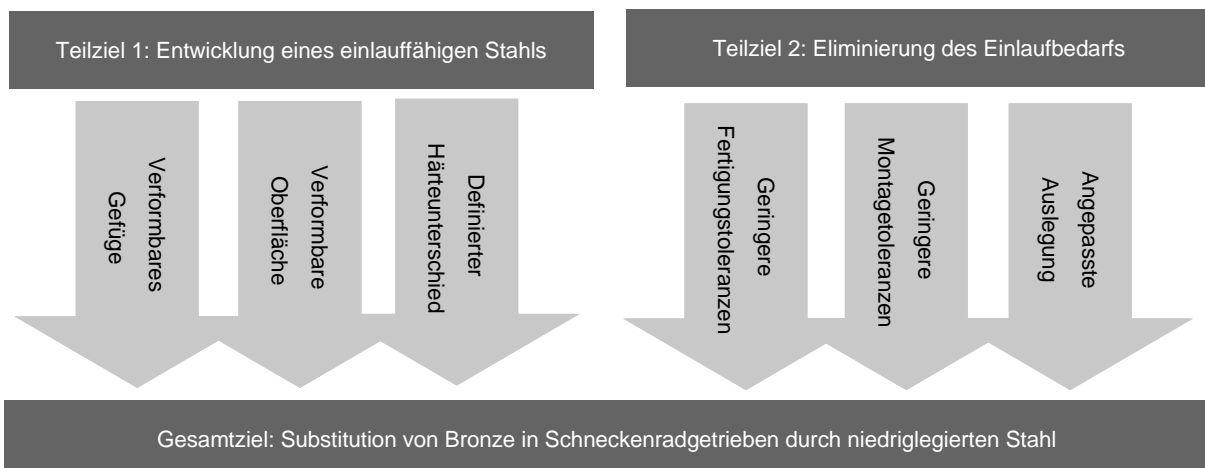


Abbildung 3: Lösungsansätze

Beim ersten Ansatz soll der Stahlwerkstoff durch metallurgische Behandlung Einlaufeigenschaften erhalten. Die Kombination aus Wärmebehandlung und Werkstoff soll hier soweit entwickelt werden, dass durch verformbare Oberflächenschichten ein Einlauf möglich ist. Dies kann durch einen verformbares Randgefüge (z. B. Restaustenit), eine weiche, verformbare Oberflächenschicht (Nachoxidieren) oder einen definierten Härteunterschied (definierter Verschleißpartner) bzw. die Kombinationen realisiert werden. Ein verformbarer Restaustenit an der Oberfläche besitzt die Eigenschaft durch mechanische Belastung plastisch auszuhärten, wodurch eine Anpassung der Flanken und somit ein gutes Tragbild erreicht wird. Beim Nachoxidieren wird freies Eisen und Eisennitrid in ein stabiles Eisenoxid verwandelt, so dass die Verbindungsschicht mit einer chemisch beständigen und mit der Verbindungsschicht fest verankerten matt-schwarzen Schutzschicht von ca. 1 µm versehen ist. Diese Schicht ist leicht verformbar und kann die Einlaufeigenschaften verbessern. Durch den Lösungsansatz mit zwei unterschiedlichen Härten von Schnecke und Schneckenrad wird ähnlich wie bei der Bronze/Stahlpaarung ein Verschleißpartner definiert.

Der zweite Ansatz besteht darin, die Notwendigkeit des Einlaufs zu beseitigen. Dies geschieht durch eine Verbesserung der geometrischen Form- und Lageabweichungen durch optimierte Fertigungs- und Montagethoden sowie optimierte Verzahnungsauslegung.

2. Stand der Wissenschaft und Technik

Üblicherweise werden für Schneckengetriebe Verzahnungen mit einer Schnecke aus Stahl und einem Schneckenrad aus Kupfer-Zinn (Bronze) verwendet. Aufgrund der hohen Kosten der Bronze versucht man bereits seit den 1960er Jahren Bronze durch andere Werkstoffe zu ersetzen.

Stand der Technik: Alternative Werkstoffe für Schneckenräder

Michels [M1] führt Untersuchungen an Schneckenrädern aus GG-25 und GGG-40 durch. Bei den Versuchen führt die geringe Anpassung durch Verschleiß der Schneckenräder zu Problemen. Durch eine Beschichtung mit Kadmiun lässt sich die Fresstragfähigkeit steigern. In der Praxis konnte die ermittelte Fresstragfähigkeit jedoch nicht erreicht werden, da in der Praxis auftretende Lastschwankungen zu ungünstigen Tragbildern führten.

Huber [H2] und Haag [H1] führen weitere Untersuchungen an Stahlschnecken mit Rädern aus GG-25 und GGG-40 durch. Zur Vermeidung von Fressern wird empfohlen die Gleitgeschwindigkeit auf 0,3 m/s zu beschränken.

Steingröver [S1] führt Versuche mit Schneckenrädern aus vergütetem Stahl (42CrMo4) durch. Bei kleinen Antriebsdrehzahlen weist diese Laufpaarung hohe Verschleißwerte auf. Bei höheren Drehzahlen kommt es schon unter geringen Belastungen zu Ausfällen durch Fressen. Als günstig erweist sich eine Kombination aus 42CrMo4V (Schnecke) und GGG-40 (Schneckenrad).

Langenbeck [L1] zeigt, dass sich durch eine Optimierung der Verzahnung hinsichtlich Flankenpressung und Schmierpalt auch für Schneckengetriebe mit der Werkstoffpaarung Stahl/Stahl vergleichsweise hohe Fresstragfähigkeiten erreichen lassen. Hier wurde ein gezielter Einlauf mittels eines Läppmittels zur Erzielung eines möglichst

großen Ausgangstragbildes durchgeführt. Diese Vorgehensweise ist jedoch als nicht praktikabel einzustufen.

Erfolgversprechend scheint der Einsatz der Paarung Stahl/Gusseisen bei Globoidschneckengetrieben zu sein, da hier im Vergleich zu Zylinderschneckengetrieben theoretisch günstigere Schmierbedingungen vorliegen. Vill [V1] führt Versuche mit Globoidschnecken aus Grauguss durch, welche Tragfähigkeitssteigerungen im Vergleich zu Zylinderschneckengetrieben mit Rädern aus Bronze nachweisen. Nachteilig ist der höhere Konstruktions- und Fertigungsaufwand globoidischer Schnecken im Vergleich zu Zylinderschnecken.

Sternberg [S2] führt Versuche mit Schneckenrädern aus Stahl durch. Bei kleinem Achsabstand ($a = 65\text{mm}$) kommt es nicht zu Ausfällen durch Fressen. Lediglich bei größeren Achsabständen treten bedingt durch die höheren Gleitgeschwindigkeiten Fresser auf. Sternberg sieht die Möglichkeit, durch höhere Verzahnungsqualitäten (Hartfeinbearbeitung) evtl. auf einen Einlauf verzichten zu können.

Lange [L2] untersucht die Möglichkeiten zur Steigerung der Tragfähigkeit von Schneckengetrieben mit Rädern aus GGG-40 und Schnecken aus 42CrMo4V. Durch eine Optimierung der Schneckenhärte und eine Flankenkorrektur am Schneckenrad wurde die Tragfähigkeit erheblich gesteigert. Bei sorgfältiger Tragbildeinstellung konnte auf einen Einlaufvorgang verzichtet werden. Lange weist darauf hin, dass die Fresstragfähigkeit durch verbesserte Verzahnungskorrekturen weiter gesteigert werden können.

Literaturverzeichnis:

- [M1] Michels, Schneckengetriebe mit Werkstoffpaarungen Stahl/Grauguss, Dissertation TU München 1968
- [H1] Haag, Selbsthemmung bei ruhenden Schneckengetrieben, FVA Vorhaben Nr. 138, Heft Nr. 368
- [H2] Huber, Versuche zur Ermittlung des Einflusses von Schmierstoffen und Werkstoffen auf das Gleit- und Verschleißverhalten von Schneckengetrieben, FVA Vorhaben Nr. 12, Heft Nr. 53
- [L1] Langenbeck, Untersuchungen zur Werkstoffwahl bei Schneckengetrieben, Antriebstechnik Heft Nr. 29/1990
- [L2] Lange, Hoch fresstragfähige Schneckengetriebe mit Rädern aus Sphäroguss, Dissertation TU München 2000
- [S1] Steingröver, Untersuchung zu Verschleiß, Verlustgrad und Fressen bei Zylinder-Schneckengetrieben, Dissertation TU München 1993
- [S2] Sternberg, Schneckenräder aus gehärtetem Stahl, FVA Vorhaben Nr. 236, Heft Nr. 488
- [V1] Vill, Schneckengetriebe zur Leistungsübertragung mit der Laufpaarung Stahl und Grauguss, Dissertation Ruhr Universität Bochum 1989

Vergleich mit alternativen Konzepten

Die Funktion eines Winkelgetriebes mit hoher Übersetzung kann von verschiedenen Getriebekonzepten übernommen werden. Neben dem Schneckenradgetriebe können Kegelrad- oder Hypoidgetriebe, eine Sonderform des Kegelradgetriebes, eingesetzt werden. Kegelradgetriebe werden dann mit einem Stirnradgetriebe kombiniert, um die hohen Übersetzungen zu erreichen. Der Wirkungsgrad dieser zweistufigen Getriebe liegt bei ca. 94% bei entsprechend höheren Produktionskosten. Zudem kann der Wirkungsgrad eines Schneckenradgetriebes erhöht werden, indem ein Schne-

ckenradgetriebe welches die Winkelfunktion übernimmt, mit einem Stirnradgetriebe kombiniert wird, um die entsprechende Übersetzung zu erreichen.

In **Abbildung 4** ist eine Fallstudie bei einer Übersetzung von $i=30$ und einer Leistungsaufnahme von 0,74 kW dargestellt. Für die bestehenden Konzepte ergibt sich eine Grenzlinie die von den Investitions- und Energiekosten aufgespannt wird. Unter der Annahme, dass bei dem neuen Konzept die Einsparung der Materialkosten von den Kosten für zusätzliche Bearbeitungsschritte aufgebraucht wird, so durchbricht das neue Konzept aufgrund der höheren Energieeffizienz diese Grenzlinie.

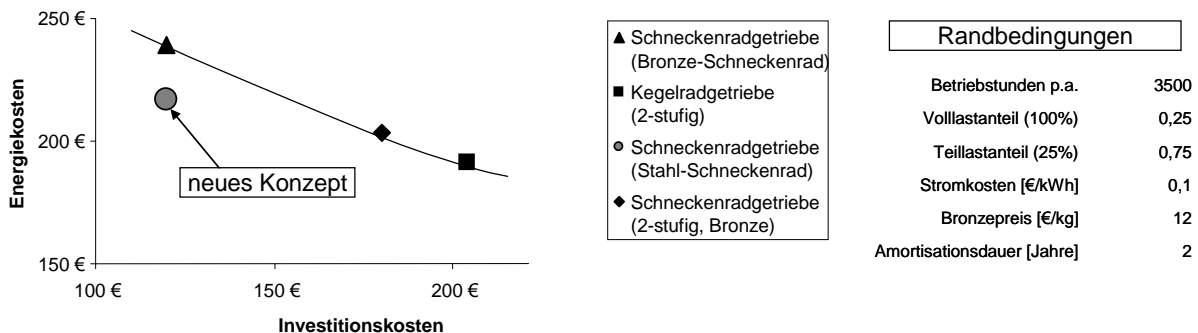


Abbildung 4: Vergleich von Winkeltriebkonzepten

Qualifikation der Verbundpartner

Mit einem Volumen von jährlich mehr als zwei Millionen Getrieben, Motoren und Frequenzumrichtern für die Antriebstechnik handelt es sich bei Bonfiglioli um einen der größten Hersteller antriebstechnischer Komponenten weltweit. Die **Bonfiglioli Vectron MDS GmbH** ist als Tochterunternehmen der Bonfiglioli Deutschland GmbH Teil der Bonfiglioli Gruppe. Bonfiglioli betreibt Fertigungsstandorte in Deutschland sowie Italien und hat den Hauptsitz der Getriebeentwicklung in Krefeld. Bonfiglioli ist Mitglied der Forschungsvereinigung Antriebstechnik (FVA) und zeichnet sich somit als Forschungsstelle aus. Als international agierendes Unternehmen mit dem Schwerpunkt der Produktion von Getriebe- und Antriebssystemen und einem jährlichen Umsatz von ca. 650 Millionen Euro und ca. 2500 Mitarbeitern weltweit hat sich Bonfiglioli als großer Systemlieferant etabliert und ist ein Endanwender des zu entwickelnden Produktes. In Deutschland sind etwa 300 Personen bei Bonfiglioli und 130 Personen am Standort in Krefeld beschäftigt. In der Rolle des Endanwenders tritt Bonfiglioli Vectron in diesem Projekt als Koordinator auf, führt zudem eine Prozesskettenbewertung durch und fasst die Ergebnisse in einer Konstruktionsrichtlinie zusammen. Bonfiglioli Vectron stellt zudem die Referenzgetriebe zur Verfügung. Bonfiglioli Vectron als Endanwender definiert im Wesentlichen die Anforderungen an die Verzahnungen in Bezug auf Festigkeit und Qualität.

Der Lehrstuhl für Industrie- und Fahrzeugantriebstechnik der Ruhr-Universität Bochum, **LIFA** (vormals LMGK) forscht seit 40 Jahren auf dem Gebiet der Schneckengetriebe. In dieser Zeit sind zahlreiche Dissertationen zur verbesserten Herstellung und zur erhöhten Tragfähigkeit von Schneckengetrieben entstanden. Ein Großteil dieser Arbeiten wurde im Rahmen der industriellen Gemeinschaftsforschung sowie in Sonderforschungsbereichen der DFG durchgeführt. Das Institut verfügt über weit

reichende Erfahrungen bei der Optimierung von Schneckenverzahnungen hinsichtlich Fertigung und Tragfähigkeit. Der Leiter der Forschungsstelle entwickelte theoretische Berechnungsmodelle, die noch heute die Grundlage der Tragfähigkeitsberechnung von Schneckengetrieben darstellt. Weiterhin ist er als Obmann des DIN-Arbeitskreises Schneckengetriebe tätig, in dem zum Beispiel die Tragfähigkeitsberechnungsnorm nach DIN 3996 entstanden ist.

Am Werkzeugmaschinenlabor (**WZL**) der RWTH Aachen existiert eine **Getriebeabteilung**, bestehend aus ca. 15 Wissenschaftlern, die sich ausschließlich mit dem Thema Zahnrad- und Getriebeuntersuchungen beschäftigen. Das WZL in Aachen beschäftigt sich seit über 100 Jahren mit Fragen der Produktionstechnik und seit über 50 Jahren mit Verzahnungen. Dabei wurde stets auf eine zeitnahe Verwertung der Ergebnisse durch die Industrie wertgelegt. Auf Initiative von Industriefirmen wurde 1956 der WZL - Getriebekreis mit dem Ziel gegründet gemeinsam die Forschung auf dem Gebiet der Verzahnungs- und Getriebetechnologie voranzutreiben. Die WZL - Getriebeforschung stellt damit die erste praktizierte Gemeinschaftsforschung in der Getriebe- und Antriebstechnik dar, bei der die Industrie zur Sicherstellung eines hohen Praxisbezugs der Forschungsaktivitäten direkt eingebunden ist. Am Lehrstuhl für Werkzeugmaschinen existiert eine jahrelange Erfahrung auf dem Gebiet der Simulationstechnik zu Verzahnungen. Der Leiter der Forschungsstelle ist u.a. Mitglied der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Produktionstechnik (WGP) und Sprecher des Exzellenzclusters „Integrative Produktionstechnik für Hochlohnländer“ der RWTH Aachen.

Das Zentrum für Mechatronik und Automatisierungstechnik, die **ZeMA** GmbH, hat als Gesellschafter das Land sowie die Universität und die Hochschule des Saarlandes. Es versteht sich als industrienaher Forschungspartner im Bereich Mechatronik und Automatisierung und besitzt mit seinen ca. 30 wissenschaftlichen Mitarbeitern eine herausragende Qualifikation. Unsere drei Schwerpunkte sind die Mikromechatronik, die Fluidmechatronik sowie die Montage- und Automatisierungstechnik.

Der Bereich Montage- und Automatisierungstechnik entwickelt und erprobt modulare und skalierbare Lösungen zur flexiblen Montage mit dem übergreifenden Ziel, komplexe Montage- und Inbetriebnahmeaufgaben zu lösen und für den Hochlohnstandort Deutschland wirtschaftlich zu gestalten. Insbesondere in der Montageautomation laufen diese Kompetenzen in hocheffiziente Montage- und Inbetriebnahmesysteme zusammen. Das Management der Montagetoleranzen ist eine übergeordnete Funktion, die dabei direkten Einfluss auf die erreichbare Produktqualität nimmt. Darüber hinaus hat der wissenschaftliche Leiter des ZeMA, Prof. Dr.-Ing. R. Müller, einen breiten industriellen Erfahrungshintergrund als Zulieferer von Montage-, Prüf- und Automatisierungssystemen für unterschiedliche Industriezweige. Zudem hat er einen ausgewiesenen Ruf als Wissenschaftler zunächst am WZL der RWTH-Aachen und nun am ZeMA. Im Bereich Montagetechnik wurden diese Kompetenzen schon in mehreren Forschungsprojekten umgesetzt.

ALD Vacuum Technologies ist Technologieführer auf dem Gebiet der Niederdruckaufkohlung mit anschließender Hochdruckgasabschreckung. ALD unterstützt die Entwicklung der Einsatzhärtestrategie um durch Verzugminimierung die Einlaufnot-

wendigkeit zu minimieren und durch Einstellen eines definierten Restaustenitgehaltes und Härteunterschieds eine einlauffähige Oberfläche zu erzeugen. ALD stellt die Ofentechnologie und Werkstattausrüstung für die Wärmebehandlung zur Verfügung und bringt seine Kompetenzen bei der Versuchsplanung mit ein. Des Weiteren werden bei ALD Härteversuche durchgeführt.

Das 1929 in München von Theodor Klüber gegründete Unternehmen **Klüber Lubrication** hat sich auf die Lösung tribologischer Fragestellungen durch hochwertige Schmierstoffe und Beratungsleistung spezialisiert. Weltweit arbeiten rund 1700 Mitarbeiter bei Klüber Lubrication, 130 von ihnen im Bereich Forschung und Entwicklung. 2009 erzielte Klüber Lubrication einen Umsatz von 325 Millionen Euro. Klüber Lubrication engagiert sich seit Jahren im Bereich Schneckengetriebe und hat zum einen durch die Mitarbeit in der FVA und zum anderen durch den Aufbau eines eigenen Schneckengetriebeprüfstands umfangreiches Knowhow bezüglich Schmierstoffe für diese Getriebebauform aufgebaut. Bereits heute werden kleine Schneckengetriebe mit der Werkstoffpaarung Stahl/Stahl mit Klüber Schmierstoffen geschmiert. Anhand von Modellprüfungen, z.B. SRV können in Vorversuchen geeignete Schmierstoffkonzepte auf ihre Verwendbarkeit geprüft werden.

Die **Liebherr-Verzahntechnik** wurde 1962 gegründet und zählt zu den weltweit führenden Herstellern von Verzahnungsfräs-, -schleif- und -stoßmaschinen. Derzeit sind ca. 850 Mitarbeiter beschäftigt. Liebherr stellt zudem die auf den Schleifmaschinen eingesetzten CBN-Werkzeuge selbst her. Liebherr fertigt für den Eigenbedarf Schneckengetriebe auf eigenen Maschinen und liefert entsprechende Maschinen und Technologie an seine Kunden. Liebherr ist aktives Mitglied im VDW, der FVA und dem WZL - Getriebekreis und stellt somit den engen Kontakt zur Forschung sicher. Der Projektverantwortliche ist Obmann des VDW-Arbeitskreises VIII Verzahntechnik, in dem kontinuierlich Verfahrensweiterentwicklungen im Bereich Wälzfräsen und Wälzschleifen gefördert werden.

Die **Elgeti Engineering GmbH** wurde 2009 gegründet und bietet Prüfstandskonstruktion, Versuchsdurchführung und Schadenskunde an. Die Firma ist ein KMU mit sechs Mitarbeitern. Der Firmengründer Hagen Elgeti ist erfahren im Bereich der Prüfstandskonstruktion und Untersuchung. Er arbeitete in den Untersuchungsabteilungen verschiedener Hochschulinstitute (IWM, WZL, IEM der RWTH) bevor er Geschäftsführer der TriboDrive GmbH war.

Die **BGH Edelstahlwerke** (BGH) produziert Edelstahl und Sonderlegierungen für höchste Beanspruchungen. Sie blickt dabei auf eine über 500 jährige Geschichte zurück: Schon 1467 wurde BGH als "Hammer an der Ferndorf" erwähnt - vor den Toren der Stadt Siegen. Jahrhunderte lang war das Schmieden die eigentliche Aufgabe des Unternehmens. Inzwischen setzt BGH zahlreiche weitere Technologien ein, um ein breites Spektrum an Produkten und Werkstoffen herzustellen - auch in kleinen Losgrößen. Die Entwicklung der inhabergeführten, mittelständischen Unternehmensgruppe zeichnet sich durch Beständigkeit und Marktorientierung aus. Viele Kunden schätzen besonders die Beratungskompetenz der BGH-Gruppe sowie den Service, den ein breites Lagersortiment ermöglicht. Im Rahmen des Projektes übernimmt die

Herstellung der Versuchswerkstoffe, die Erprobung und Definition der mechanisch-technologischen Eigenschaften im Lieferzustand.

Die Eltro GmbH wurde 1980 gegründet und beschäftigt ca. 100 Mitarbeiter. Das Verfahren der **ELTRO GmbH** ist ein umweltfreundliches und ressourcenschonendes Nitrierverfahren zum Schutz von Bauteilen und Werkzeugen gegen Verschleiß, Korrosion und zur Festigkeitssteigerung. ELTRO setzt dabei seit mehr als 25 Jahren auf die Vorteile einer Behandlung im Plasma. Finite Element Berechnungen, mathematische Belastungssimulationen und 3D Darstellungen sind Bestandteile der Systementwicklung. Auf der Basis der kundenspezifischen Gegebenheiten werden in der ELTRO Forschungsabteilung Verfahrenslösungen entwickelt und vorgeschlagen.

Oerlikon Balzers ist der Pionier und Marktführer auf dem Gebiet der Verschleißschutz-Beschichtung. Oerlikon Balzers entwickelt Schichten und Verfahren, produziert und verkauft Anlagen und Produktionseinrichtungen und bietet als einziges Unternehmen das Beschichten über ein dynamisch wachsendes Netz von fast 90 Fertigungszentren in Europa, Amerika und Asien als Lohnservice an. Oerlikon Balzers gehört zum Schweizer Oerlikon-Konzern, ein weltweit führender Hersteller von Produktionssystemen, Komponenten und Dienstleistungen für High-Tech-Produkte.

HS Niederrhein - Kompetenzzentrum „Surface Technology Applied Research (STAR)“

Die Hochschule Niederrhein, deren Ursprung auf die im Jahr 1855 gegründete Web- schule Crefeld zurückgeht, ist mit über 12000 Studierenden in 10 Fachbereichen zur zweitgrößten Fachhochschule in Nordrhein- Westfalen und zur viertgrößten Fach- hochschule der Bundesrepublik Deutschland mit über 30 Bachelor- und mehr als 20 Masterstudiengängen, zum Teil in dualen Studiengängen, herangewachsen.

Zu den Forschungsschwerpunkten der Hochschule Niederrhein zählen unter anderem die Kompetenzfelder „funktionale Oberflächen“ und „Energieeffizienz“, die in Fragen der Tribologie eng miteinander verknüpft sind. Zurückblickend auf eine lange Tradition der Lack- und Oberflächenchemie, wurde im Jahr 2011 das Kompetenzzentrum „Surface Technology Applied Research (STAR)“ im Fachbereich Maschinenbau und Verfahrenstechnik aus der Taufe gehoben. Die darin engagierten Professoren blicken auf eine langjährige Erfahrung aus industrieller und hochschulbasierter Forschungs- und Entwicklungstätigkeit zurück. Innerhalb des Kompetenzzentrums wird somit der komplette Entwicklungs- und Implementierungsprozess innovativer Oberflächentechniken von der Konstruktion über die Oberflächenbehandlungsverfahren bis hin zur produktionstechnischen Umsetzung abgebildet.

Innerhalb des Projektvorhabens wird die Hochschule Niederrhein die Aufgaben der Oberflächenanalyse ´modifizierter Zahnräder übernehmen und für die einheitliche, qualitätssichernde Dokumentation der Vergleichsdaten sorgen.

Arbeitsplan

Die Substitution der Bronze beeinflusst jeden einzelnen Schritt in der Produktentstehung eines Schneckengetriebes.

Deshalb wird auf dem Lösungsweg erstmals eine ganzheitliche Prozesskettenbetrachtung durchgeführt, **Abbildung 5**.

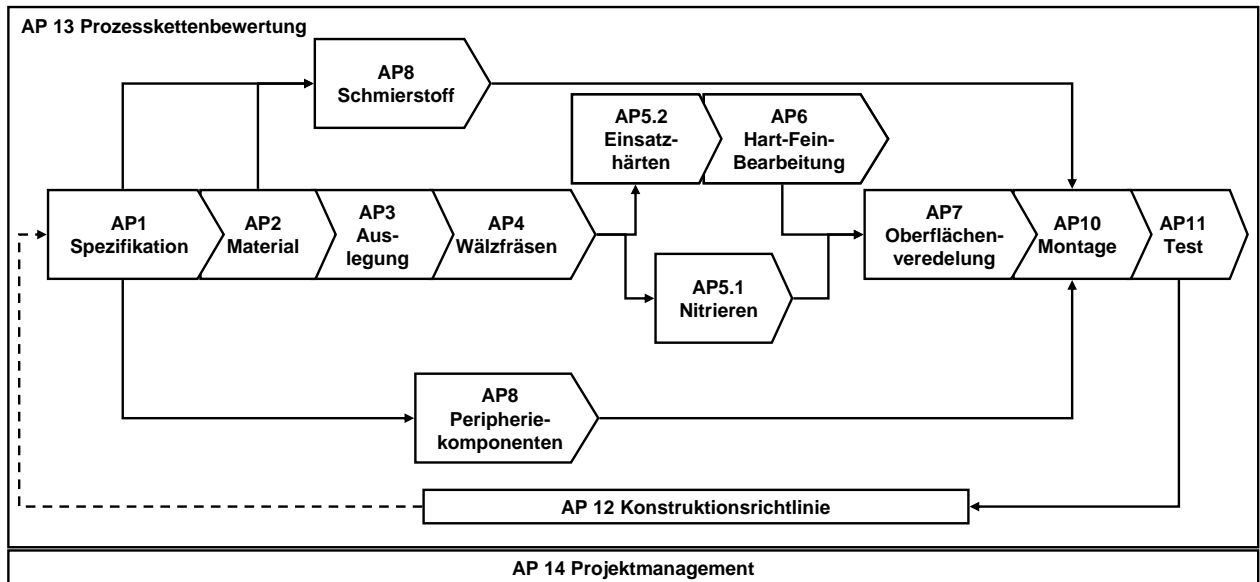


Abbildung 5: Lösungsweg

Das Projekt ist in zwei Phasen unterteilt, siehe Abbildung. In einer ersten Phase sollen möglichst viele Varianten abgetestet werden und im mittleren Meilenstein, vielversprechende Varianten ausgewählt werden. Die vielversprechenden Varianten sollen in der zweiten Projektphase optimiert und genauer geprüft werden.

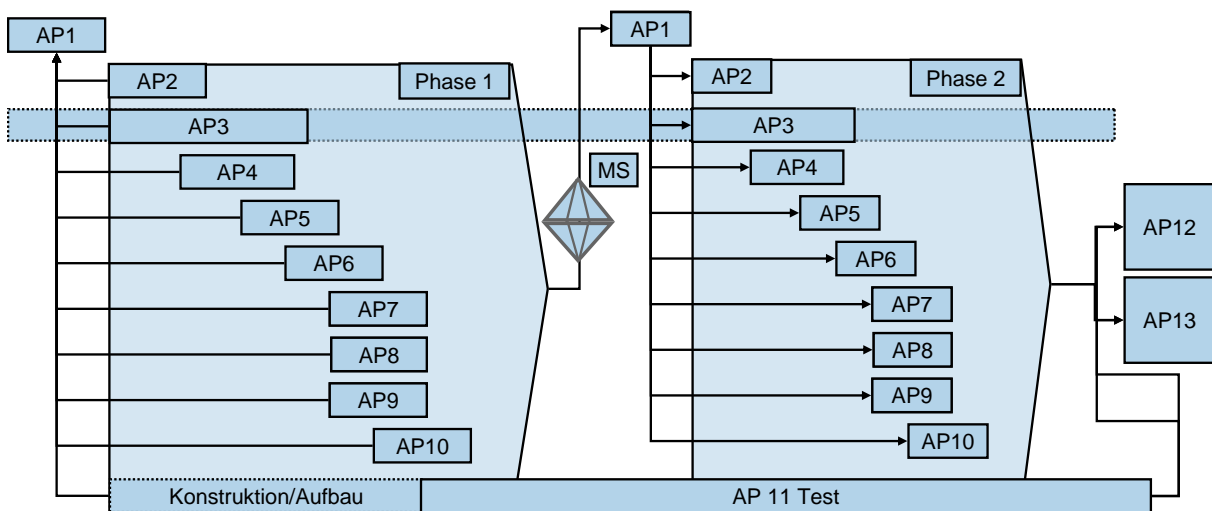


Abbildung 6: Lösungsweg

3. Geometrieauslegung

Verantwortlich

Bonfiglioli Vectron MDS GmbH

Ausführende Stellen

Ruhr-Universität Bochum, RWTH Aachen (WZL)

3.1. Ergebnisse der Ruhr-Universität Bochum

3.1.1. Forschungsziel

Im Rahmen des hier dokumentierten Projektes soll der Bronzwerkstoff in den Schneckengetrieben durch einen Einsatzstahl substituiert werden.

Bronzelegierungen als Schneckenradwerkstoff haben sich, wie oben schon beschrieben, in den Schneckengetrieben vor allem dadurch durchgesetzt, weil sie gute Einlaufesigenschaften aufweisen. Hierbei verschleißt die weiche Schneckenradflanke während des Einlaufvorgangs und passt sich an die Schneckenflanke an, sodass sich nach dem Einlauf das Tragbild nahezu über die gesamte Radflanke erstreckt.

Um für ein Schneckenrad aus einem vergleichsweise harten Stahlwerkstoff ein ebenfalls günstiges und großes Tragbild zu erreichen, müssen entweder für das Stahlrad Mindesteinlaufesigenschaften, möglichst ähnlich wie bei Bronze, durch gezielte Wärmebehandlungen erzielt werden, oder es müssen ausreichend hohe Fertigungsgenauigkeiten erreicht und die Montageabweichungen soweit minimiert werden, dass auf den gewöhnlichen Einlaufprozess verzichtet werden kann.

Eine in einem gewissen Maße einlauffähige Stahloberfläche eines Bauteils aus Einsatzstahl kann durch eine Wärmebehandlung erreicht werden, bei der nach dem Einsatzhärten ein relativ großer Restaustenitgehalt von bis zu 40% vorliegt. Die relativ weichen Restaustenitphasen erlauben dann einen Einlaufvorgang und wandeln sich dabei lastinduziert auch noch in Martensit um, so dass nach dem Einlauf eine Eingriffssituation mit einem guten Tragbild zwischen harten und damit tragfähigen Oberflächen vorliegt.

Um dabei den nötigen Einlaufbedarf des Stahlrades zu minimieren, muss eine angepasste Auslegung für die Verzahnungsgeometrie erfolgen. Die Verzahnung soll also bereits nach der Fertigung bzw. dem Einbau ein möglichst großes Tragbild aufwei-

sen. Damit ein Kantentragen und ein ungeeignetes Leerlauftragbild an der Verzahnung vermieden werden, müssen die Fertigungsmethoden optimiert und hohe Verzahnungsqualitäten erreicht werden.

Bei der dafür nötigen Prozesskette ist ein großer Wert auf geringe Montage- und Fertigungstoleranzen zu legen. Für die Substitution des Bronzeworkstoffes durch Stahl soll deshalb im Laufe des Vorhabens eine ganzheitliche Betrachtung der Verzahnungsauslegung, Werkstoffwahl, Wärmebehandlung und Optimierung des Schmierstoffes durchgeführt werden.

3.1.2. Erzielte Ergebnisse

Im Rahmen des Projektes führte die Forschungsstelle zunächst eine umfassende Literaturrecherche zum Stand der Forschung durch. (AP 1)

Im nächsten Arbeitsschritt erfolgte eine Auslegung von insgesamt sechs Verzahnungsgeometrien. Für drei verschiedene Achsabstände wurden jeweils eine Geometrie mit einer ZI- und einer ZC-Flankenform ausgelegt. (AP 3)

In Absprache mit den Verbundpartnern erfolgte ein Entwurf einer Dokumentationsrichtlinie für die jeweiligen Prozessschritte. (AP 11.2)

Weiterhin wurden an der Forschungsstelle Prüfstandsversuche für die Verzahnungen mit dem Achsabstand $a=100\text{mm}$ durchgeführt. (AP 11.6)

Während der ganzen Projektlaufzeit wurden zudem viele Verzahnungen im Messlabor der Forschungsstelle auf einem Klingelberg-Verzahnungsmesszentrum vermessen und die Messergebnisse den Projektpartnern über einen Online-Datenserver zur Verfügung gestellt. (AP 14 und AP 15)

Im Folgenden werden die erzielten Ergebnisse im Einzelnen erläutert.

3.1.3. AP 1 Literaturrecherche

Im Rahmen der Literaturrecherche fertigte die Forschungsstelle einen insgesamt 335-seitigen Bericht an, der sich in sechs Kapitel gliedert.

Zunächst werden im ersten Kapitel die Recherchen zu den Fresstestverfahren dokumentiert. Die Recherche zu den Fresstestverfahren umfasst eine allgemeine Definiti-

on von Fressen, die gängigen Tragfähigkeitsberechnungsverfahren an Stirn- und Kegelradverzahnungen sowie eine Beschreibung des FZG-Fresstests.

Für Schneckengetriebe wird ebenfalls ein grundlegendes Integraltemperaturkriterium erläutert.

Darauf folgend werden im zweiten Kapitel verschiedene Lastkollektive für den Einlaufvorgang sowie die Grübchen- und die Verschleißtests erläutert. Zudem werden eigene Lastkollektive aus der Vorgabe der Hertz'schen Pressung oder der Gleitgeschwindigkeit ermittelt.

Im dritten Kapitel sind die bisherigen Untersuchungen von Stahl- und Gussschneckenrädern zusammengefasst. Hier sind sowohl die verwendeten Verzahnungen, Lastzustände, Schmierstoffe, als auch der jeweilige Prüfstandsaufbau und die Versuchsauswertung aufgelistet.

Das vierte Kapitel enthält die relevanten Messgrößen des Schneckentriebes. Um den Verschleiß bzw. Materialabtrag der Verzahnung zu dokumentieren, sind Rauheits-/Topographiemessungen an der Schnecke bzw. am Schneckenrad vor, während des Versuchs in definierten Zeitabständen und nach dem Versuch notwendig. Die Ermittlung des Wirkungsgrades des Getriebes kann durch die zeitsynchrone Messung der Drehmomente und Drehzahlen am Antrieb und Abtrieb erfolgen. Die Tragfähigkeit von Schneckengetrieben mit Verzahnungen aus Stahl wird in Laststeigerungstests oder in Dauerlaufstest bis zum Ausfall durch Fressen ermittelt. Die Prüfstände werden dabei bei Überschreiten von oberen Grenzwerten der Drehmomente, oberen Grenzwerten der Ölsumpftemperatur und oberen Grenzwerten der Schwingschnellen am Getriebegehäuse abgeschaltet. Zusätzlich wird auch noch der Abfall des Wirkungsgrades als Abschaltkriterium ausgewertet.

Im fünften Kapitel werden zunächst die Geometrien und Eigenschaften verschiedener Schneckenflankenformen beschrieben. Die Lage der Berührlinien und der Krümmungsverhältnisse im Kontaktbereich wird durch die Geometrie von Schnecke und Schneckenrad vorgegeben. In einer Recherche werden verschiedene Ausführungen von Schneckengetrieben erläutert. Es wird zwischen den Bauformen der Zylinder- und der Globoidschneckengetriebe unterschieden und anhand verschiedener Publikationen mögliche Flankenformen aufgezeigt.

Im sechsten Kapitel werden die unterschiedlichen Beschichtungsmedien und Beschichtungsverfahren vorgestellt.

3.1.4. AP 3 Auslegung

Nachdem Bonfiglioli als Projektkoordinator die Spezifikationen und die Makrogeometrien für die drei Schneckengetriebe Größen (I: $a=62,17\text{mm}$, $i=30$; II: $a=49,5\text{mm}$, $i=60$; III: $a=100\text{mm}$, $i=20,5$) festgelegt hatte, wurden von der Forschungsstelle die Mikrogeometrien für sechs verschiedene Verzahnungen ausgelegt. Zu diesem Zweck wurde das am Lehrstuhl entwickelte Programm TRABI 8.1 (Tragbildberechnung) genutzt. Unter Vorgabe der Makro- und Mikrogeometriedaten ermöglicht dieses Programm die Berechnung lastfreier Tragbilder unter der Annahme idealer Zahnflanken. Danach wurde durch eine Stapelverarbeitung eine Analyse der Sensibilität des Tragbilds gegenüber Abweichungen aus dem Fertigungsprozess und dem Montagezustand durchgeführt. Zudem erfolgte für alle Verzahnungen eine Tragfähigkeitsberechnung nach DIN 3996 [D1]. Anschließend führte die Forschungsstelle eine Vielzahl von FE-Berechnungen mit den Verzahnungen in vielen Wälzstellungen im Eingriffsgebiet durch, um Berührlinien, Linienlasten und Flächenpressungen als versagensrelevante Parameter möglichst präzise zu ermitteln und anhand derer dann die Geometrien zu optimieren.

Im Folgenden sollen die einzelnen Auslegungsschritte für die Geometrie G1 ($a=62,17\text{mm}$, $i=30$) näher erläutert werden. Eine umfangreiche Beschreibung der Verzahnungsauslegung wurde von der Forschungsstelle in einem Auslegungsreport zusammengefasst. Dieser Auslegungsreport umfasst 169 Seiten und enthält detaillierte Berechnungs- und Simulationsergebnisse für alle sechs Geometrien.

Mikrogeometrieauslegung für die Geometrie G1

Die Geometrie G1 entspricht einer Zylinderschneckengetriebeverzahnung mit einem Achsabstand von $a=62,17\text{mm}$, einer Übersetzung von $i=30$ und der aus Gründen der Vergleichbarkeit mit dem Stand der Technik geforderten Flankenform ZI. Die Verzahnung weist die in Tabelle 1 gezeigten Geometriedaten auf.

Bezeichnung	Zeichen	Wert	Einheit
Achsabstand	a	62,170	[mm]
Zähnezahl der Schnecke	z_1	1	[-]
Zähnezahl des Rad	z_2	30	[-]
Übersetzung	u	30	[-]
Normalmodul	m_n	30,199	[mm]
Axialmodul	m_x	3,220	[mm]
Mittlenkreisdurchmesser der Schnecke	d_m	27,737	[mm]
Verzahnungslänge der Schnecke	L	45	[mm]
Kopfkreisdurchmesser der Schnecke	d_{a1}	34,100	[mm]
Fusskreisdurchmesser der Schnecke	d_{f1}	20,101	[mm]
Erzeugungswinkel der Schnecke	α_0	20,000	[°]
Aussendurchmesser des Rades	d_{e2}	160,00	[mm]
Kopfkreisdurchmesser des Rades	d_{a2}	102,90	[mm]
Fusskreisdurchmesser des Rades	d_{f2}	88,870	[mm]
Radbreite	b_{2h}	22,000	[mm]
Kehlradius	r_k	10,700	[mm]
Fasenwinkel	Θ	40,000	[°]
Fasenlagenabstand	a_Θ	78,220	[mm]
Profilverschiebung des Rades	x_2	0	[-]

Tabelle 1: Makrogeometrie der Geometrie G1

Auf Basis dieser Daten berechnete die Forschungsstelle die Größen des Schneckenradfräasers und die Maschineneinstellenden zum Fräsen des Schneckenrades. Weiterhin wurde das lastfreie Tragbild bestimmt.

In der Tabelle 2 und 3 sind die neuausgelegten Größen für das Fräserwerkzeug sowie die zugehörigen Maschineneinstellenden für die Geometrie G1 aufgelistet.

Bezeichnung		Wert	Einheit
Axialmodul	m_{x0}	3.218	[mm]
Mittlenkreisdurchmesser	d_{m0}	29.148	[mm]
Aussendurchmesser	d_{a0}	36.881	[mm]
Höhenballigkeit	B_0	0.011	[mm]
Erzeugungswinkel	α_{00}	20,000	[°]

Tabelle 2: Fräserdaten der Geometrie G1

Berührlinienverläufe

Mit Hilfe einer schon über viele Jahre immer weiter entwickelten Software ermittelte die Forschungsstelle dann die geometrischen Berührlinienverläufe der Geometrie G1. Die dargestellten Berührlinien gelten hierbei für ein eingelaufenes Schneckenrad. Abbildung 4 zeigt den Verlauf der Berührlinien im Schneckenstirnschnitt. Die Berührlinien verlaufen typisch für eine ZI-Geometrie nahezu horizontal auf der Flanke. Dies ist hinsichtlich des Aufbaus eines hydrodynamischen Schmierfilms als eher ungünstig anzusehen, da hierdurch ein Abscheren des Schmierfilms begünstigt wird. Eine weitere Optimierung bezüglich dieses Effekts ist bei der Flankenform ZI allerdings kaum möglich.

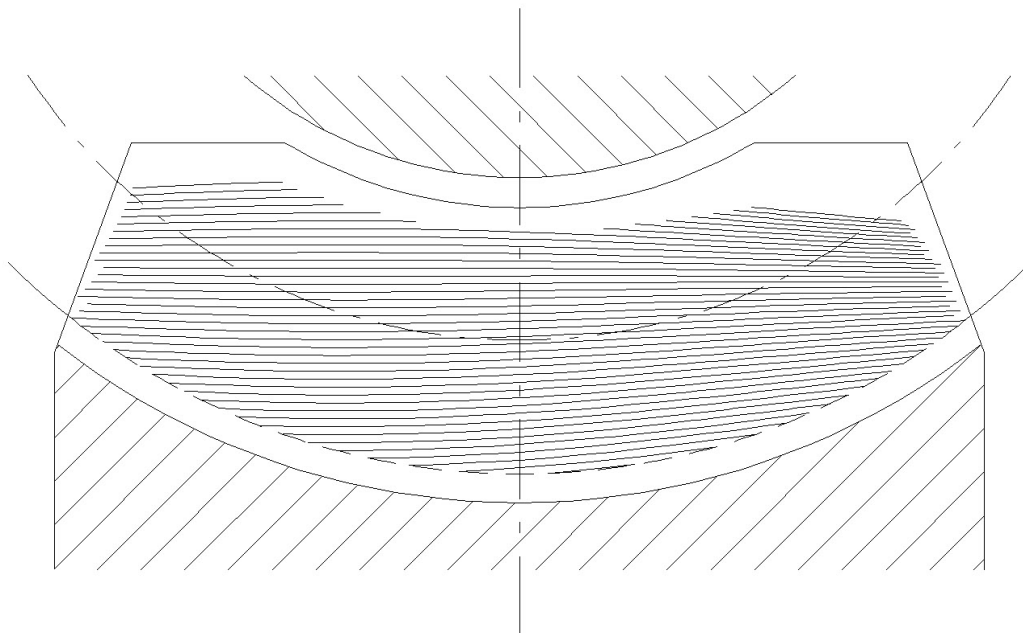


Abbildung 4: Berührlinien im Schneckenstirnschnitt

Die Berührlinien im Radialschnitt der Radflanke, gezeigt in Abbildung 5, verlaufen ebenfalls nahezu horizontal und somit auch typisch für die Flankenform ZI. Auch hier ist der Verlauf hydrodynamisch und damit tribologisch als eher ungünstig zu bewerten, eine Optimierungsmöglichkeit besteht jedoch nur durch die Wahl einer anderen Flankenform.

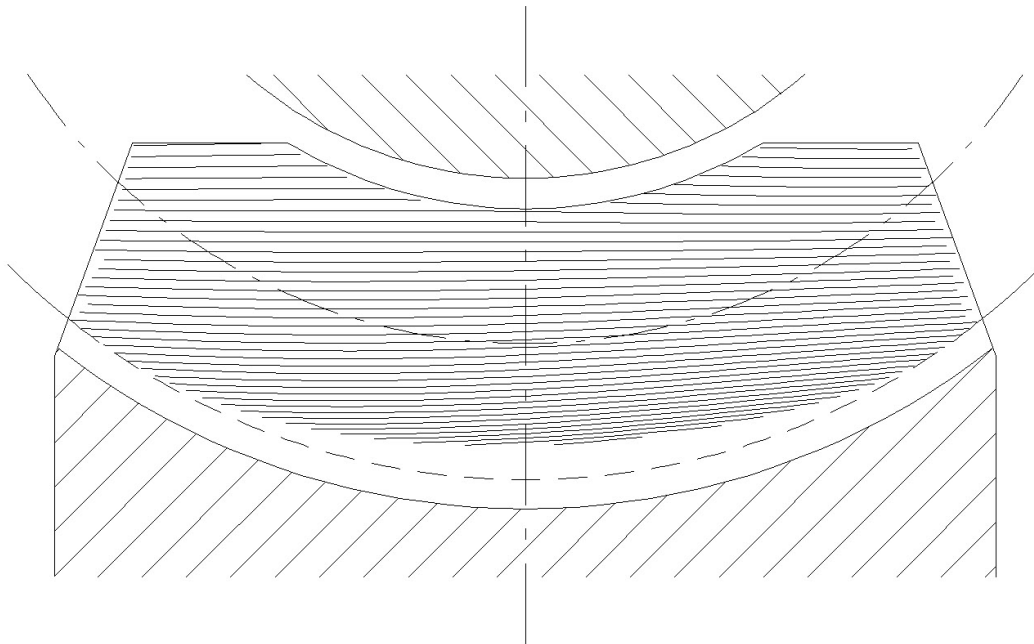


Abbildung 5: Berührlinien im Radialschnitt des Schneckenrades

Die in Abbildung 4 und 5 gezeigten Berührlinienverläufe waren dann noch bezüglich Kantentragens auf mögliche kritische Bereiche mittels FE-Berechnungen zu prüfen. Dies geschieht im weiteren Verlauf dieses Kapitels.

Tragfähigkeitsberechnung nach DIN 3996

Mit Hilfe des Programms STL **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** hat die Forschungsstelle Tragfähigkeits-berechnungen nach DIN 3996 **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** durchgeführt. Die Tragfähigkeitsberechnungen wurden für die unterschiedlichen, heute verfügbaren Radwerkstoffe in Kombination mit einer Schnecke aus 16MnCr5 (einsatzgehärtet) durchgeführt, um dann auf Basis dieser Berechnungen Sensitivitätsbetrachtungen anzustellen.

Wie aus Tabelle 4 hervorgeht, werden für den Radwerkstoff CuSn12Ni-C in allen Kategorien hinreichende Sicherheiten gegen die üblichen Schadensmechanismen ermittelt, ebenso wie für den Grauguss EN-GJS-400-15. Lediglich die Durchbiegesicherheit der Schnecke ist deutlich geringer. Für den Radwerkstoff EN-GJL-250 wird lediglich eine Grübchensicherheit von 1.01 ermittelt. Dies entspricht fast genau der

minimal zulässigen Grübchensicherheit von 1.0 nach DIN 3996 **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden..**

Bezeichnung	CuSn12Ni-C	EN-GJS-400-15	EN-GJL-250	Einheit
Gesamtwirkungsgrad	70.60	66.24	65.08	[%]
Ölsumpftemperatur	64.30	64.30	64.3	[°C]
Grübchensicherheit	1.48	1.18	1.01	[-]
Verschleißsicherheit (spritzer Zahnkopf)	20.61	54.83	44.27	[-]
Verschleißsicherheit (Flankenspiel)	7.34	19.52	15.76	[-]
Durchbiegesicherheit	3.14	1.18	3.10	[-]
Zahnfußbruchsicherheit	2.88	3.68	2.24	[-]
Temperatursicherheit	1.56	1.56	1.56	[-]

Tabelle 4: Ergebnisse der Tragfähigkeitsberechnung nach DIN 3996

Bei der Interpretation der Berechnungsergebnisse ist zu berücksichtigen, dass für die DIN 3996 [D1] der Anwendungsbereich in Bezug auf den Achsabstand begrenzt ist. Die DIN 3996 gilt für Achsabstände größer als 63mm. Der Achsabstand der Geometrie G1 liegt ganz geringfügig unter diesem Grenzwert. Weiterhin ist zu vermerken, dass bei den Rechenverfahren nach DIN 3996 der Werkstoff Stahl bisher nicht berücksichtigt werden kann, da mit diesem Werkstoff noch nicht ausreichend viele Untersuchungen durchgeführt wurden und deshalb die benötigten statistisch abgesicherten Werkstoffparameter für die Normberechnungen noch nicht vorhanden sind.

Sensibilitätsanalyse

Da sowohl die Fertigung als auch die Montage toleranz- und abweichungsbehaftete Prozesse darstellen, führte die Forschungsstelle eine Sensibilitätsanalyse durch, um den Einfluss möglicher Abweichungen auf das Leerlauftragbild zu testen. Hierbei wurden die Berechnungsergebnisse der ZEMA sowie die mögliche Genauigkeit der Fräsmaschinen von Liebherr-Verzahntechnik berücksichtigt. Tabelle 5 zeigt die angenommenen Toleranzbereiche.

Bezeichnung		Wert	Toleranz	u. Wert	o. Wert	Einheit
Fräterschwenkwinkel	$\Delta\gamma$	0.460	± 0.02	0.440	0.480	[°]
Achsabstandsverschiebung	Δa_F	0.710	± 0.02	0.690	0.730	[mm]
Axialposition des Rades	Δa_{x2}	0.000	± 0.01	-0.100	0.100	[mm]
Achsabstandsversch. Gehäuse	Δa_G	0.000	± 0.01	-0.100	0.100	[mm]
Achskreuzwinkel	$\Delta\psi$	0.000	± 0.02	-0.200	0.200	[°]

Tabelle 5: Toleranzen für die Sensibilitätsanalyse

Die Einflüsse der Veränderung dieser einzelnen Größen auf die Lage des Leerlauftragbilds werden im Folgenden einzeln diskutiert.

Veränderung des Fräterschwenkwinkels

Der Einfluss einer Veränderung des Fräterschwenkwinkels innerhalb des in Tabelle 5 gezeigten Bereichs ist in Abbildung 6 gezeigt.

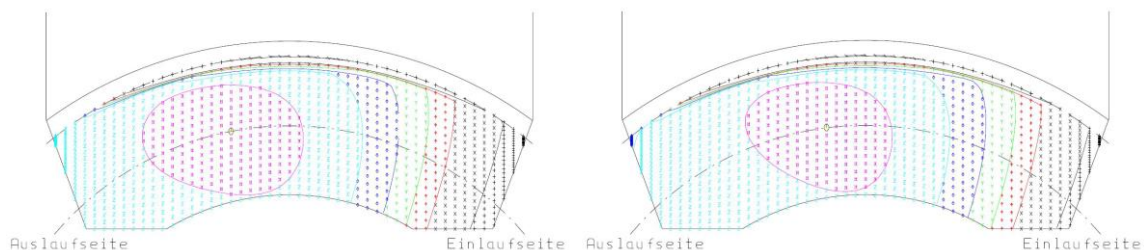


Abbildung 6: Einfluss des Fräterschwenkwinkels, links: oberer Toleranzwert, rechts: unterer Toleranzwert

Eine positive Veränderung des Fräterschwenkwinkels führt aufgrund der nur geringfügigen auslaufseitigen Positionierung des Leerlauftragbilds nur zu einer langsamen Verschiebung in Richtung des Auslaufs. Eine negative Veränderung des Fräterschwenkwinkels bewegt das Leerlauftragbild minimal in Richtung des Einlaufs. In beide Richtungen sind die Entwicklungen infolge einer Veränderung als unkritisch zu bewerten, da nur eine sehr geringe Verschiebung des Leerlauftragbilds resultiert.

Veränderung des Fräserachsabstandes

Der Einfluss einer Veränderung des Achsabstands beim Fräsen innerhalb des in Tabelle 5 gezeigten Bereichs ist in Abbildung 7 dargestellt.

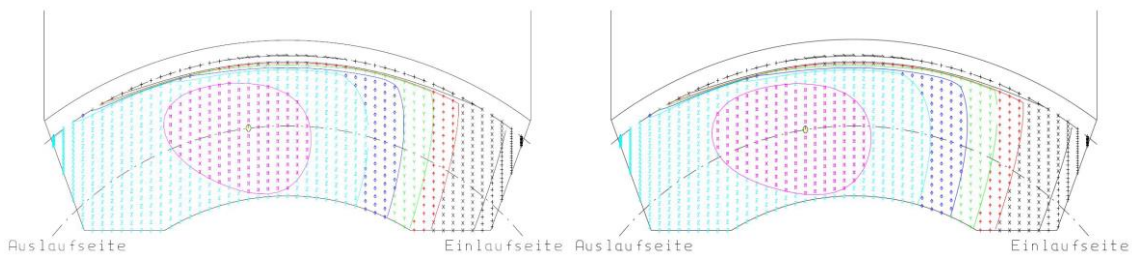


Abbildung 7: Einfluss der Fräserachsabstandsänderung, links: oberer Toleranzwert, rechts: unterer Toleranzwert

Eine Veränderung des Achsabstandes beim Fräsen führt sowohl zu einer geringfügigen vertikalen Verschiebung als auch zu einer leichten Drehung des Tragbilds. Positive Veränderungen bewirken eine Verkleinerung des Tragbildauges sowie eine minimale Verschiebung in Richtung des Kehlradius. Negative Veränderungen führen zu einer leichten Verbreiterung des Tragbildauges in Richtung des Auslaufs. Aufgrund der nur minimalen Verschiebungen des Leerlauftragbilds sind die Einflüsse einer Veränderung des Fräserachsabstandes als unkritisch zu bewerten.

Veränderung der axialen Einbauposition des Rades

Der Einfluss einer Veränderung der Axialposition des Rades innerhalb des in Tabelle 5 gezeigten Bereichs ist in Abbildung 8 zu sehen.

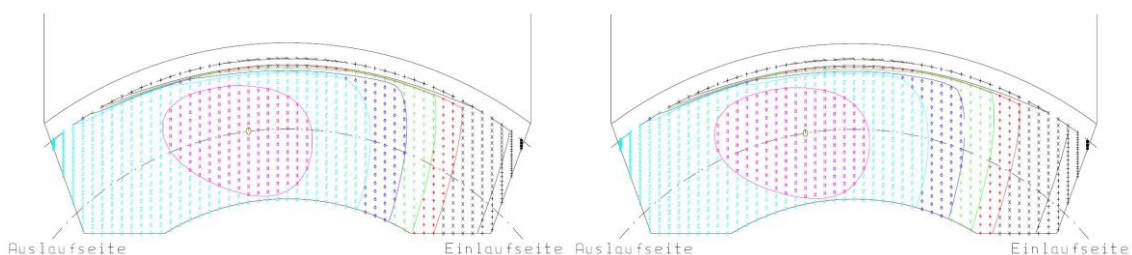


Abbildung 8: Einfluss der axialen Einbauposition des Rades, links: oberer Toleranzwert, rechts: unterer Toleranzwert

Eine Veränderung der Axialposition des Rades führt zu einer Verschiebung des Leerlauftragbildes in Breitenrichtung. Da sowohl eine positive als auch eine negative Veränderung in den betrachteten Bereichen zu nur sehr geringen Veränderungen des Leerlauftragbilds führen, ist auch dieser Einfluss ebenfalls als unkritisch zu betrachten.

Veränderung des Montageachsabstandes

Eine Veränderung des Montageachsabstands führt zu den stärksten Veränderungen in der Sensibilitätsanalyse (Abb. 9).

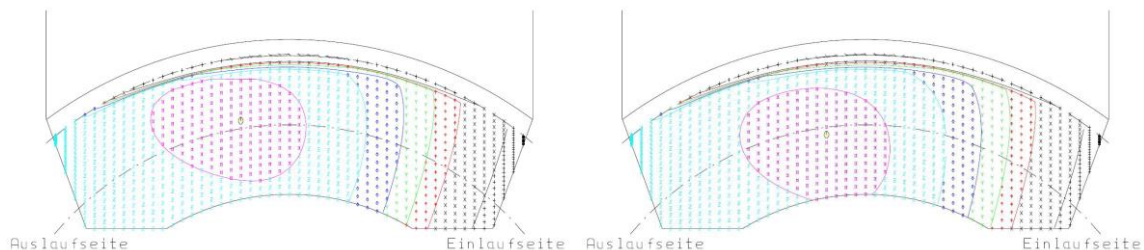


Abbildung 9: Einfluss der Veränderung des Montageachsabstandes,
links: oberer Toleranzwert, rechts: unterer Toleranzwert

Wie erwartet verschiebt eine positive Abweichung das Leerlauftragbild in Richtung des Zahnfußes des Schneckenrades, während eine negative Abweichung das Leerlauftragbild in Richtung des Kehlradius auflaufen lässt. Im Bereich des Kehlradius ist aber nicht mit einem Kantentragen zu rechnen, da die umliegenden geringen Kontaktabstände entlang der Zahnbreite unter Last ein volles Tragen im Kantenbereich des Kehlradius verhindern. Daher sind auch die innerhalb des betrachteten Wertebereichs auftretenden Verschiebungen als unkritisch zu betrachten.

Veränderung des Achskreuzwinkels

Eine Veränderung des Achskreuzwinkels führt nur zu einer geringen Verdrehung des Leerlauftragbildes, die im betrachteten Wertebereich unkritisch ist (Abb. 10).

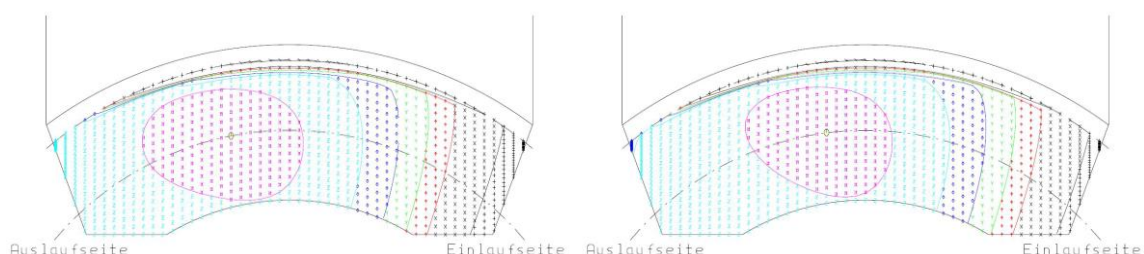


Abbildung 10: Einfluss der Veränderung des Achskreuzwinkels,
links: oberer Toleranzwert, rechts: unterer Toleranzwert

Die Sensibilitätsanalyse hat gezeigt, dass es keinerlei kritische Verschiebungen des Leerlauftragbildes infolge der betrachteten Abweichungen auftreten. Damit ist die

durchgeführte Auslegung als ausreichend stabil und damit für die Fertigung als geeignet einzustufen.

Im nachfolgenden Abschnitt erfolgt eine Betrachtung und Beurteilung der Last- und Eingriffsverhältnisse mit Hilfe von Finite-Elemente-Berechnungen.

Finite-Elemente-Berechnungen

Mit Hilfe der Programme SGen und STGen der Forschungsstelle sowie einigen Zusatzmodulen wurden Dateien erzeugt, die sämtliche Informationen beinhalten, um mit hexagonalen Elementen vernetzte Modelle von Schnecke und Schneckenrad aufzubauen. Diese können mit der kommerziellen FE-Software MSC Patran 2013 ausgeführt werden. Mit Hilfe des Solvers MSC Marc 2013 können die Modelle anschließend simuliert werden. Diese allgemeine Vorgehensweise des Aufbaus und der Durchführung beruht auf der von **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** und **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** entwickelten Methodik.

Der Berechnungsablauf gliedert sich in folgende Schritte:

1. Aufbau der Modelle von Schnecke und Schneckenrad
2. Identifikation geeigneter Vernetzungen
3. Simulation eines vollständigen Eingriffs

Aufbau der Modelle von Schnecke und Rad

Das Finite-Elemente-Modell eines Radsatzes besteht aus Modellen der Schnecke und des Rades. Die Schnecke besteht aus zylindrischen Wellenenden und einer schraubenförmigen Verzahnung mit der Flankenform ZI. Die Geometriedaten der Verzahnung können der Tabelle 1 entnommen werden. Das FE-Modell der Schnecke ist in der Abbildung 11 dargestellt.

Das Modell des Schneckenrades besteht wahlweise aus drei oder fünf Radzähnen. Für die Geometrie G1 werden nur drei Radzähne benötigt, da die lastfreie Überdeckung 2,2 beträgt. Somit befinden sich in den einzelnen Wälzstellungen maximal drei Radzähne im Eingriff. Abbildung 12 zeigt das vollständige Modell des Radsegmentes (links) und einen einzelnen Radzahn (rechts). Das Radsegment wird bei der Modellgenerierung in der Zahnücke der Schnecke positioniert.

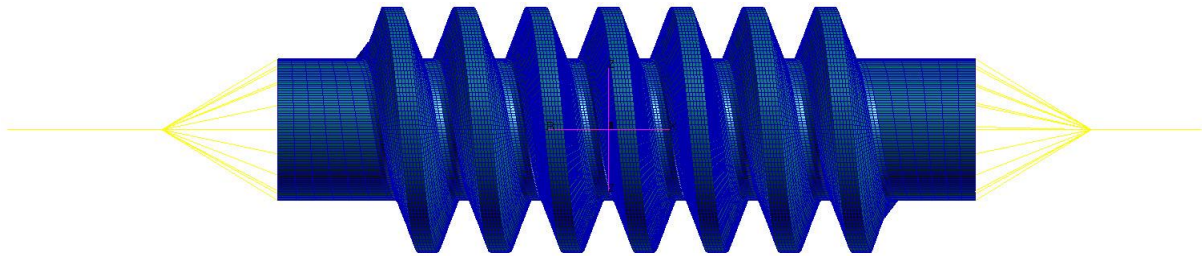


Abbildung 11: FE-Modell der Schnecke

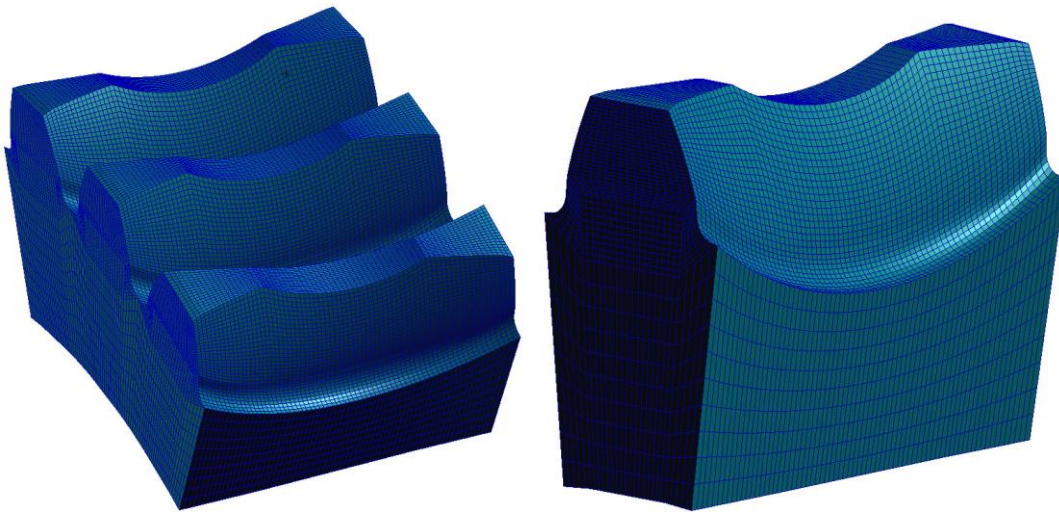


Abbildung 12: FE-Modelle des Schneckenradsegmentes und eines Radzahnes

Die Modelle der Schnecke und des Rades werden vollständig mit hexagonalen Elementen vernetzt. Sowohl bei der Erzeugung der Volumenmodelle als auch bei der Vernetzung werden die vorgegebene Mikrogeometrie, die Maschineneinstelltdaten und die vorgegebenen Abweichungen bei der Montage berücksichtigt. Dies ermöglicht eine realitätsnahe Simulation von Schneckengetrieben.

Randbedingungen

Vor jeder Finite-Elemente Berechnung werden Randbedingungen zur Lagerung der Bauteile in einem Gesamtsystem definiert und Lasten auf bestimmte Modellknoten aufgebracht. Das Modell der Schnecke wird an den Wellenenden gelagert. Es werden bis auf eine axiale Verschiebung alle translatorischen und rotatorischen Freiheitsgrade gesperrt. Das aus drei Zähnen bestehende Radsegment wird an der innenliegenden Fläche des Kranzes eingespannt und steht somit fest.

Für die Berechnungen nach der Finiten-Elemente-Methode wird ein klassisches Kontaktmodell erzeugt. Dieses kann von einem Solver, wie MSC Marc 2013, nach dem Schema „Knoten-zu-Oberfläche“ gelöst werden. Die Oberflächen der Elemente der Schnecke werden gegen die Knoten des Rades gedrückt.

Sowohl die Schnecke als auch das Rad bestehen aus Stahl, für den ein linear elastisches Werkstoffverhalten gemäß dem Hooke'schen Gesetz vorausgesetzt wird. Somit sind für die Schnecke und das Rad die Elastizitätsmodule mit $E=210000\text{N/mm}^2$ für Stahl und die Querkontraktionszahlen mit $\nu=0,3$ vorgegeben.

Identifikation geeigneter Vernetzungen

Im ersten Schritt der FE-Berechnungen wurde an den FE-Modellen des Radsatzes eine Netzstudie durchgeführt. Diese hatte zum Ziel, von der Vernetzung möglichst unabhängige Ergebnisse zu erzielen. Außerdem musste eine geeignete Vernetzung ermittelt werden, deren Elemente nur in gewissen Grenzen gedehnt und geschert werden dürfen. Je stärker ein Element aus dem Idealzustand heraus verzerrt wird, desto höher sind die Berechnungsungenauigkeiten. Die zulässigen Abweichungen hängen aber stark vom Ort der Elemente innerhalb der Modelle ab. Im Bereich des Radkranzes dürfen beispielsweise stark gedehnte Elemente auftreten, während im Flankenbereich und im Fußbereich der Schnecke eine sehr regelmäßige Vernetzung vorliegen muss.

Neben einer niedrigen Verzerrung der Elemente muss die Vernetzung fein genug gewählt werden, um Ergebnisse hoher Güte zu erzielen. Zunächst wurde eine Schnecke mit einer hohen Vernetzungsgüte erzeugt. Mit dieser Schnecke wurden dann 15 geometrisch gleiche Räder, deren Vernetzungsdichte aber ansteigt, für einen Lastfall simuliert. Ab einer bestimmten Knotenanzahl an der Radflanke konvergieren die berechneten Deformationen und Spannungen schnell, so dass dann eine hinreichend feine Vernetzung vorliegt. In der Tabelle 6 sind die hierbei getesteten Vernetzungsvarianten gezeigt.

	Elementzahlen am Rad				Summe	
	Breite	Höhe	Dicke	Fuß	Knoten	Elemente
N01	24	8	6	6	197828	178069
N02	28	8	6	6	202180	182077

N03	32	10	7	6	211086	190213
N04	36	12	8	6	221540	199813
N05	40	12	9	6	231226	208861
N06	44	14	10	6	244698	221341
N07	48	16	11	6	260102	235669
N08	52	16	12	7	277105	251677
N09	56	18	13	7	296598	269941
N10	60	20	14	7	318431	290461
N11	64	20	15	7	336058	307621
N12	68	22	16	8	368244	337621
N13	72	22	17	10	402038	369805
N14	76	24	17	12	435970	401857
N15	80	26	18	13	478671	442501

Tabelle 6: Vernetzungsvarianten für das Radelement der Geometrie G1

Die grafische Darstellung des Unterschiedes in der Vernetzungsfeinheit ist in Abbildung 13 dargestellt.

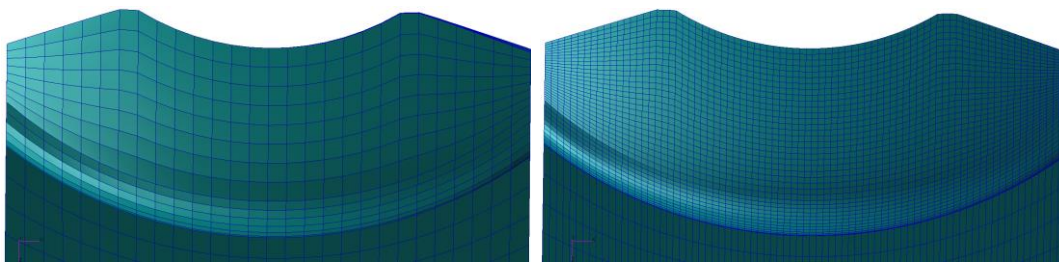


Abbildung 13: Darstellung der Netzvarianten N01 und N15 der Netzstudie

Zur Auswertung der Netzstudie werden die Deformationen und die Vergleichsspannungen nach von Mises ausgewertet.

Deformationen

Die Simulationen zeigen für die resultierenden Deformationen von der Größe her sehr konstante Ergebnisse und zwar unabhängig von der gewählten Vernetzung. In der hier simulierten und ausgewerteten Wälzstellung beträgt die maximale resultierende Deformation des Rades $11\mu\text{m}$, während die Schnecke, vor allem durch die Durchbiegung des Wellenkörpers um maximal $107\mu\text{m}$ verformt wird. In Abbildung 14 sind die

Simulationsergebnisse in Abhängigkeit der Vernetzungen gezeigt. Wie hoch die Schnecke und die Radzähne deformiert werden, ist während der Netzstudie nicht primär relevant. Wichtig ist, dass unabhängig von der Vernetzung möglichst konstante Simulationsergebnisse erzielt werden.

Da für die verschiedenen Simulationen sehr konstante Deformationen ermittelt wurden, sind folglich alle getesteten Vernetzungen zur Bestimmung von Deformationen geeignet.

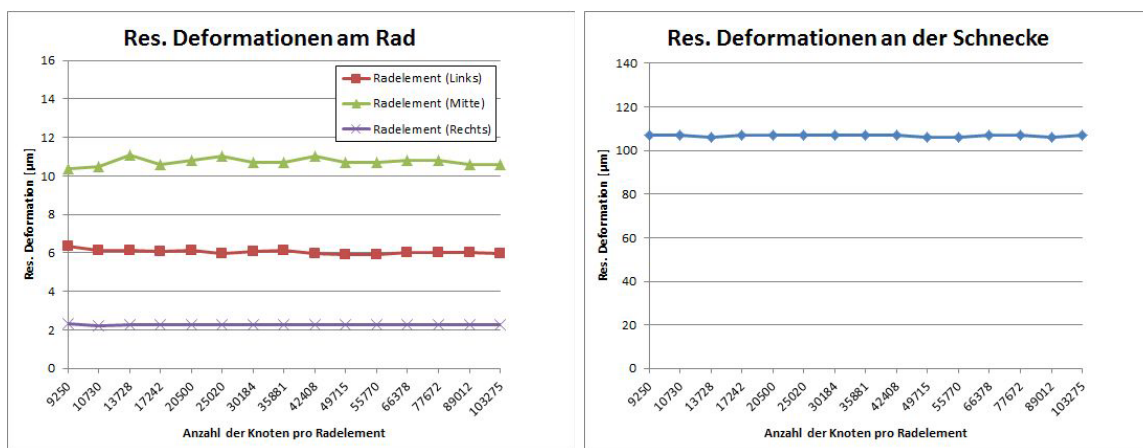


Abbildung 14: maximale Resultierende Deformation an Rad und Schnecke in Abhängigkeit der Knotenzahl

Vergleichsspannungen nach von Mises

Die ermittelten Vergleichsspannungen hängen stark von der Feinheit der gewählten Vernetzung ab (Abb. 15). Es kann aber das für derartige Netzstudien typische Konvergenzverhalten der Ergebnisse bei steigender Knoten- und Elementzahl beobachtet werden. Am Rad steigen die Vergleichsspannungen mit feiner werdender Vernetzung an, während die Vergleichsspannungen an der Schnecke mit feiner werdender Vernetzung fallen. In den Kontaktbereichen kommt es zur Ausbildung starker Singularitäten der Vergleichsspannungen. Diese Singularitäten sind auf eine ungenügende Auflösung der Vernetzung über der Höhe der Berührlinien zurückzuführen, was durch die Berechnung des Kontaktstatus der Oberflächenknoten deutlich wird. Da die Breite der Berührlinien aufgrund der hohen Steifigkeiten der Kontaktpartner gering ausfällt, ist die Zahl der Knoten über der Breite der Berührlinien klein. Dadurch wird die Last über eine Reihe einzelner Knoten übertragen, wodurch die Ausbildung von Singulari-

täten begünstigt wird. In Abbildung 15 sind die ermittelten Maximalwerte der auf den Oberflächen auftretenden Vergleichsspannungen nach von Mises für die verschiedenen simulierten Vernetzungsvarianten gezeigt.

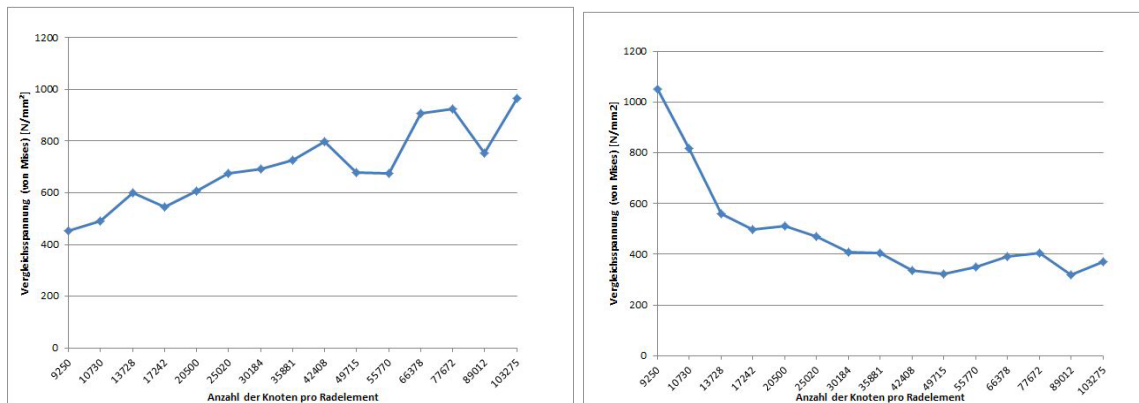


Abbildung 15: Maximalwerte der Vergleichsspannungen nach von Mises an Schnecke (rechts) und Schneckenrad (links)

Die Beachtung der ermittelten Beträge für die Vergleichsspannungen ist während der Netzstudie nicht primär notwendig, sondern hat bei der nachfolgenden Simulation der Verzahnung in unterschiedlichen Wälzstellungen zu erfolgen. Bei der Netzstudie ist es in erster Linie wichtig eine Vernetzung auszuwählen, bei der während der Simulation wenige bis keine Fehlstellen bzw. Singularitäten auftreten.

Anhand der Erkenntnisse aus der Netzstudie und unter Berücksichtigung der zur Verfügung stehenden Rechnerkapazitäten wurde für die Simulation in den Wälzstellungen die Vernetzungseinstellung N13 aus Tabelle 6 gewählt. Diese stellt für die Berechnung der Verformungen und der Bauteilspannungen eine ausreichend feine, homogene Vernetzung des Radelementes dar.

Simulation eines vollständigen Eingriffs

Mit der ausgewählten Vernetzung N13 aus Tabelle 6 wurden die einzelnen Wälzstellungen im Eingriffsgebiet simuliert. Aus der Zähnezahl des Rades von 30 folgt für den Teilungswinkel $\varphi_T = 12^\circ$. Daraus werden die Winkel für die Radzähne in den einzelnen Wälzstellungen des Radsatzes abgeleitet und in Bezug auf eine Referenzstellung angegeben. Diese Referenzstellung befindet sich auf dem Mittenkreisdurchmesser des Rades in der 6-Uhr-Stellung. Um einen vollständigen Eingriff abzubilden, muss das

Rad aus der Referenzstellung um bis zu einer halben Winkelteilung ausgelenkt werden. Daraus ergeben sich die in Tabelle 7 gezeigten Wälzstellungen.

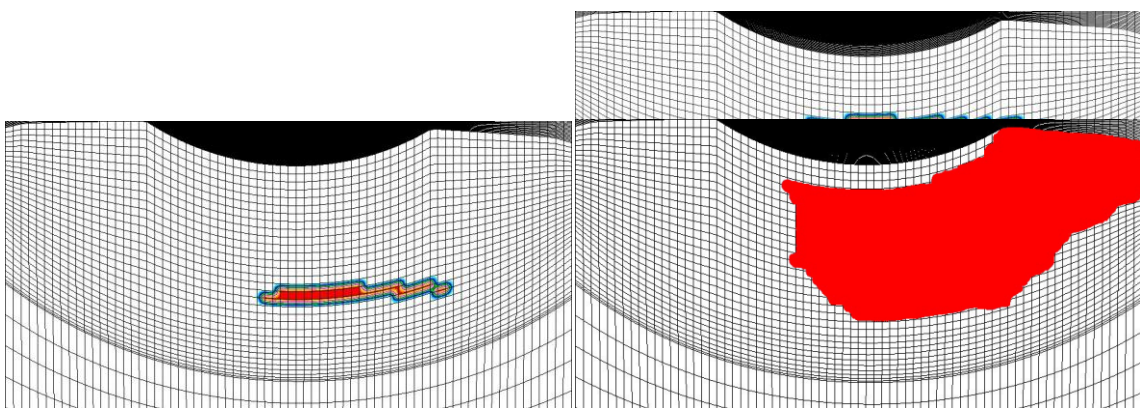
Bezeichnung	Stellung der Radzähne		
	Links	Mitte	Rechts
W-6	6,0°	-6,0°	-18,0°
W-5	7,0°	-5,0°	-17,0°
W-4	8,0°	-4,0°	-16,0°
W-3	9,0°	-3,0°	-15,0°
W-2	10,0°	-2,0°	-14,0°
W-1	11,0°	-1,0°	-13,0°
W 0	12,0°	0,0°	-12,0°
W+1	13,0°	1,0°	-11,0°
W+2	14,0°	2,0°	-10,0°
W+3	15,0°	3,0°	-9,0°
W+4	16,0°	4,0°	-8,0°
W+5	17,0°	5,0°	-7,0°
W+6	18,0°	6,0°	-6,0°

Tabelle 7: Bezeichnung der Wälzstellungen mit den jeweiligen Parametern

Für jede Wälzstellung wurden Finite-Elemente-Modelle aufgebaut, die Simulation durchgeführt und anschließend ausgewertet. Über einen gesamten Eingriff des Rades wurden das Lasttragbild, die resultierenden Deformationen und die Vergleichsspannungen (von Mises) auf den Radflanken ausgewertet.

Lasttragbild

Die Auswertung der Simulationen in den einzelnen Wälzstellungen wird mit den Berührlinien begonnen. Wird für einen Knoten auf der Radflanke Kontakt ermittelt, so wird diesem Knoten der Wert eins zugewiesen. Knoten ohne Kontakt bekommen den Wert 0 zugeteilt. Somit können die Berührlinien, wie in Abbildung 16 gezeigt, dargestellt werden.



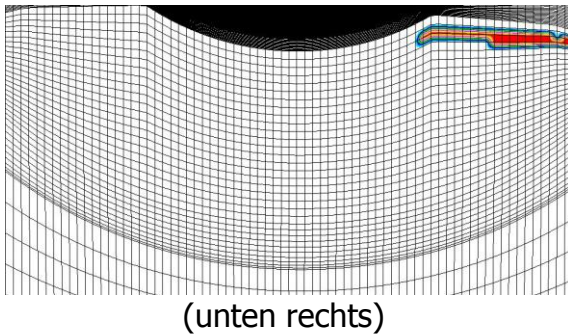


Abbildung 16: Berührlinien zu Beginn des Eingriffs (links oben), in der Mitte des Eingriffs (rechts oben), Eingriffsende (links unten) und das Lasttragbild

Zu Beginn des Eingriffs kommt der Radzahn im auslaufseitigen Kopfbereich, wie in Abbildung 16 (links oben) gezeigt, in Kontakt mit der Schnecke. Beim Abwälzen von Schnecke und Rad werden die Berührlinien länger und verschieben sich in Richtung des Mittenkreises, siehe Abbildung 16 (rechts oben). Ab der Mitte des Eingriffs wandern die Berührlinien in Richtung des Zahnfußes, Abbildung 16 (links unten). Die Berührlinien werden in diesen Wälzstellungen kürzer, bis der Eingriffsbereich verlassen wird und kein Kontakt zwischen Schnecke und Schneckenrad mehr vorliegt.

Eine Superposition/Überlagerung der einzelnen Berührlinien über die Wälzstellungen führt zum Lasttragbild, wie es in Abbildung 16 (rechts unten) zu sehen ist. Im Vergleich zwischen dem Leerlauftragbild (Abbildung 3) ist das Lasttragbild deutlich größer. Bei einer Nennlast von 190Nm werden die Flanken von Schnecke und Rad so weit verformt, dass die um das Tragbildauge des Leerlauftragbilds liegenden Bereiche, deren Flankenabstände geometrisch 5-20 μ m betragen, einander ange-nähert werden und teilweise in Kontakt kommen. Dadurch wird vor allem im Auslaufbereich das Tragbild deutlich vergrößert. Jedoch auch in Richtung des Einlaufs findet eine leichte Vergrößerung des Tragbildes statt. Einlaufseitig klaffen die Flanken jedoch auch unter Last auseinander, sodass das Einziehen des Schmier-stoffes in den Kontaktbereich gewährleistet wird.

Deformationen am Rad

Nach den Berührlinien und dem Lasttragbild werden die resultierenden Deformationen an den Radzähnen ausgewertet.

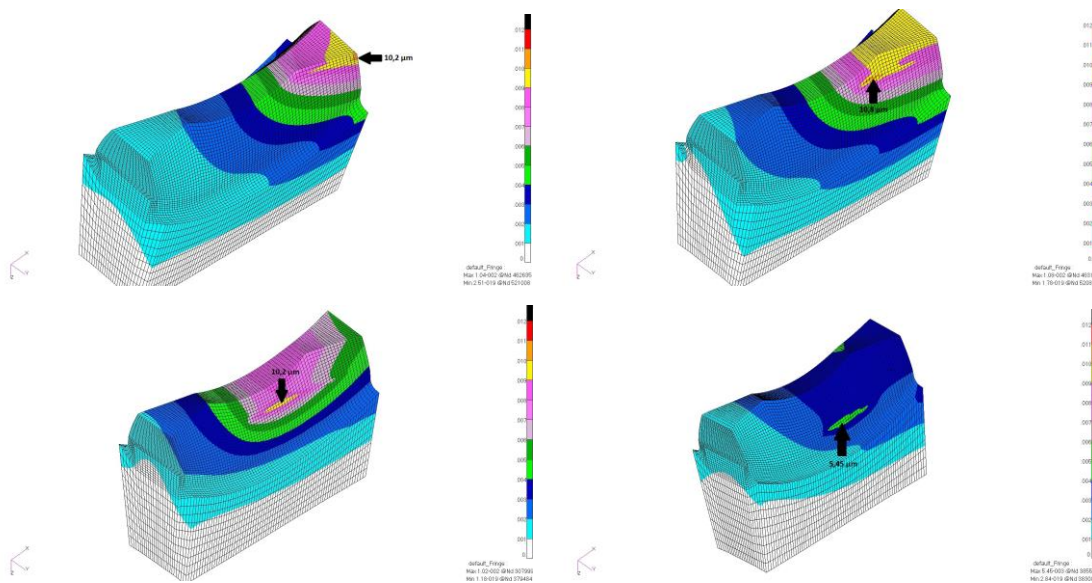


Abbildung 17: Deformationen am Radzahn in verschiedenen Wälzstellungen

Die Deformationen sind abhängig vom Ort der Berührlinie auf der Radflanke. Zu Beginn des Eingriffs befindet sich der Radzahn im auslaufseitigen Kopfbereich in Kontakt mit der Schnecke. Im Kontaktbereich wird die Flanke ein- und infolge dessen der Radzahn weggedrückt. Mit zunehmend mittiger Lage der Berührlinie auf der Radflanke verändert sich die Deformation der Radflanke. Da die Zahndicke in der Mitte der Flanke gegenüber den Randbereichen hin zu den Stirnflächen des Schneckenrades abnimmt, liegen in der Zahnmitte niedrigere Steifigkeiten vor als in den Randbereichen. Je weiter die Berührlinie daher in der Mitte des Radzahnes liegt, desto stärker kommt es unter Last zu einer Verformung des Zahns. Im Kontaktbereich kommt es gegenüber dem Rest der Flanke durch die Lastübertragung zu erhöhten, jedoch unkritischen Deformationen. Gegen Eingriffsende liegt die Berührlinie im Zahnfußbereich des Radzahnes. Dort nehmen die Zahndicke und folglich auch die Steifigkeit des Radzahnes zu. Das trägt zu einer Verringerung der Deformationen der Flanke bei. Lediglich im Kontaktbereich kommt es gegenüber der restlichen Flanke zu höherer Deformation. In Abbildung 17 sind die verschiedenen die Deformation in verschiedenen Wälzstellungen dargestellt.

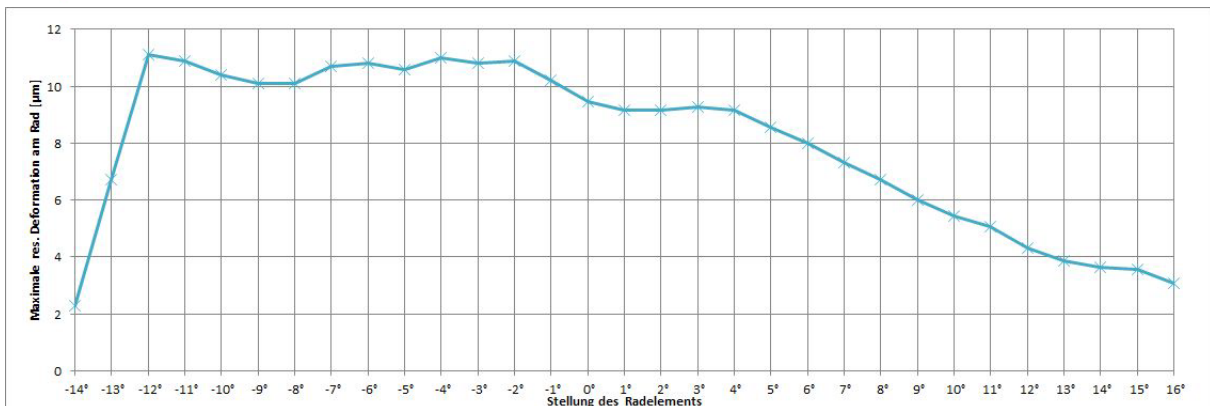


Abbildung 18: Maximalwerte der resultierenden Deformation an einem Radelement während eines vollständigen Eingriffs

Die Beträge der maximalen resultierenden Deformationen können über einem gesamten Eingriff aufgetragen werden (Abbildung 18). Zu Beginn des Eingriffs kommt es zu einem Anstieg der resultierenden Deformationen auf bis zu 11µm. Während des Eingriffsbeginns betragen die Deformationen 10-11µm. Je weiter der Eingriff vorschreitet, desto geringer werden die Deformationen. Dies liegt darin begründet, dass die Berührlinien in Richtung des Zahnfußes wandern, wo die Radzahndicke und somit die Steifigkeiten zunehmen. Außerhalb des Eingriffsgebiets liegen die resultierenden Deformationen nicht bei null, da ein Radsegment bestehend aus drei Radzähnen simuliert wird. Wird ein Radzahn verformt, so kommt es bei den übrigen Radzähnen zu einer Starrkörperverschiebung, die in den zu den Deformationen gezeigten Bildern und im Diagramm enthalten sind. Insgesamt kann jedoch festgehalten werden, dass die Deformationen der Radzähne mit bis zu 11µm gering sind.

Vergleichsspannungen nach von Mises am Rad

Abbildung 19 zeigt die Maximalwerte der Vergleichsspannung nach von Mises eines Radzahnes über dem gesamten Eingriffsgebiet. Es können die charakteristischen Stöße zum Eingriffsbeginn und -ende erkannt werden. Vor allem während des Eingriffsbeginns ist mit hohen Spannungen zu rechnen, die bezüglich der Ausbildung von Fressschäden kritisch werden können. Diese Spannungsspitzen können durch Korrektur der Flankengeometrie reduziert und damit die örtliche Fressgefahr gesenkt werden. Bei der Wälzstellung -4° wird eine sehr hohe Spannung von über $\sigma_V=1400\text{N/mm}^2$ verzeichnet, die auf eine numerische Singularität zurückzuführen ist.

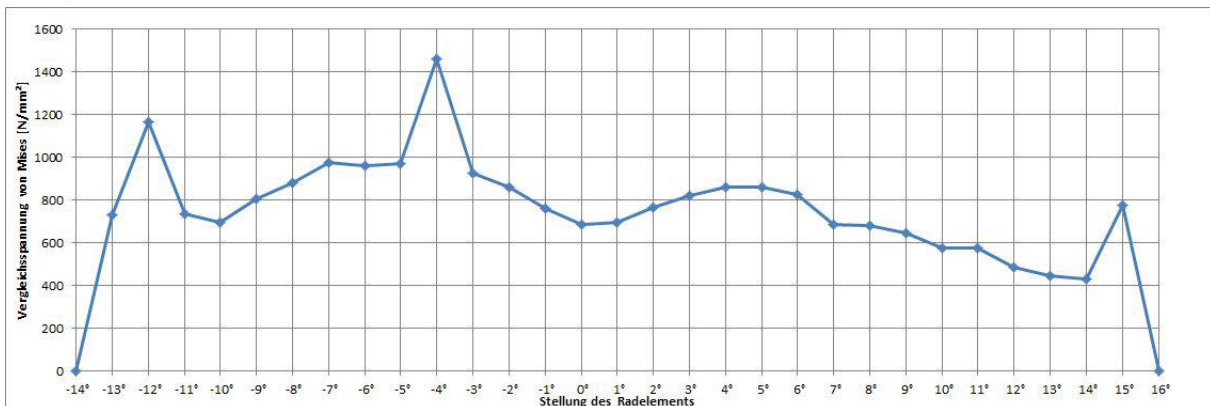


Abbildung 19: Maximalwerte der Vergleichsspannungen an einem Radelement während eines vollständigen Eingriffs

Die Annahme, dass es sich um eine numerische Singularität handelt, wird durch ein weites Berührungsfeld auf der Radflanke und eine zugehörige Singularität am gegenüberliegenden Knoten der Schneckenflanke gestützt. Die Ergebnisse der Simulation in diesem Eingriffsgebiet zeigen vom Kontaktstatus her eine breite Berührlinie mit moderaten Vergleichsspannungen, die größtenteils zu weniger als $\sigma_V=1000\text{N/mm}^2$ berechnet werden. Lediglich an einem einzelnen Knoten des Radelements tritt eine Singularität auf. Bei der Betrachtung des restlichen Eingriffsverlaufs zeigen die Berechnungsergebnisse bezüglich der Vergleichsspannungen keine weiteren Auffälligkeiten. Die maximalen Vergleichsspannungen werden in allen Wälzstellungen zu Werten unter $\sigma_V=1000\text{N/mm}^2$ bestimmt. Somit liegen diese auch unterhalb des von Oerlikon Balzers für den Halt der Beschichtungen kritisch eingestuftem Bereiches von $<1200\text{N/mm}^2$.

Zusammenfassung zum Arbeitspaket Auslegung

Die Forschungsstelle hat im Rahmen des Projektes insgesamt sechs verschiedene Mikrogeometrien ausgelegt. Für die drei im Projekt untersuchten Schneckengetriebe-Größen mit $a=49,5\text{mm}$, $a=62,17\text{mm}$ und $a=100\text{mm}$ wurde jeweils eine Geometrie mit der Zahnflankenform ZI und ZC ausgelegt.

Nach dem Festlegen der Mikrogeometrie wurden mit den Programmen TRABI 8.1 und ZSB die Fräser- und Maschineneinstellparameter hinsichtlich des Leerlauftraggildes und der Berührlinienverläufe eingestellt.

Anschließend erfolgte für alle Geometrien eine Tragfähigkeitsberechnung nach DIN 3996 und eine Sensitivitätsanalyse hinsichtlich Fertigungsungenauigkeiten und Montagtoleranzen.

Zuletzt wurden die Verzahnungen mittels FE-Simulationen bezüglich der Lasttragbilder, der Deformationen und der Vergleichsspannungen ausgewertet.

Alle Geometrien wurden soweit optimiert, dass alle oben genannten Aspekte erfüllt und alle Grenzwerte eingehalten wurden.

Sämtlichen Details der Auslegungen sowie die Beschreibung aller notwendigen Methoden wurden in einem Auslegungsreport zusammengefasst und den Projektpartnern zur Verfügung gestellt.

Mit Hilfe der Dokumentationsrichtlinie steht den Projektpartnern eine Dokumentvorlage zur Verfügung, in die alle prozessrelevanten Werkstückangaben übersichtlich eingetragen und bei Bedarf nachgeschlagen werden können.

3.2. Ergebnisse des WZL (RWTH Aachen)

3.2.1. Erzielte Ergebnisse im Forschungsvorhaben

Das folgende Kapitel fasst die im Forschungsvorhaben erzielten Ergebnisse des WZL der RWTH Aachen zusammen. Dabei sind die Ergebnisse thematisch anhand der in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** definierten Teilziele aufbereitet.

3.2.2. Erweiterung der FE-basierten Zahnkontaktanalyse und des FE-Strukturgenerators um die Eigenschaften von Schneckengetrieben

Der folgende Abschnitt beschreibt die Arbeiten, die das Erreichen des Teilziels 1, die Erweiterung der Zahnkontaktanalyse um die Berechnung von Schneckengetrieben, verfolgen. Dazu waren sowohl die FE-basierte Zahnkontaktanalyse-Software ZaKo3D als auch der FE-Strukturgenerator anzupassen. **Bild 3–1** zeigt den Leistungsumfang der am WZL entwickelten Software ZaKo3D auf.



Bild 3–1: Leistungsumfang der FE-basierten Zahnkontaktanalyse ZaKo3D

Auf Basis der dreidimensionalen Beschreibung der Zahnflanken und der Positionierung der beiden Kontaktpartner wird eine Simulation des Zahnkontaktes unter Berücksichtigung von Teilungsabweichungen und Achslageabweichungen durchgeführt. Als Ergebnis dieser Zahnkontaktanalyse werden charakteristische Verzahnungskennwerte ermittelt, die eine funktionale Beschreibung der Kontaktgeometrie, des Anregungsverhaltens und der Tragfähigkeit des Zahnkontaktes erlauben.

Für die Anpassung der Zahnkontaktanalyse an Schneckenräder sind drei Arbeitsschritte notwendig. Der erste Arbeitsschritt ist das Einlesen der Geometrie von Schnecke und Schneckenrad in ZaKo3D. Die benötigten Geometriedaten werden vom Institut LIFA der Ruhr-Universität Bochum bereitgestellt. Die Daten des Schneckenrades stehen in Form von Soll-

mess-Daten nach Klingelnberg-Definition zur Verfügung. Die Schnecke wird durch ein Axialprofil beschrieben. Für das Einlesen der Geometriedaten in ZaKo3D wurde ein Konverter geschrieben, der die Daten in das von ZaKo3D verwendete PKT-Format konvertiert sowie die in den Ausgangsdaten nicht vorhandene Fußgeometrie ergänzt.

Der zweite Arbeitsschritt ist die Implementierung der Kinematik des Schneckengetriebes. Dazu wurde ZaKo3D um eine kinematische Kette erweitert, die die relative Bewegung der Schnecke zum Schneckenrad abbildet. Dabei wird das Koordinatensystem des Schneckenrades nicht bewegt. Die gesamte Relativbewegung wird auf die Schnecke aufgebracht. Zur Validierung wurden Tragbild-Berechnungen mit ZaKo3D und dem Programm Trabi der Ruhr-Universität Bochum durchgeführt. Die berechneten Tragbilder weisen eine sehr hohe Übereinstimmung auf.

Grundlage für die Berechnung der Zahnkontaktanalyse unter Last ist die Erweiterung des FE-Strukturgenerators um die automatisierte Vernetzung von Schnecken und Schneckenrädern. Grundlage für die Vernetzung ist die Interpretation der eingelesenen Zahngeometrien. Diese Interpretation wird im FE-Strukturgenerator des WZL durch das Geometrie- und Transformationsmodul übernommen. Da die Geometriedaten der Schnecke im Axialschnitt und nicht, wie bei Stirnrädern, im Stirnschnitt definiert sind, wurde das Geometrie- und Transformationsmodul an diese Definition angepasst. Die Generierung und Fesselung des FE-Modells wird voll automatisiert auf Basis der dreidimensionalen Beschreibung der Zahnflanke vorgenommen. Zwei exemplarisch erzeugte FE-Modelle der Schnecke und des Schneckenrades sind in **Bild 3–2** dargestellt.

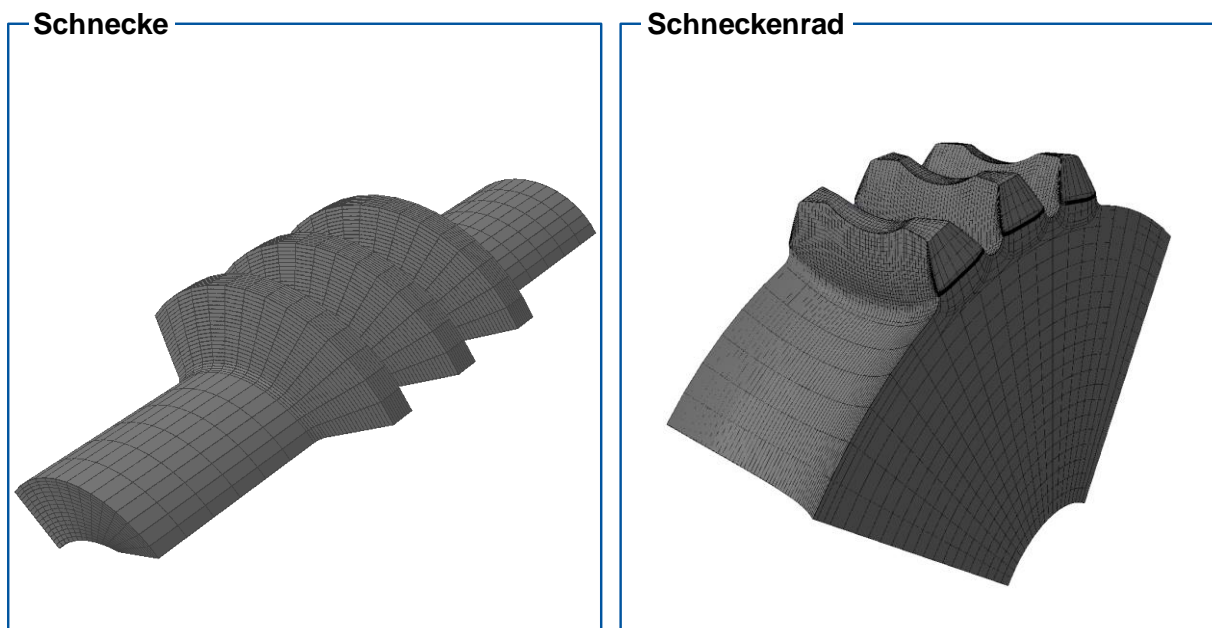


Bild 3–2: Ergebnis der automatisierten FE-Netzgenerierung

Basierend auf der Einflusszahlenmethode werden die Flankenknoten der FE-Modelle mit Einheitskräften belastet und somit die Modellsteifigkeit anhand von Verschiebungseinflusszahlen ermittelt. Diese Verschiebungseinflusszahlen werden für die Zahnkontaktanalyse unter Last verwendet, indem unter Lösung eines linearen Gleichungssystems die Lastverteilung entlang der Zahnflanke für jede Wälzposition der Verzahnung ermittelt wird. Auf Basis der Lastverteilung können charakteristische Verzahnungskenngrößen wie die Flankenpressung und die Zahnfußspannung berechnet werden. Die Ergebnisse dieser Berechnung können dann wieder auf dem FE-Netz visualisiert werden, was in **Bild 3–3** exemplarisch dargestellt ist. Die

Ergebnisse der Zahnkontaktanalyse können in der Oberfläche des Programmsystems „WZL Gear Toolbox“ visualisiert und bewertet werden. Mit der Erweiterung von Zako3D ist es erstmals möglich, FE-basiert und somit steifigkeitsgerecht das Einsatzverhalten von Schneckengetrieben zu berechnen. Durch die Einbindung in das Konzept der Variantenrechnung zur Berücksichtigung von Fertigungs- und Montageabweichungen wird ein Beitrag zur zielorientierten Auslegung von Schneckengetrieben mit hohen Anforderungen an die Kontaktgeometrie (Stahl-Schneckenräder) geleistet.

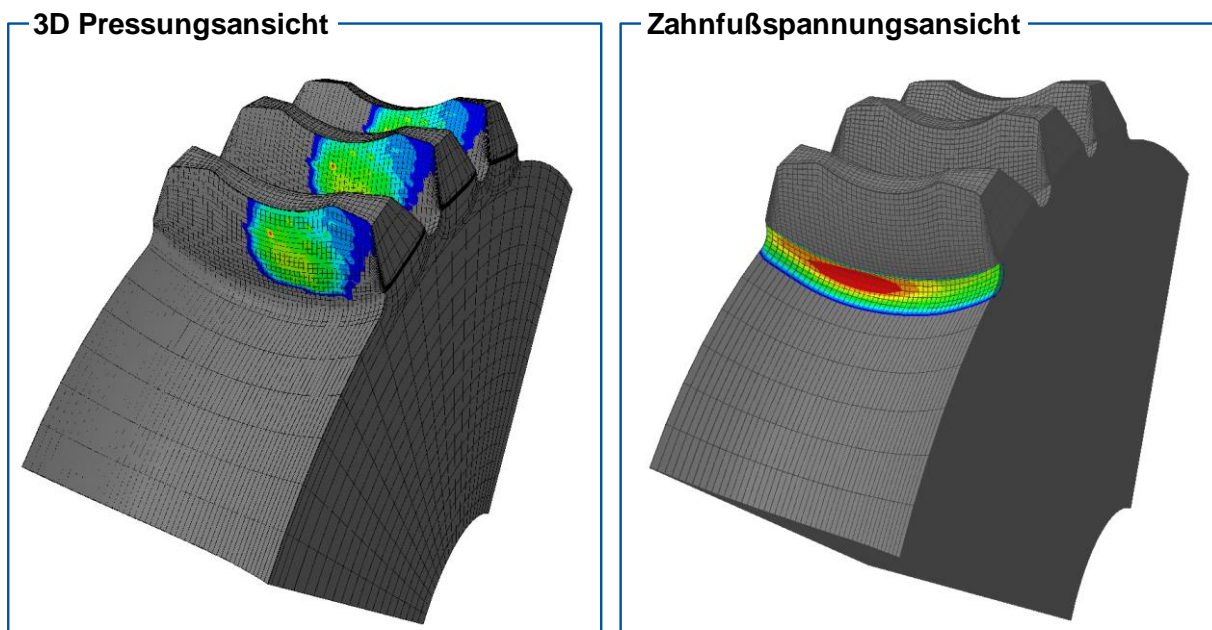


Bild 3–3: Dreidimensionale Visualisierung der Flankenpressung und Zahnfußspannung am Schneckenrad

Sensitivitätsanalyse des Schneckengetriebes im Auslegungsprozess

Das Kapitel 6.2 beschreibt die Arbeiten für das Teilziel 2, der Bestimmung der Sensitivität der Schneckenverzahnung im Auslegungsprozess. Übergeordnetes Ziel des Rahmenplans ist dabei die Auslegung der Mikrogeometrie der Schneckenräder in Zusammenarbeit mit der Institut LIFA der Ruhr-Universität Bochum und der Bonfiglioli Vectron GmbH. Dabei soll anhand der Zahnkontaktanalyse sichergestellt werden, dass die ausgewählte Verzahnungsgeometrie robust gegenüber Achslage- und Fertigungs- sowie Montageabweichungen ist.

Die Auslegung der Mikrogeometrie wird anhand des Schneckengetriebes aus Projektphase 1 (Achsabstand $a = 63$ mm) durchgeführt. Die Auslegung der Verzahnung wurde durch die Projektpartner von Bonfiglioli und der Ruhr-Universität Bochum nach Rücksprache mit dem Werkzeughersteller modifiziert. Daher wurde auf Basis der neuen Auslegung eine Nachrechnung des Schneckengetriebes mit ZaKo3D durchgeführt. Das **Bild 3–4** gibt einen Überblick über die Simulationsergebnisse. Im oberen linken Bereich von **Bild 3–4** werden das in ZaKo3D berechnete lastfreie Tragbild und das lastfreie Tragbild aus dem Programm Trabi der Ruhr-Universität Bochum gegenübergestellt. Beide Tragbilder sind identisch.

Des Weiteren sind in **Bild 3–4** die Ergebnisse der Pressungsberechnung aus ZaKo3D für drei verschiedene Drehmomente dargestellt. Dabei wurde eine Simulation unter Nennlast, eine Simulation unter halber Nennlast und eine Simulation unter doppelter Nennlast durchgeführt. Dabei ist zu erkennen, dass der Zahnkontakt im rechten Bereich der Zahnflanke stattfindet. Der linke Bereich trägt nicht zur Lastübertragung bei. Eine Vergrößerung der Last führt dazu,

dass sich der Kontaktbereich im rechten Bereich der Zahnflanke vergrößert und die Pressungsbelastung zunimmt.

Durch die neue Auslegung wird der linke Flankenbereich entlastet. Selbst bei hohen Drehmomenten ist mit keiner Pressungsbelastung in diesem Flankenbereich zu rechnen. Da im linken Flankenbereich ungünstige Gleitgeschwindigkeitsverhältnisse auftreten, senkt diese Maßnahme dort die Fressgefahr im Vergleich zur vorherigen Auslegung.

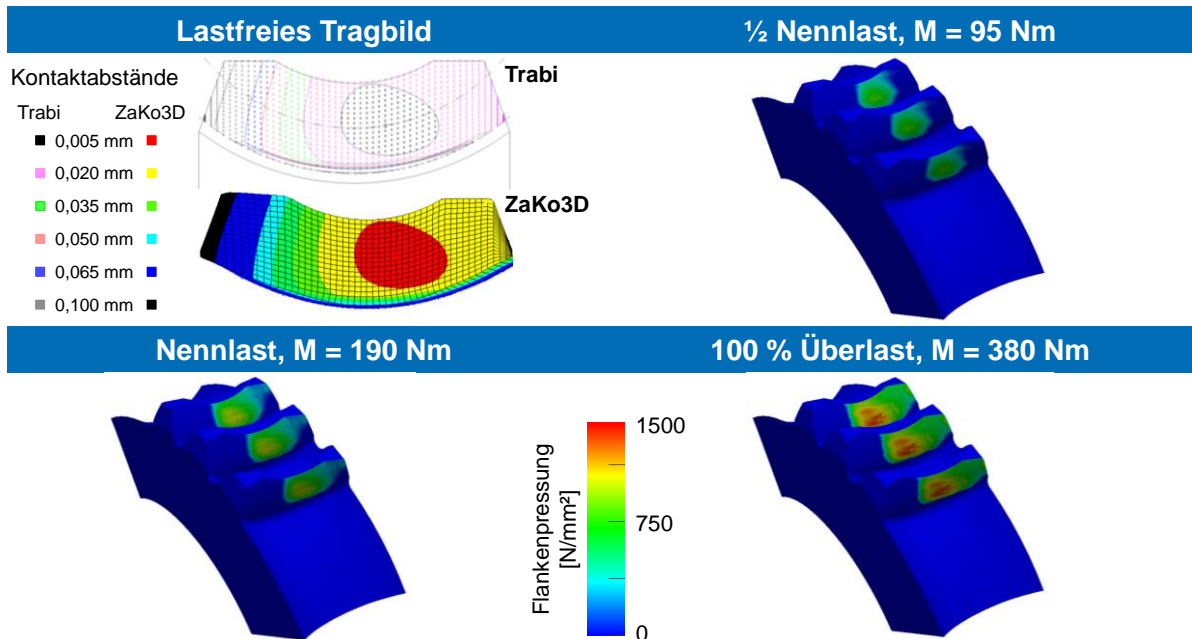


Bild 3–4: Visualisierung des lastfreien Tragbilds und der Pressungsverteilung unter Last

Ein weiteres Arbeitspaket ist die Sensitivitätsanalyse des Einsatzverhaltens aufgrund von geometrischen Abweichungen aus der Hartfeinbearbeitung. In einem ersten Schritt wurde eine Sensitivitätsanalyse auf Basis von Annahmen durchgeführt, um das methodische Vorgehen zu demonstrieren. Die Ergebnisse dieser Sensitivitätsanalyse sind in **Bild 3–5** auf der linken Seite dargestellt. Das Bild enthält 25 sogenannte Briefmarkendiagramme.

In der Legende wird der Aufbau der Briefmarkendiagramme beschrieben. Jedes Briefmarkendiagramm wird durch zwei lokale Achsen aufgespannt. Auf der horizontalen Achse ist die Flankenlinienwinkelabweichung des Schneckenrades in den Grenzen von $-30\ \mu\text{m}$ bis $+30\ \mu\text{m}$ aufgetragen. Auf der vertikalen Achse ist die Profilwinkelabweichung des Schneckenrades in den Grenzen von $-30\ \mu\text{m}$ bis $+30\ \mu\text{m}$ aufgetragen. Beide Parameter wurden in der Zahnkontaktanalyse in fünf Schritten variiert. Für jede mögliche Kombination beider Parameter wurde in ZaKo3D die maximale Flankenpressung berechnet. Die maximale Flankenpressung wird anhand der Farbskala in das Diagramm eingetragen. Somit ist auf einen einfachen Blick zu erkennen, welche Mikrogeometrieabweichungen zu einer günstigen und welche Mikrogeometrieabweichungen zu einer ungünstigen Pressungsverteilung führen.

Zusätzlich zu Flankenlinienwinkelabweichung und Profilwinkelabweichung wurden die Profil- und Breitenballigkeit des Schneckenrads variiert. Diese beiden Parameter wurden in der Zahnkontaktanalyse in fünf Schritten variiert und sind auf den globalen Achsen im linken Teil von **Bild 3–5** aufgetragen. Für jedes Wertepaar aus Profil- und Breitenballigkeit wird eine Variantenrechnung von Flankenlinienwinkelabweichung und Profilwinkelabweichung durchgeführt. Das bedeutet, dass für jedes Wertepaar aus Profil- und Breitenballigkeit ein Briefmarkendiagramm dargestellt werden kann. Es lässt sich somit visualisieren, wie Balligkeiten die Empfindlichkeit gegenüber Winkelabweichungen beeinflussen. In der durchgeführten Varian-

tenrechnung ist zu erkennen, dass eine Auslegung ohne zusätzliche Balligkeiten zu geringen Pressungswerten führen, wenn keine Winkelabweichungen auftreten. Insbesondere bei einer Vergrößerung der Flankenlinienwinkelabweichung ist jedoch eine deutliche Erhöhung der Flankenpressung zu verzeichnen. Im Gegensatz dazu verhält sich eine Variante mit einer hohen Breitenballigkeit unempfindlicher gegenüber Flankenlinienwinkelabweichungen. Sind jedoch nur sehr geringe Winkelabweichungen zu erwarten, ergeben sich höhere Werte für die Pressungen. Unter Kenntnis der erreichbaren Genauigkeiten der Fertigungsprozesse sowie Montageteranzen und dem lastabhängigen Verlagerungsverhalten ist es somit möglich, Mikrogeometrievarianten auszulegen, die für die entsprechenden Toleranzfeldgrößen geringe Pressungswerte aufweisen und unempfindlich gegenüber Verlagerungen sind.

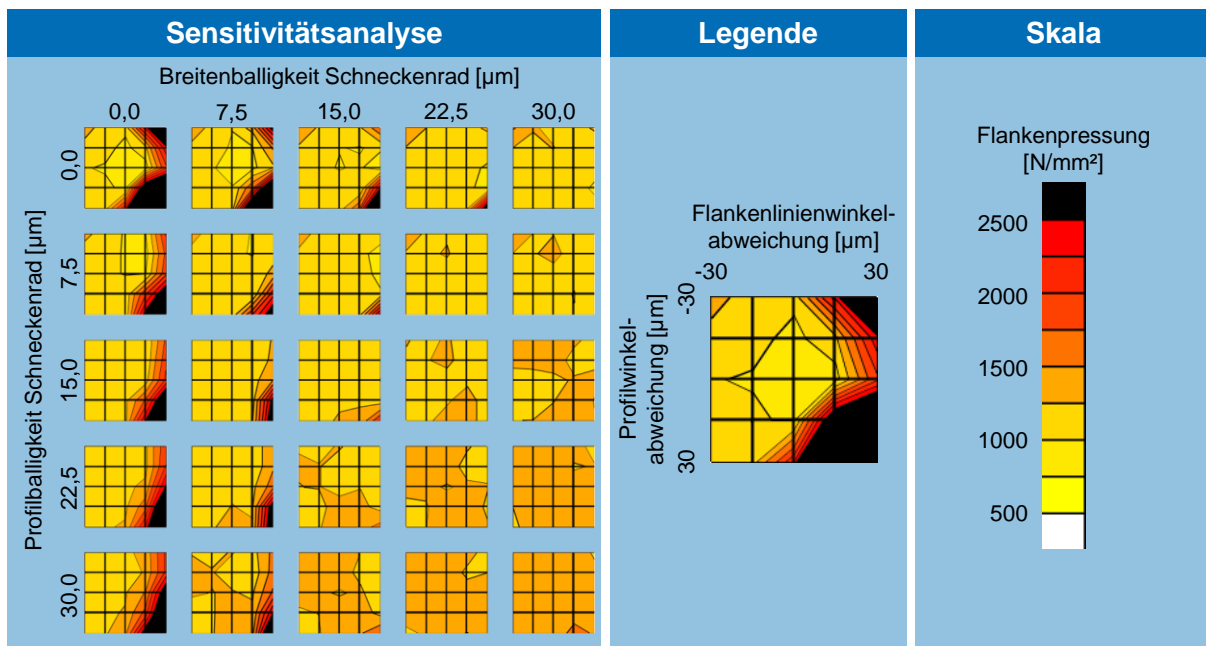


Bild 3–5: Einfluss der Mikrogeometrie auf die Flankenpressung

Bewertung des Verlagerungsverhaltens lt. Zeichnungstoleranzen

Das Kapitel 0 beschreibt die Arbeiten, die die Bewertung der Montageteranzen auf Basis der Toleranzanalyse des Zentrums für Mechatronik und Automatisierungstechnik (ZeMA), betreffen. Übergeordnetes Ziel des Rahmenplans ist dabei die Auslegung und Bewertung der Mikrogeometrie und der Montageteranzen der Schneckenräder in Zusammenarbeit mit dem Institut LIFA der Ruhr-Universität Bochum, dem ZeMA und Bonfiglioli.

Im Folgenden wird die Verlagerung des Tragbildes auf dem Schneckenrad unter Variation der Montageabweichungen für das Schneckengetriebe 1 simulativ analysiert. Das Schneckengetriebe 1 weist einen Achsabstand von $a = 49,5 \text{ mm}$ und eine Übersetzung von $i = 60$ auf und ist mit einem ZI-Profil ausgelegt. Bild 3–6 zeigt ein 3D-Modell der Verzahnung unter Angabe der wichtigsten Verzahnungsdaten. Für die Verlagerungsanalyse wurden vom ZeMA dazu in einer Toleranzkettenanalyse alle möglichen Lagen der Lagerbohrungen anhand der Zeichnungstoleranzen ermittelt und in eine Abweichung des Achskreuzwinkels und eine Abweichung der axialen Position des Schneckenrades umgerechnet. Mithilfe der Software ZaKo3D, die in diesem Projekt an die Berechnung von Schneckengetrieben angepasst wurde, wird die Tragbildlage in Abhängigkeit dieser Abweichungen ermittelt.

- **Daten Radpaarung**
 - a = 49,5 mm
 - i = 60
 - $m_x = 1,299$ mm
- **Daten Schnecke**
 - $z_1 = 1$
 - $\alpha_1 = 20^\circ$
 - $d_{m1} = 21,047$ mm
 - $d_{a1} = 23,6$ mm
- **Daten Schneckenrad**
 - $z_2 = 60$
 - $b_2 = 14$ mm
 - $d_{e2} = 81,8$ mm
- **Profilform**
ZI-Profil

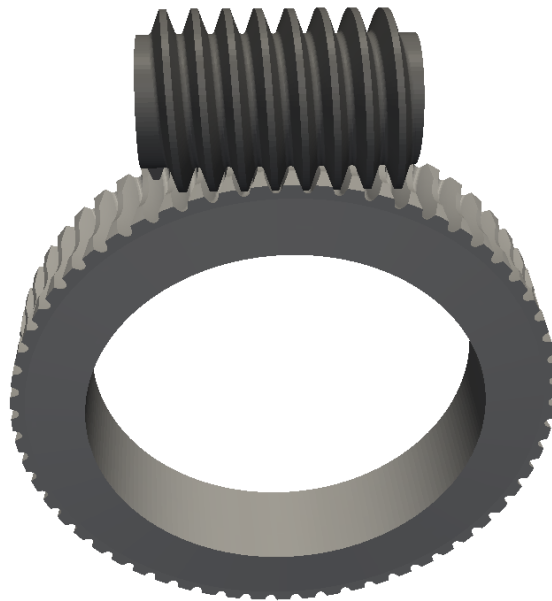


Bild 3–6: Schneckengetriebe 1 mit ZI-Profil

Das Ergebnis der Tragbildberechnung ist in **Bild 3–7** dargestellt. Das Bild zeigt neun verschiedene Tragbilder des Schneckengetriebes 1 in Abhängigkeit der Verlagerungssituation. Die Legende zu der Darstellung ist in **Bild 3–26** im Anhang zu finden. Das Tragbild in der Mitte von **Bild 3–7** ist für die Sollposition dargestellt. Die umliegenden Tragbilder wurden unter Berücksichtigung von Achsverlagerungen berechnet. Die linken drei Tragbilder weisen dabei den durch das ZeMA ermittelten kleinsten möglichen Achskreuzwinkel Σ innerhalb des Toleranzfeldes auf. Die rechten drei Tragbilder wurden entsprechend für den größtmöglichen Achskreuzwinkel berechnet. Dazwischen sind die Tragbilder für den Soll-Achskreuzwinkel dargestellt. In vertikaler Richtung wird entsprechend die axiale Verschiebung des Schneckenrades variiert. Im oberen Bereich wird das Schneckenrad in Richtung der auslaufenden Flankenseite maximal ausgelenkt, im unteren Bereich entsprechend in Richtung der einlaufenden Flankenseite.

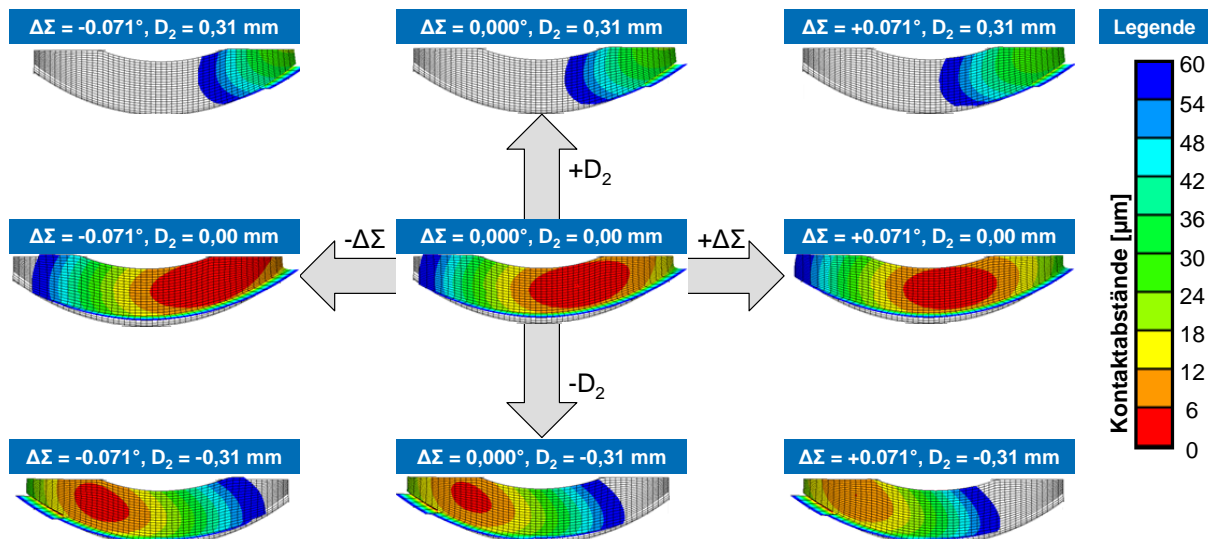


Bild 3–7: Verlagerungsverhalten der ZI-Schnecke in den vom ZeMA ermittelten Toleranzbereichen

Bei den ermittelten Abweichungen zeigen sich extreme Verlagerungen des Tragbilds. Insbesondere die axiale Verlagerung des Schneckenrades hat einen großen Einfluss auf die Tragbildlage. Bei einer axialen Verlagerung von $\Delta D_2 = 0,31$ mm verlagert sich das Tragbild an die auslaufende Flankenseite und es kommt dort zum Kantentragen. Bei einer axialen Verlagerung von $\Delta D_2 = -0,31$ mm wandert das Tragbild auf die einlaufende Flankenseite. Da an dieser Stelle die Berührlinien und Gleitgeschwindigkeiten in die gleiche Richtung zeigen, kann es zu einem Abreißen des Schmierfilms kommen. Daher ist zu vermeiden, dass das Tragbild an dieser Stelle liegt.

Die ermittelten Achskreuzwinkelabweichungen beeinflussen die Tragbildlage deutlich weniger als die ermittelten axialen Verlagerungen des Schneckenrades. Nichtsdestoweniger wird das Tragbild bei einer Veränderung des Achskreuzwinkels von $\Delta\Sigma = -0,071^\circ$ an die Kante des Zahnkopfes verlagert. Da zu erwarten ist, dass sich durch die Kombination mit anderen Lageabweichungen noch größere Verlagerungen des Tragbildes ergeben, ist der ermittelte Abweichungswert als nicht akzeptabel zu bewerten.

Von der Ruhr-Universität Bochum wurden nachfolgend engere Achslagetoleranzen für das Schneckengetriebe 1 vorgeschlagen, die bei $\Delta a = \pm 0,01$ mm für die Achsabstandsabweichung, $\Delta\Sigma = \pm 0,025^\circ$ für die Achskreuzwinkelabweichung und bei $\Delta D_2 = \pm 0,01$ mm für die axiale Verlagerung des Schneckenrades liegen. Das **Bild 3–8** zeigt die Tragbilder, welche unter Ausnutzung der Einzeltoleranzen ermittelt wurden. Die Legende zu der Darstellung ist ebenfalls in **Bild 3–26** im Anhang zu finden. Im Vergleich zu den Tragbildverlagerungen in **Bild 3–7** zeigt sich eine deutlich stabilere Tragbildlage. Einzig bei der Achskreuzwinkelabweichung von $\Delta\Sigma = -0,025$ mm tritt Kontakt an der Kopfkante auf. Das Tragbild zeigt für alle Varianten einen hinreichend großen Abstand zur Kante der auslaufenden Flankenseite und ist für keine der Einzelabweichungen auf der einlaufenden Flankenseite positioniert. Es ist somit ein deutlich stabileres Einsatzverhalten zu erwarten.

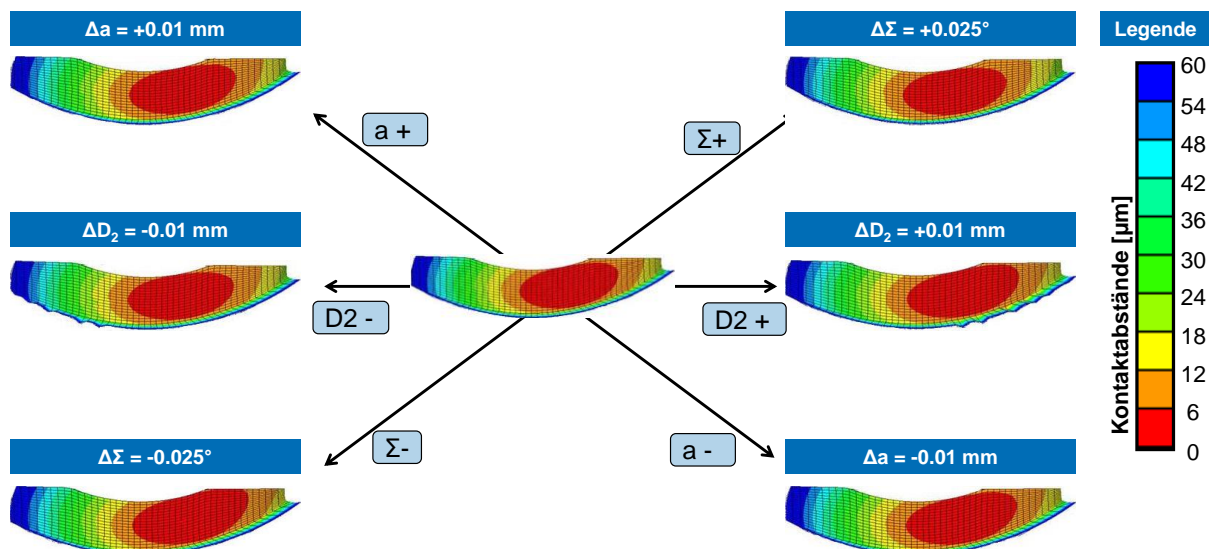


Bild 3–8: Verlagerungsverhalten der ZI-Schnecke in den von der Ruhr-Universität Bochum festgelegten Toleranzbereichen

Vergleich der Verlagerungssensitivität von Schneckengetrieben mit ZI- und ZC-Profil

Das Kapitel 0 beschreibt die Arbeiten den Vergleich des Verlagerungsverhaltens der ZI- und der ZC-Schneckenprofile betreffen. Hinter dem ZI-Profil stellt das ZC-Profil die in industriellen Anwendungen am häufigsten verwendete Schneckenprofilform dar. Aufgrund des

konvex-konkaven Kontaktes sind die Flankenpressung bei Verwendungen des ZC-Profiles gegenüber dem ZI-Profil reduziert. Jedoch reagiert dieser konvex-konkave Kontakt empfindlicher auf Positionsveränderungen im Vergleich zum konvex-konvexen Kontakt (ZI-Profil). Für die Beurteilung des ZC-Profiles gilt es daher, den Einfluss der Positionsveränderung zu charakterisieren. Ein 3D-Modell der Schneckenverzahnung 1 mit ZC-Profil ist in **Bild 3–9** mit der Angabe der wichtigsten Verzahnungsdaten dargestellt.

- **Daten Radpaarung**
 - a = 49,5 mm
 - i = 60
 - $m_x = 1,299$ mm
- **Daten Schnecke**
 - $z_1 = 1$
 - $\alpha_1 = 20^\circ$
 - $d_{m1} = 19,228$ mm
 - $d_{a1} = 21,826$ mm
- **Daten Schneckenrad**
 - $z_2 = 60$
 - $b_2 = 15$ mm
 - $d_{e2} = 83,670$ mm
- **Profilform**
ZC-Profil

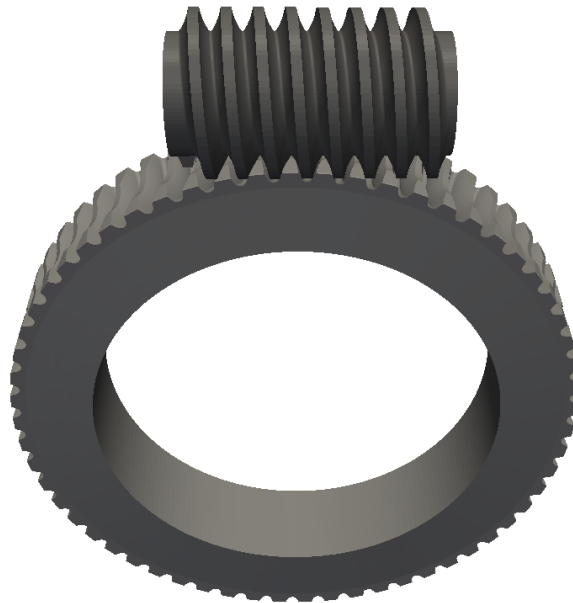


Bild 3–9: Schneckengetriebe 1 mit ZC-Profil

Innerhalb des Toleranzbereichs, der von der Ruhr-Universität Bochum vorgegeben wurde, wurde dazu eine Analyse des Verlagerungsverhaltens einer Schneckenverzahnung mit ZC-Profil durchgeführt. Das Ergebnis ist in **Bild 3–10** dargestellt. Es handelt sich um die gleiche Analyse, die für die Schneckenradverzahnung mit ZI-Profil in **Bild 3–8** dargestellt ist. Die Legende zu der Darstellung ist in **Bild 3–26** im Anhang zu finden.

Im Vergleich zur ZI-Schnecke zeigt sich für die ZC-Schnecke ein deutlich empfindlicheres Verlagerungsverhalten. Dies gilt insbesondere in Bezug auf Achsabstandsänderungen. Jedoch ist auch für Schneckengetriebe mit ZC-Profil kein Kantentragen in den von der Ruhr-Universität Bochum vorgegebenen Toleranzbereichen aufgetreten.

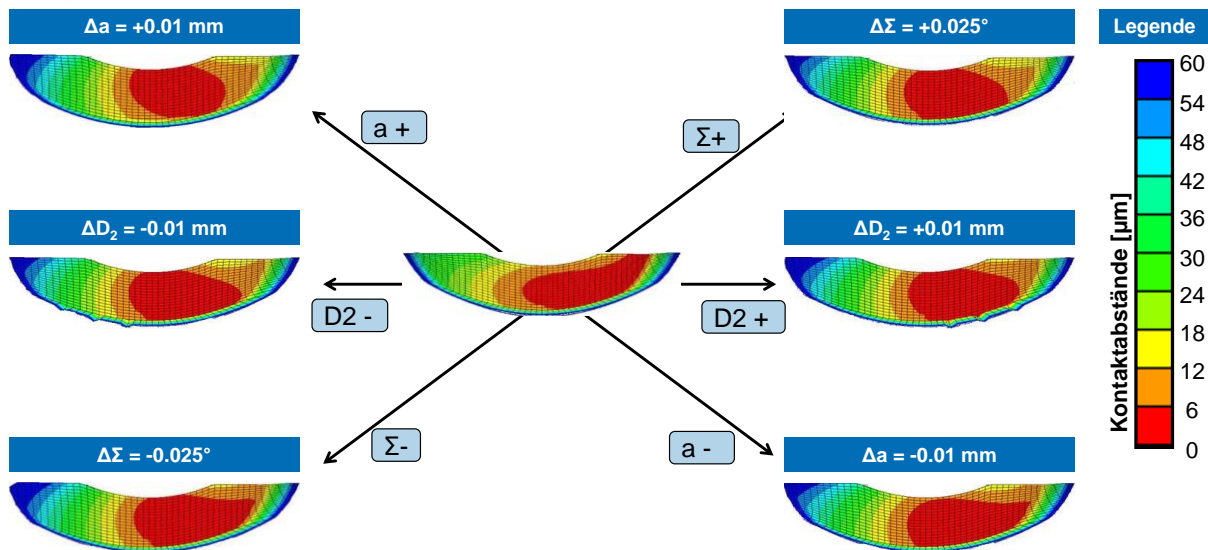


Bild 3–10: Verlagerungsverhalten der ZC-Schnecke in den von der Ruhr-Universität Bochum festgelegten Toleranzbereichen

Aufbau der ZaKo3D-Modelle der Schneckengetriebe für die zweite Projektphase

Für die Berechnungen in der WZL-Software ZaKo3D wurde die Software in der ersten Projektphase um die Zahnkontaktanalyse von Schneckengetrieben unter Last erweitert. Mit Hilfe der Eingangsdaten, die vom Programm TraBi der Ruhr-Universität Bochum erzeugt wurden, ist es möglich, mit Hilfe eines FE-basierten Einflusszahlenmodells Kenngrößen für das Einsatzverhalten von Schneckengetrieben unter Last zu berechnen und Fertigungs- sowie Einbautoleranzen zu bewerten.

Für die zweite Projektphase wurden die ZaKo3D-Modelle der Schneckengetriebe für diese Projektphase erstellt. In **Bild 3–11** sind dazu die verwendeten FE-Modelle dargestellt. Auf der linken Seite sind die Geometrien G1 & G2 aufgeführt. Die Geometrie G1 entspricht dem Schneckengetriebe mit einem Achsabstand von $a = 62,17$ mm, mit dem die Screeningversuche bei der Elgeti Engineering GmbH durchgeführt wurden. Dieses Modell wurde bereits in der ersten Projektphase für die Auslegung und die Sensitivitätsanalyse verwendet. Die Geometrie G2 ist ein aus Schneckengetriebe G1 abgeleitetes Schneckengetriebe, das eine ZC-Flankenform aufweist. Dieses Modell wurde verwendet, um einen Vergleich zwischen der ZI- und der ZC-Flankenform durchzuführen.

Die Schneckengetriebe G3 & G4 in der Mitte von **Bild 3–11** weisen im Vergleich zu den Getrieben G1 & G2 einen geringeren Achsabstand von $a = 49,5$ mm auf. Am Getriebe G3 wurden in der zweiten Projektphase ebenfalls praktische Untersuchungen durchgeführt. An diesem Schneckengetriebe, das eine ZI-Flankenform aufweist, wurde daher in Zusammenarbeit mit der Ruhr-Universität Bochum im Rahmen der Auslegung eine Mikrogeometrieoptimierung durchgeführt. Das Schneckengetriebe G4 ist, in Analogie zur Geometrie G2, ein Schneckengetriebe mit ZC-Flankenform, an dem der Vergleich zwischen den Flankenformen ZI und ZC durchgeführt wird.

Auf der rechten Seite sind die Schneckengetriebe G5 & G6 dargestellt. Die Makrogeometrie von Schneckengetriebe G5 entspricht dem FVA-Standardschneckengetriebe mit einem Achsabstand von $a = 100$ mm und einer Übersetzung von $i = 20,5$. Die Flankenform ist eine ZI-Flankenform. Das Getriebe G6 ist vom Getriebe G5 abgeleitet, jedoch wird Getriebe G6 mit einer ZC-Flankenform ausgeführt.

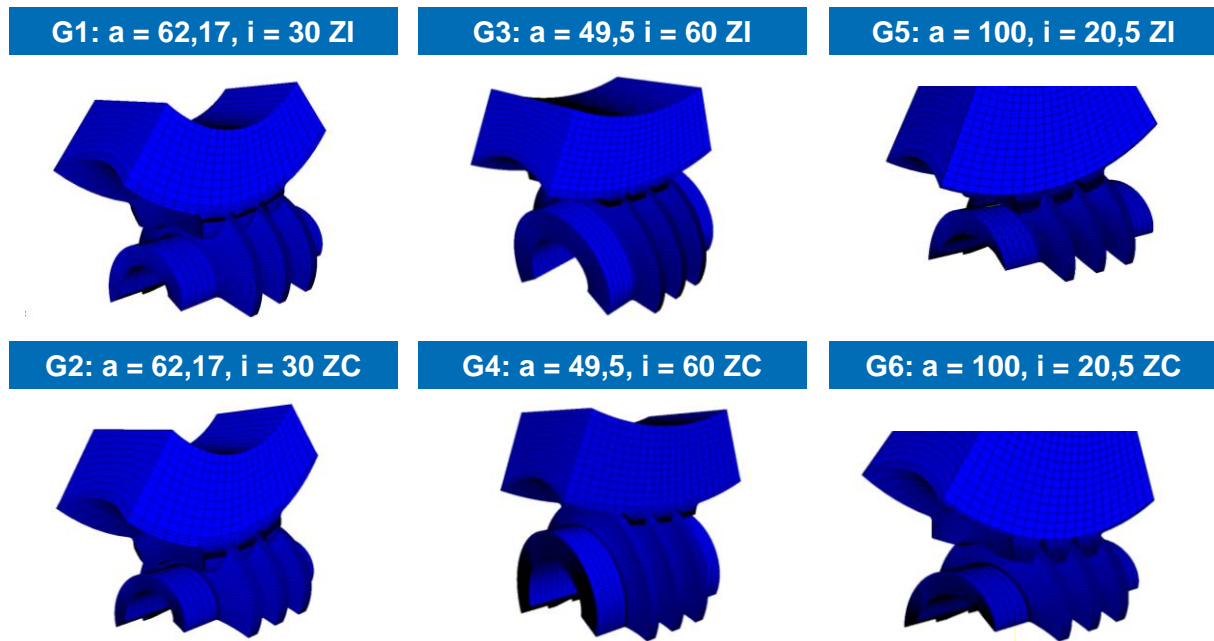


Bild 3–11: ZaKo3D-Modelle der Schneckengetriebe G1 - G6

Mitarbeit bei der Auslegung von Schneckengetriebe 2&3

Für das Schneckengetriebe 2 des Rahmenplans (Geometrien G3&G4) wurde in Zusammenarbeit mit der Ruhr-Universität Bochum die Mikrogeometrie ausgelegt. Dazu wurden von der Ruhr-Universität Bochum über die in diesem Projekt erarbeitete Schnittstelle die Eingangsdaten für die Zahnkontaktanalyse erstellt, die anschließend in ZaKo3D analysiert wurde. In Abstimmung mit der Ruhr-Universität Bochum wurde die Geometrie des Schneckengetriebes festgelegt. Ergebnisse dieser Auslegung sind in **Bild 3–12** dargestellt.

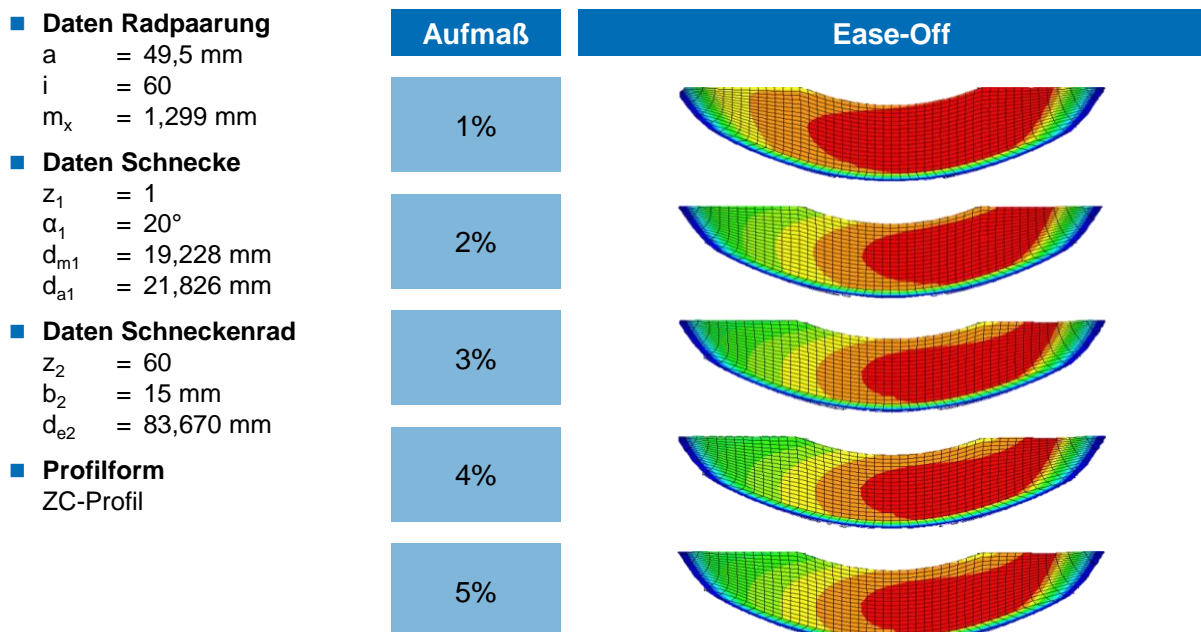


Bild 3–12: Vergleich des Ease-Off für Schneckengetriebe G4 mit ZC-Profil bei verschiedenen Aufmaßen

Das **Bild 3–12** zeigt exemplarisch die Ergebnisse aus ZaKo3D, die zur Festlegung des Aufmaßes der Variante G4 verwendet wurden. Das Aufmaß beschreibt die radiale Veränderung des

Werkzeugprofils (Veränderung des Profilwinkels) und beeinflusst entsprechend die Mikrogeometrie der Verzahnung und somit die Kontaktverhältnisse und ist daher ein Parameter der Mikrogeometrieauslegung.

Auf der rechten Seite sind die Ease-Off Abweichungsflächen für verschiedene Aufmaße dargestellt. Die Aufmaße variieren zwischen 1% und 5%. Je größer das Aufmaß gewählt wird, umso kleiner wird das Tragbild und umso stärker ist das Tragbild auf die auslaufende Flankenseite verlagert (vgl. Legende in **Bild 3–26**). Die Kriterien bei der Auswahl der Tragbilder waren ein ausreichender Abstand des Tragbildes zur einlaufenden Flankenseite, da dort ungünstige Gleitgeschwindigkeitsverhältnisse vorherrschen, sowie die Vermeidung von Unterschnitt und Kantentragen. Die Variante mit 5% Aufmaß erfüllt diese Anforderungen am besten.

Für die finalen Auslegungen der Schneckenverzahnungen wurde in ZaKo3D eine Tragbildberechnung durchgeführt. Die Tragbilder sind in **Bild 3–13** dargestellt und liegen bei allen Varianten im Bereich der Zahnflankenmitte mit einer leichten Verlagerung auf die Auslaufseite. Eine Ausnahme bildet die Variante G4, bei der das Tragbild deutlicher in den Bereich der Auslaufseite verlagert ist, als dies bei den anderen Varianten der Fall ist.

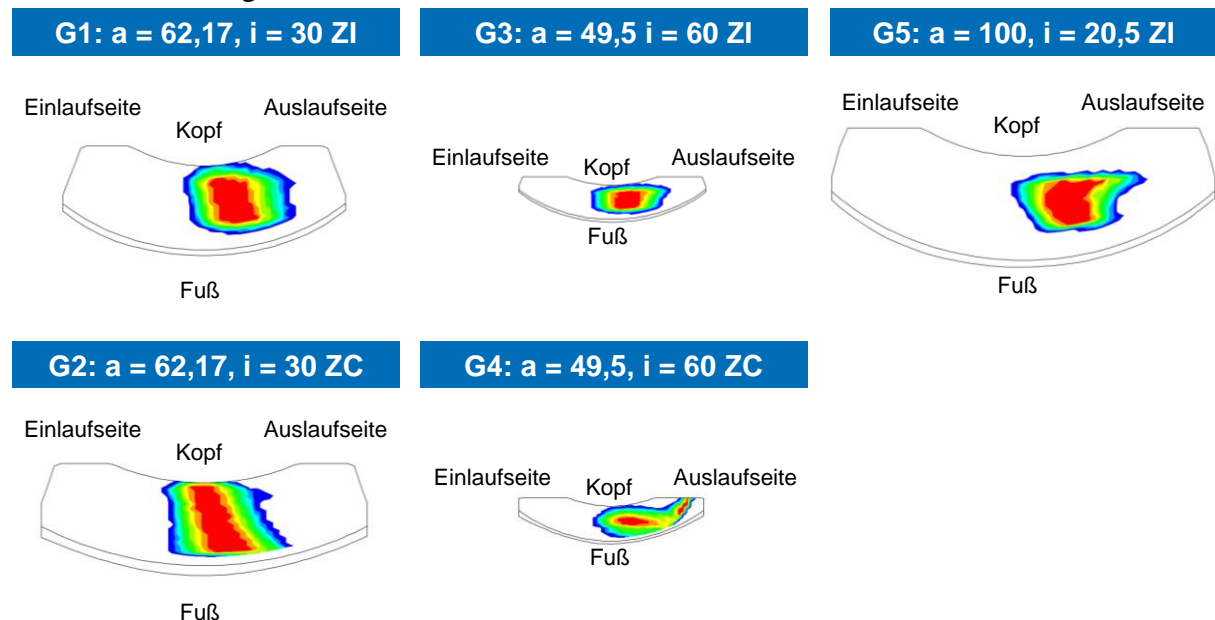


Bild 3–13: Finale Tragbilder der Varianten G1 – G5

3.2.3. Zwischenfazit

Das zweite Teilziel umfasst unter anderem die Untersuchung der Sensitivität der Tragbildlage innerhalb der Zeichnungstoleranzen und innerhalb der von der Ruhr-Universität Bochum ausgelegten Toleranzen. Es wurde gezeigt, dass die Toleranzen, die in den aktuellen Zeichnungen eingetragen sind, zu Achslageabweichungen führen können, die ein extremes Kantentragen der Verzahnung zur Folge haben. Des Weiteren wurden der Einfluss der von der Ruhr-Universität Bochum vorgeschlagenen Achslagetoleranzen auf die Tragbildlage untersucht. Es wurde gezeigt, dass die angepassten Achslagetoleranzen zu einem deutlich stabileren Einsatzverhalten führen.

In einem weiteren Schritt wurde ein Vergleich zwischen dem Verlagerungsverhalten von ZI- und der ZC-Schnecken geometrien durchgeführt. Es wurde gezeigt, dass sich für das ZC-Profil ein empfindlicheres Verlagerungsverhalten einstellt als bei der ZI-Schnecke, dass jedoch im

vorgegebenen Toleranzbereich bezüglich der Achslageabweichungen kein Kantentragen auftritt.

Neben der Verzahnungsvariante mit einem Achsabstand $a = 62,17$ mm werden zwei weitere Achsabstände untersucht. Für diese Varianten gilt es ebenfalls die Tragbilder auf ihre Lage hin zu untersuchen. Dazu wurden die ZaKo3D-Modelle aufgebaut und die Tragbilder der ausgelegten Verzahnungen berechnet. Die ausgelegten Tragbilder liegen auf der Auslaufseite der Zahnflanke, auf der günstige tribologische Eigenschaften erwartet werden. Zudem weisen sie ausreichend Abstand zu den Flankenberandungen auf.

Die Ergebnisse des zweiten Teilziels zeigen, dass die Software ZaKo3D dazu befähigt wurde Schneckenverzahnungen unterschiedlichster Geometrie und Profilform hinsichtlich ihres Einsatzverhalten bewerten zu können. Insbesondere die Möglichkeit der Variantenrechnung unter Berücksichtigung von Fertigungs- und Montageabweichungen sowie veränderter Achspositionieren ermöglicht dem Anwender die Auslegung robuster und für den Anwendungsfall optimierter Verzahnungsgeometrien.

3.2.4. Sensitivitätsanalyse auf Basis realer Messdaten

Teilziel 3 umfasst die Sensitivitätsanalysen bezüglich der Mikrogeometrieabweichungen aus den Härte- und den Hartfeinbearbeitungsprozessen auf Basis realer Verzahnungsmessungen. Ziel ist es, die Empfindlichkeit der betrachteten Verzahnung auf die entstehenden Mikrogeometrieabweichungen zu bewerten. Dabei wird unter Durchführung einer Variantenrechnung das Einsatzverhalten unterschiedlichen Mikrogeometrievarianten untersucht und anschließend ausgewertet.

Für die Variante G3 wurde bereits eine Vorstudie zur Tragbildverlagerung aufgrund der Mikrogeometrieabweichungen durchgeführt. Das Ergebnis sind die in **Bild 3–14** dargestellten Briefmarkendiagramme. Vergleichbare Diagramme wurden bereits in der ersten Projektphase an den Schneckengetrieben G1 & G2 für die Machbarkeitsstudie zur Sensitivitätsanalyse verwendet. Für die vier Abweichungsgrößen Profilwinkelabweichung, Flankenlinienwinkelabweichung, Profilballigkeit und Breitenballigkeit ist der Abstand des Tragbildes, bei einem Drehmoment am Schneckenrad von $M_2 = 95$ Nm, von der Einlaufseite der Zahnflanke dargestellt. Anhand der Diagramme ist zu erkennen, dass die Flankenlinienwinkelabweichung einen deutlich größeren Einfluss auf den Abstand des Tragbildes von der Einlaufseite der Zahnflanke hat als die Profilwinkelabweichung, die nahezu keinen Einfluss besitzt. Der Einsatz einer hohen Breitenballigkeit sorgt jedoch nicht dafür, dass die Verlagerungsempfindlichkeit deutlich sinkt. Eine weitere Erhöhung dieses Parameters führt zu keiner nennenswerten Verbesserung des Schneckengetriebes in Bezug auf die Verlagerungsempfindlichkeit in Breitenrichtung. In weiteren Studien soll nun der Einfluss der Mikrogeometrieabweichungen auf weitere Kenngrößen des Einsatzverhaltens bewertet werden.

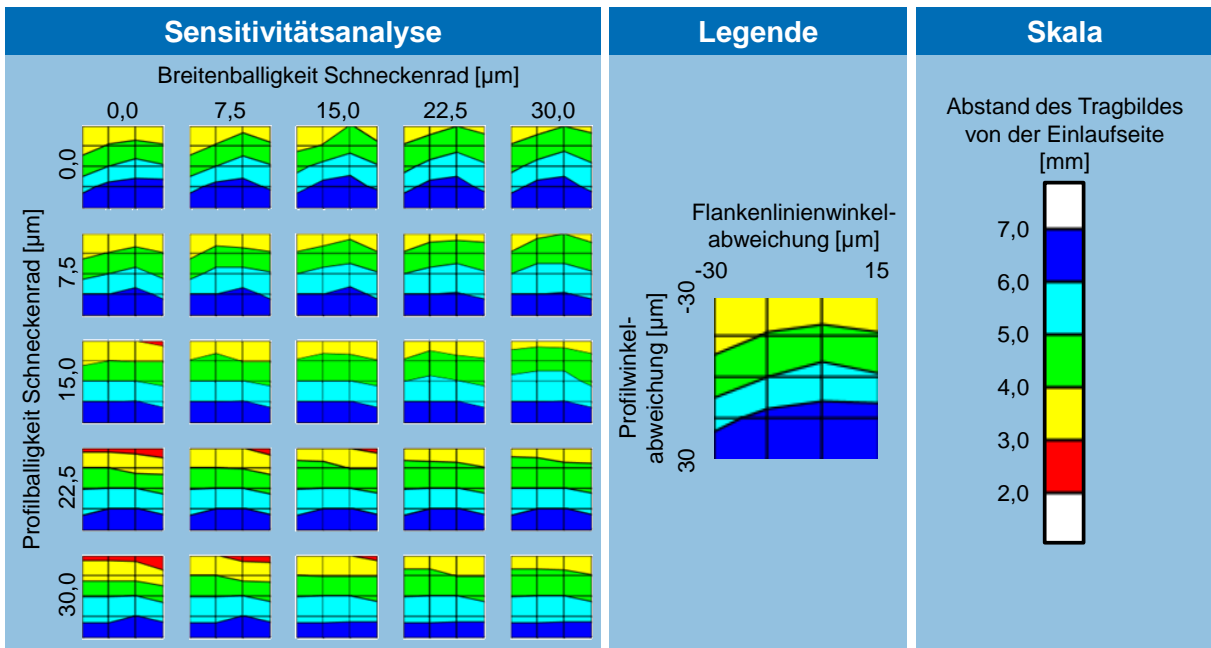


Bild 3–14: Vorstudie zur Sensitivitätsanalyse

Auswertung der Verzahnungsmessungen

Als Eingangsdaten für die Sensitivitätsanalyse standen Verzahnungstopografiemessungen der Schneckenräder zur Verfügung. Die Topografie wurde jeweils über vier Zähne verteilt gemessen. Das Messgitter hatte eine Größe von 15 Punkten in Profil- und 15 Punkten in Flankenrichtung. Das Verfahren zur Ermittlung der Mikrogeometrieabweichungen ist in **Bild 3–15** dargestellt.

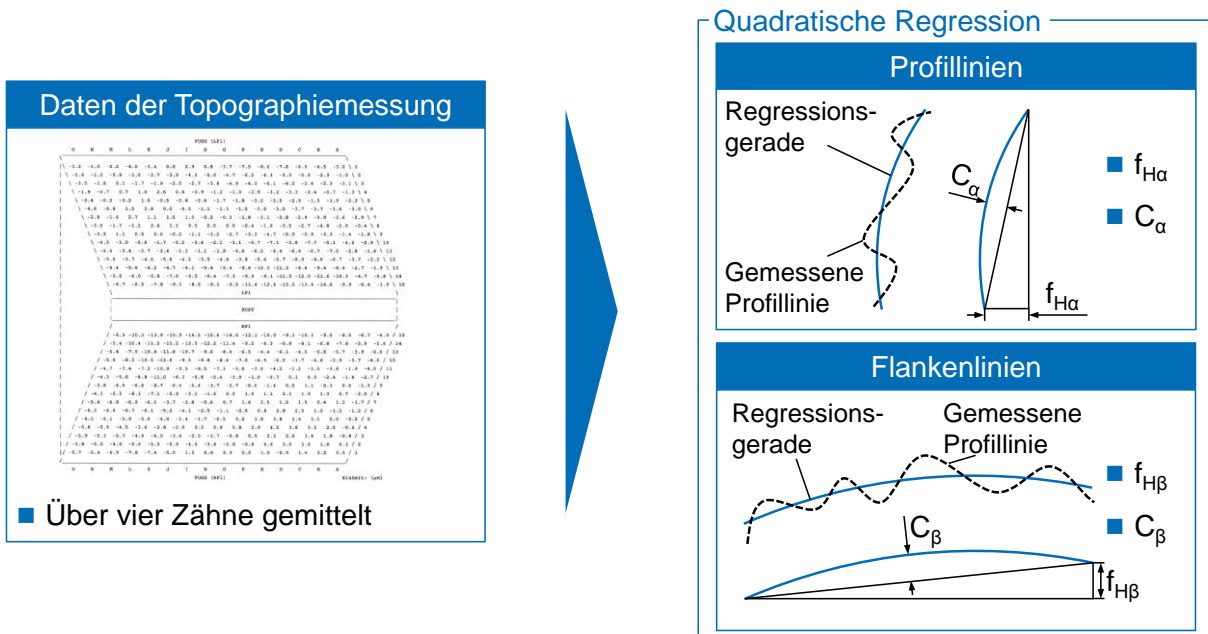


Bild 3–15: Vorgehen zur Ermittlung der Mikrogeometrieabweichungen

Basierend auf der über vier Zähne gemittelten Topografiemessung wurden die verzahnungstypischen Mikrogeometrieabweichungen $f_{H\alpha}$, $f_{H\beta}$, C_α und C_β mittels quadratischer Regression für die gemessenen Profil- und Flankenlinien bestimmt. Dieses Verfahren wurde für zwei verschiedene Schneckenräder zur statistischen Absicherung durchgeführt. Die Mikrogeometrieabweichungen für die Sensitivitätsanalyse wurden schließlich aus den Mittelwerten aller

gemessenen Profil- und Flankenlinien bestimmt und als Eingangsdaten für die Variantenrechnung des Schneckengetriebes G1 verwendet. Die Abweichungen von Mikrogeometrie beziehen sich dabei immer auf die Sollgeometrie der Verzahnung.

Sensitivitätsanalyse der Mikrogeometrieabweichungen aus den Härteprozessen

Für die Wärmebehandlung von Schneckenrädern wurden in diesem Forschungsprojekt zwei verschiedene Ansätze verwendet. Das Einsatzhärten und das Plasmanitrieren. Da aufgrund der niedrigen Prozesstemperaturen beim Plasmanitrieren geringe Härteverzüge im Vergleich zum Einsatzhärten auftreten, ist beim Plasmanitrieren kein nachfolgender Prozessschritt analog zur Hartfeinbearbeitung notwendig. Dadurch wirken sich Härteverzüge direkt auf das spätere Einsatzverhalten der Verzahnung aus. Dieser Einfluss der Härteverzüge wird in einer Sensitivitätsanalyse untersucht. Das Plasmanitrieren kann in zwei Verfahren unterteilt werden. Zum einen das Nitrieren und zum anderen das Nitrocarburieren, bei dem zusätzlich zum Stickstoff noch Kohlenstoff in der Gasatmosphäre vorhanden ist.

Die Analyse der Verzahnungsmessungen nach dem Nitrierprozess im Vergleich zur Sollauslegung ergibt im Mittel eine Abweichung des Profillinienwinkels $\Delta f_{H\alpha}$ von $2 \mu\text{m}$, eine Abweichung des Flankenlinienwinkels $\Delta f_{H\beta}$ von $4 \mu\text{m}$, eine Profilballigkeit ΔC_α von $1 \mu\text{m}$ und eine Breitenballigkeit ΔC_β von $2 \mu\text{m}$. Auf Basis der ermittelten Abweichungen wurden um die Sollauslegung symmetrische Toleranzfelder gelegt. Die Toleranzfelder haben eine Feldbreite, die dem Betrag der doppelten Abweichung entspricht. Diese Toleranzfelder wurden als Eingangsdaten für die Sensitivitätsanalyse verwendet. Der Einfluss der ermittelten Mikrogeometrieabweichungen aus den Härteverzügen des Nitrierprozesses auf die Flankenpressung bei einem Nennmoment von $M_2 = 190 \text{ Nm}$ ist in **Bild 3–16** dargestellt.

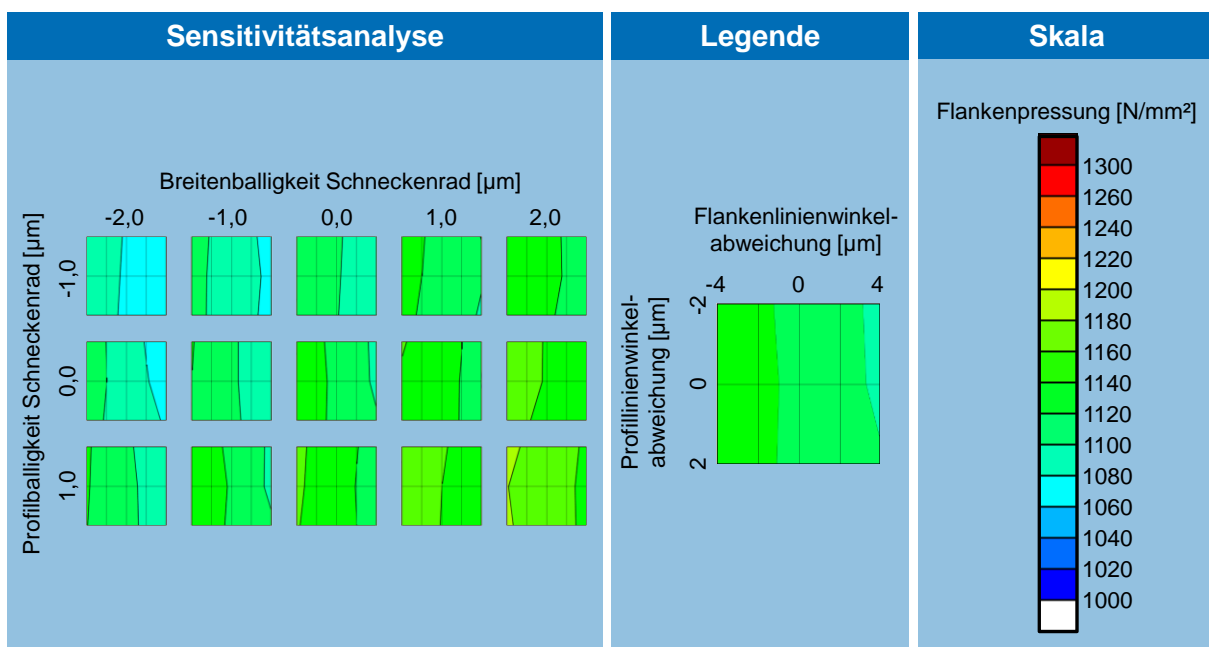


Bild 3–16: Einfluss der Abweichungen beim Nitrierprozess auf die Flankenpressung bei Nennmoment $M_2 = 190 \text{ Nm}$

Die linke Seite der Abbildung zeigt die Sensitivitätsanalyse als sogenannte Briefmarkendarstellung. Durch die Briefmarkendarstellung wird es ermöglicht, den Einfluss von vier verschiedenen Variablen auf eine Zielgröße abzubilden. Dazu werden lokale und globale Achsenparameter gewählt. Auf der globalen Abszisse ist die Breitenballigkeit des Schneckenrades

variiert. Die globale Ordinate zeigt die Variation der Profilballigkeit. Auf der lokalen Abszisse jeder Briefmarke wird die Flankenlinienwinkelabweichung und auf der lokalen Ordinate die Profillinienwinkelabweichung variiert. Die Zielgröße bildet die Flankenpressung, deren farbliche Skalierung der rechten Seite der Abbildung zu entnehmen ist.

Anhand der Briefmarkendarstellung lässt sich erkennen, dass aufgrund der geringen Härteverzüge nur geringe Schwankungen in der Flankenpressung im untersuchten Toleranzfeld auftreten. Diese liegen bei einem Maximum von ca. 5%. Die Analyse zeigt, dass die Kombination aus negativer Profil- und Breitenballigkeit einen positiven Einfluss auf die Flankenpressung des Schneckengetriebes nimmt. Für die Kombination aus positiver Profil- und Breitenballigkeit ergibt sich ein negativer Einfluss auf die Flankenpressung. Für negative Profil- und Breitenballigkeiten entsteht ein leicht vergrößertes Tragbild im Vergleich zur Sollgeometrie und zu positiven Profil- und Breitenballigkeiten. Aufgrund der verbesserten Lastverteilung reduziert sich daher der Betrag der maximalen Flankenpressung. Diese Phänomene lassen sich auch bei halbem Nennmoment von $M_2 = 95 \text{ Nm}$ (vgl. **Bild 3–27**, Anhang) und bei Überlast von $M_2 = 390 \text{ Nm}$ (vgl. **Bild 3–28**, Anhang) feststellen.

Der Einfluss der Härteverzüge aus dem Nitrierprozess auf den Summendrehsfehler bei einem Nennmoment von $M_2 = 190 \text{ Nm}$ ist in **Bild 3–17** dargestellt.

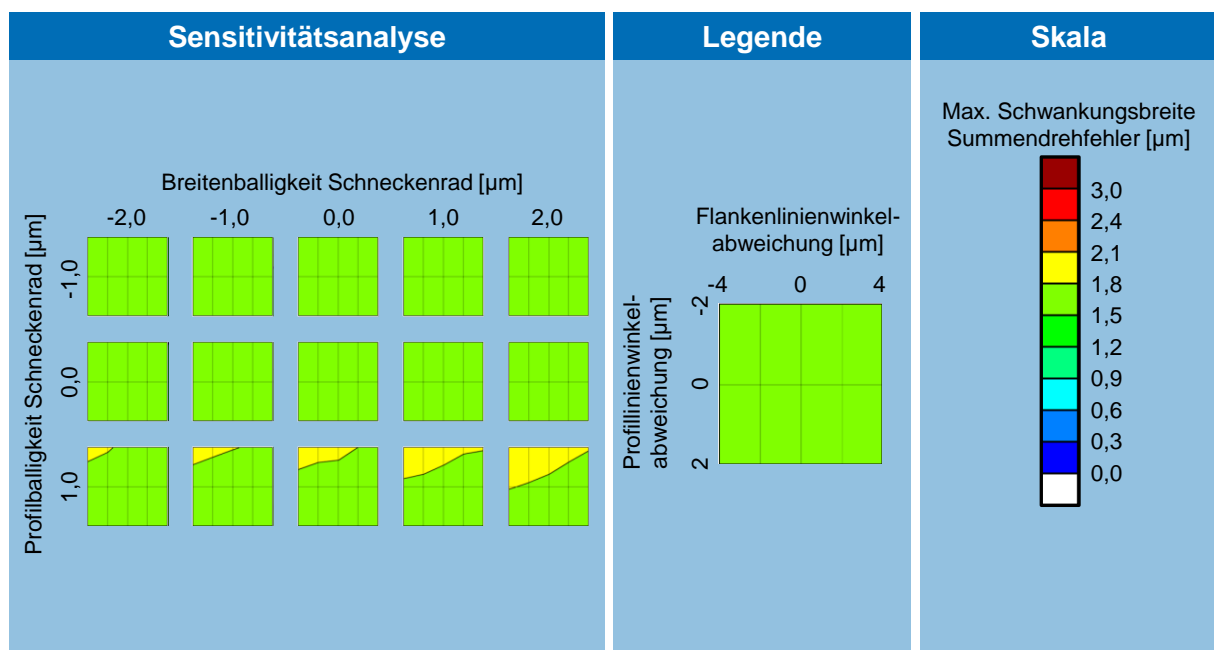


Bild 3–17: Einfluss der Abweichungen beim Nitrierprozess auf den Summendrehsfehler bei Nennmoment $M_2 = 190 \text{ Nm}$

Der Aufbau der Abbildung folgt analog dem Aufbau der Betrachtung der Flankenpressung. Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse zeigen, dass die ermittelten Mikrogeometrieabweichungen aufgrund ihrer geringen Unterschiede zur Sollgeometrie ebenfalls nur einen geringen Einfluss auf die Schwankungsbreite des Summendrehsfehlers nehmen. Auffällig ist, dass die Kombination aus positiver Profilballigkeit und negativer Profillinienwinkelabweichungen einen negativen Einfluss auf die maximale Schwankungsbreite besitzt. In dieser Kombination wird das Tragbild leicht im Vergleich zur Sollgeometrie reduziert. Dies wirkt sich vor allem auf den lastfreien Anteil des Summendrehsfehlers aus, dessen Schwankungsbreite im Betrag ansteigt. Für das halbe Nennmoment von $M_2 = 95 \text{ Nm}$ führt eine negative Flankenlinienwinkelabweichung zu einer höheren Schwankungsbreite im Summendrehsfehler (vgl. **Bild 3–29**, Anhang). Aufgrund der geringeren Last besitzt der lastfreie Anteil des Summendrehsfehlers

einen größeren Effekt auf den Summendrehfehler. Da sich für die Varianten mit positiver Flankenlinienwinkelabweichung im Vergleich zur negativen Flankenlinienwinkelabweichung leicht vergrößerte Tragbilder ergeben, sinkt die Schwankungsbreite des lastfreien Anteils im Summendrehfehler. Bei einem Drehmoment oberhalb des Nennmoments von $M_2 = 380 \text{ Nm}$ zeigt sich ein gegenläufiges Bild. Hier führt eine positive Korrektur der Flankenlinienwinkelabweichung zu einer erhöhten Schwankungsbreite (vgl. **Bild 3–30**, Anhang). Der Einfluss der lastbedingten Effekte im Summendrehfehler nimmt entsprechend mit der Last zu. Es ergibt sich mit einer positiven Flankenlinienwinkelabweichung ein verkleinertes Tragbild unter Last für das Drehmoment $M_2 = 390 \text{ Nm}$ im Vergleich zu einer negativen Flankenlinienwinkelabweichung. Insgesamt ist festzustellen, dass die relative Abweichung in der Schwankungsbreite des Summendrehfehlers aufgrund der hohen Fertigungsqualität sehr gering ist.

Die Analyse der Verzahnungsmessungen nach dem Nitrocarburierprozess ergibt im Mittel im Vergleich zur Sollgeometrie eine Abweichung des Profillinienwinkels $\Delta f_{H\alpha}$ von $2 \mu\text{m}$, eine Abweichung des Flankenlinienwinkels $\Delta f_{H\beta}$ von $4 \mu\text{m}$, eine Profilballigkeit ΔC_α von $1 \mu\text{m}$ und eine Breitenballigkeit ΔC_β von $1 \mu\text{m}$. Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse unter Betrachtung der Flankenpressung sind in **Bild 3–18** dargestellt.

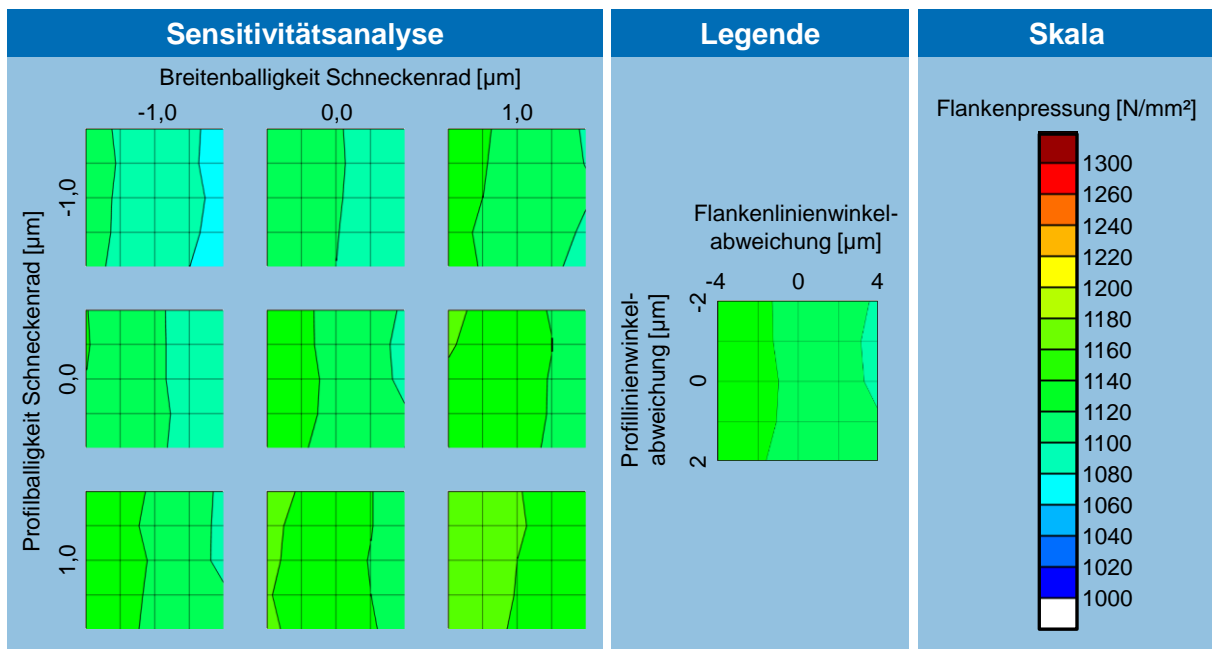


Bild 3–18: Einfluss der Abweichungen beim Nitrocarburierprozess auf die Flankenpressung bei Nennmoment $M_2 = 190 \text{ Nm}$

Analog zu den Ergebnissen der Sensitivitätsanalyse für den Nitrierprozess zeigen die Ergebnisse für die Analyse des Nitrocarburierprozesses ähnliche Effekte bei Betrachtung der Flankenpressung im untersuchten Toleranzfeld. Auch hier wirkt sich eine Kombination aus negativer Profil- und Breitenballigkeit positiv auf die Flankenpressung aus. Zudem zeigen die Ergebnisse, dass eine positive Flankenlinienwinkelabweichung einen positiven Einfluss und eine negative Flankenlinienwinkelabweichung im Vergleich zur Sollgeometrie einen negativen Einfluss auf die Flankenpressung besitzt. Aufgrund des vergrößerten Tragbildes und der verbesserten Lastverteilung wird die Flankenpressung reduziert. Dies verdeutlicht sich auch bei Betrachtung der Ergebnisse für die beiden anderen untersuchten Drehmomente (vgl. **Bild 3–31**, **Bild 3–32**, Anhang). Für den Nitrocarburierprozess zeigt sich ebenfalls, dass aufgrund der sehr geringen Abweichungen von der Mikrogeometrie der Sollauslegung nur geringe Schwankungen in der Flankenpressung entstehen.

Die Betrachtung des Einflusses der Mikrogeometrieabweichungen auf den Summendrehsfehler bei einem Nennmoment von $M_2 = 190 \text{ Nm}$ ist in **Bild 3–19** zu erkennen. Für die Schwankungsbreite des Summendrehsfehlers zeigen sich nur geringe relative Abweichungen im untersuchten Toleranzfeld. Deutlich wird, dass analog zum Nitrierprozess eine Kombination aus positiver Profilballigkeit und negativer Profillinienwinkelabweichung zu einer Erhöhung der Schwankungsbreite des Summendrehsfehlers führt. Für das halbe Nennmoment zeigt sich analog zum Nitrierprozess der negative Einfluss einer negativen Flankenlinienwinkelabweichung auf den Summendrehsfehler (vgl. **Bild 3–33**, Anhang). Für das doppelte Nennmoment als Überlast kehrt sich dieser Effekt um. Eine positive Flankenlinienwinkelabweichung besitzt für das höhere Drehmoment einen negativen Einfluss auf die Schwankungsbreite des Summendrehsfehlers (vgl. **Bild 3–34**, Anhang).

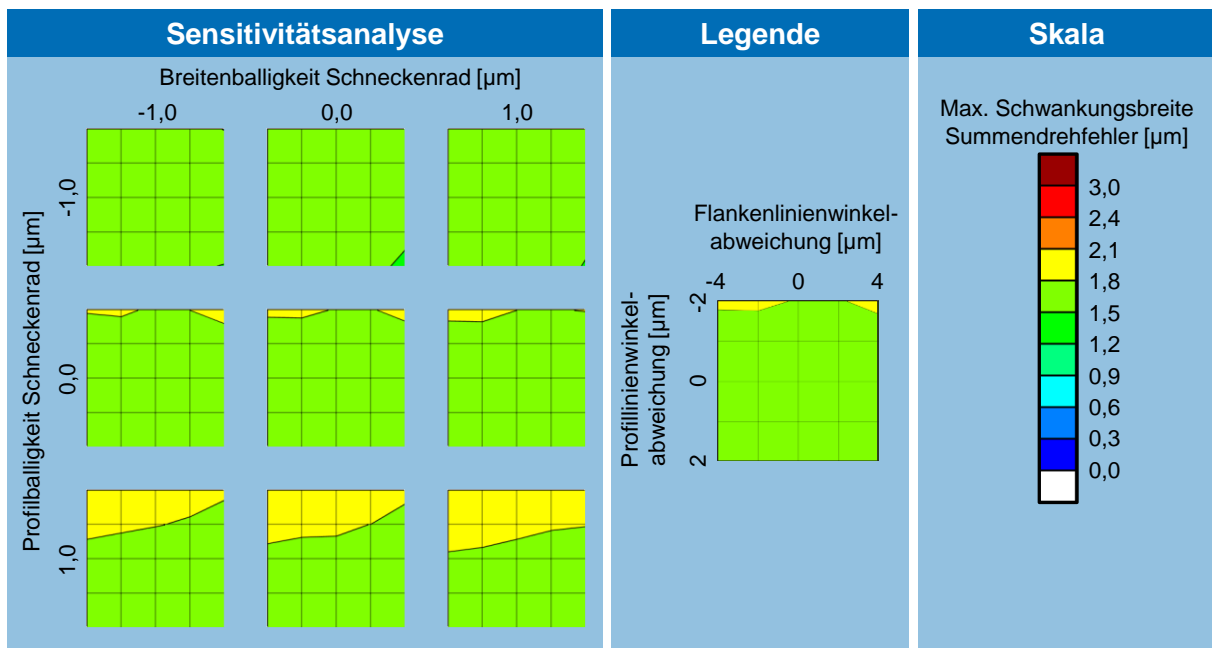


Bild 3–19: Einfluss der Abweichungen beim Nitrocarburierprozess auf den Summendrehsfehler bei Nennmoment $M_2 = 190 \text{ Nm}$

Sensitivitätsanalyse der Mikrogeometrieabweichungen aus den Hartfeinbearbeitungsprozessen

Werden einsatzgehärtete Schneckenräder verwendet, ist ein nachfolgender Hartfeinbearbeitungsprozess notwendig, um die entstehenden Härteverzüge nach dem Einsatzhärten auszugleichen. Als Verfahren der Hartfeinbearbeitung kommen das Wälzschleifen und das Schälwälzfräsen zum Einsatz.

Die Analyse der Verzahnungsmessungen nach dem Wälzschleifprozess ergibt im Mittel im Vergleich zur Sollgeometrie eine Abweichung des Profillinienwinkels $\Delta f_{H\alpha}$ von $6 \mu\text{m}$, eine Abweichung des Flankenlinienwinkels $\Delta f_{H\beta}$ von $2 \mu\text{m}$, eine Profilballigkeit ΔC_α von $6 \mu\text{m}$ und eine Breitenballigkeit ΔC_β von $2 \mu\text{m}$. In **Bild 3–20** sind die Einflüsse der Mikrogeometrieabweichungen auf die Flankenpressung für das Nennmoment von $M_2 = 190 \text{ Nm}$ dargestellt. Die Briefmarkendarstellung zeigt, dass eine Kombination aus einer geringeren Profil- und Breitenballigkeit im Vergleich zur Sollauslegung einen positiven Einfluss auf die Flankenpressung bei Nennmoment nimmt. Im Gegensatz dazu steigt die Flankenpressung an, sobald eine Kombination aus höheren Profil- und Breitenballigkeiten gewählt wird. Aufgrund der geringen Toleranzfeldbreiten liegt die Schwankung der Flankenpressung im Bereich von im Maximum ca. 10%. Zudem zeigt die Briefmarkendarstellung, dass eine Kombination aus ei-

ner negativen Profil- und Flankenlinienwinkelkorrektur ebenfalls einen negativen Einfluss auf die Flankenpressung nimmt, da sich hier ein geringer Traganteil im Vergleich einstellt. Dies ist vor allem in Kombination mit einer positiven Profilballigkeit festzustellen. Diese Phänomene lassen sich auch bei halbem Nennmoment von $M_2 = 95 \text{ Nm}$ (vgl. **Bild 3–35**, Anhang) und bei Überlast von $M_2 = 390 \text{ Nm}$ (vgl. **Bild 3–36**, Anhang) erkennen. Insgesamt zeigt sich, dass aufgrund der hohen Fertigungsqualität nur geringe Abweichungen im Wälzschleifprozess auftreten. Dies führt dazu, dass nur eine geringe Schwankung der Flankenpressung im untersuchten Toleranzfeld festzustellen ist.

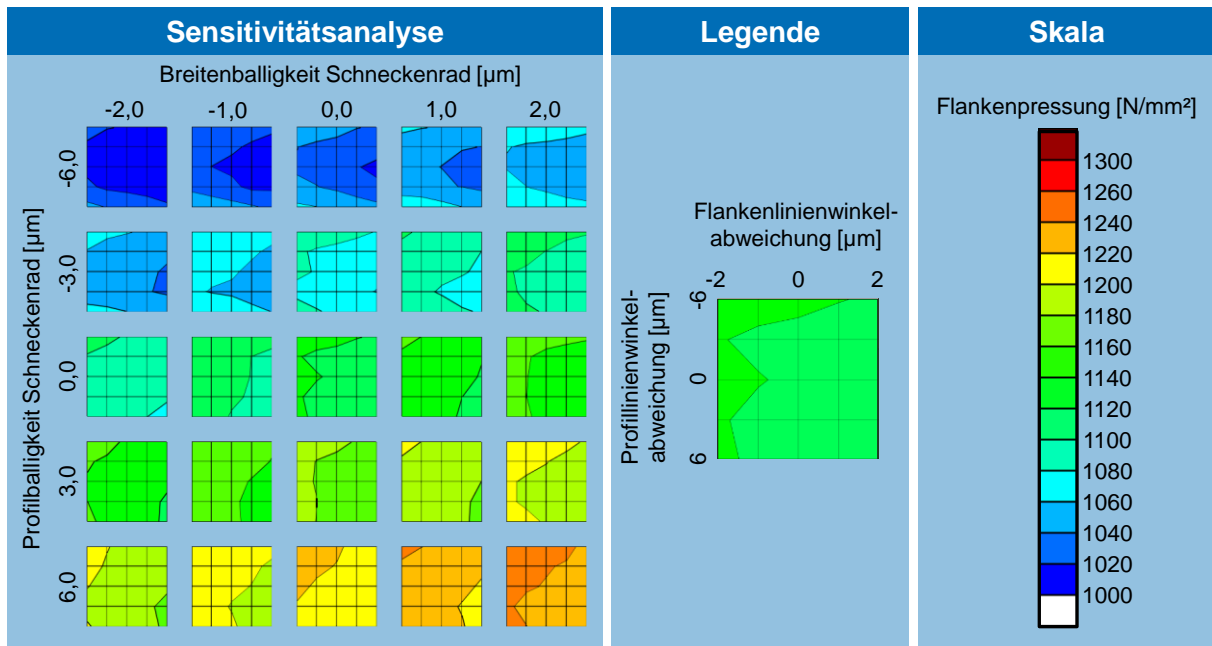


Bild 3–20: Einfluss der Abweichungen beim Wälzschleifprozess auf die Flankenpressung bei Nennmoment $M_2 = 190 \text{ Nm}$

In **Bild 3–21** ist der Einfluss der Abweichungen auf den Summendrehfehler bei Nennmoment abgebildet. Die Briefmarkendarstellung zeigt, dass die Flankenlinienwinkelabweichung und die Breitenballigkeit im untersuchten Toleranzfeld nur einen geringen Einfluss auf die Schwankungsbreite des Summendrehfehlers des Schneckengetriebes besitzen. Eine Kombination aus negativer Profilballigkeit und positiver Profillinienwinkelkorrektur hat ebenso wie die Kombination aus positiver Profilballigkeit und negativer Profillinienwinkelkorrektur einen negativen Einfluss auf die Schwankungsbreite des Summendrehfehlers bei Nennmoment aufgrund eines geringen Traganteils.

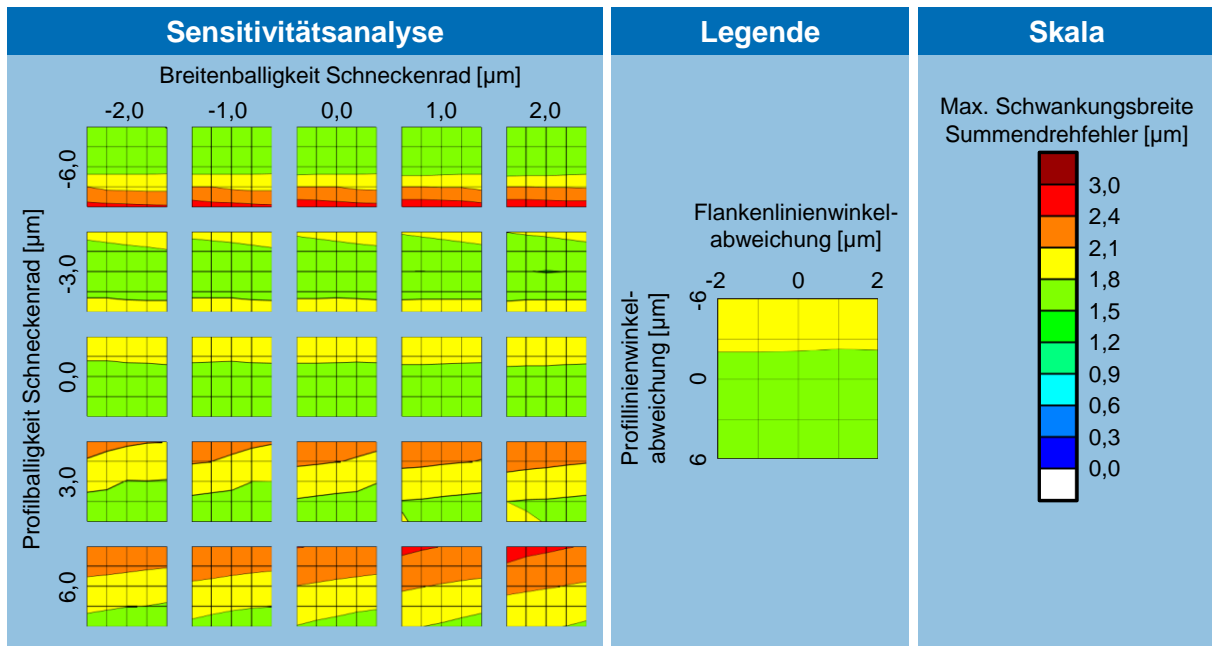


Bild 3–21: Einfluss der Abweichungen beim Wälzschleifprozess auf den Summendreherfehler bei Nennmoment $M_2 = 190 \text{ Nm}$

Bei geringerem Drehmoment zeigt sich verstärkt der negative Einfluss der Kombination aus negativer Profilballigkeit und positiver Profillinienwinkelabweichung (vgl. **Bild 3–37**, Anhang). Dies ist auf den höheren Einfluss des lastfreien Anteils des Summendreherfehlers zurückzuführen. Dieser wird durch das sich einstellende Tragbild beeinflusst. Das Tragbild ist für diese Varianten leicht reduziert.

Für Drehmomente oberhalb des Nennmoments nimmt dieser Effekt allerdings ab und es zeigt sich, dass eine Erhöhung der Profilballigkeit um $6 \mu\text{m}$ einen negativen Einfluss auf die Schwankungsbreite des Summendreherfehlers besitzt (vgl. **Bild 3–38**, Anhang). Der lastbedingte Einfluss auf den Summendreherfehler nimmt entsprechend mit steigender Last zu und eine positive Profilballigkeit führt zu einer geringeren Tragbildgröße unter dem betrachteten Drehmoment von $M_2 = 380 \text{ Nm}$.

Die Analyse der Abweichungen nach dem Schälwälzfräsprozess ergibt im Mittel im Vergleich zur Sollgeometrie eine Abweichung des Profillinienwinkels $\Delta f_{H\alpha}$ von $2 \mu\text{m}$, eine Abweichung des Flankenlinienwinkels $\Delta f_{H\beta}$ von $6 \mu\text{m}$, eine Profilballigkeit ΔC_α von $1 \mu\text{m}$ und eine Breitenballigkeit ΔC_β von $2 \mu\text{m}$. Die Toleranzfelder werden analog zur Analyse des Wälzschleifprozesses gewählt. **Bild 3–22** zeigt den Einfluss der Mikrogeometrieabweichung aus dem Schälwälzfräsprozess auf die Flankenpressung für das Nennmoment von $M_2 = 190 \text{ Nm}$.

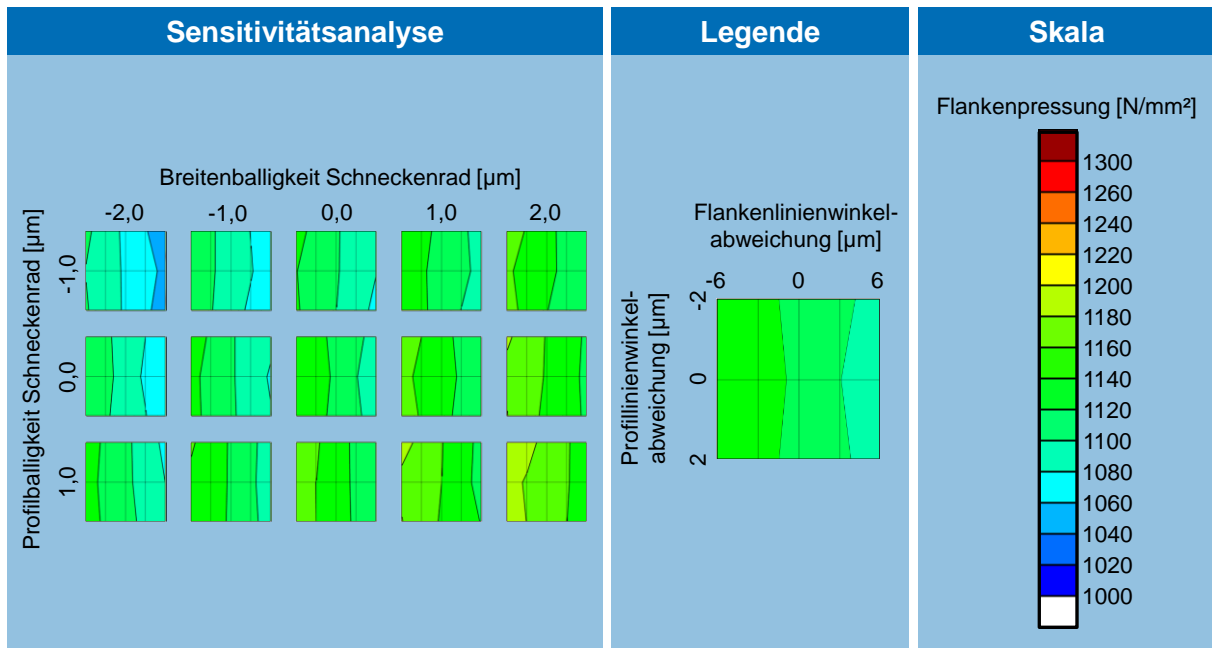


Bild 3–22: Einfluss der Abweichungen beim Schälwälzfräsprozess auf die Flankenpressung bei Nennmoment $M_2 = 190 \text{ Nm}$

Die Briefmarkendarstellung zeigt, dass eine positive Flankenlinienwinkelabweichung einen positiven Einfluss auf die Flankenpressung bei Nennmoment nimmt. Für den Schälwälzfräsprozess wird ebenfalls deutlich, dass eine Kombination aus negativer Profil- und Breitenballigkeit einen positiven Effekt auf die Flankenpressung nimmt. Diese Erkenntnis deckt sich mit den Ergebnissen aus der Analyse des Wälzschleifprozesses. Ebenso zeigt sich, dass eine Kombination aus positiver Profil- und Breitenballigkeit einen negativen Einfluss auf die Flankenpressung des Schneckengetriebes besitzt. Aufgrund der sehr hohen Fertigungsgüte der untersuchten Verzahnungen im Schälwälzfräsprozess ist nur eine sehr geringe Schwankung der Flankenpressung im untersuchten Toleranzfeld zu beobachten. Diese liegt bei ca. 5%. Für das halbe Drehmoment und unter Überlast zeigen sich ebenfalls die beschriebenen Effekte (vgl. **Bild 3–39**, **Bild 3–40**, Anhang).

Der Einfluss der Mikrogeometrieabweichungen aus dem Schälwälzfräsprozess auf den Summendrehfehler bei Nennmoment ist in **Bild 3–23** dargestellt.

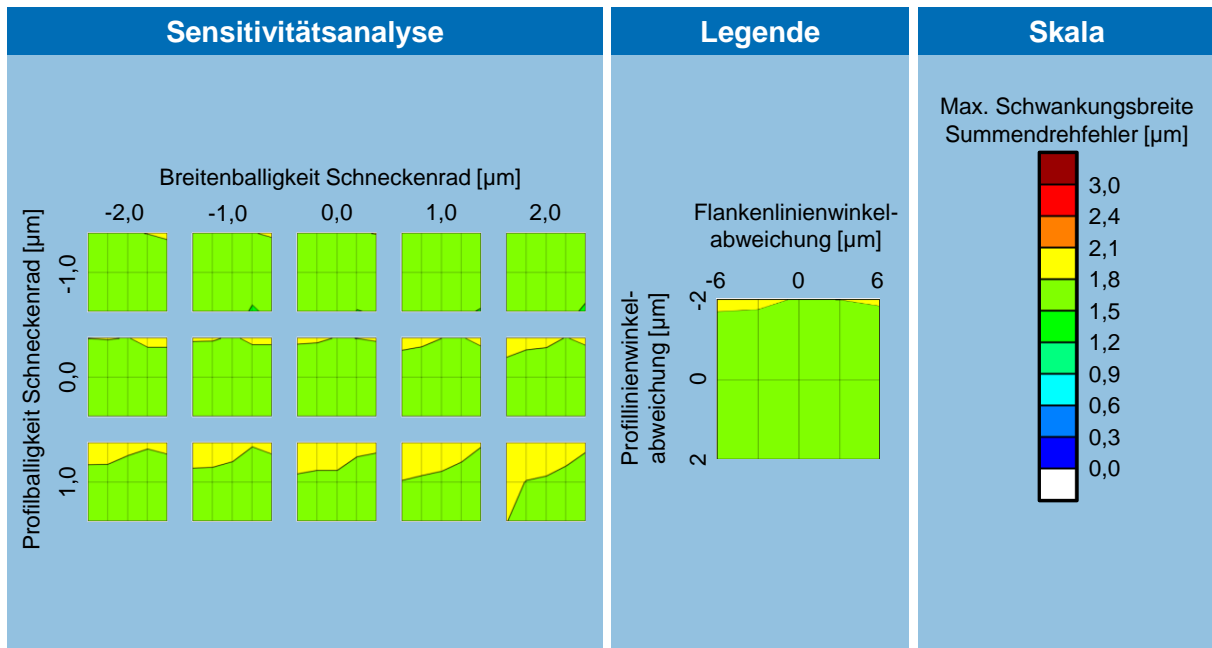


Bild 3–23: Einfluss der Abweichungen beim Schälwälzfräsprozess auf den Summendreherfehler bei Nennmoment $M_2 = 190 \text{ Nm}$

Anhand der Briefmarkendarstellung lässt sich erkennen, dass die Breitenballigkeit und die Flankenlinienwinkelabweichung nur einen geringen Einfluss auf die Schwankungsbreite des Summendreherfehlers nehmen. Eine Erhöhung der Profilballigkeit mit gleichzeitiger Minderung der Profillinienwinkelabweichung zeigt einen negativen Einfluss auf die Schwankungsbreite. Dieser entsteht durch ein leicht reduziertes Tragbild im Vergleich zu den anderen Varianten. Bei geringerem Drehmoment nimmt der Einfluss der Flankenlinienwinkelabweichung im Vergleich zum Nennmoment zu. Hier zeigt sich ein negativer Einfluss auf den Summendreherfehler bei negativer Flankenlinienwinkelabweichung (vgl. **Bild 3–41**, Anhang). Der lastbedingte Einfluss auf den Summendreherfehler ist entsprechend geringer im Vergleich zum Nennmoment, wodurch der Einfluss des lastfreien Anteils des Summendreherfehlers ansteigt. Dieser Anteil wird durch das lastfreie Tragbild beeinflusst, welches bei negativer Flankenlinienwinkelabweichung eine reduzierte Größe aufweist. Für Drehmomente oberhalb des Nennmoments ergibt sich ein umgekehrtes Bild. Positive Flankenlinienwinkelabweichungen führen zu einer höheren Schwankungsbreite des Summendreherfehlers (vgl. **Bild 3–42**, Anhang). Der lastbedingte Einfluss auf den Summendreherfehler nimmt zu und der Traganteil unter Last für positive Flankenlinienwinkelabweichungen wird reduziert. Dadurch entstehen höhere Schwankungen im Summendreherfehler. Insgesamt zeigt sich, dass aufgrund der hohen Fertigungsqualität nur eine geringe Schwankungsbreite des Summendreherfehlers im untersuchten Toleranzfeld vorliegt.

Zahnkontaktanalyse auf Basis realer Verzahnungstopografie

Neben der Analyse der Härte- und Fertigungsabweichungen und die daraus ermittelten Sensitivitätsanalysen wurde zudem eine Allzahn-Topografiemessung eines Schneckenrades durchgeführt. Dabei wurde die Flanken aller Zähne mit einem Messgitter von 31x25 Punkten auf einem Verzahnungsmesszentrum vermessen und die Messdaten als Eingangsdaten für die Zahnkontaktanalyse verwendet. **Bild 3–24** zeigt den Vergleich der lastfreien Tragbilder zwischen realer Verzahnungstopografie (oben) und der Sollauslegung der Flanken-geometrie (unten). Durch die realen Abweichungen von der Sollauslegung wird das Tragbild der Verzahnung eingeschnürt und verschiebt sich leicht in den Bereich des Auslaufes. Jedoch zeigt der

Vergleich deutlich, dass die Lage des Tragbildes mit realer Verzahnungstopografie mit der gewünschten Lage übereinstimmt.

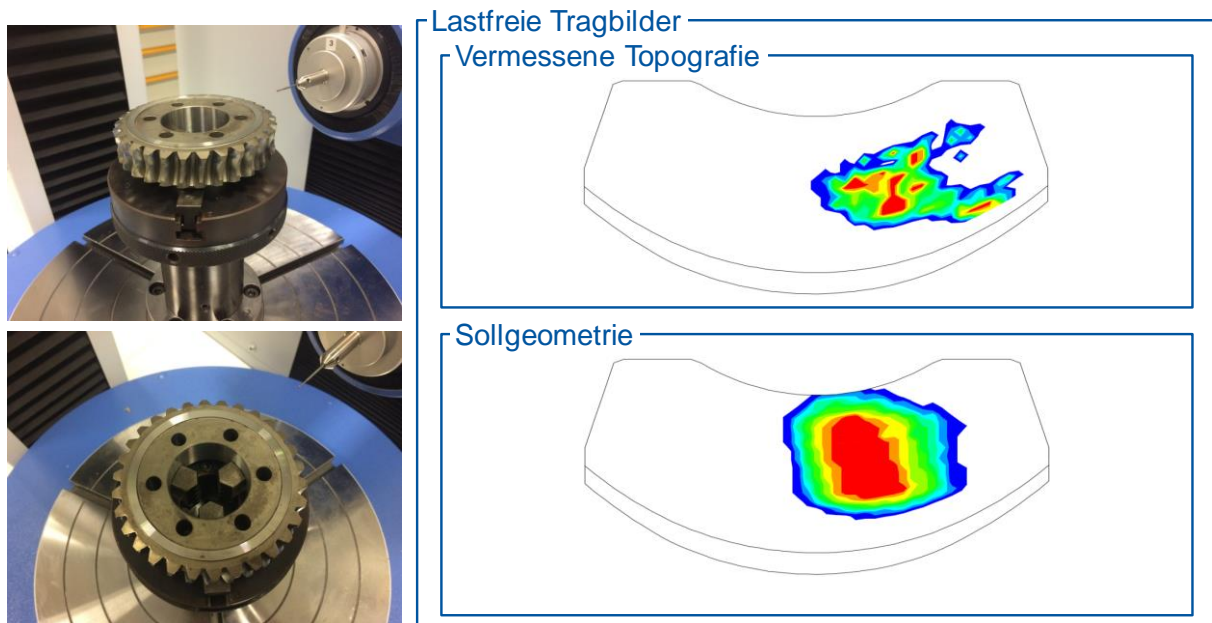


Bild 3–24: Vergleich der lastfreien Tragbilder zwischen realer Verzahnungstopografie und Solltopografie.

Der Vergleich zwischen realer Verzahnungstopografie und Sollgeometrie unter Last für das Nennmoment $M = 190 \text{ Nm}$ ist in **Bild 3–25** dargestellt.

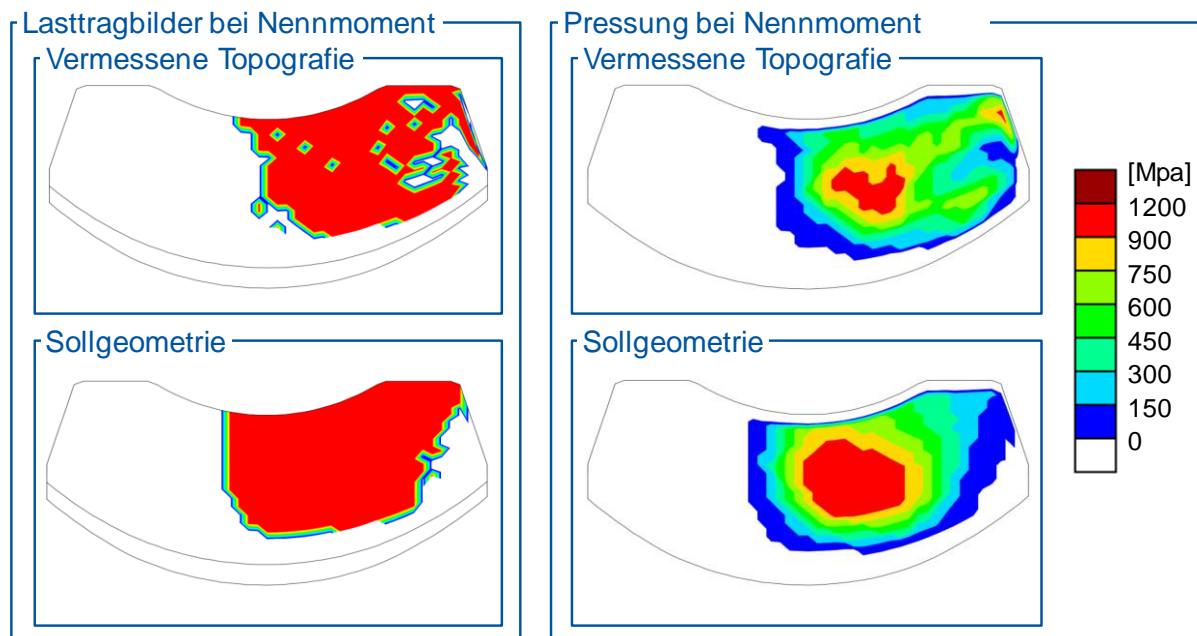


Bild 3–25: Vergleich der Lasttragbilder und der Flankenpressung bei Nennmoment $M=190 \text{ Nm}$

Der Vergleich zwischen den beiden Lasttragbildern auf der rechten Seite zeigt, dass auch unter Berücksichtigung realer Flankentopografien mit Fertigungsabweichungen die Lage und Größe des Tragbildes mit der gewünschten Lage und Größe übereinstimmt. Bei dem Vergleich der Flankenpressung auf der linken Seite, ist der Bereich der maximalen Pressung leicht im Vergleich zur Sollgeometrie eingeschnürt. Zudem lässt sich erkennen, dass an der

Kante der Auslaufseite eine leichte Pressungsüberhöhung im Vergleich zur Sollgeometrie auftritt. Diese beiden Phänomene sind auf die fertigungsbedingten Abweichungen zurückzuführen.

3.2.5. Zwischenfazit

Die Sensitivitätsanalysen zeigen den Einfluss der Härteverzüge und der Abweichungen aus der Wärmebehandlung und den Hartfeinbearbeitungsprozessen auf das Einsatzverhalten der Schneckengetriebe. Dabei wurden auf Basis von Verzahnungsmessungen die entstehenden Mikrogeometrieabweichungen aus den Produktionsschritten der Geometrie G1 bestimmt. Die Ergebnisse dieser Auswertung zeigen, dass für alle Prozessschritte eine sehr hohe Verzahnungsqualität erzielt wird. Die größte im Mittel bestimmte Abweichung liegt im Bereich von 6 μm . Auf Basis dieser Ermittlung wurde der Einfluss der Mikrogeometrieabweichungen auf die Flankenpressung und den Summendrehsfehler untersucht. Mit Briefmarkendiagrammen kann dieser Einfluss im untersuchten Toleranzfeld verdeutlicht werden. Aufgrund der hohen Fertigungsqualität werden sowohl für die Flankenpressung als auch für den Summendrehsfehler nur geringe relative Abweichungen zwischen Sollauslegung und Minimal-/Maximalwert im untersuchten Toleranzfeld beobachtet. Die Ergebnisse zeigen, dass eine Kombination aus negativer Profil- und Breitenballigkeit einen positiven Einfluss auf die Flankenpressung bei allen drei untersuchten Drehmomenten besitzt. Für die Untersuchung des Summendrehsfehlers zeigen sich bei den drei Drehmomenten unterschiedliche Effekte. Bei geringer Last wirkt sich eine positive Flankenlinienwinkelabweichung positiv auf den Summendrehsfehler aus. Dieser Effekt kehrt sich mit Erhöhung der Last um.

Insgesamt zeigen die Ergebnisse des dritten Teilziels, dass die FE-basierte Zahnkontaktanalyse ZaKo3D dazu befähigt wurde, das Einsatzverhalten von Schneckengetriebe auch auf Basis realer Verzahnungsmessdaten zu bewerten. Dadurch wird es dem Anwender der Software ermöglicht die reale Verzahnungsgeometrie abzubilden und somit einen Abgleich mit Prüfstandsversuchen durchzuführen bzw. Ursachen für erhöhte Geräuschanregung oder reduzierte Tragfähigkeit der Verzahnung simulativ zu identifizieren.

3.2.6. Anhang

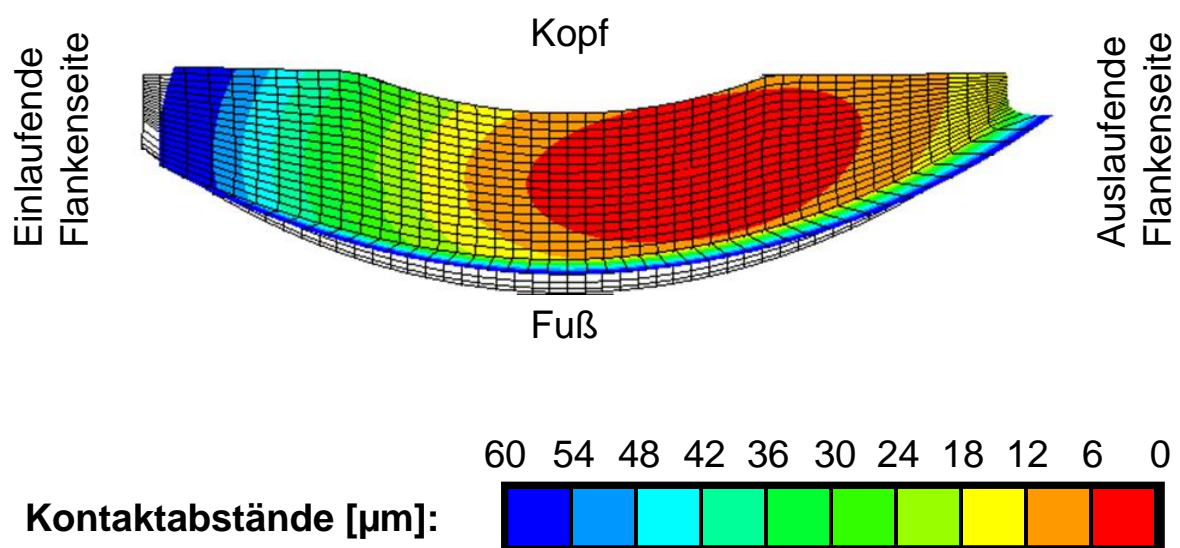


Bild 3–26: Legende zur Tragbilddarstellung

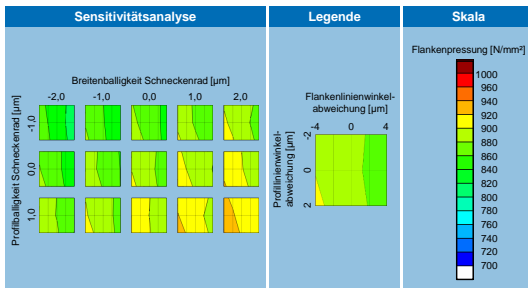


Bild 3–27: Einfluss der Abweichungen beim Nitrierprozess auf die Flankenpressung bei halbem Nennmoment $M_2 = 95 \text{ Nm}$

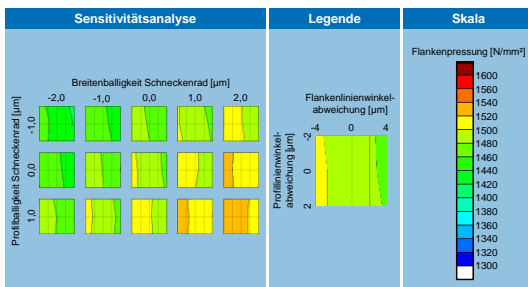


Bild 3–28: Einfluss der Abweichungen beim Nitrierprozess auf die Flankenpressung bei Überlast $M_2 = 380 \text{ Nm}$

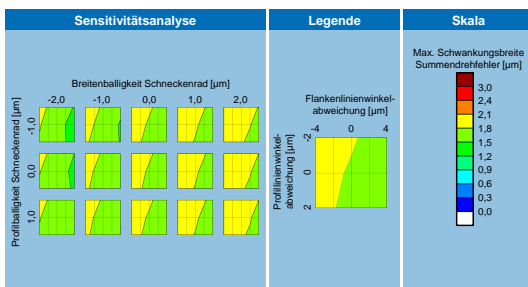


Bild 3–29: Einfluss der Abweichungen beim Nitrierprozess auf den Summendreifehler bei halbem Nennmoment $M_2 = 95 \text{ Nm}$

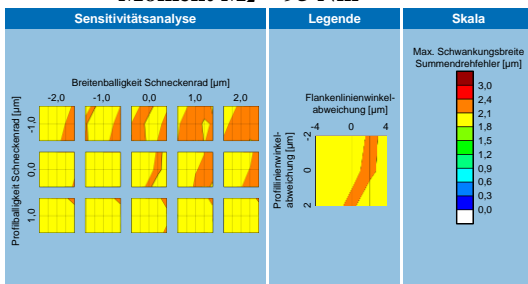


Bild 3–30: Einfluss der Abweichungen beim Nitrierprozess auf den Summendreifehler bei Überlast $M_2 = 380 \text{ Nm}$

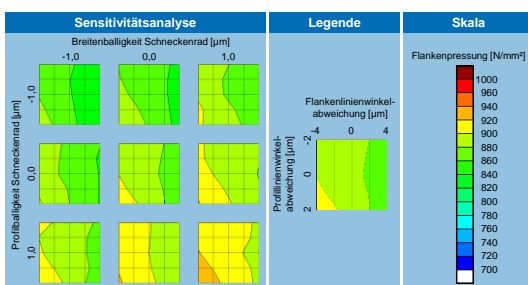


Bild 3–31: Einfluss der Abweichungen beim Nitrocarburierprozess auf die Flankenpressung bei halbem Nennmoment $M_2 = 95 \text{ Nm}$

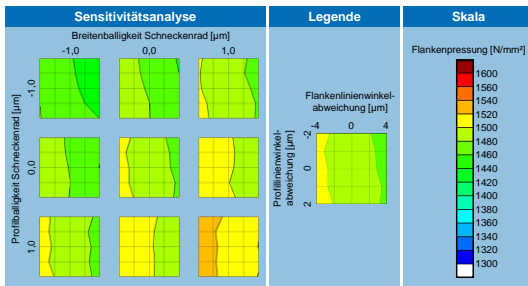


Bild 3–32: Einfluss der Abweichungen beim Nitrocarburierprozess auf die Flankenpressung bei Überlast $M_2 = 380 \text{ Nm}$

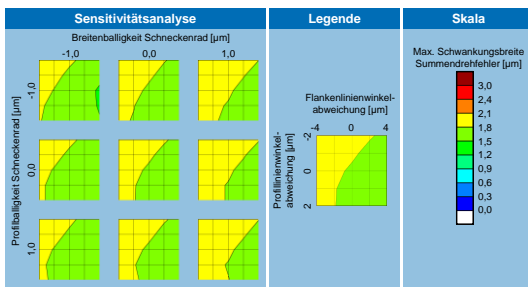


Bild 3–33: Einfluss der Abweichungen beim Nitrocarburierprozess auf den Summendrehtfehler bei halbem Nennmoment $M_2 = 95 \text{ Nm}$

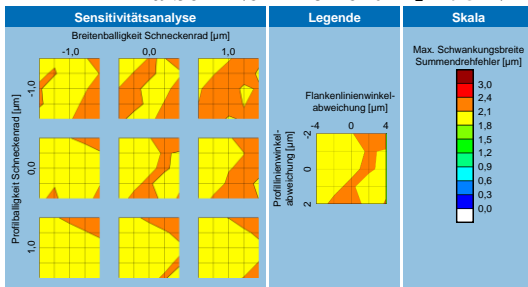


Bild 3–34: Einfluss der Abweichungen beim Nitrocarburierprozess auf den Summendrehtfehler bei Überlast $M_2 = 380 \text{ Nm}$

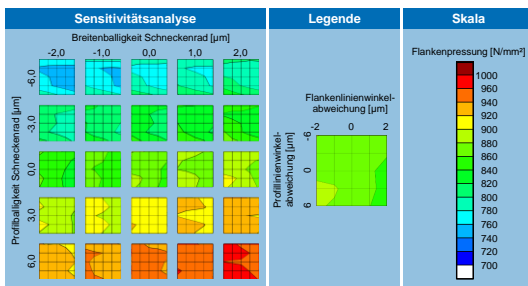


Bild 3–35: Einfluss der Abweichungen beim Wälzschleifen auf die Flankenpressung bei halbem Nennmoment $M_2 = 95 \text{ Nm}$

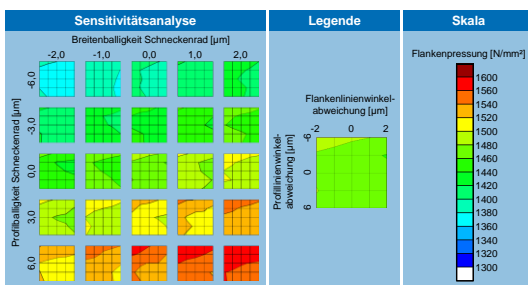


Bild 3–36: Einfluss der Abweichungen beim Wälzschleifen auf die Flankenpressung bei Überlast $M_2 = 380 \text{ Nm}$

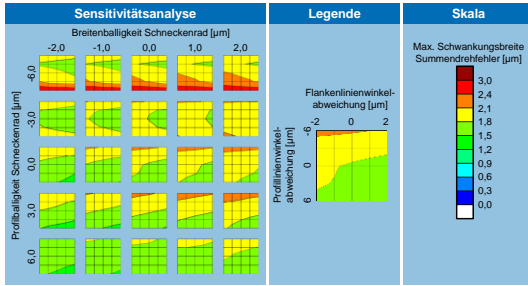


Bild 3–37: Einfluss der Abweichungen beim Wälzschleifen auf den Summendrehtfehler bei halbem Nennmoment $M_2 = 95 \text{ Nm}$

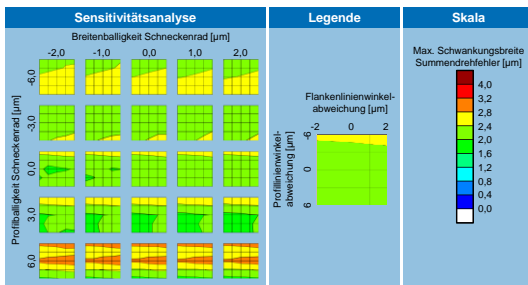


Bild 3–38: Einfluss der Abweichungen beim Wälzschleifen auf den Summendrehtfehler bei Überlast $M_2 = 380 \text{ Nm}$

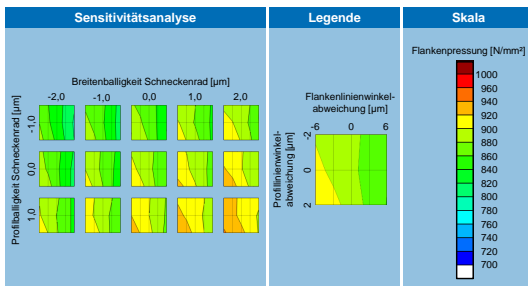


Bild 3–39: Einfluss der Abweichungen beim Schälwälzfräsprozess auf die Flankenpressung bei halbem Nennmoment $M_2 = 95 \text{ Nm}$

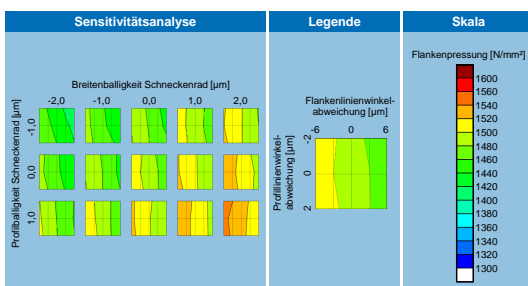


Bild 3–40: Einfluss der Abweichungen beim Schälwälzfräsprozess auf die Flankenpressung bei Überlast $M_2 = 380 \text{ Nm}$

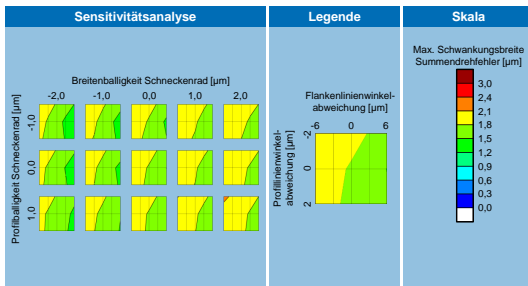


Bild 3–41: Einfluss der Abweichungen beim Schälwälzfräsprozess auf den Summendrehtfehler bei halbem Nennmoment $M_2 = 95 \text{ Nm}$

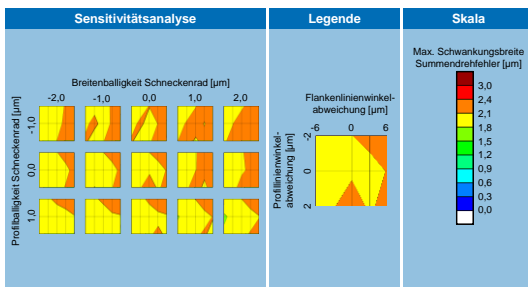


Bild 3–42: Einfluss der Abweichungen beim Schälwälzfräsprozess auf den Summendrehtfehler bei Überlast $M_2 = 380 \text{ Nm}$

4. Materialentwicklung (BGH)

Verantwortlich

BGH Edelstahl Siegen GmbH

Ausführende Stellen

BGH Edelstahl Siegen GmbH

4.1. Executive Summary

Die BGH hatte im Rahmen des Projektes „Stahlschnecke“ die Aufgabe, die Versuchswerkstoffe in unterschiedlichen Stahlgüten und Abmessungen herzustellen.

Bisherige Bemühungen, Stahl als Werkstoff für Schnecken einzusetzen sind gescheitert, da als Versagensursache das sogenannte Fressen auftrat. Demzufolge war das Ziel des Projektes, einen Werkstoff einschließlich Wärmebehandlungs- sowie Oberflächentechnologie zu entwickeln, der ein Fressen vermeidet.

Innerhalb des Projektes wurde in den verschiedenen Versuchsphasen für das Konzept einsatzgehärtetes Bauteil die Werkstoffe 18CrNiMo7-7 sowie 16MnCr5 und für das Konzept nitriertes Bauteil der Werkstoff 42CrMo4 zur Verfügung gestellt.

Grundsätzlich kann die Aussage getroffen werden, dass die Verfügbarkeit der Werkstoffe auf dem Markt gegeben ist, da die Stahlgüten und deren Materialentwicklung basierend auf bestehende Werkstoffkonzepte für den Getriebebau im Automobilbereich und in der Windkraft erfolgte. Jedoch war eine enge Kooperation und Abstimmung mit den Partnern aus Fertigung, Wärmebehandlung, Hartfeinbehandlung und Oberflächenveredelung notwendig zur Bereitstellung der Werkstoffe in entsprechender Ausführung.

4.2. Einleitung und Zielsetzung

Es werden in Europa ca. 2,5 Mio. Schneckenradgetriebe p. a. gebaut, der Vorteil des Winkeltriebtyps ist eine hohe Übersetzung. Allerdings sind die Kosten der Getriebe u. a. aufgrund der Schnecke aus Bronze, die als definierter Verschleiß-Partner eingesetzt wird, sehr hoch. Der zu erwartende Abmessungsbereich der möglichen, einsetzbaren Einsatz- und Vergütungsstähle liegt etwa zwischen 120 bis 250 mm rd. Im Rahmen des Projektes Stahlschnecke übernahm die BGH Edelstahl Siegen GmbH die Aufgabe der Herstellung der Versuchswerkstoffe, die Erprobung und Definition der mechanisch-technologischen Eigenschaften im Lieferzustand.

Das Ziel war die Entwicklung von Legierungsansätzen, die in Kombination mit geeigneten Wärmebehandlungsverfahren die Einlaufeigenschaften der Getriebekomponenten verbessern und/oder geringe Fertigungsabweichungen, d. h. Härteverzüge, aufweisen.

4.3. Vorgehensweise und Lösungsansätze

Derzeit wird für das Schneckenrad der Werkstoff GZ-CuSn12Ni4 eingesetzt, die Verarbeitung erfolgt im Gusszustand. Die mechanische Eigenschaften des Werkstoffs GZ-CuSn12Ni4 sind: $R_m = 350 - 380 \text{ MPa}$, $R_{p0,2} = 200 \text{ MPa}$, $A_5 = 12 \%$, $E = 109.000 - 112.000 \text{ MPa}$, Härte = 120 HB, Dichte = $8,8 \text{ g/cm}^3$.

Aufgrund der mechanischen Eigenschaften des bisherigen Werkstoffkonzeptes ist davon auszugehen, dass die Belastungen auf der Oberfläche in der Verzahnung offenbar sehr gering sind, es wird von einer mittleren Flankenpressung von etwa 520 MPa ausgegangen. Interessant ist die Betrachtung des E-Moduls, da bei einem geringen E-Modul die Kontaktfläche sehr groß ist. Werden Werkstoffe mit höheren E-Modulen eingesetzt, wird die Kontaktfläche kleiner und somit die Flankenpressung erhöht werden. Die Betriebstemperatur des Getriebes wurde mit etwa 80 bis 120 °C angegeben. Der Abtrag nach dem Einlaufen der Paarung beträgt etwa 50 µm. Dies liegt aber im Wesentlichen an der heutigen Methode der „Hart-Feinbearbeitung im Einsatz“ (gezieltes Einlaufen) sowie der Methodik der Nutzung der Walzfräser (durch

eine längere Nutzung der Walzfräser ergeben sich größere Schwankungen in der Toleranz).

Bisherige Bemühungen, Stahl als Werkstoff für Schnecken einzusetzen, sind bisher gescheitert. In Wesentlichen trat als Schadens- bzw. Versagensursache das so genannte Fressen auf. Daher ist die oberste Zielsetzung des Projektes, einen Werkstoff einschließlich einer Wärmebehandlungs- sowie Oberflächentechnologie zu entwickeln, der ein Fressen vermeidet (hohe Wärmeleitfähigkeit, hohe Festigkeit). Damit wird dann keine Schmierwirkung, wie sie von der Bronze bisher genutzt wird, benötigt. Somit muss Folgendes entwickelt werden:

1. Entwicklung eines einlauffähigen Stahlkonzeptes mit den Ansätzen:

Verformbares Gefüge (d. h. definiert einzustellender Restaustenitgehalt).

Nachoxidierte Oberfläche.

Definierter Härteunterschiede der Werkstoffpaarung.

2. Eliminierung Einlaufbedarf

Einengung der Fertigungs- und Montagetoleranzen

Angepasste Auslegung der Verzahnung.

Zunächst sollen die Anforderungen an Materialien und Wärmebehandlungsverfahren definiert werden, dann erfolgt die Auslegung der Verzahnung und Fertigung der ersten Testkörper. Nach einer Erprobung erfolgt ein Meilenstein einschl. einer Revisionschleife zwecks möglicher Optimierung der Konzepte.

Wesentliche Gründe für das Scheitern von Vorprojekten (ca. 20 Jahre alt) waren lt. Professor Dr. Wolfgang Predki (Ruhr Universität Bochum; Lehrstuhl für Industrie- und Fahrzeugantriebstechnik):

1) Die Genauigkeit der mechanischen Bearbeitung

2) Der Härteverzug.

Aus den Ergebnissen der Vorprojekte kann jedoch abgeleitet werden, dass offenbar ein Härteunterschied von 2 HRC zwischen Schnecke und Rad sinnvoll erscheint.

Als Lösungsansatz wurde die Verwendung eines

- mikrolegierten, höher legierten Einsatzstahles
- Vergütungsstahles mit Eignung zum Nitrieren und Nachoxidieren

gewählt. Die Materialentwicklung erfolgte basierend auf bestehenden Werkstoffkonzepten für den Getriebebau im Automobil- und Windkraftbereich, siehe Bild 1.

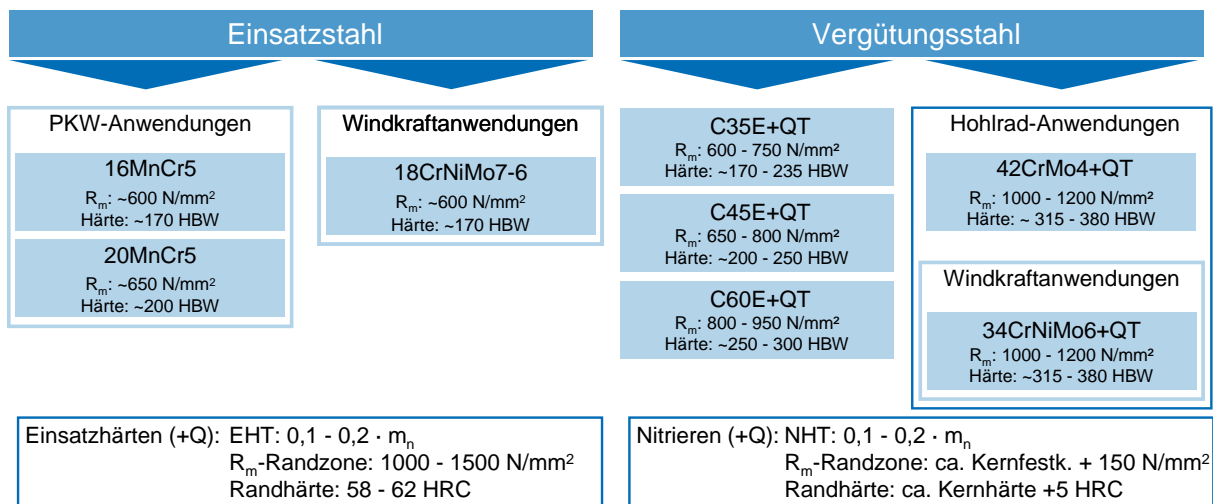


Bild 1: Werkstoffkonzepte im Getriebebau aus dem Automobil- und Windkraftbereich

Die Schneckenräder selber werden im heutigen Werkstoffkonzept aus Bronze und die Schnecke aus Einsatzstahl hergestellt. Als neues Werkstoffkonzept für die einsatzgehärteten Bauteile wurde der 18NiCr13 ggf. der 18CrNiMo7-6 ausgesucht. Während für das Werkstoffkonzept des nitrierten Bauteils der Werkstoff 42CrMo4 in der Wahl war, siehe Tabelle 1.

Tabelle 1: Heutige und zukünftige Materialkombinationen für die Schneckenräder sowie die Schnecke

Schneckenrad Heutiges Werkstoffkonzept	Schnecke	Bemerkung
Bronze Durchmesser: 100 bis 200 mm Breite: 20 bis 50 mm	16MnCr5 einsatzgehärtet Oberflächenhärte: 58 bis 60 HRC	Schnecke gesenkgeschmiedet
Werkstoffkonzept einsatzgehärtetes Bauteil	Zur Zeit	Technologischer Ansatz
18NiCr13, 18CrNi8 ggf. auch 18CrNiMo7-6 + Nb wegen Verzug sowie als Referenz 16MnCr5	16MnCr5 ggf. Wechsel zu 25MoCr4	Randhärtedifferenz durch Anlasstemperatur Restaustenit = Fkt. von Legierung und Rand-Kohlenstoffgehalt Verzug = Fkt. von Einsatzhärteparameter und Werkstoffzustand
Werkstoffkonzept nitriertes Bauteil	Zur Zeit	Technologischer Ansatz
42 CrMo4 Oberflächenhärte: 600 bis 700 HV ggf. Alternative CrNiMoV mit $R_m = 1300 \text{ MPa}$ $A_v = 50 \text{ bis } 60 \text{ J}$ min. Anlasstemperatur: ~ 600 °C	16MnCr5	Nitrieren oder Nitro-Carburieren + Nach-oxidieren Proben für Vorversuche $\varnothing 30 \times 120 \text{ mm}$, vergütet in Werkstoff 42CrMo4 + Ni + V (7290) und 30NiCrMoV8-4 (6932)

Die Lösungsansätze wurden insoweit als praktikabel angesehen, da sie auf bereits bestehende Werkstoffkonzepte aufbauen:

- Mikrolegierte Einsatzstähle finden teilweise heute schon Anwendung. Positive Ergebnisse auf die Reduzierung der Härteverzüge sind aus Untersuchungen bekannt und in der Literatur zu finden.
- Bzgl. der zu verwendenden Vergütungsstähle liegen ebenfalls Erfahrungen aus der Industrie vor, zumeist im vergüteten Zustand.

4.4. Fertigungsweg, Erprobung und Bereitstellung der Werkstoffe

Die Erwartungen an die BGH Edelstahl Siegen GmbH bezüglich der Ergebnisse waren wie folgt

Definition der Werkstoffe, deren chemische Zusammensetzung sowie die mechanisch-technologische Eigenschaften.

Probenmaterial für Vorversuche.

Materialherstellung für Prototypen.

Bereitstellung von Referenzwerkstoffen, falls erforderlich.

Eine enge Kooperation und Abstimmung mit den Partnern aus Fertigung, Wärmebehandlung, Hartfeinbehandlung und Oberflächenveredlung war notwendig bezüglich den Anforderungen an den Werkstoffen.

Bereits im Stahlwerk beginnend wurde der auf die vorgeschlagenen Werkstoffkonzepte angepasste Fertigungsweg, schematisch in Bild 3 dargestellt, eingeschlagen mit Blick auf die späteren Bauteilanforderungen.

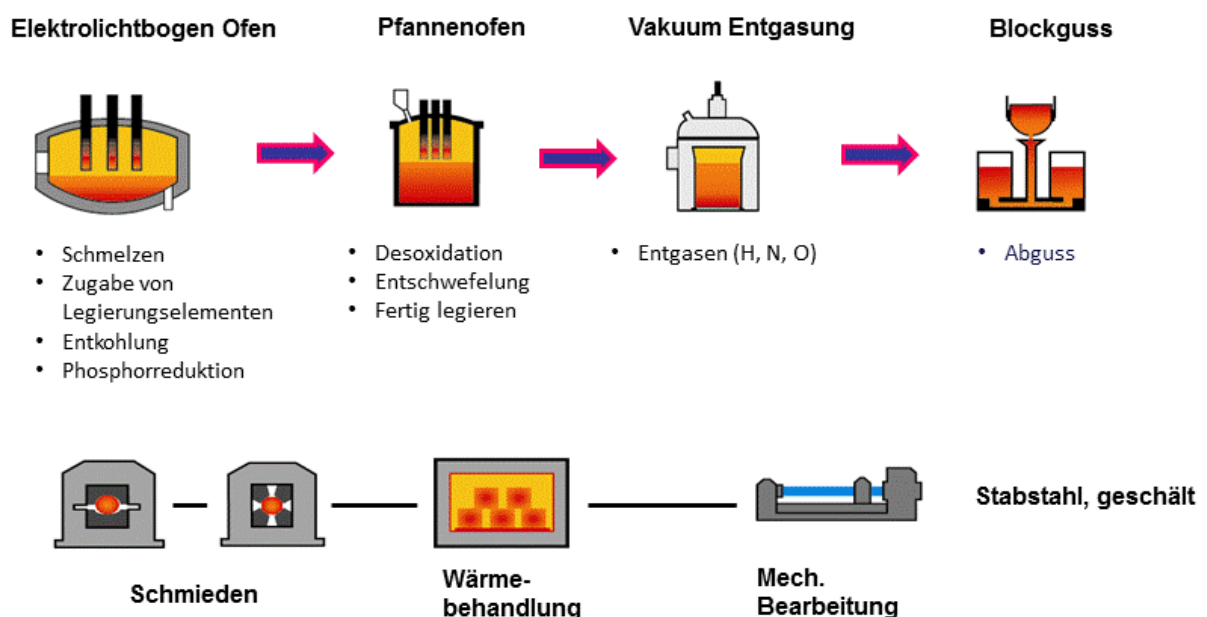


Bild 3: Stahlwerkstechnologie für Edelbaustahl und Übersicht der Produktionsanlagen der BGH Edelstahl Siegen GmbH

Dazu wurde bereits in Vor-Vorversuchen Probenmaterial den Partnern zur Verfügung gestellt zur Feinabstimmung derer Fertigung mit Blick auf das gesetzte Ziel.

Eine Übersicht dazu gibt Tabelle 2 wieder. Die chemische Zusammensetzung und die mechanischen Kennwerte sind dem Bild 4 zu entnehmen.

Tabelle 2: Übersicht der gelieferten Werkstoffe für die Vor-Vorversuche

Werkstoff	Anzahl	Gewicht [kg]	Abmessung		Kontakt- daten Lieferung
			∅ [mm]	Länge [mm]	
Konzept nitriertes Bauteil					
42CrMo4 (1.7225) Schmelze 712079 Proben-Nr. 875 L	6 Stück		Vierkant 30 x 30 mm		ELTRO GmbH Baesweiler
42CrMo4-mod (1.7225+Ni+V) Schmelze 307161	6 Stück		Vierkant 30 x 30 mm		
30CrNiMo8 (1.6580) Schmelze 713029 Proben-Nr. 997 L	6 Stück		Vierkant 30 x 30 mm		
Konzept einsatzgehärtetes Bauteil					
18CrNiMo7-6 (1.6587) Schmelze 713450	25 Stück		40	10	ALD Vacuum Technologies GmbH Hanau

4.4.1. Materialherstellung Phase 1 - Vorversuche:

In Phase 1 erfolgte die Produktion des Materials für die geplanten Versuche (Erschmelzen, Umformen, Wärmebehandeln und Prüfen). Eine Übersicht hierzu ist in Tabelle 3 zusammengestellt. In Phase 1 wurden je ein Werkstoff für die Einsatzhärtung und ein Werkstoff für das Nitrieren hergestellt, Tabelle 3. Es erfolgten die begleitenden werkstoffkundlichen Untersuchungen, Bild 5. Unter der Voraussetzung, dass je nach Anforderung und Belastungskollektiv sowie der Ergebnisse erster Labor-

versuche sich die Stähle innerhalb der ausgewählten Stahlgruppen der Einsatz- und Vergütungsstähle noch etwas verschieben können.

Das Stabmaterial wurde zur Weiterverarbeitung an die Firma AnTech Antriebstechnik nach Aschaffenburg gesandt.

Table 3: Übersicht der gelieferten Werkstoffe für die Materialherstellung Phase 1

Werkstoff	Anzahl	Gewicht [kg]	Abmessung		Kontakt- daten Lieferung
			∅ [mm]	Länge [mm]	
Konzept nitriertes Bauteil					
42CrMo4 (1.7225) geschält Schmelze 382453 Auftrag 089354-001 BGH-Zeugnis 374416	2 Stäbe	703	120	3000 4000	AnTech Antriebstechnik Aschaffenburg 13.11.2013
Konzept einsatzgehärtetes Bauteil					
16MnCr5 (1.7131) geschält Schmelze 500190 Auftrag 557347 DEW-Zeugnis 1962072	3 Stäbe	1830	135	5470 - 5570	AnTech Antriebstechnik Aschaffenburg 18.02.2014

Es werden die statischen Eigenschaften durch Zugversuche bei den Werkstoffen für das Konzept nitrierte Bauteile ermittelt. Während bei den Werkstoffe für das Konzept einsatzgehärtete Bauteile die Härtebarkeit als maßgeblicher Werkstoffkennwert angezogen wird.

Die Werkstoffkennwerte werden zusammen mit den berechneten Belastungsprofilen und den Prüfstandergebnissen zur Beurteilung der Fresstragfähigkeit verwendet.

Die Wärmebehandlung wird von ALD und Eltro durchgeführt, die auch die Werkstoffe bezüglich Wärmebehandelbarkeit freigeben.

4.4.2. Materialherstellung Phase 2 - Prototypen:

In Phase 2 sollte aufbauend auf den Erfahrungswerten aus Phase 1 die Herstellung von optimierten Werkstoffvarianten nach einer ersten Beurteilung für einen Prototyp hergestellt werden.

In Abhängigkeit der Ergebnisse aus Phase 1 war ebenfalls zu prüfen, ob für eine gezielte Einstellung des Restaustenitgehaltes weitere legierungstechnische und wärmebehandlungstechnische Maßnahmen notwendig sind, jedoch ergab sich bezüglich der Erschmelzung und Umformung keine signifikante Veränderung gegenüber der Phase 1.

Zur Verifizierung der ersten Ergebnisse wurde neues Material zur Verfügung gestellt, Tabelle 4. Des Weiteren wird in Phase 2 auch der Referenzwerkstoff 18CrNiMo7-6 mit in die Untersuchungen einbezogen.

Tabelle 4: Übersicht der gelieferten Werkstoffe für die Materialherstellung Phase 2

Werkstoff	Anzahl	Gewicht [kg]	Abmessung		Kontakt Daten Lieferung
			∅ [mm]	Länge [mm]	
Konzept nitriertes Bauteil					
42CrMo4 (1.7225) geschält Schmelze 714694 Lieferschein 14/04/1367 Auftrag 040007-046-01 BGH-Zeugnis 320561	2 Stäbe	1032	125	5168 5253	AnTech Antriebstechnik Aschaffenburg 17.04.2014
Konzept einsatzgehärtetes Bauteil					
16MnCr5 (1.7131) geschält Schmelze BGH 714877 Lieferschein 14/05/0930 Auftrag 040007-037-01 BGH-Zeugnis 320584	4 Stäbe	2162	120	5447 - 6262	AnTech Antriebstechnik Aschaffenburg 14.05.2014
18CrNiMo7-6 (1.6587) geschält Schmelze 712791 Auftrag 089380-004 BGH Zeugnis 373542	1 Stab	250	110	3400	AnTech Antriebstechnik Aschaffenburg 02.07.2014

4.4.3. Materialherstellung Phase 2 - erweitert

Zur Verifizierung der bisherigen Ergebnisse wurde für das Konzept einsatzgehärtetes Bauteil der Werkstoff 16MnCr5 in den Abmessungen 185 mm und 90 mm hergestellt.

Bezüglich der Erschmelzung und Umformung sind keine Veränderungen in der chemischen Zusammensetzung und in der Fertigung gegenüber den zuvor ausgelieferten Varianten erfolgt. In Tabelle 5 sind die Werkstoffe aufgeführt und aus Bild 7 können die mechanischen Kennwerte entnommen werden.

Tabelle 5: Übersicht der gelieferten Werkstoffe für die Materialherstellung Phase 2

Werkstoff	Anzahl	Gewicht [kg]	Abmessung		Kontakt Daten Lieferung
			∅ [mm]	Länge [mm]	

Konzept einsatzgehärtetes Bauteil

16MnCr5 (1.7131) Schmelze BGH 715423 Lieferschein 16/04/0320 Auftrag 040013-031-01 aus 040009-065-01 BGH-Zeugnis 331393	4 Stäbe	1520	185	1784	AnTech Antriebstechnik Aschaffenburg 07.04.2016
16MnCr5 (1.7131) Schmelze BGH 715423 Lieferschein 16/04/0320 Auftrag 040013-032-01 aus 40009-066-01 BGH-Zeugnis 332533	4 Stäbe	360	90	1782 - 1784	AnTech Antriebstechnik Aschaffenburg 07.04.2016

5. Wälzfräsen (LIEBHERR)

Verantwortlich

Liebherr-Verzahntechnik GmbH

Ausführende Stellen

Liebherr-Verzahntechnik GmbH

5.1. Stand der Technik

LIEBHERR

Die Funktion eines Winkelgetriebes mit hoher Übersetzung kann von verschiedenen Getriebekonzepten übernommen werden. Neben dem Schneckenradgetriebe können Kegelrad- oder Hypoidgetriebe, eine Sonderform des Kegelradgetriebes, eingesetzt werden. Kegelradgetriebe werden dann mit einem Stirnradgetriebe kombiniert, um die hohen Übersetzungen zu erreichen. Der Wirkungsgrad dieser zweistufigen Getriebe liegt bei ca. 94% bei entsprechend höheren Produktionskosten. Zudem kann der Wirkungsgrad eines Schneckenradgetriebes erhöht werden, indem ein Schneckenradgetriebe welches die Winkelfunktion übernimmt, mit einem Stirnradgetriebe kombiniert wird, um die entsprechende Übersetzung zu erreichen. Während speziell in der Automobil- und Nutzfahrzeugindustrie Kegelrad- bzw. Hypoidgetriebe favorisiert werden, sind im Bereich der Industriegetriebe und Stellantriebe die Schneckengetriebe weiter verbreitet.

Für Schneckengetriebe werden üblicherweise Werkstoffpaarungen mit einer Schnecke aus Stahl und einem Schneckenrad aus einer Kupfer-Zinn-Legierung (Bronze) verwendet. Aufgrund der hohen Kosten der Bronze versucht man bereits seit den 1960er Jahren Bronze durch andere Werkstoffe zu ersetzen.

Die Herstellung der Schneckenräder erfolgt durch Wälzfräsen, das zugleich die Endbearbeitung der Verzahnung darstellt. Ein Beispiel einer entsprechenden Wälzfräsmaschine und der typischen Prozessanordnung ist in **Abbildung 4** dargestellt.

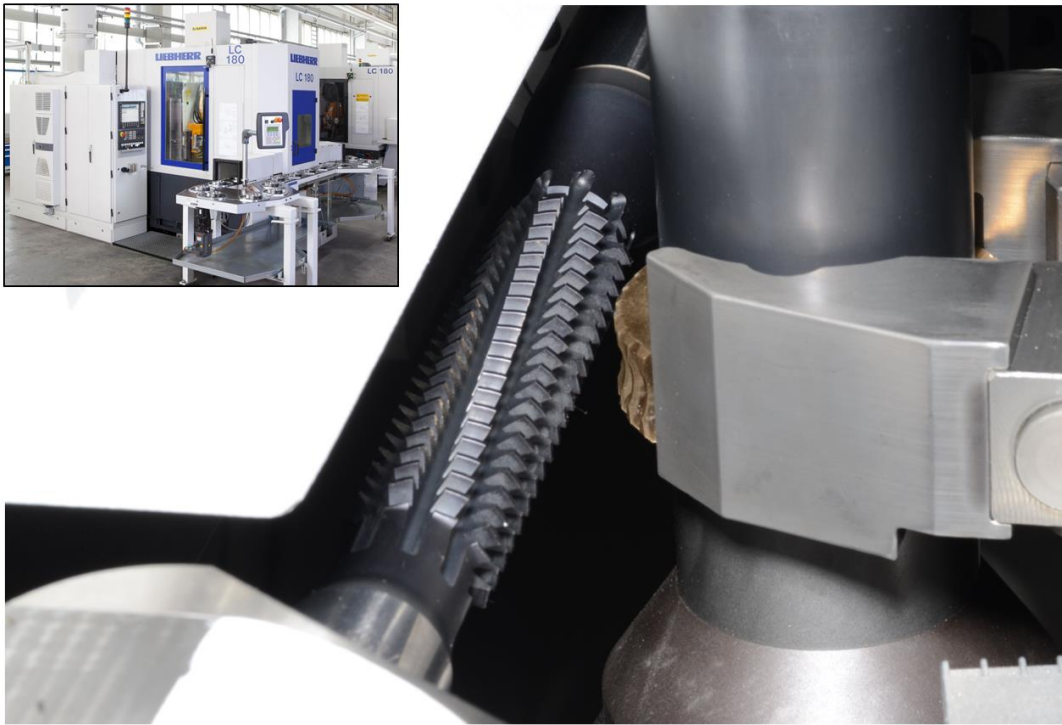
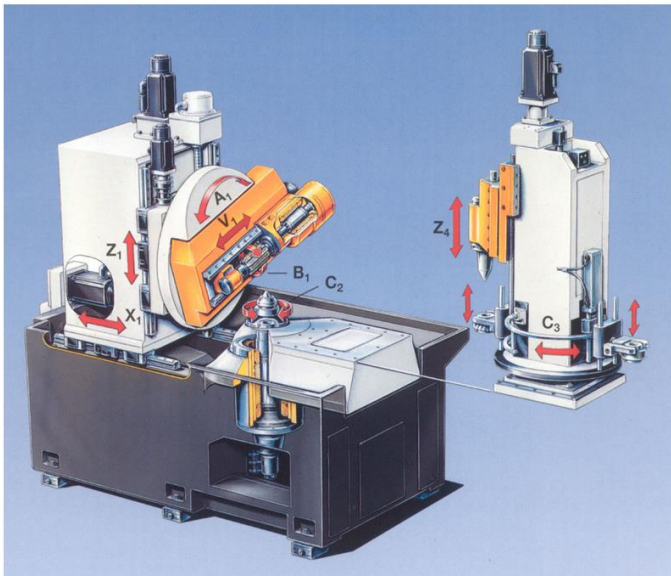


Abbildung 4: Wälzfräsen von Schneckenrädern (Bronze)

Charakteristisch für das Schneckenradfräsen ist der verhältnismäßig kleine Werkzeugdurchmesser des Wälzfräasers, da dieser nur wenige Prozent größer als die zugehörige Schnecke des Schneckengetriebes sein darf. Andernfalls wird das Tragbild des Schneckenrades zu klein und die Tragfähigkeit nimmt ab, was zu einer Reduzierung des übertragbaren Drehmomentes und damit der Leistungsdichte führt.

Bedingt durch diese filigrane Werkzeuggestalt ist der Prozess in erhöhtem Maße schwingungsanfällig, so dass regeneratives Rattern eine der Prozessgrenzen darstellt und die theoretische Leistungsfähigkeit von Werkzeugen und Maschinen in der Regel nicht voll ausgenutzt werden kann. Zusätzlich ist das Werkzeug im Vergleich zum konventionellen Wälzfräsen von Stirnrädern über einen nahezu doppelt so langen Schnittbogen im Eingriff mit dem Werkstück, so dass moderatere Schnittwerte und angepasste Werkzeugauslegungen bei ansonsten gleichen Verzahnungen erforderlich sind.

Die Prozessstrategie sieht in der Regel ein radiales Eintauchen des Wälzfräasers in die Verzahnung vor, dem sich ggf. ein tangentiales Glätten der Flankenoberfläche des Schneckenrades anschließt. Es sind mit dem sogenannten Tangential- oder Hochleistungs-Radialfräsen auch andere Vorschubstrategien und Werkzeugkonzepte möglich, jedoch wird das Radialfräsen aufgrund seiner hohen Produktivität wann immer möglich favorisiert. Die Umsetzung der erforderlichen Bahnbewegungen des Schneckenrad-Wälzfräasers erfolgt über die CNC-Achsen der Wälzfräsmaschine. Ein typisches Beispiel des Aufbaus einer modernen Wälzfräsmaschine zeigt **Abbildung 5**.



6 CNC-Achsen,
um die notwendigen Bewegungen
zu realisieren
(plus zusätzliche CNC-Achsen für die
Automation/Werkstückwechsel)

A-Achse: Schwenken des Werkzeugs
B-Achse: Werkzeugspindel
C-Achse: Tischspindel (Werkstück)

X-Achse: radiale Zustellung
V-Achse: Shiftbewegung des Fräasers
Z-Achse: Axialvorschub

Direktantriebe
für höhere Spindel- und Tischdrehzahlen

Abbildung 5: Aufbau einer Wälzfräsmaschine

In das Maschinenbett (schwarz) wird der Tischrahmen mit der Tischspindel als Werkstückdrehachse (C₂-Achse) eingelassen. Auf der gegenüberliegenden Seite wird der Ständer montiert, der über die X₁-Achse die radiale Zustellung des Werkzeuges durchführt. An diesen ist der Fräskopfschlitten angebracht, der über die Bewegung der Z₁-Achse bei der Bearbeitung von Stirnrädern den Axialvorschub realisiert. Der Fräskopf selbst ist in der A₁-Achse drehbar gelagert, um den Schwenkwinkel des Wälzfräasers einstellen zu können. Der Fräskopf beinhaltet sowohl die V₁-Achse zum tangentialen Vershiften des Werkzeuges als auch die Werkzeugspindel (B₁-Achse) selbst, die die erforderliche Werkzeugrotation zur Erzeugung der Schnittgeschwindigkeit übernimmt. Charakteristisch für Wälzfräsmaschinen ist die extrem präzise Koppelung der Werkzeugdrehung (B₁-Achse) mit der Werkstückdrehung (C₂-Achse). Diese sogenannte Wälzkopplung ist entscheidend für die Verzahnungsqualität der zu bearbeitenden Werkstücke.

Auf den Tischrahmen wird noch der Gegenänder aufgesetzt, der einerseits über eine Gegenhalterspitze zur Aufnahme von Zentrierspitzen oder Spannglocken sowie andererseits über einen Ringlader zum automatischen Werkstückwechsel als interne Automation verfügt. Die entsprechenden zusätzlichen CNC-Achsen sind im Bild eingezeichnet.

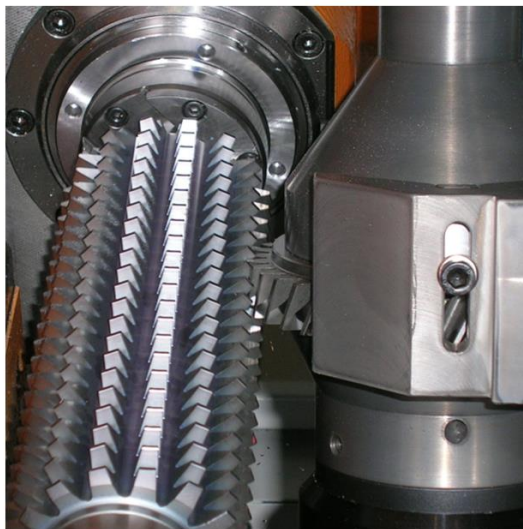
Sowohl die Frässpindel als auch die Tischspindel sind direktangetrieben, um die aus den kleinen Werkzeugdurchmessern bei gegebener Schnittgeschwindigkeit resultierenden hohen Drehzahlen abbilden zu können.

Frühere Projekte zur Einführung von Stahl als Schneckenwerkstoff sind daran gescheitert, dass die Schneckenradqualität aufgrund des Härteverzugs nach der erforderlichen Wärmebehandlung durch Einsatzhärten nur in der DIN-Klasse 9 lag und keine Nachbehandlung mehr stattfand. Aufgrund des schlechteren Einlaufverhaltens von Stahl-Schneckenrädern ist die Anforderung an die geometrische Bauteilqualität

bei diesem Material jedoch höher als bei der Bronzevariante. Hier ist mit erforderlichen Verzahnungsqualitäten im Bereich der DIN-Klasse 6-7 zu rechnen. Zusätzlich muss eine gute Oberflächenqualität und -rauheit (z.B. $R_z = 4,5 \mu\text{m}$ und $R_a = 1 \mu\text{m}$) sowie eine sehr geringe Formabweichung weiterhin sichergestellt sein, um eine gleichmäßige Lastverteilung auf den Zahnflanken zu gewährleisten und somit die örtlichen Flankenbelastungen erheblich senken. Es ist anzunehmen, dass dies nur durch eine entsprechende Hartfeinbearbeitung der Stahl-Schneckenräder nach dem Einsatzhärten und ggf. weitere Schritte zur Oberflächenveredelung zu realisieren ist.

In Bezug auf Schneckenräder kommen hier prinzipiell zwei Hartfeinbearbeitungsverfahren in Betracht. Dies ist zum einen aus dem Bereich der Verfahren mit definierter Schneide das Schälwälzfräsen als Variante des Wälzfräsens und aus dem Bereich der Verfahren mit undefinierter Schneide das Wälzschleifen, das hinsichtlich seiner Prozesskinematik und dem Maschinenaufbau dem Wälzfräsen entspricht.

Beginnend mit dem Schälwälzfräsen sind die Verfahrensmerkmale und seine Vor- und Nachteile in **Abbildung 6** dargestellt. Wie im linken Bildteil am Beispiel einer Stirnradbearbeitung zu erkennen ist, gleicht das Schälwälzfräsen dem Wälzfräsen. Da es sich jedoch um ein Hartfeinbearbeitungsverfahren handelt, ist das Werkstück bereits vorverzahnt, so dass das Werkzeug vor dem Fräsen zum Werkzeug eingemittet werden muss, was typischerweise mit entsprechenden Sensoren automatisch geschieht.



Verfahrensmerkmale

- Hartfeinbearbeitung
- Verfahrensprinzip analog zum Wälzfräsen
- Hartmetall-Werkzeuge
- Negativer Kopfspanwinkel am Werkzeug
- Verzahnungsqualität: DIN 5 - 7
- Schnittgeschwindigkeit: 70 - 120 m/min

 ■ Vor- und Fertigbearbeitung auf derselben Maschine möglich

 ■ lange Bearbeitungszeiten
■ mittlere Verzahnungsqualität

Anwendungsgebiete

- Mittel- und Kleinserien
- Lohnverzahner, Landmaschinen

Abbildung 6: Schälwälzfräsen (Stirnrad)

Zur Zerspaltung der gehärteten Bauteiloberfläche müssen Hartmetall-Wälzfräser zum Einsatz kommen, die zudem über einen negativen Kopfspanwinkel verfügen, um die Schlagbelastung auf das Werkzeug beim Schneideneintritt zu senken. Die realisierbaren Schnittgeschwindigkeiten liegen im unteren und mittleren Modulbereich ($m = 1 - 4 \text{ mm}$) im Bereich von 70 – 120 m/min. Die erzielbaren Verzahnungsqualitäten liegen im Bereich von DIN 5-7.

Der Vorteil des Verfahrens liegt darin, dass für das Vorverzahnen der Bauteile und die anschließende Hartfeinbearbeitung dieselbe Maschine zum Einsatz kommen kann, so dass ein Invest in zusätzliche Feinbearbeitungsmaschinen vermieden werden kann. Nachteilig ist, dass die Bearbeitungszeiten durch die vergleichsweise niedrigen Schnittgeschwindigkeiten typischerweise deutlich höher liegen als z.B. beim Verzahnungsschleifen. Außerdem ist die erzielbare Verzahnungsqualität durch die kinematischen Abweichungen des Wälzfräsprozesses (Vorschubmarkierungen und Hüllschnitte) und die Herstellgenauigkeit der Wälzfräser eingeschränkt.

Die andere denkbare Alternative zur Hartfeinbearbeitung von Stahl-Schneckenrädern ist das Wälzschleifen. Im Bereich der Stirnradfertigung ist dabei der Einsatz abrichtbarer Korund-Schleifschnecken sehr weit verbreitet. Da sich jedoch durch das Abrichten der Werkzeugdurchmesser der Schleifschnecke kontinuierlich ändert und verkleinert und zudem - wie oben beschrieben - bei der Schneckenradfertigung ohnehin nur sehr kleine Werkzeugdurchmesser zulässig sind, scheidet diese Verfahrensvariante für die Anwendung aus. Eine Alternative bietet das Wälzschleifen mit galvanisch belegten CBN-Schleifschnecken (**Abbildung 7**).



Anwendungsgebiete

- Mittel- und Großserien
- Automobil, Industriegetriebe

Verfahrensmerkmale

- Hartfeinbearbeitung
 - Verfahrensprinzip analog zum Wälzfräsen
 - einlagig mit CBN belegte Werkzeuge
 - Werkzeuge sind nicht abrichtbar (Wiederbelegung erforderlich)
 - sehr hohe Werkzeugstandzeiten
 - Verzahnungsqualität: DIN 3 - 6
 - Schnittgeschwindigkeit: bis 80 m/s
-
- ⊕ sehr kurze Bearbeitungszeiten
 - sehr hohe Prozessstabilität
 - kein Abrichten erforderlich
-
- ⊖ hoher Werkzeuginvest

Abbildung 7: Wälzschleifen mit galvanisch gebundenem CBN

Die Schleifwerkzeuge sind einlagig mit dem hochharten und damit sehr verschleißfesten CBN belegt, so dass kein Abrichten erforderlich ist. Die Schleifschnecke behält damit über der gesamten Lebensdauer seinen Durchmesser bei. Da das CBN eine ähnlich hohe Härte wie Diamant hat, werden sehr hohe Werkzeugstandzeiten erreicht. Analog zum Schälwälzfräsen muss auch beim Wälzschleifen das Werkstück zum Werkzeug vor der Bearbeitung eingemittet werden. Die erzielbare Verzahnungsqualität liegt mit etwa DIN 3 - 6 deutlich höher im Vergleich zum Schälwälzfräsen.

Außerdem können mit bis zu 80 m/s wesentlich höhere Schnittgeschwindigkeiten realisiert werden.

Der Vorteil des Wälzschleifens liegt in den bedingt durch die hohen Schnittgeschwindigkeiten und den Wegfall der Abrichtzeiten kurzen Bearbeitungszeiten und der sehr hohen Prozessstabilität durch den geringen Werkzeugverschleiß. Nachteilig ist der hohe Invest für die CBN-Werkzeuge.

Im Hinblick auf eine mögliche Anwendung dieser Verfahren zur Hartfeinbearbeitung von Schneckenrädern muss jedoch festgestellt werden, dass für keines der beiden Verfahren Forschungsergebnisse oder industrielle Anwendungen bekannt sind. Dies trifft in besonderem Maße auf die eingesetzten Werkzeuge zu. So sind beispielsweise die zum Schälwälzfräsen erforderlichen Hartmetall-Schneckenradfräser erst seit wenigen Jahren überhaupt auf dem Markt verfügbar und werden bisher ausschließlich zum Fertigfräsen von Bronze-Schneckenrädern mit entsprechend geringer Härte und Festigkeit eingesetzt.

Hinsichtlich der galvanisch gebundenen CBN-Schleifschnecken stellt sich die Situation nochmals anders dar. Zwar bildet die Auslegung und Fertigung dieser galvanischen Werkzeuge seit vielen Jahren eine Kernkompetenz im Hause Liebherr, aber diese bezieht sich auf die für Stirnradanwendungen typischen Abmessungen. **Abbildung 8** gibt hierfür zwei Beispiele aus dem für dieses Projekt relevanten Modulbereich von 1 – 4 mm.



Abbildung 8: CBN-Schnecken zum Wälzschleifen

Es ist zu erkennen, dass die Werkzeugdurchmesser im Vergleich zur Zahnhöhe (vergleiche Abbildung 4) viel größer sind als typische Werkzeuge zur Schneckenradbearbeitung. Auch lassen sich bei größeren Durchmessern Werkzeugkonzepte mit getrenntem Schrupp- und Schlichtbereich (im Bild oben) zur weiteren Steigerung der

Werkzeugstandzeiten und der Prozesssicherheit viel einfacher umsetzen. Der Wissenstransfer auf die filigranen Abmessungen eines Schleifwerkzeuges zur Schneckenradfertigung wird somit eine wesentliche Herausforderung in diesem Projekt darstellen.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die in diesem Projekt zu realisierenden Fertigungsverfahren zur Hartfeinbearbeitung von Schneckenrädern derzeit weder erforscht noch auf dem Markt erhältlich sind. Weiterhin ist kein öffentlich zugängliches Wissen bekannt, das etwaige Versuche unternommen oder gar erfolgreich abgeschlossen wurden. Zusätzlich ist bisher unklar, ob sich dieser zusätzliche Fertigungsaufwand durch eine entsprechende Leistungssteigerung oder Stückkostenreduzierung der Stahl-Schneckenräder lohnt. Es ist somit das Ziel des Verbundprojektes, zu untersuchen, ob die geplanten Fertigungstechnologien zufriedenstellende Ergebnisse, z.B. hinsichtlich der Bauteilqualität oder praxisrelevanter Bearbeitungszeiten, erzielen können und die gefertigten Bauteile die Erwartungen an die Leistungsfähigkeit erfüllen.

5.2. Erzielte Ergebnisse

Zu Beginn des Projektes wurde für die Phase 1 eine Verzahnungsgeometrie der zu untersuchenden Schneckenräder ausgelegt und die erforderlichen Bauteil- und Fertigungszeichnungen erstellt (AP3). Zur Unterstützung der fertigungsgerechten Konstruktion der Bauteile hat Liebherr sein Erfahrungswissen eingebracht. Ein besonderes Augenmerk lag auf der Definition geeigneter Bezugs- und Spannflächen sowie auf der Festlegung anforderungsgerechter Toleranzen.

Die Verzahnungsdaten des in Phase 1 zu untersuchenden Schneckenrades sowie der zugehörigen Schnecke sind in **Abbildung 9** dargestellt. Das Schneckengetriebe hat eine Übersetzung von 1:30 bei einem Achsabstand von 62,17 mm. Der resultierende Stirnmodul des Schneckenrades beträgt ca. 3,22 mm, der Durchmesser der Schnecke ist 34,1 mm.



■ Schneckenrad

- Stirnmodul = 3,2201 mm
- Zähnezahl = 30
- Eingriffswinkel = 20°
- Schrägungswinkel = 6,622°
- Durchmesser = 102,9 mm
- Breite = 22,0 mm
- Werkstoff = diverse
- Härte = diverse
- Qualität (Soll) = 6 (DIN 3974)

Schnecke

- Gangzahl = 1gg, rechts
- Durchmesser = 34,1 mm
- Mittenkreis = 27,737 mm

Abbildung 9: Werkstück (Phase 1)

Aufgrund des geringen Schrägungswinkels des Schneckenrades von ca. $6,6^\circ$ ist ein Radialfräsen möglich. In Arbeitspaket 2 wurden als zu untersuchende Werkstoffe ein 16MnCr5 mit einer Zugfestigkeit von ca. 550 N/mm^2 , ein 18CrNiMo7-6 mit einer Zugfestigkeit von ca. 600 N/mm^2 , ein 42CrMo4 mit einer Zugfestigkeit von ca. 1000 N/mm^2 und als Referenz eine Bronze CuSn12 mit einer Zugfestigkeit von ca. 390 N/mm^2 ausgewählt. Die zu erzielende Qualität wurde mit DIN 6 nach DIN 3974 festgelegt.

5.2.1. Werkzeugauslegung

Basierend auf den Verzahnungen wurden durch Liebherr in Zusammenarbeit mit dem Wälzfräserhersteller Saacke die Fräs- und Schleifwerkzeuge ausgelegt. Speziell bei der Auslegung der Wälzfräser musste den unterschiedlichen Prozessketten und Fertigungsverfahren Rechnung getragen werden, so dass je ein Fräserdesign für das Vorfräsen, das Fertigfräsen und das Schälwälzfräsen der Schneckenräder erforderlich war. Einen Überblick über die drei unterschiedlichen Varianten gibt **Abbildung 10**.

Beim Vorfräsen ist das Zerspanvolumen am größten, so dass ein ausreichend großer Spanraum erforderlich ist. Der Vorfräser wurde daher nur mit nur 6 Spannuten bei einem Durchmesser von ca. 37,5 mm ausgeführt. Die dadurch am Werkstück entstehenden Hüllschnitte haben hier nur eine untergeordnete Bedeutung, da das Werkstück ja später noch hartfeinbearbeitet wird.

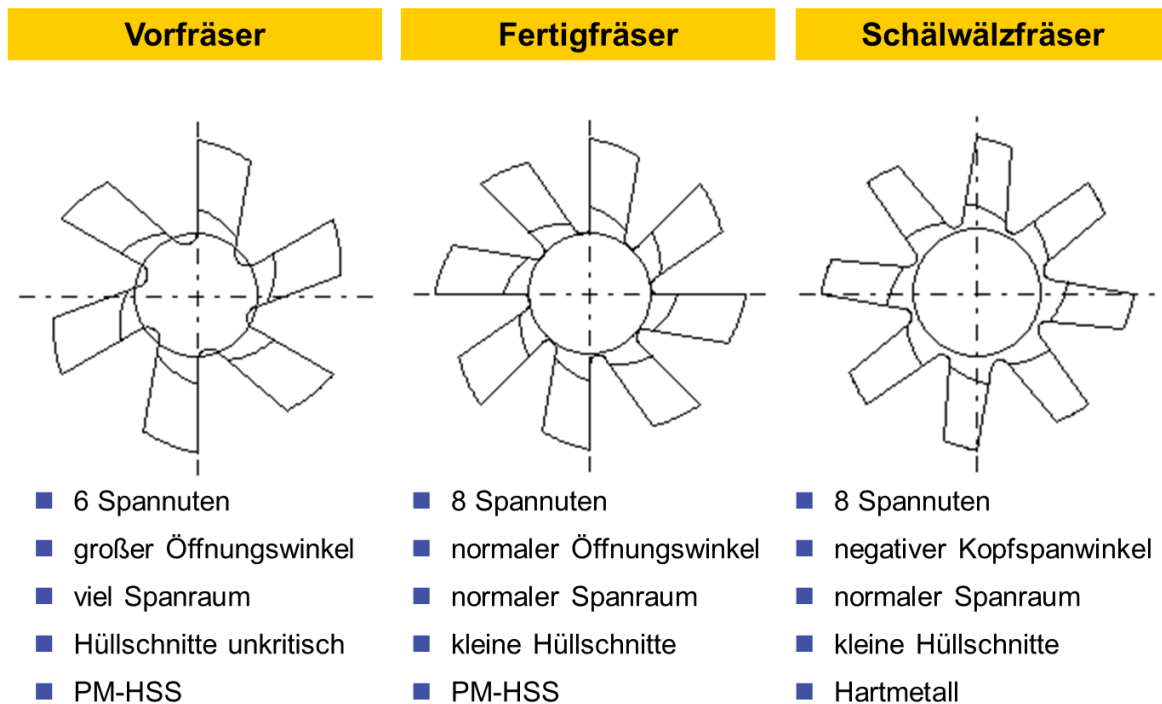


Abbildung 10: Fräswerkzeuge (Auslegung)

Zur Verschleißreduzierung wurde innerhalb dieses Projektes der Fertigfräser als Schlichtfräser zur reinen Flankenbearbeitung mit ausgelegt. Es wird also zunächst vorverzahnt und dann fertiggefräst. Aufgrund des deutlich geringeren Zerspanvolumens wird der Fertigfräser mit 8 Spannuten bei einem Werkzeugdurchmesser von ca. 36,9 mm ausgeführt. Da es sich um eine Fertigbearbeitung handelt, können die Formabweichungen durch Hüllschnitte somit minimiert werden. Sowohl der Vor- als auch der Fertigfräser wurden aus PM-HSS gefertigt.

Analog zum Fertigfräser wurde der Schälwälzfräser mit gleichem Durchmesser und gleicher Spannutenzahl ausgelegt. Um jedoch der Werkstückhärte bei der Hartfeinbearbeitung Rechnung zu tragen wurde der Schälwälzfräser in Hartmetall und mit negativem Kopfspanwinkel ausgeführt (vgl. Kapitel 4). Als Flankenaufmaß für die Fertigbearbeitung wurden 0,12 mm veranschlagt, die im Werkzeugprofil des Vorfräsers berücksichtigt sind.

Die Auslegung der Werkzeugprofile der galvanisch gebundenen CBN-Schleifschnecken ist identisch zu den Werkzeugprofil der Fertig- und Schälwälzfräser, um eine direkte Vergleichbarkeit zu erhalten.

Eine Gegenüberstellung der drei beschafften Wälzfräser zeigt **Abbildung 11**. Aufgrund der geringen Werkzeugdurchmesser wurden alle drei Wälzfräser als Schaftwerkzeuge ausgeführt, die direkt in der Frässpindel gespannt werden können. Bei allen drei Werkzeugen handelt es sich um Radialfräser, die zum Verschleißschutz mit einer AlCrN-Beschichtung versehen wurden.



Abbildung 11: Wälzfräser (Phase 1)

5.2.2. Vorfräsen

Basierend auf den definierten Spann- und Bezugsflächen des Werkstücks wurden auch expandierende Spannmittel beschafft, die eine hohe Rundlaufqualität der Werkstücke sicherstellen und eine automatische Beladung im Rahmen einer Serienfertigung ermöglichen.

Nach der Bereitstellung der Schneckenradrohlinge und der Lieferung der Werkzeuge und Vorrichtungen wurde mit dem Vorverzahn der Schneckenräder begonnen. Den entsprechenden Versuchsaufbau auf der eingesetzten Liebherr-Wälzfräsmaschine vom Typ LC 180 zeigt **Abbildung 12**. Die Versuchsmaschine ist für Werkstücke bis zu einem Durchmesser von 180 mm und einem Modul von 4 mm geeignet, so dass alle innerhalb dieses Projektes untersuchten Verzahnungen auf ihr bearbeitet werden können. Die Versuche wurden als Nassbearbeitung mit Öl durchgeführt.

Im Rahmen von Vorversuchen wurden an allen Werkstoffen die realisierbaren Schnittwerte im Hinblick auf eine ausreichende Verzahnungsqualität und eine möglichst kurze Prozesszeit hin untersucht. Es zeigt sich, dass erwartungsgemäß die beiden Einsatzstähle (16MnCr5 und 18CrNiMo7-6) sowie die Bronze vergleichsweise gut zerspanbar sind, wohingegen der Vergütungsstahl (42CrMo4) aufgrund seiner hohen Festigkeit deutlich reduzierte Schnittwerte erfordert und zu einem erhöhten Werkzeugverschleiß führt.



Abbildung 12: Wälzfräsen von Schneckenrädern (Phase 1)

Da die Qualitätsanforderungen beim Vorfräsen im Vergleich zur Fertigbearbeitung geringer, konnten hier kurze Prozesszeiten erzielt werden. Die Stückzeit für das Vorfräsen der Einsatzstähle lag bei 1,09 min. Von beiden Stahlsorten wurden im Rahmen des Projektes zusammen über 800 Werkstücke verzahnt.

Um die erzielte Qualität zu erfassen und zu dokumentieren, wurden die Teile im Nachgang der Fräsbearbeitung von Liebherr bezüglich Teilungsqualität, Topographie, Zahndicke und ggf. Oberflächenrauheit vermessen. Somit wurde sichergestellt, dass den weiteren Projektpartner toleranzhaltige Teile zur Verfügung gestellt wurden. **Abbildung 13** zeigt die eingesetzte Klingenberg-Verzahnungsmessmaschine, die sowohl zum Messen von Schneckenrädern als auch zur Kontrolle der bereitgestellten Messschnecken geeignet ist. Die Maschine ist in der Lage, Sollkoordinaten aus einer Fertigungssimulation der Schneckenräder für die Vermessung zu importieren, die darauf bezogenen Abweichungen zu ermitteln und als Topographie der Zahnflanken darzustellen und auszugeben.

Die vorverzahnten Schneckenräder wurden danach zur Wärmebehandlung in Form eines Einsatzhärten (AP5.2) gesandt. Für weiterführende Untersuchungen zur Oberflächenanalyse und finalen Dokumentation der Verzahnungsqualität wurden Muster Teile an die entsprechenden Projektpartner versandt.

Nach dem Einsatzhärten wurden die Teile stichprobenartig zur Ermittlung des Härteverzuges bei Liebherr erneut gemessen. **Abbildung 18** zeigt exemplarisch einen Vergleich.

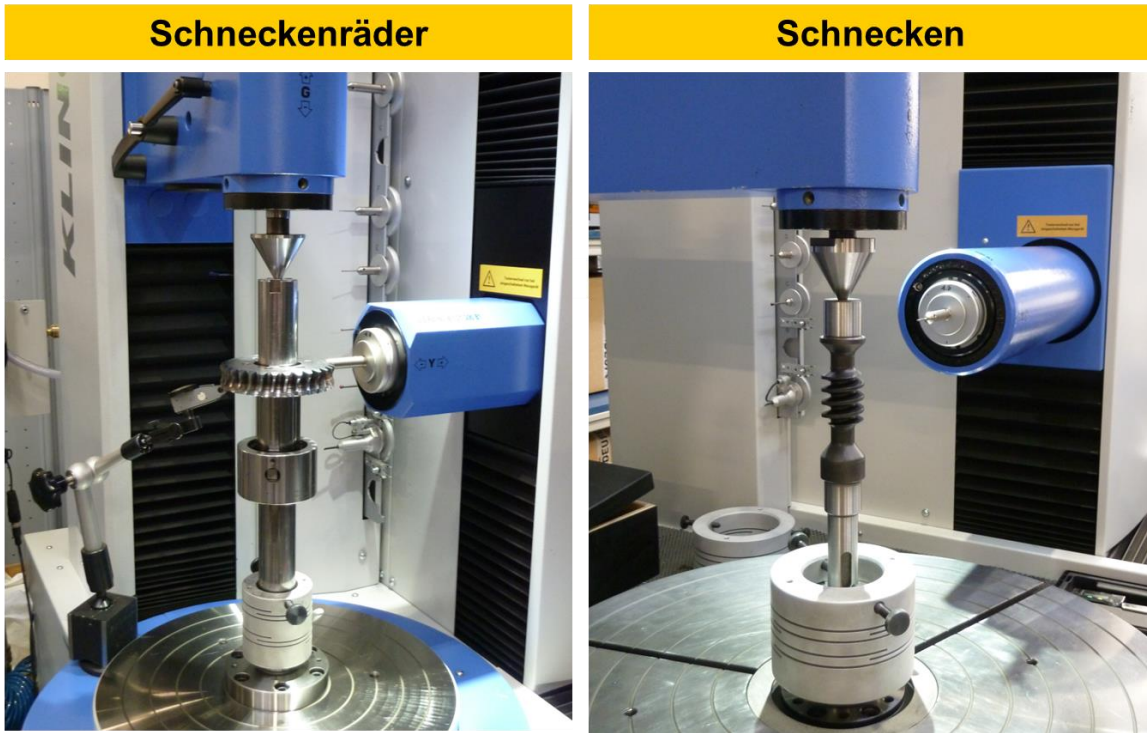


Abbildung 13: Verzahnungsmessung von Schneckenrädern und Schnecken

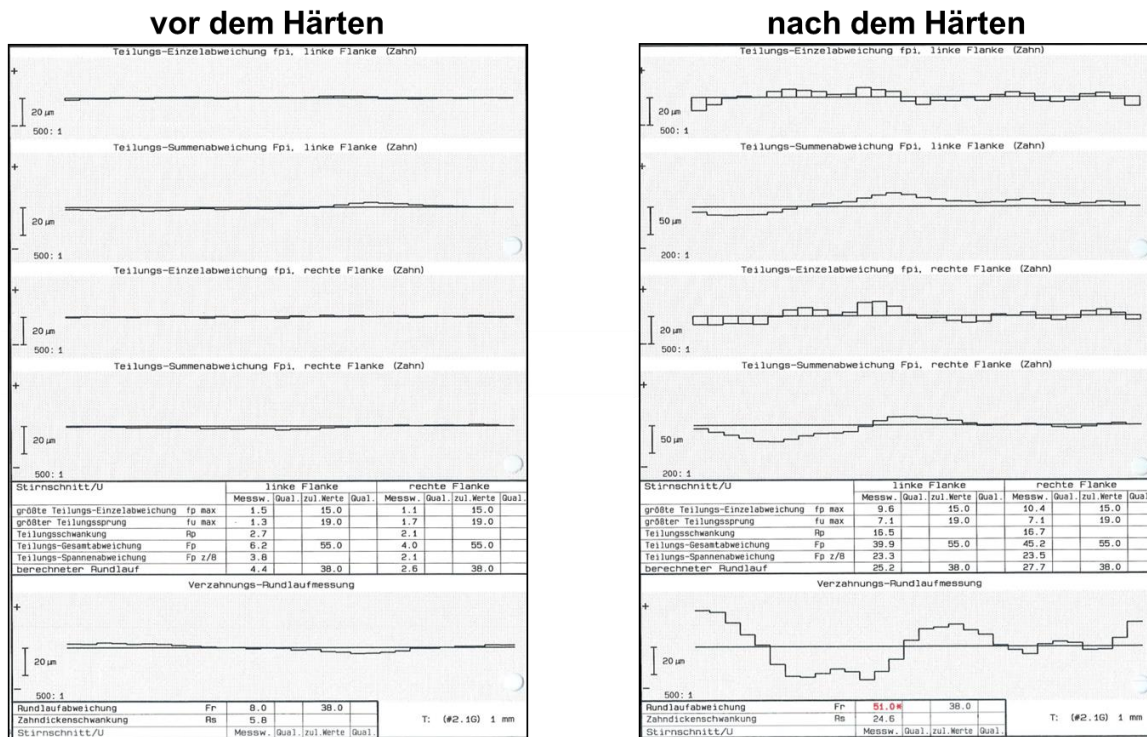


Abbildung 18: Härteverzug durch das Einsatzhärten

Wie im linken Bildteil zu erkennen ist, konnte beim Vorverzahn eine sehr gute Rundlauf- und Teilungsqualität erzielt werden, die die gegebenen Toleranzen bei wei-

tem nicht ausschöpft. Durch das Einsatzhärten tritt der erwartete Verzug auf, der sich jedoch in Bezug auf die Teilungsabweichungen noch in Grenzen hält. Deutlich ausgeprägter sind die Verzüge in ihrer Auswirkung auf den Rundlauf der Teile, so dass selbst die Qualitätsklasse 8 nicht mehr erreicht wird. Dies unterstreicht die Notwendigkeit einer nachfolgenden Hartfeinbearbeitung bei dieser Werkstoffvariante.

Als positiv ist festzuhalten, dass die Härteverzüge sowohl hinsichtlich der Verzahnungsqualität als auch hinsichtlich der Zahndicke dennoch so gering sind, dass das zuvor veranschlagte Flankenmaß von 0,12 mm deutlich ausreichend ist. Ein entsprechender Härtevorhalt war nicht erforderlich.

5.2.3. Fertigfräsen

Als alternative Prozesskette zum Einsatzhärten und Hartfeinbearbeiten wurde das Fertigfräsen und Nitrieren von Vergütungsstählen anhand des Werkstoffs 42CrMo4 (1000 N/mm²) untersucht. Im Gegensatz zum Vorfräsen soll hierbei bereits die Endqualität erzeugt werden, daher bestehen höhere Anforderungen an die Verzahnungs- und Oberflächenqualität. Ein Beispiel der innerhalb diese Projektes erzeugten Qualität liefert **Abbildung 14**. Es ist zu erkennen, dass die gewünschte Qualität DIN 6 problemlos eingehalten werden konnte.

Schneckenrad

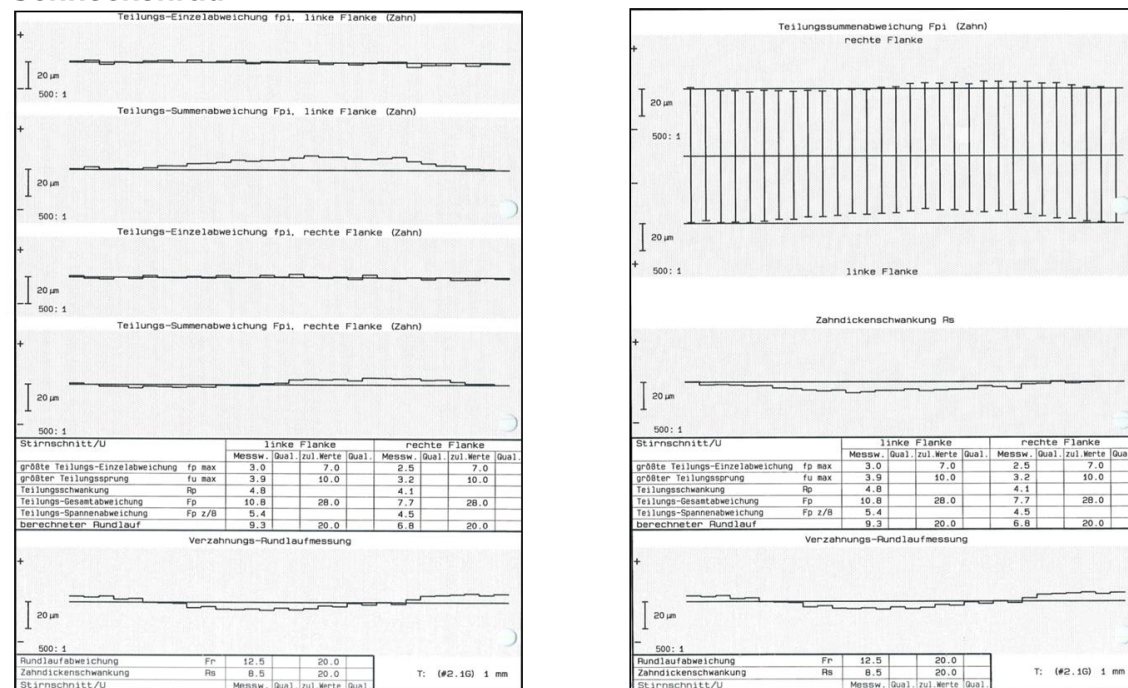
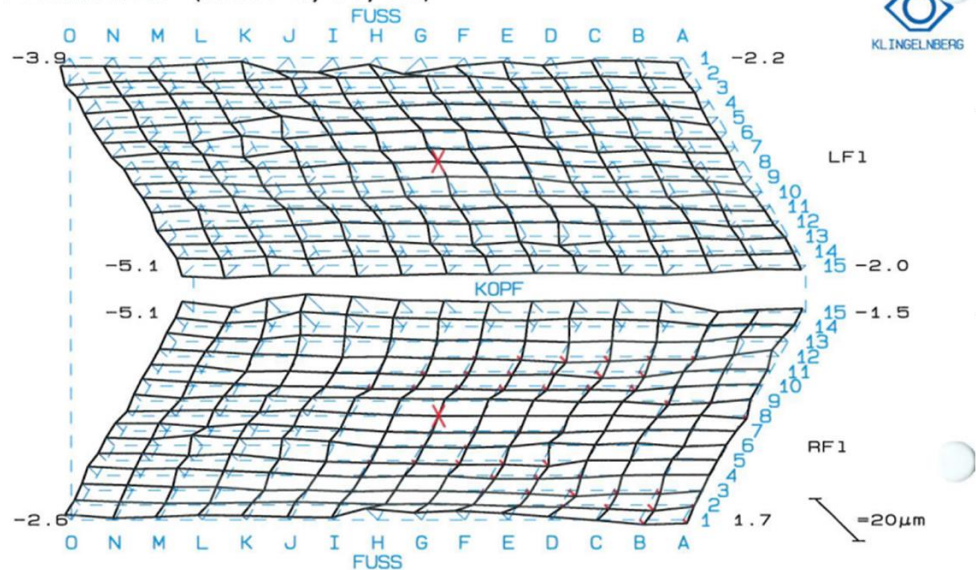


Abbildung 14: Verzahnungsqualität nach dem Fertigfräsen (42CrMo4, Phase 1)

Auch in der Topographiemessung (**Abbildung 15**) zeigen sich nur geringfügige Abweichungen.

MITTELWERTE (ZAHN 1, 11, 21)



T: (#2.1G) 1 mm

Kenngröße	Sollwert	Istwert	Abw.	u.Tol.	o.Tol.	Einh.
Stirnschnittsehne (H8; R=48.285; Z=0.000)	5.233	4.981	-0.252			mm
						mm

Abbildung 15: Topographie nach dem Fertigfräsen (42CrMo4, Phase 1)

Neben der geometrischen Vermessung der Schneckenräder steht vor allem der Funktionsnachweis im Vordergrund. Hierzu wird eine Einflanken-Wälzprüfung mit einer qualitativ hochwertigen Messschnecke durchgeführt, die geometrisch zu der späteren Getriebeschnecke identisch ist. Die Messschnecke wird angetrieben und aus den Verzahnungsabweichungen des Prüfschneckenrades resultierenden Drehabweichungen werden für beide Drehrichtungen aufgezeichnet. Ein entsprechender Prüfstand ist in **Abbildung 16** dargestellt. Im unteren rechten Bildteil ist der Eingriff von Schnecke und Schneckenrad zu erkennen. Ein typisches Ergebnis einer solchen Wälzprüfung für die fertiggefrästen Schneckenräder zeigt **Abbildung 17**. Auch hier konnte die gewünschte Qualität DIN 6 mit Werten von DIN 4-6 sehr gut erreicht werden.

Im Zuge der Wälzprüfung kann mit Hilfe einer Tuscherpaste (hier blau) auch eine sogenannte Tragbildprüfung erfolgen, in der die Kontaktfläche zwischen Schnecke und Schneckenrad im lastfreien Zustand mit der theoretischen Auslegung verglichen wird. Die Messungen zeigten eine gute Übereinstimmung, was mit den gemessenen Topographien korreliert.

Ebenfalls wurde anhand des Verdrehflankenspiels des Schneckenrades die Zahndicke kontrolliert und ggf. angepasst.

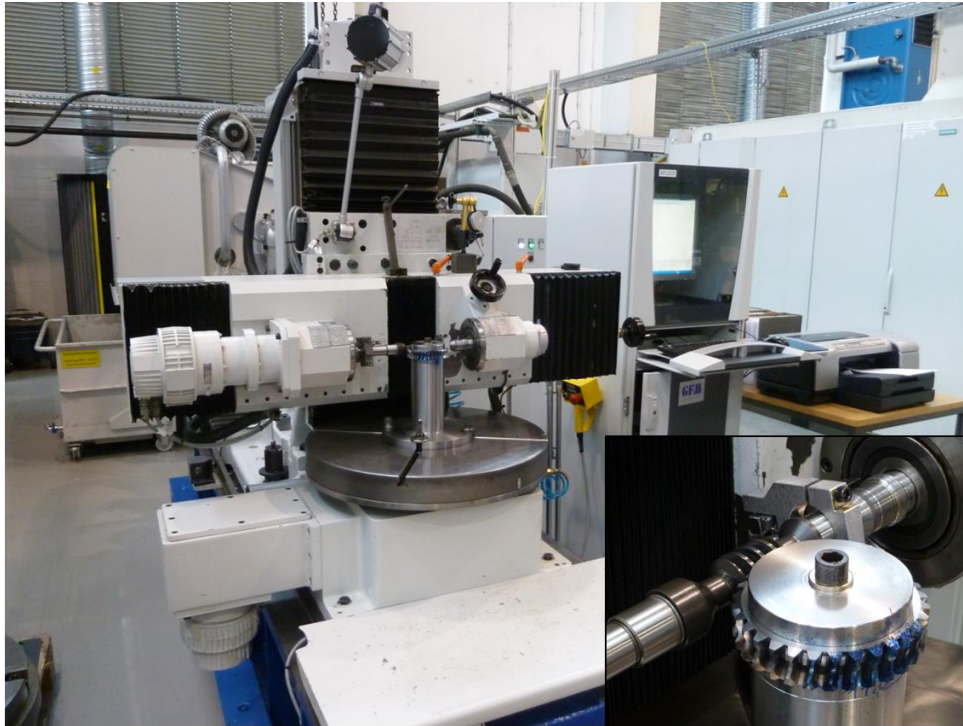


Abbildung 16: Wälzprüfung von Schneckenrädern

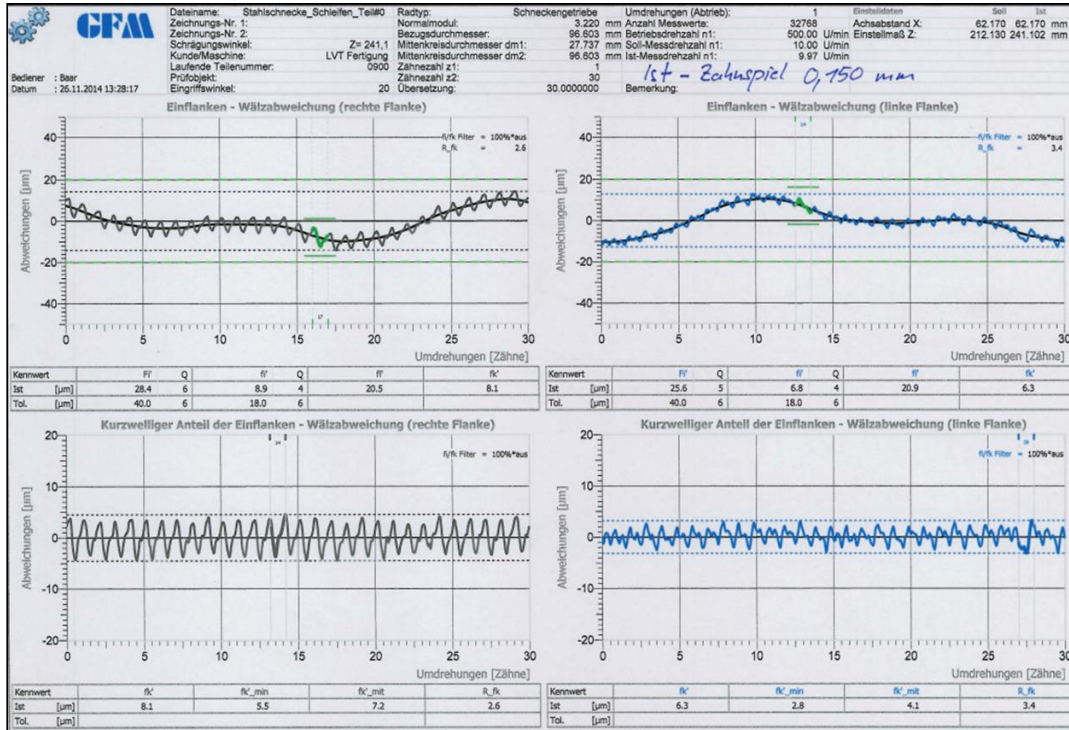


Abbildung 17: Wälzabweichungen von fertiggefrästen Schneckenrädern (Phase 1)

Die gemessene Oberflächenrauheit lag mit $R_z = 2,5 - 3,5 \mu\text{m}$ und $R_a \approx 0,45 \mu\text{m}$ deutlich innerhalb der geforderten Werte (siehe Kapitel 4).

Auf Basis der verwendeten Schnittwerte würde sich für das Fertigfräsen des Vergütungsstahls mit einem PM-HSS-Wälzfräser eine Stückzeit von 1,87 min ergeben. Allerdings zeigte sich im Rahmen der Technologieerprobung, dass die Werkstückqualität bedingt durch den Werkzeugverschleiß recht schnell abnimmt. Dies ist auf die hohe Festigkeit des untersuchten Vergütungsstahls zurückzuführen. Deshalb wurden Versuche mit einem Hartmetall-Wälzfräser gemacht, der vergleichbare oder bessere Ergebnisse (siehe oben) über einen deutlich längeren Zeitraum lieferte. Dementsprechend wurden alle Schneckenräder für die nachfolgenden Prüfstandsversuche mit einem Hartmetallfräser gefertigt. Die errechnete Stückzeit lag bei 1,68 min.

Für weiterführende Untersuchungen zur Oberflächenanalyse und finalen Dokumentation der Verzahnungsqualität wurden Musterteile an die entsprechenden Projektpartner versandt.

Die fertiggefrästen Schneckenräder wurden danach zur Wärmebehandlung in Form eines Nitrierens (AP5.1) gesandt. Die anschließende Vermessung der gehärteten Schneckenräder ergab, dass erwartungsgemäß durch das Nitrieren im Rahmen der Messgenauigkeit kein Härteverzug entsteht und die Teile somit einbaufertig wären.

Ergänzend wurden in diesem Arbeitspaket auch Teile aus Bronze (CuSn12) mit einem Hartmetall-Wälzfräser fertiggefräst, um einerseits eine Referenz für die späteren Prüfstandsversuche zu erzeugen und andererseits die entsprechende Stückzeit zu ermitteln, die den Stand der Technik wiederspielt und als Vergleich zu den Stahl-Schneckenrädern dienen kann. Es zeigt sich, dass sich die erzielte Verzahnungsqualität und Topographie vergleichbar mit den zuvor gefertigten Stahl-Schneckenrädern aus Vergütungsstahl ist. Die Oberflächenrauheit der Bronze-Räder ist mit $R_z = 1,5 - 3,0 \mu\text{m}$ und $R_a = 0,25 - 0,35 \mu\text{m}$ etwas besser. Die Stückzeit liegt bei 1,09 min.

Um auch den Einfluss unterschiedlicher Randzoneneigenschaften im Rahmen des Verbundprojektes untersuchen zu können, wurden abschließend Schneckenräder aus dem Einsatzstahl 18CrNiMo7-6 fertiggefräst. Die erzielte Verzahnungsqualität und Topographie ist vergleichbar mit den zuvor gefertigten Stahl-Schneckenrädern aus Vergütungsstahl und Bronze. Die Oberflächenrauheit ist mit $R_z = 5,5 - 6,5 \mu\text{m}$ und $R_a = 0,9 - 1,1 \mu\text{m}$ jedoch deutlich schlechter. Ob es hier einen Werkstoffeinfluss gibt oder eher der fortgeschrittene Werkzeugverschleiß ursächlich ist, konnte im Rahmen des Projektes nicht geklärt werden. Die Stückzeit lag ebenfalls bei 1,09 min.

Die fertiggefrästen Schneckenräder wurden danach zur Wärmebehandlung in Form eines Einsatzhärtens (AP5.2) mit dem Ziel eines hohen Restaustentitgehaltes gesandt. Für weiterführende Untersuchungen zur Oberflächenanalyse und finalen Dokumentation der Verzahnungsqualität wurden Musterteile an die entsprechenden Projektpartner versandt.

Von verschiedenen Werkstoffvarianten wurden im Rahmen des Projektes insgesamt über 200 Werkstücke fertiggefräst.

5.2.4. Hartfeinbearbeitung

Wie zuvor in Abbildung 18 gezeigt, tritt durch das Einsatzhärten der Schneckenräder ein zu großer Härteverzug auf, als dass die gewünschte Verzahnungsqualität von DIN 6 erreicht werden könnte. Daher ist eine nachfolgende Hartfeinbearbeitung notwendig. Als Verfahrensvarianten werden im Rahmen dieses Projektes das Schälwälzfräsen und das Wälzschleifen untersucht. Die Herausforderung dieses Arbeitspaketes liegt in der Erzielung möglichst hoher Verzahnungsqualitäten und sehr hoher Oberflächengüten ohne Randzonenschädigungen.

Vor der Hartfeinbearbeitung der Verzahnung selbst müssen auch die Bezugs- und Spannflächen z.B. durch Schleifen oder Hartdrehen hartfeinbearbeitet werden, um auch hier den Härteverzug zu eliminieren. Im Rahmen dieses Projektes hat Liebherr dies für alle betreffenden Bauteilvarianten durchgeführt.

Schälwälzfräsen

Die Untersuchungen zum Schälwälzfräsen von Stahl-Schneckenrädern erfolgten anhand des Einsatzstahls 16MnCr5. Die Härte der einsatzgehärteten Bauteile wurde hierbei zwischen 51 – 61 HRC variiert, um den Einfluss unterschiedlicher Randzoneigenschaften in den Prüfstandsversuchen zu untersuchen. Alle Varianten wurden mit den gleichen Schnittwerten bearbeitet. Die nachfolgend vorgestellten Ergebnisse basieren exemplarisch auf der Standardvariante mit 60 HRC.

Das Schälwälzfräsen wurde mit dem zuvor vorgestellten Hartmetall-Schälwälzfräser auf der Versuchsmaschine LC 180 als Nassbearbeitung mit Öl durchgeführt. Das Einmitten des Werkzeugs zum Werkstück erfolgte automatisch über einen induktiven Einfädelsensor in der Maschine. Ein repräsentatives Ergebnis zeigt **Abbildung 19**. Es wird deutlich, dass die Härteverzüge vollständig eliminiert werden können und eine sehr gute Rundlauf- und Teilungsgenauigkeit entsteht, die deutlich innerhalb der geforderten DIN 6 bleibt.

Auch die Topographiemessung in **Abbildung 20** zeigt trotz der hohen Bauteilhärte nur geringe Abweichungen und ist vergleichbar zu den Resultaten vom Fertigfräsen. Die erzielte Oberflächenrauheit ist mit $R_z = 2,5 - 3,0 \mu\text{m}$ und $R_a = 0,40 - 0,45 \mu\text{m}$ sehr gut und deutlich innerhalb der Vorgaben. Eine zusätzlich durchgeführte Nitalätzung zeigte keine Randzonenschädigungen. Auch in der Wälzprüfung konnte die gewünschte Qualität DIN 6 mit Werten von DIN 4-5 sehr gut erreicht werden. Die Stückzeit lag bei 2,00 min. Von verschiedenen Härtevarianten wurden im Rahmen des Projektes insgesamt über 230 Werkstücke schälwälzgefräst.

Schneckenrad

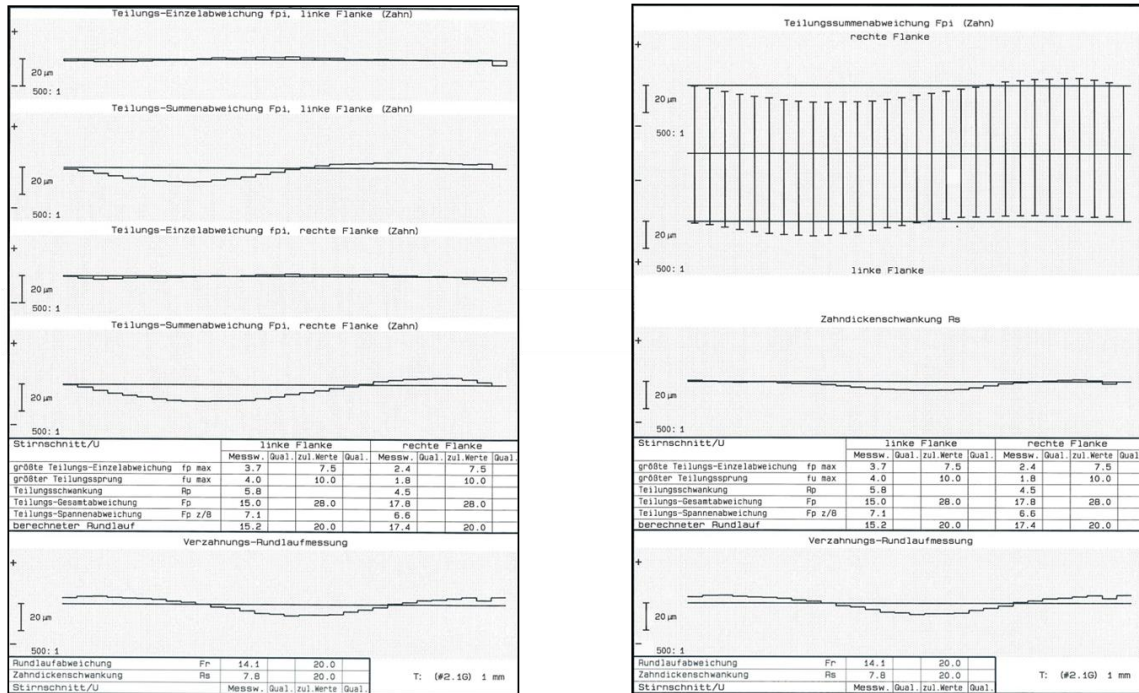


Abbildung 19: Verzahnungsqualität nach dem Schälwälzfräsen (Phase 1)

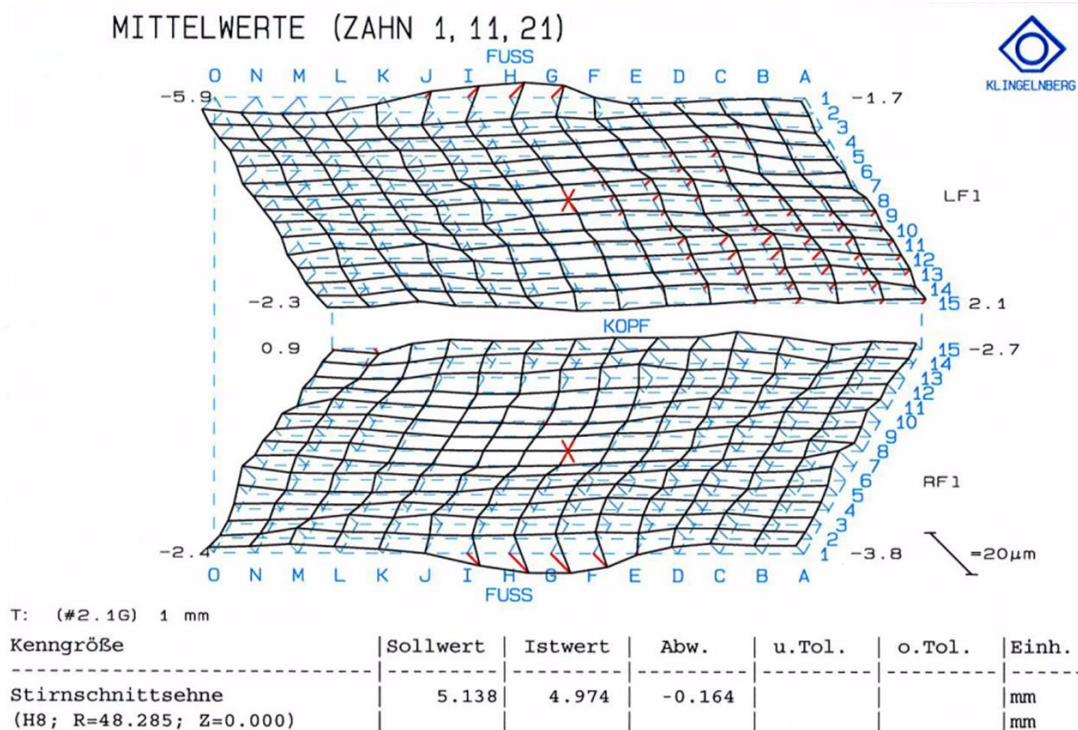


Abbildung 20: Topographie nach dem Schälwälzfräsen (Phase 1)

Für weiterführende Untersuchungen zur Oberflächenanalyse und finalen Dokumentation der Verzahnungsqualität wurden Musterteile an die entsprechenden Projektpartner versandt.

Die schälwälzgefrästen Schneckenräder wurden entweder zur Oberflächenveredelung (AP7) oder direkt für die Prüfstanduntersuchungen (AP11) an die entsprechenden Projektpartner weitergeleitet. Exemplarisch wurden Schneckenräder, die zur Oberflächenveredelung mit einer Hartstoffschicht beschichtet wurden, im Anschluss vermessen. Die Messung ergab, dass durch das Beschichten im Rahmen der Schichtdicke von 2 – 3 μm keine Geometrieänderungen entstehen, welche im Rahmen der gegebenen Toleranzen als kritisch zu bewerten sind.

Wälzschleifen

Aufgrund der sehr kleinen Werkzeugdurchmesser und der geringen zulässigen Durchmesseränderung bei Schneckenradbearbeitungswerkzeugen kamen anstatt der sonst üblicherweise verwendeten abrichtbaren Korund-Werkzeuge nur abrichtfreie galvanisch belegte CBN-Schleifschnecken zum Einsatz (**Abbildung 21**).



Abbildung 21: galvanisch belegte CBN-Schleifschnecken (Schruppen & Schlichten)

Allein die Herstellung dieser Werkzeuge war eine große Herausforderung, da das Werkzeug einen sehr geringen Kerndurchmesser hat und somit sehr filigran und biegeweich wird. Aufgrund des geringen Außendurchmessers von 36,8 mm waren Sonderwerkzeuge zur Bearbeitung und maschinentechnische Anpassungen nötig. Dennoch konnten die Schleifschnecken in der erforderlichen Genauigkeit von Liebherr gefertigt werden, wie die nachfolgenden Ergebnisse zeigen.

Aus technologischer Sicht bestand die größte Herausforderung in den wesentlich größeren Kontaktlängen zwischen Werkzeug und Werkstück, da beim Schneckenrad-schleifen die Kontaktlängen 30-40% vom Umfang vs. 1% vom Umfang beim Stirn-radschleifen betragen. Daher ist beim Wälzschleifen von Schneckenrädern mit einer deutlich erhöhten Schleifbrandgefahr zu rechnen. Aus diesem Grunde wurden auch mehrere Varianten von CBN-Schnecken mit unterschiedlicher Körnung zum Schrumpfen und zum Schlichten untersucht. Die Schrupp-Schnecke zielt dabei darauf ab, mit einer größeren Körnung den Großteil des Aufmaßes zu zerspanen, um dann mit einer feineren Schlicht-Schnecke mit verringertem Schleifbrandrisiko das verbliebene geringe Aufmaß abzuschleifen und die Endqualität zu erzeugen. Zur Verbesserung der Oberflächenqualität werden zwei Korngrößen zum Schlichten mit mittlerer und feiner Körnung untersucht.

Die Versuche zum Wälzschleifen wurden auf der Liebherr-Wälzschleifmaschine vom Typ LCS 150 durchgeführt (**Abbildung 22**). Die Bearbeitung erfolgte industriell üblich mit Schleiföl. Das Einmitten des Werkzeugs zum Werkstück erfolgte analog zum Schälwälzfräsen automatisch über einen induktiven Einfädelsensor in der Maschine.

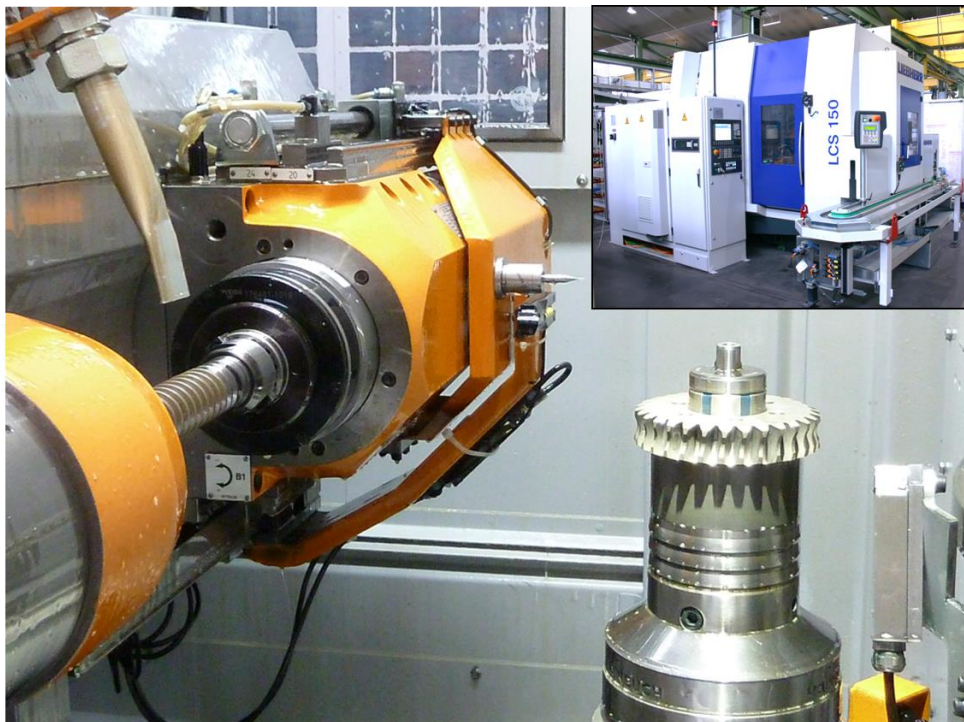


Abbildung 22: Wälzschleifen von Schneckenrädern

Die Versuchsmaschine verfügt über eine Spindeldrehzahl von 12.000 min^{-1} , so dass trotz des kleinen Werkzeugdurchmessers noch Schnittgeschwindigkeiten von 15 - 20 m/s erreicht werden konnten.

Da es bezüglich des Wälzschleifens von Schneckenrädern keinerlei Erfahrungen oder Vorarbeiten gibt, musste eine komplette Technologieentwicklung mit umfangreichen Versuchen durchgeführt werden.

Ein repräsentatives Schleifergebnis zeigt **Abbildung 23**. Es ist zu erkennen, dass auch beim Wälzschleifen die Härteverzüge vollständig eliminiert werden können und eine exzellente Rundlauf- und Teilungsgenauigkeit entsteht, die sich im Bereich vom Qualität 1-3 bewegt und damit die geforderte DIN 6 bei weitem übertrifft. Das Wälzschleifen unterstreicht hier die verfahrenstypische hohe Bauteilgenauigkeit.

Schneckenrad

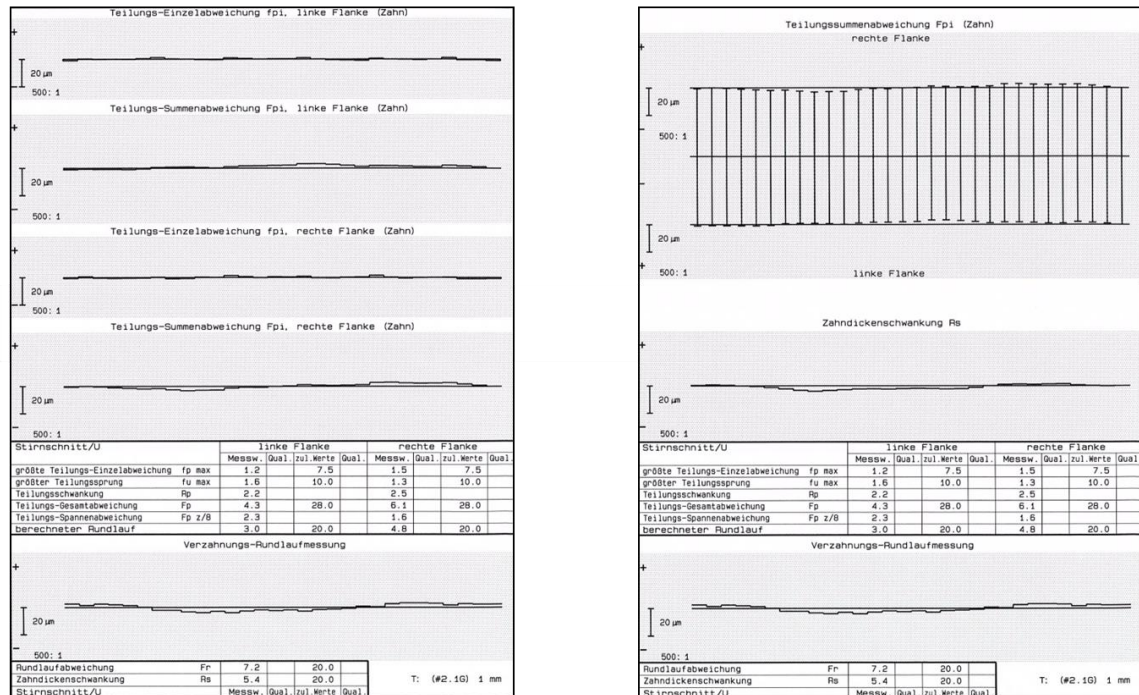


Abbildung 23: Verzahnungsqualität nach dem Wälzschleifen (Phase 1)

Auch die Topographiemessung in **Abbildung 24** zeigt ein gutes Ergebnis mit geringen Abweichungen, bleibt jedoch sichtbar hinter den durch das Schälwälzfräsen erzielten Ergebnissen zurück. Die erzielte Oberflächenrauheit ist mit $R_z = 3,0 - 3,5 \mu\text{m}$ und $R_a = 0,4 - 0,5 \mu\text{m}$ sehr gut und deutlich innerhalb der Vorgaben.

Besonders positiv ist, dass auch die zusätzlich durchgeführte Nitalätzung keine Randzonschädigungen zeigte. Damit ist der Nachweis erbracht, dass das Wälzschleifen von Stahl-Schneckenrädern prinzipiell möglich ist.

Zur Verifizierung des Einflusses der etwas schlechteren Flanken-Topographie auf das Laufverhalten der Schneckenräder wurde auch eine Wälzprüfung durchgeführt. Die Messung (**Abbildung 25**) zeigt jedoch, dass die Qualität in DIN 4 liegt und somit die gewünschte DIN 6 sicher erreicht wird.

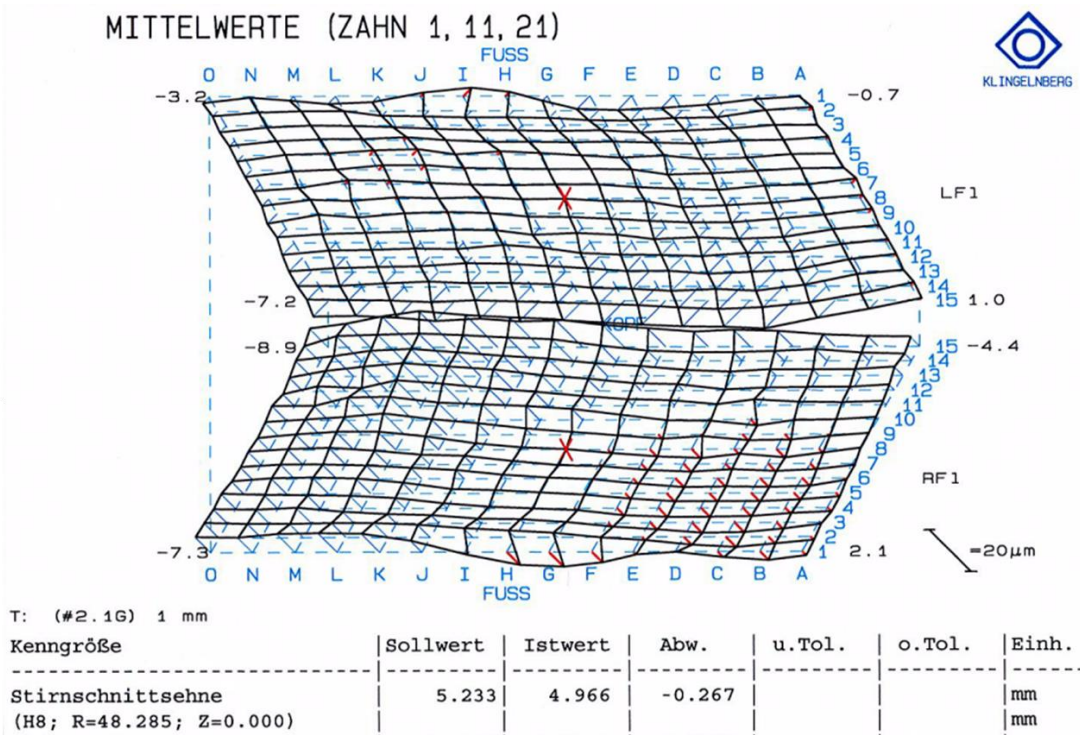


Abbildung 24: Topographie nach dem Wälzschleifen (Phase 1)

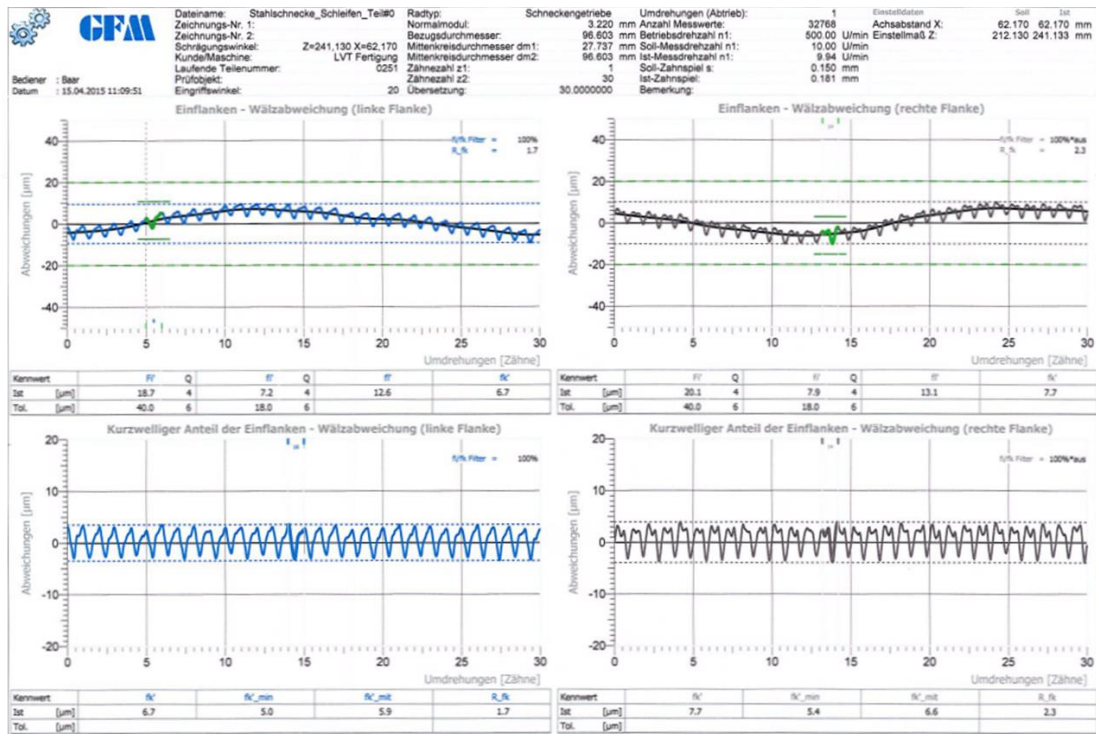


Abbildung 25: Wälzabweichungen wälzgeschliffener Schneckenräder (Phase 1)

Zur Sicherstellung einer schleifbrandfreien Bearbeitung wurden moderate Schnittwerte gewählt. Die Stückzeit lag bei 1,76 min und damit noch unter der Stückzeit vom

Schälwälzfräsen. Die Erwartung kürzerer Bearbeitungszeiten konnte somit zunächst auch bestätigt werden.

Der Versuch die Schleifzeiten durch höhere Vorschubwerte weiter zu reduzieren, kommt jedoch schnell an seine Grenzen. Wie in **Abbildung 26** zu sehen ist, treten bei einer Steigerung der Vorschubwerte infolge der langen Schnittbogenlängen teilweise massive Zusetzungen der Schleifschnecken auf, da sich Werkstückmaterial zwischen den CBN-Körnern festsetzt. Dies ist gleichbedeutend mit einem Ausfall des Werkzeuges und führt in der Regel auch zu Schleifbrand.



gesteigerte Schnittwerte führen zu Zusetzungen !!

Abbildung 26: Zusetzungen der CBN-Schleifschnecke (Schichten)

Durch den Einsatz feinerer CBN-Körnungen zum Schlichten wird dieser Effekt noch verstärkt, so dass keine prozesssichere oder wirtschaftliche Verbesserung der Oberflächenqualität erzielbar ist.

Durch den Einsatz einer Schrupp-Schnecke mit einer groben CBN-Körnung lassen sich höhere Zerspanleistungen erzielen, jedoch sind Kombi-Werkzeuge mit einem Schrupp- und Schlichtbereich (vgl. Abbildung 8), wie sie für einen industriellen Einsatz nötig wären, in diesem Durchmesserbereich nicht herstellbar. Da mit einer Schlicht-Schnecke mit mittlerer Körnung gute Ergebnisse erzielt wurden, wurde dieser Ansatz im weiteren Projektverlauf weiterverfolgt.

Für weiterführende Untersuchungen zur Oberflächenanalyse und finalen Dokumentation der Verzahnungsqualität wurden Musterteile an die entsprechenden Projektpartner versandt.

Insgesamt wurden in diesem Arbeitspaket mit diversen Schleifschnecken über 230 Werkstücke wälzgeschliffen.

5.2.5. Phase 2

Da die technische Machbarkeit der Fertigung hochqualitativer Schneckenräder aus Stahl in der Phase 1 erfolgreich nachgewiesen werden konnte, wurden die Untersuchungen an zwei weiteren Verzahnungen (**Abbildung 27**) verifiziert.

Bonfiglioli



- Stirnmodul	=	1,2992 mm
- Zähnezahl	=	60
- Eingriffswinkel	=	20°
- Schrägungswinkel	=	3,532° (1gg)
- Kopfkreis	=	80,5 mm
- Breite	=	16,0 mm
- Werkstoff	=	16MnCr5

RU Bochum



- Stirnmodul	=	4,00 mm
- Zähnezahl	=	41
- Eingriffswinkel	=	20°
- Schrägungswinkel	=	12,517° (2gg)
- Kopfkreis	=	172,0 mm
- Breite	=	30,0 mm
- Werkstoff	=	16MnCr5

Abbildung 27: Werkstücke (Phase 2)

Das zugehörige Schneckengetriebe der ersten Verzahnung (Bonfiglioli) hat eine Übersetzung von 1:60 bei einem Achsabstand von 49,0 mm. Der resultierende Stirnmodul des Schneckenrades beträgt ca. 1,3 mm, der Durchmesser der Schnecke ist 23,6 mm. Das Schneckenrad ist somit deutlich kleiner als das in Phase 1 betrachtete Werkstück.

Aufgrund des geringen Schrägungswinkels des Schneckenrades von ca. 3,5° kann auch dieses Rad radial gefräst werden. Als Werkstoffe wurde ein 16MnCr5 mit einer Zugfestigkeit von ca. 740 N/mm² verwendet. Die zu erzielende Qualität wurde mit DIN 6 nach DIN 3974 beibehalten.

Das zugehörige Schneckengetriebe der zweiten Verzahnung (RU Bochum) hat eine Übersetzung von 2:41 bei einem Achsabstand von 100,0 mm. Der resultierende Stirnmodul des Schneckenrades beträgt 4,0 mm, der Durchmesser der Schnecke ist

44,0 mm. Das Schneckenrad ist somit deutlich größer als das in Phase 1 betrachtete Werkstück. Zudem ist die Schnecke zweigängig, was zu einem größeren Schrägungswinkel von ca. $12,5^\circ$ führt. Trotzdem kann dieses Werkstück noch radial gefräst werden. Als Werkstoff wurde ebenfalls ein 16MnCr5 mit einer Zugfestigkeit von ca. 740 N/mm^2 verwendet. Die zu erzielende Qualität ist DIN 6 nach DIN 3974.

Aufbauend auf den Erkenntnissen der Phase 1 wurden für beide Verzahnungen Werkzeuge zum Vorverzahnern und zur Hartfeinbearbeitung sowie entsprechende Vorrichtungen beschafft. Die Bearbeitung erfolgte auf denselben Maschinen wie in Phase 1. Den Versuchsaufbau beim Wälzfräsen zeigt **Abbildung 28**.

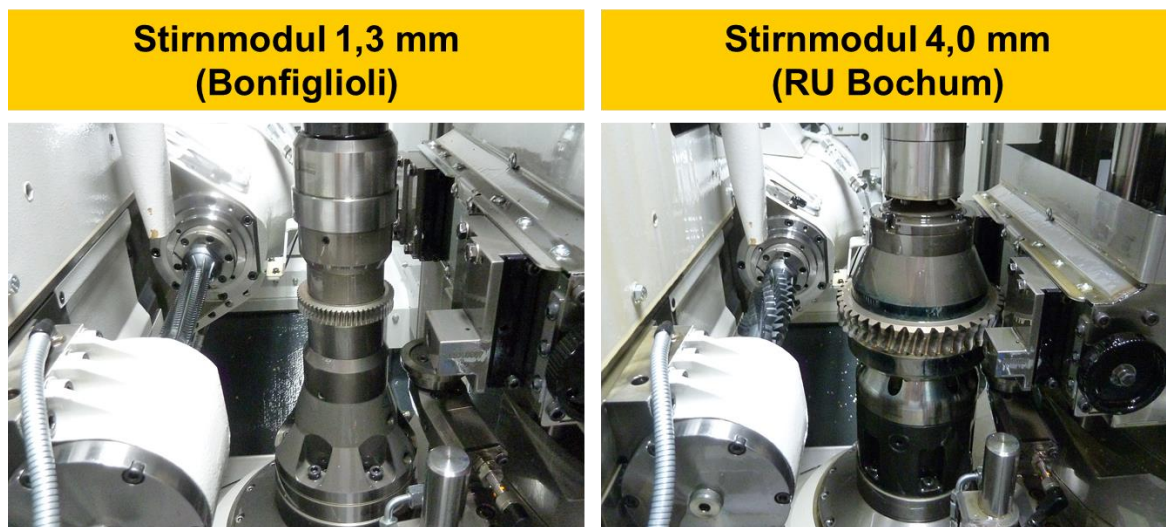


Abbildung 28: Wälzfräsen von Schneckenrädern (Phase 2)

Aufgrund des sehr kleinen erforderlichen Werkzeugdurchmessers von nur 25,2 mm für den Schälwälzfräser, war die Fertigung entsprechender CBN-Schleifschnecken bei der m1,3-Verzahnung nicht möglich. Die Untersuchungen zur Hartfeinbearbeitung fokussieren somit auf das Schälwälzfräsen. Aufgrund der zu erwartenden geringeren Härteverzüge wurde das Flankenaufmaß auf 0,10 mm reduziert.

Bei der m4-Verzahnung wurden beide Hartfeinbearbeitungsvarianten untersucht.

Da auf den Erfahrungen aus dem Arbeitspaket 4 der Phase 1 sehr gut aufgebaut werden konnte, erfolgte das Vorverzahnern beider Bauteile ohne größere Schwierigkeiten. Von beiden Varianten wurden je ca. 150 Stück vorverzahnt. Die Stückzeit für die m1,3-Verzahnung betrug 0,23 min, die Stückzeit für die m4-Verzahnung 1,99 min.

Danach wurden die Bauteile zum Einsatzhärten (60 HRC) geschickt und im Anschluss durch Liebherr die Bezugs- und Spannflächen hartfeinbearbeitet.

Schälwälzfräsen (m1,3)

Beim Schälwälzfräsen der m1,3-Verzahnung wurden genauso gute Rundlauf- und Teilungsqualitäten erzielt wie an der Verzahnung aus Phase 1. Die Hartfeinbearbeitung der Bauteile verlief problemlos, so dass auch exzellente Formgenauigkeiten erzielt werden konnten, wie die Topographiemessung in **Abbildung 19** zeigt.

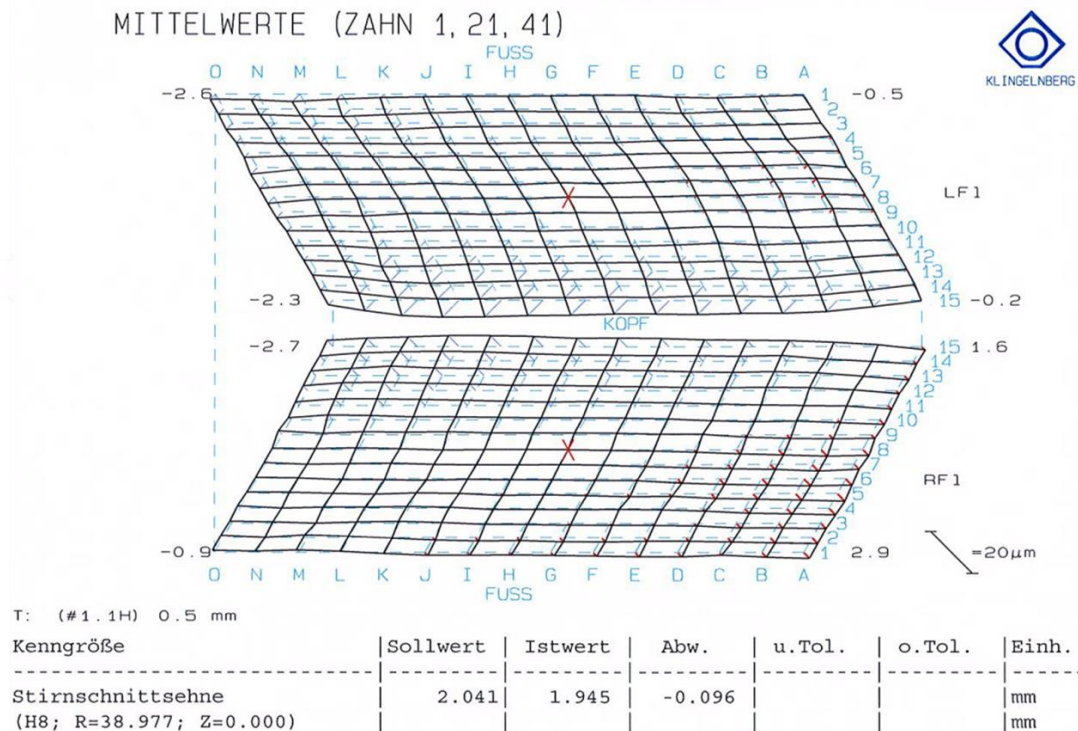


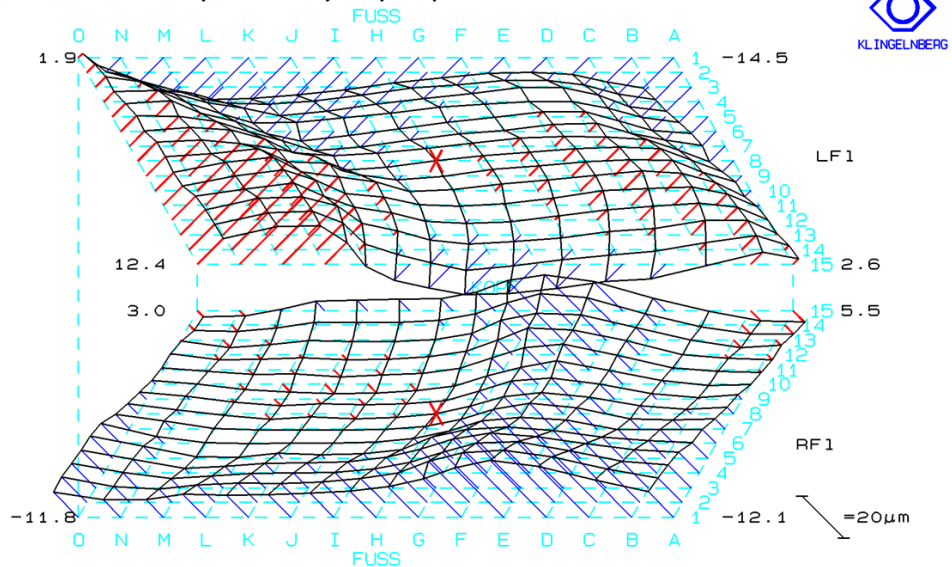
Abbildung 29: Topographie nach dem Schälwälzfräsen (m1,3)

Die erzielte Oberflächenrauheit ist mit $R_z = 1,0 - 1,5 \mu\text{m}$ und $R_a = 0,2 - 0,3 \mu\text{m}$ ebenfalls sehr gut und bedeutet das beste Ergebnis innerhalb der gesamten Untersuchungen. Auch die zusätzlich durchgeführte Nitalätzung zeigte keine Randzonenschädigungen. Die Stückzeit lag bei 0,80 min. Insgesamt wurden von dieser Verzahnung etwa 45 Werkstücke schälwälzgefräst.

Schälwälzfräsen (m4)

Auch bei der m4-Verzahnung wurden erwartungsgemäß die geforderten Rundlauf- und Teilungsqualitäten von DIN 6 erreicht. Bei der Hartfeinbearbeitung der Bauteile zeigt sich jedoch anscheinend ein Größeneinfluss, da die erzielten Topographieabweichungen deutlich größer sind als in Phase 1 (**Abbildung 30**).

MITTELWERTE (ZAHN 1,14,28)



T: (#3.1F) 1.5 mm

Kenngröße	Sollwert	Istwert	Abw.	u.Tol.	o.Tol.	Einh.
Stirnschnittsehne (H8; R=82.000; Z=0.000)	6.282	6.133	-0.149			mm

Abbildung 30: Topographie nach dem Schälwälzfräsen (m4)

Dies kann einerseits darauf zurückgeführt werden, dass die beabsichtigte Profilballigkeit größer ausfällt als beabsichtigt. Andererseits zeigen sich auch in Breitenrichtung wellenartige Formabweichungen, deren Ursache im Rahmen des Projektes nicht eindeutig geklärt werden konnte.

Wie in Abbildung 31 zu sehen, sind die in der Wälzprüfung ermittelten Wälzabweichungen dennoch sehr gering und toleranzhaltig, so dass eine Eignung für die nachfolgenden Prüfstandsversuche gegeben ist.

Die erzielte Oberflächenrauheit ist mit $R_z = 1,2 - 2,0 \mu\text{m}$ und $R_a = 0,2 - 0,3 \mu\text{m}$ ebenfalls sehr gut. Auch die zusätzlich durchgeführte Nitalätzung zeigte keine Randzonschädigungen. Die Stückzeit lag bei 2,80 min. Insgesamt wurden von dieser Verzahnung etwa 45 Werkstücke schälwälzgefräst.

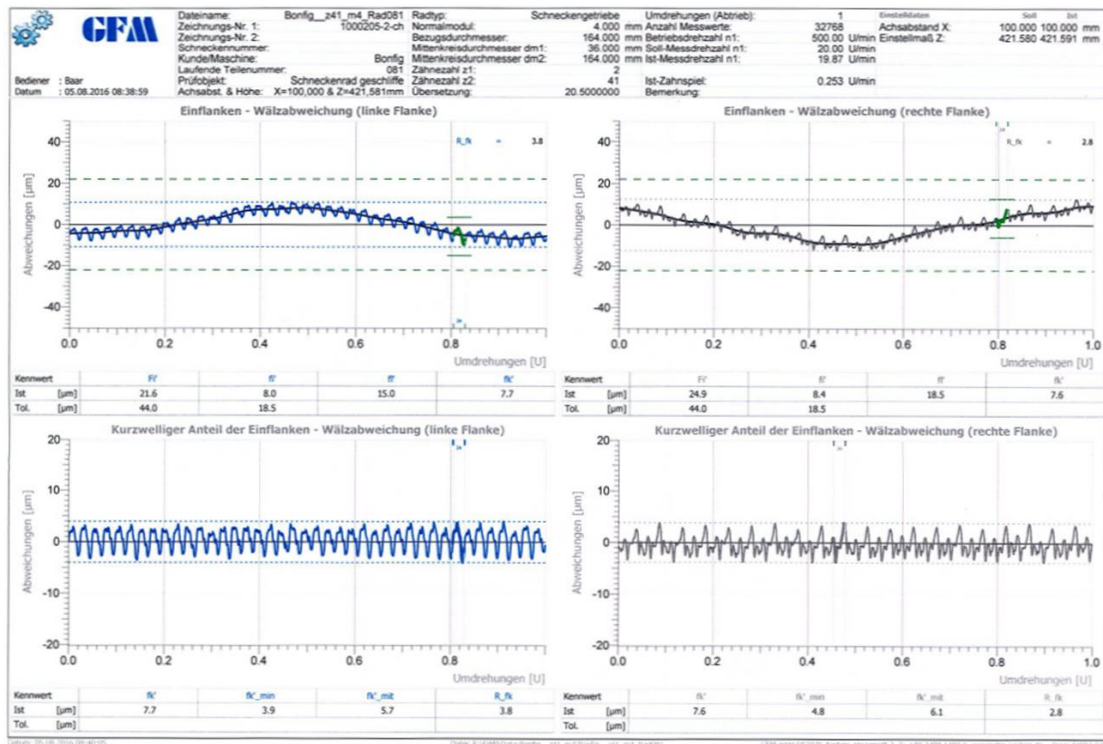


Abbildung 31: Wälzabweichungen von schälwälzgefästen Schneckenrädern (m4)

Wälzschleifen (m4)

Zum Wälzschleifen der m4-Verzahnung wurde basierend auf den Ergebnissen aus Phase 1 eine Schlicht-Schnecke mit mittlerer CBN-Korngröße eingesetzt (**Abbildung 32**).

Die geforderten Rundlauf- und Teilungsqualitäten von DIN 6 werden auch beim Wälzschleifen erwartungsgemäß erreicht. Analog zum Schälwälzfräsen zeigen sich aber auch beim Wälzschleifen größere Abweichungen in der Topographiemessung (**Abbildung 33**).

Da die gleiche Werkzeugprofilauslegung zugrunde liegt, ist auch beim Wälzschleifen die Profilballigkeit etwas größer als beabsichtigt. Die wellenförmigen Abweichungen in Breitenrichtung sind weniger deutlich ausgeprägt als beim Schälwälzfräsen, aber dennoch höher als bei den beiden anderen bisher untersuchten Verzahnungen. Dies bestätigt die Annahme eines Größeneinflusses z.B. durch größere Schnittkräfte.

Auch hier wurde zur Verifizierung eine Wälzprüfung durchgeführt, die zeigt, dass die ermittelten Wälzabweichungen toleranzhaltig sind, so dass auch die wälzgeschliffenen Schneckenräder für die nachfolgenden Prüfstandsversuche geeignet sind.



Abbildung 32: galvanisch belegte CBN-Schleifschnecken (m4, Schlichtschnecke)

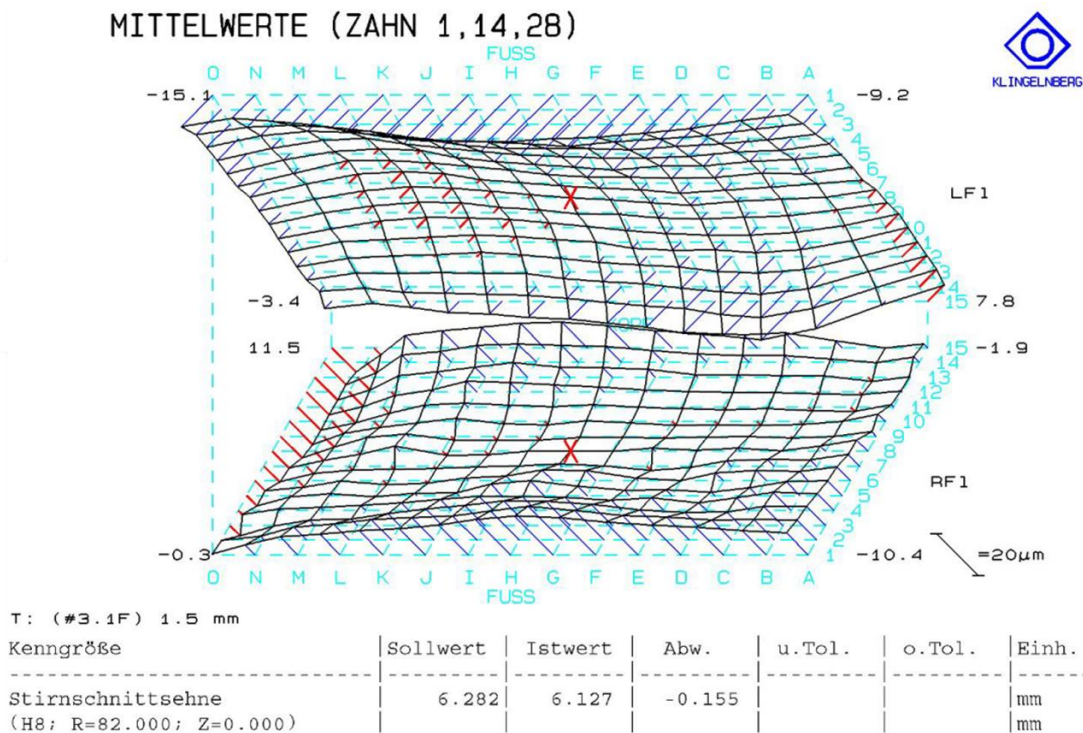


Abbildung 33: Wälzabweichungen von wälzgeschliffenen Schneckenrädern (m4)

Die erzielte Oberflächenrauheit ist mit $R_z = 2,5 - 3,0 \mu\text{m}$ und $R_a = 0,3 - 0,4 \mu\text{m}$ sehr gut. Die Stückzeit liegt mit 8,80 min sehr hoch und damit um ein Vielfaches langsamer als das Schälwälzfräsen. Insgesamt wurden von dieser Verzahnung etwa 50 Werkstücke wälzgeschliffen.

Zum Abschluss ist in **Abbildung 34** exemplarisch ein Vergleich einer wälzgeschliffenen Oberfläche und einer nitalgeätzten Oberfläche dargestellt. Die sehr gute Oberflächenqualität nach dem Wälzschleifen ist im linken Bildteil gut zu erkennen. Im rechten Bildteil zeigt sich, dass das Werkstück keine Randzonenschädigungen aufweist. Damit ist nachgewiesen, dass selbst bei Stahl-Schnecken im mittleren Modulbereich eine schädigungsfreie Hartfeinbearbeitung möglich ist.

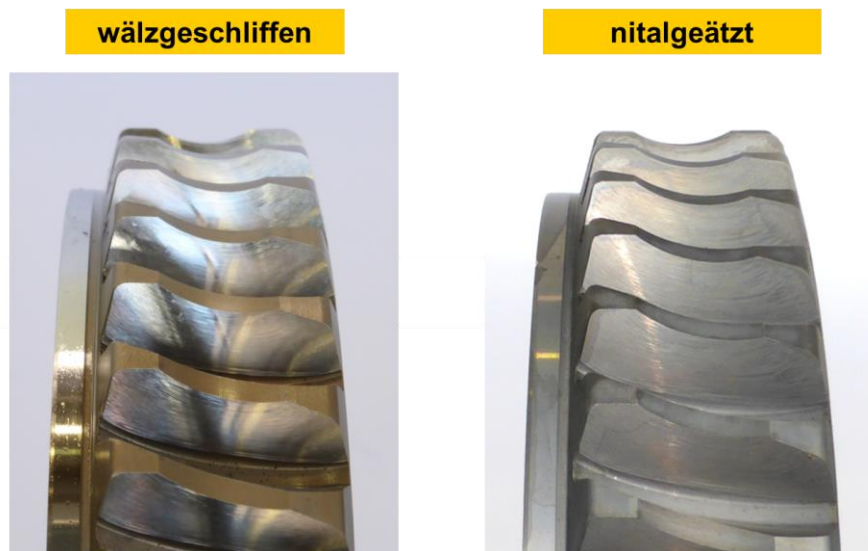


Abbildung 34: Nitalätzung wälzgeschliffener Schneckenräder (m_4 , Phase 2)

5.3. Fazit

Das Ziel dieses Teilprojektes und der von Liebherr bearbeiteten Arbeitspakete war es, hochqualitative Schneckenräder aus unterschiedlichen Stahlwerkstoffen herzustellen. Dabei wurden neben dem Vorverzahnen sowohl Weich- als auch Hartfeinbearbeitungsverfahren an unterschiedlichen Verzahnungen im Modulbereich von 1,3 – 4 mm untersucht. Da insbesondere die Hartfeinbearbeitung von Stahlschneckenrädern völliges Neuland darstellte, mussten umfassende Versuche zur Technologieentwicklung für das Schälwälzfräsen und das Wälzschleifen mit galvanisch gebundenem CBN durchgeführt werden. Basierend auf den Ergebnissen sollten gehärtete Stahlschneckenräder in hoher Verzahnungs- und Oberflächenqualität für Prüfstanduntersuchungen gefertigt werden.

Es konnte gezeigt werden, dass es mit beiden genannten Verfahren möglich ist, die Qualitätsanforderungen zu erfüllen und Randzonenschädigungen auszuschließen. Die erzielten Qualitäten waren typischerweise um 1 - 2 Qualitätsklassen besser als Anforderungen. Speziell im Schälwälzfräsen scheint hier aufgrund der niedrigeren Werkzeugkosten im Vergleich zum Wälzschleifen mit CBN-Schnecken Potential zu liegen. Die erforderlichen Bearbeitungszeiten liegen höher als beim Fertigfräsen von Bronzeschneckenrädern, jedoch kann der höhere Materialpreis der Bronze im Vergleich zum Stahl dies rechtfertigen.

Das Projektziel wurde somit erreicht.

6. Vakuum Einsatzhärten und Hochdruck Gasabschrecken (ALD)

Verantwortlich

ALD Vacuum Technologies GmbH

Ausführende Stellen

ALD Vacuum Technologies GmbH

6.1. Aufgabenstellung

Das Gesamtziel des Vorhabens ist es, die bisher in Schneckengetrieben verwendete Bronze (CuSn12Ni), durch niedrig legierten Stahl zu ersetzen. Um dies zu erreichen, ist neben niedrigen/reduzierten Fertigungstoleranzen und angepassten Auslegungen, auch die Entwicklung eines geeigneten Stahls, mit entsprechender Wärmebehandlung notwendig.

Als Technologieführer auf dem Gebiet der Niederdruckaufkohlung mit anschließender Hochdruckgasabschreckung, war es Aufgabe der Firma ALD Vacuum Technologies GmbH eine entsprechende Einsatzhärtestrategie für Stahlschneckenräder zu entwickeln. Am Ende des Projektes sollte eine funktionale Werkstoffpaarung zur Verfügung stehen, die die Betriebsanforderungen für ein Schneckengetriebe erfüllt. Betrachtet werden sollten 2 Werkstoffe aus dem Lager der Einsatzstähle. Ausgewählt wurden 16MnCr5 aus der Familie der niedrig legierten Einsatzstähle und 18CrNiMo7-6 aus der Familie der höher legierten Einsatzstähle.

Zwei Ansätze wurden zu Beginn des Vorhabens diskutiert. Der erste Ansatz stellt die Funktionalität durch Definition eines Verschleißpartners her, indem das Schneckenrad eine der Schnecke kleinere oder gleichen Härte aufweist. Der zweite Ansatz lehnt an Mechanismen an, die in einem konventionellen Schneckengetriebe mit Bronzerad zum Tragen kommen. Dort werden durch entsprechendes Einlaufverhalten Fehler in der Verzahnungsgeometrie ausgeglichen. Im zweiten Ansatz soll über geeignete Wärmebehandlungsparameter ein Gefüge mit hohem Gehalt an Restaustenit eingestellt, das sich unter zyklischer mechanischer Wechselbelastung in Martensit umwandeln kann. Dadurch soll sich ein analoges Einlaufverhalten, wie beim Bronzerad, einstellen. Etwaige Ungenauigkeiten in der Verzahnung sollen dadurch ausgeglichen werden, was dann zu einem fresstragfähigen Tragbild führt.

Aufgabe der ALD war es die Wärmebehandlungsprozesse zu entwickeln und dann im weiteren Projektverlauf die Einsatzhärtung der Schneckenräder durchzuführen, die in den Prüfständen der Projektpartner getestet werden. Dabei sollte die Reduzierung der Härteverzüge ebenfalls im Focus stehen. Die Aufgabenstellung sieht dabei eine enge Kooperation mit den Projektpartnern – bes. Firma Liebherr und die Hochschule Niederrhein.

6.2. Erzielte Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse, die im Arbeitspaket 5.1 (Einsatzhärten) erzielt wurden chronologisch Aufgeführt. Dabei werden auch alle Arbeitsgänge, die zu diesen Ergebnissen geführt haben wiedergegeben.

Die Wärmebehandlung der Schneckenräder sollte im Technikum der ALD stattfinden wobei das System „ModulTherm“ zum Einsatz kommen sollte. Es handelt sich dabei um eine verkettete Einzelkammeranlage, bestehend aus mehreren separaten Behandlungskammern (BK), die in einer Reihe angeordnet sind (im Technikum der ALD ist nur eine BK vorhanden). Die Behandlungskammern werden durch eine bewegliche Transport- und Abschreckkammer beschickt und entladen. Die Wärmebehandlung findet im Niederdruckbereich zwischen 8 und 12 mbar statt, wobei die Aufkohlung der Schneckenräder über die Begasung der heißen Charge mit Acetylen erfolgt. Die Abschreckung findet nach Abschluss der Wärmebehandlung im Hochdruckgas (18 bar He oder N₂) der Abschreckkammer statt. In Abbildung 1 ist die ModulTherm inclusive Abschreckkammer gezeigt.

Bereits während der ersten beiden Verbundtreffen wurde festgelegt, den Ansatz des definierten Härteunterschieds anhand von Proben/Schneckenrädern aus 16MnCr5 zu untersuchen, wogegen Ansatz 2 (hoher Restaustenitgehalt) mit Schneckenrädern aus 18CrNiMo7-6 untersucht werden soll. Die Entscheidung beruht auf der Empfindlichkeit der Werkstoffe gegenüber Restaustenit, wobei 18CrNiMo7-6 die höchste Empfindlichkeit besitzt. Es wurde außerdem festgelegt, sich zunächst auf den Ansatz des definierten Härteunterschieds zu konzentrieren. Diese Entscheidung beruht u.a. auf dem damaligen Stand der Fertigungs- und Prüfkapazitäten.

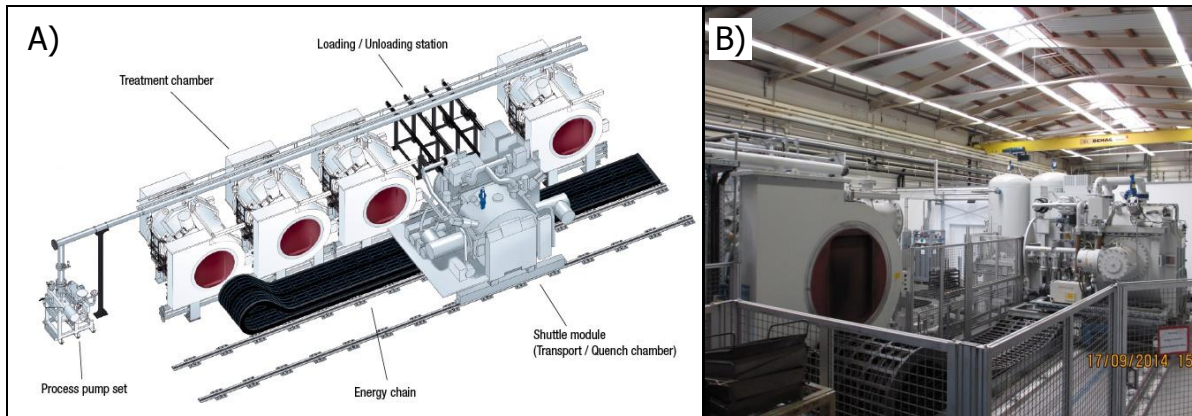


Abbildung 1: Schema der ModulTherm-Anlage mit Abschreckkammer und mehreren Behandlungskammern (A); Foto der Technikumsanlage der ALD in Hanau (B)

Die Wärmebehandlungsvorgaben für die Entwicklung der Rezepte, ergaben sich anhand von Angaben des Projektpartners Bonfiglioli und Liebherr. Aus dem Modul der Schneckenräder errechnete sich eine CHD von etwa 0,5 mm für das fertige Zahnrad nach der Hartfeinbearbeitung. Im weiteren Projektverlauf wurde zusätzlich eine Toleranz von $\pm 0,1$ mm festgelegt. Das Schleifaufmaß wurde von Liebherr mit 100-150 μm angegeben. D.h. für die Schneckenräder, die einen definierten Härteunterschied aufweisen sollten, muss das Wärmebehandlungsrezept eine CHD von 0,65 mm $\pm 0,1$ mm ergeben. Da Schneckenräder mit einem hohen Restaustenitgehalt nicht nachbearbeitet werden, ist hier kein Schleifaufmaß nötig. Diese Schneckenräder, so der Ansatz, sollen sich während des Betriebs einlaufen. Sie erhalten Ihre endgültige Geometrie im Einsatz des Schneckengetriebes. Tabelle 1 fasst die Spezifikationen noch einmal kurz zusammen.

Tabelle 1: Wärmebehandlungsvorgaben im Forschungsvorhaben Stahlschnecke

Variante	CHD [mm]	Oberflächenhärte [HRC]	Restaustenitgehalt [%]	Kernhärte
Definierter Härteunterschied	0,55- 0,75	60/57/54	≤ 25	Nicht Spezifi- ziert
Hoher Restaustenitgehalt	0,4-0,6	N/A*	≥ 30	Nicht Spezifi- ziert

*die Angabe einer Oberflächenhärte ist an dieser Stelle nicht Zielführend da diese sich während des Einsatzes im Getriebe ständig ändert. Sie liegt nach der Wärmebehandlung deutlich unterhalb von 60 HRC.

Zu Beginn des Projektes wurden vorläufige Wärmebehandlungsrezepte für die Materialien 16MnCr5 und 18CrNiMo7-6 entwickelt. Die Vorentwicklung erfolgte anhand von Probescheiben/C-Scheiben, wie in Abbildung 2 exemplarisch dargestellt.



Abbildung 2 Probescheibe/C-Scheibe für die Rezeptentwicklung oder Prozessüberwachung von Wärmebehandlungsprozessen.

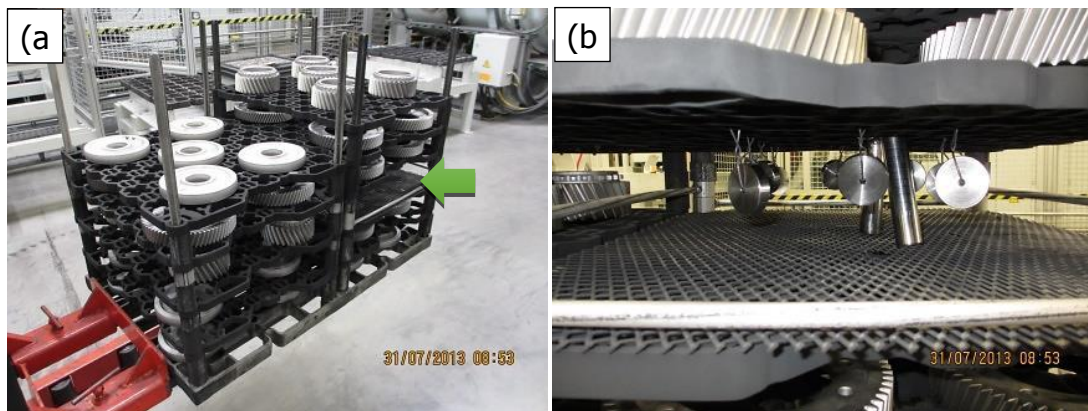
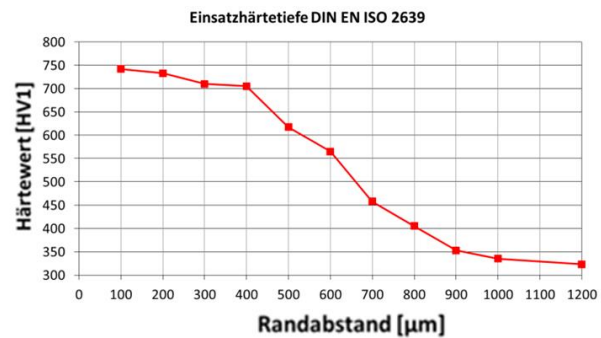


Abbildung 3: Wärmebehandlungscharge mit Ballast (a) und Probescheiben (b). Der Pfeil zeigt die Lage der Probescheiben in der Charge.

Dazu wurden die C-Scheiben in eine Charge mit Ballastmaterial gehängt, was eine produktionsnahe Wärmebehandlung ergeben soll. Eine solche Charge ist beispielhaft in Abbildung 3 gezeigt. Um für den späteren Vorhabensverlauf im Zweifel schnell auf entsprechende Rezepte zugreifen zu können wurden auf diese Weise Rezepte für beide Ansätze, sowohl für 16MnCr5 als auch für 18CrNiMo7-6 entwickelt. Nach wenigen Iterationsschritten wurden für beide Werkstoffe schnell die richtigen Prozessparameter gefunden. In Abbildung 4 bis 7 sind für das Projekt wichtige metallurgische Daten von wärmebehandelten C-Scheiben aus 16MnCr5 und 18CrNiMo7-6 gezeigt. Wie zu sehen ist, wurden für alle Ansätze die Spezifikationen in der CHD und des Restaustenitgehaltes erreicht. In Abbildung 4 und 5 ist zu sehen, dass ein gleichmäßiges martensitisches Gefüge für beide Werkstoffe erreicht wurde. Auch die CHD von 0,65 mm wurde bei beiden Materialien getroffen. Für die hohen Restaustenitgehalte

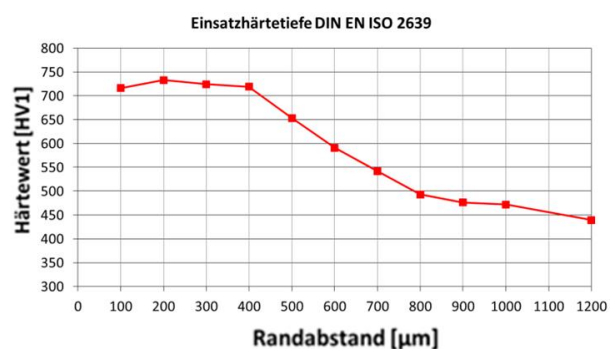
ist in Abbildung 6 und 7 zusehen, wie die Oberfläche beider C-Scheiben zu einem Großteil aus Restaustenit besteht, was auch an der Härteverlaufskurve zu sehen ist. Diese zeigt den erwarteten Abfall in der Oberflächenhärte. Exemplarisch wurde zusätzlich an einer C-Scheibe aus 16 MnCr5 der Kohlenstoffverlauf gemessen, was in Abbildung 6 ebenfalls gezeigt ist. Der Kohlenstoffgehalt erreicht in dieser Probe Werte oberhalb von 1 %. In Abbildung 7 ist das Gefüge einer Wärmebehandelten Probe aus 18CrNiMo7-6 zu sehen. Neben dem hohen Gehalt an Restaustenit sind auch Karbide in der äußersten Oberfläche zu erkennen, welche im späteren Verlauf über Rezeptkorrekturen entfernt wurden.

Abgeschreckt wurde bei den Vorversuchen mit 18 bar N₂, was sich für C-Scheiben zunächst als ausreichend herausstellte, um eine entsprechende Ansprunghärte zu erhalten.



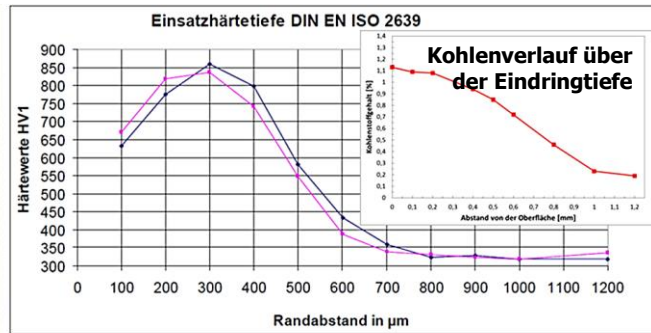
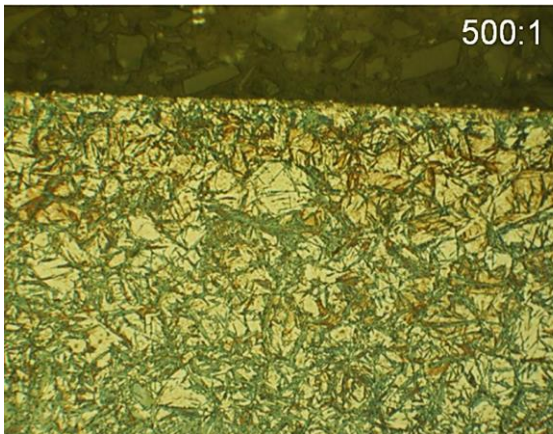
CHD = 0,62 mm

Abbildung 4: Gefüge und Härteverlaufsspur einer C-Scheibe aus 16MnCr5, für den Ansatz des definierten Härteunterschieds.



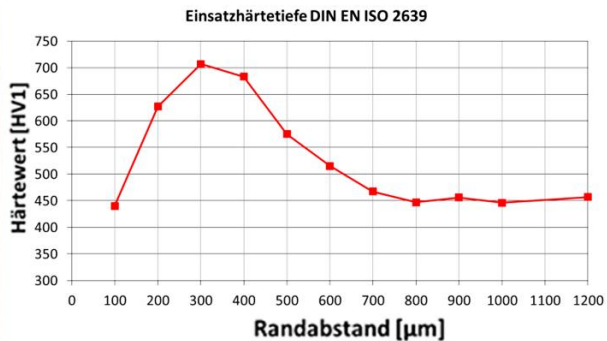
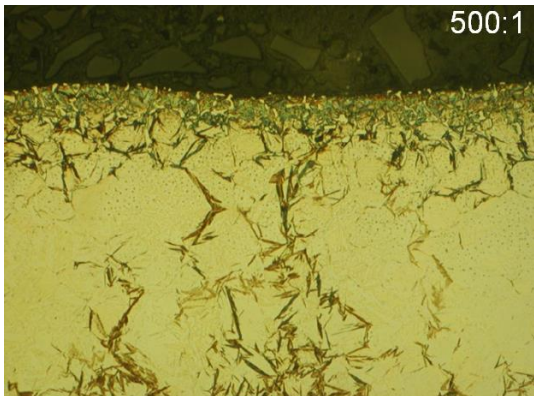
CHD = 0,68 mm

Abbildung 5: Gefüge und Härteverlaufsspur einer C-Scheibe aus 18CrNiMo7-6, für den Ansatz des definierten Härteunterschieds.



CHD = 0,52 mm

Abbildung 6: Gefüge und Härteverlaufsspur einer C-Scheibe aus 16MnCr5, für den Ansatz des hohen Restaustenitgehalts incl. Verlauf des Kohlenstoffs in der Probe.



CHD = 0,54 mm

Abbildung 7: Gefüge und Härteverlaufsspur einer C-Scheibe aus 18CrNiMo7-6, für den Ansatz des hohen Restaustenitgehalts.

Als nächsten Schritt wurden diese Rezepte dann an Schneckenrädern getestet. Im Vorhabensverlauf mussten verifizierende Tests, für Rezepte des definierten Härteunterschieds, mehrmals wiederholt werden, da es zu Änderungen in der Schneckenradgeometrie gab und zum anderen zu Änderungen in der Werkstoffcharge, bzw. des Werkstoffherstellers gegeben hatte. So wurde zunächst ein von Bonfiglioli bezogener Werkstoff eingesetzt, um Schneckenräder der Geometrie „A“ herzustellen. Im weiteren Projektverlauf wurde die Geometrie geändert und der Werkstofflieferant wechselte zu BGH, sowie die Werkstoffcharge zwischen „DEW“-Charge zu „BGH“-Charge.

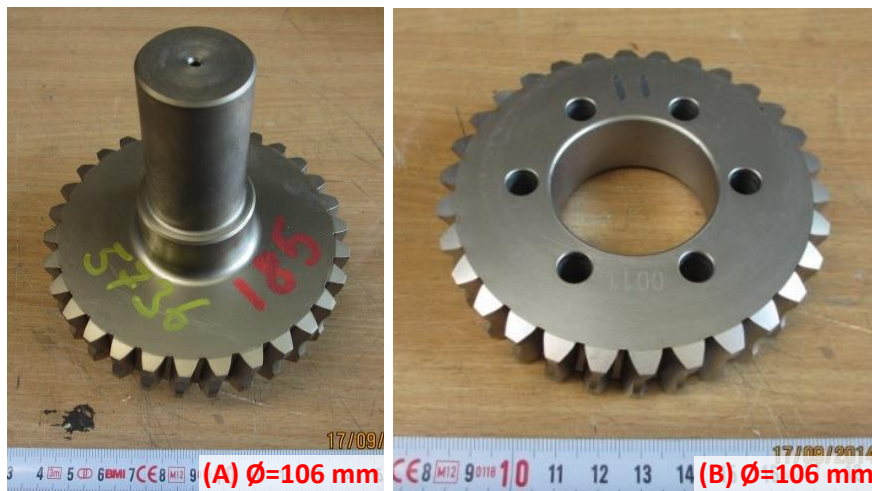


Abbildung 8: Schneckenräder erster Geometrie (A), und finale Geometrie (B)

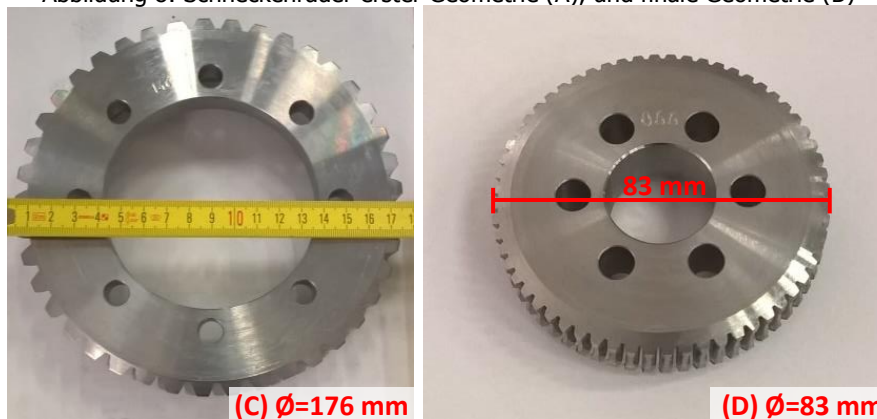


Abbildung 9: Weitere Geometrien, die gegen Ende des Forschungsvorhabens hergestellt und wärmebehandelt wurden; Schneckenrad mit 176 mm (C) und mit 83 mm (D) Durchmesser

Abbildung 8 und 9 zeigen die im Projektverlauf wärmebehandelten Schneckenradgeometrien. Die in Abbildung 9 gezeigten Schneckenräder wurden gegen Ende des Vorhabens betrachtet und getestet.

Ein erster Test der an C-Scheiben ermittelten Rezepte erfolgte also an Schneckenrädern der Geometrie (A), wobei an dieser Geometrie zunächst nur Ansatz 1 betrachtet wurde. Dabei stellte sich schnell heraus, dass eine Abschreckung mit N_2 nicht ausreicht, um Ansprunghärten von 65 HRC oder mehr zu erreichen. Daher wurde die Abschreckung auf He umgestellt. Aus den Versuchen mit C-Scheiben, sowie den Verifizierungsversuchen an Schneckenrädern der Geometrie A wurden erste Anlasstemperaturen bestimmt, welche zu den Oberflächenhärten 60, 57 und 54 HRC führen. Die Anlasstemperaturen mussten im späteren Verlauf mehrmals angepasst und überprüft werden. Zu den Gründen wird später erneut Bezug genommen.

Kurz nachdem die ersten Schneckenräder einsatzgehärtet wurden, kam es zu einer Anpassung der Schneckenradgeometrie. Die neue Geometrie (Abbildung 8 (B)) wur-

de aus einer neuen Werkstoffcharge hergestellt (DEW), wodurch die Rezeptparameter erneut geprüft werden mussten. Dies war, wie sich später herausstellte, besonders für die Anlasstemperaturen von großer Bedeutung. Da die Oberflächenhärte in einem recht engen Band einzustellen war, ergab sich die Notwendigkeit die entsprechenden Anlasstemperaturen genau zu kennen. Wie sich herausstellte wichen die benötigten Anlasstemperaturen des Bonfiglioli-Stahls von denen des DEW-Stahls leicht ab, was allerdings bereits ausreichte, um die Zieloberflächenhärten zu verfehlen.

Nachdem die Anlassparameter für den neuen Werkstoff gefunden waren, wurde eine Charge der neuen Geometrie einsatzgehärtet, welche dann zu verschiedenen Teilen an Rösler, Balzers, die Hochschule Niederrhein und Liebherr ging. Die Chargierung erfolgte zur Minimierung des Verzugs direkt auf CFC, was in Abbildung 10 exemplarisch gezeigt ist.



Abbildung 10: Exemplarische Darstellung einer Wärmebehandlungscharge für Schneckenräder auf CFC-Chargiermaterial zur Verzugsminimierung.

Die Verzüge, die bei der Wärmebehandlung entstanden, wurden von Liebherr gemessen, und waren dann Grundlage für die fertig gefrästen Schneckenräder. Eine weitere Optimierung der Verzüge wurde nicht weiter verfolgt, da die gemessenen Verzüge bereits so gering waren, dass ein Vorhalten für fertig gefräste Schneckenräder sehr gut möglich war.

Nachdem die Verzüge ermittelt wurden, fand eine erneute Umstellung der Werkstoffcharge bei 16MnCr5 statt. Dies hatte zur Folge, dass die Anlasstemperaturen und Rezeptparameter ein weiteres Mal ermittelt/verifiziert werden mussten. Geprüft wur-

den die Rezeptparameter für Ansatz 1 (16MnCr5) und Ansatz 2 (16MnCr5 & 18CrNiMo7-6). Aufgrund des Projektfortschritts kam für 18CrNiMo7-6 eine Überprüfung der Rezeptparameter des Ansatzes 1 nicht mehr in Frage.

Der Wechsel der Stahlcharge hatte keinen Einfluss auf die Metallurgie, wodurch die Rezeptparameter für die Vakuum-Wärmebehandlung unangetastet blieben. Die Metallurgie der Schneckenräder aus „BGH“-Stahl ist in den Abbildungen 11 bis 13 zu sehen. Mit den entwickelten Rezepten werden alle Spezifikationen erfüllt. Die Rezeptparameter sind in den Tabellen 2 bis 5 aufgeführt. Sie führen zu einer Oberflächenhärte von 60, 57 und 54 HRC (bei entsprechender Anlasstemperatur), bzw. zu einem Restaustenitgehalt von mehr als 30 % und wurden so für die Wärmebehandlung der Prüfstandschargen eingesetzt.

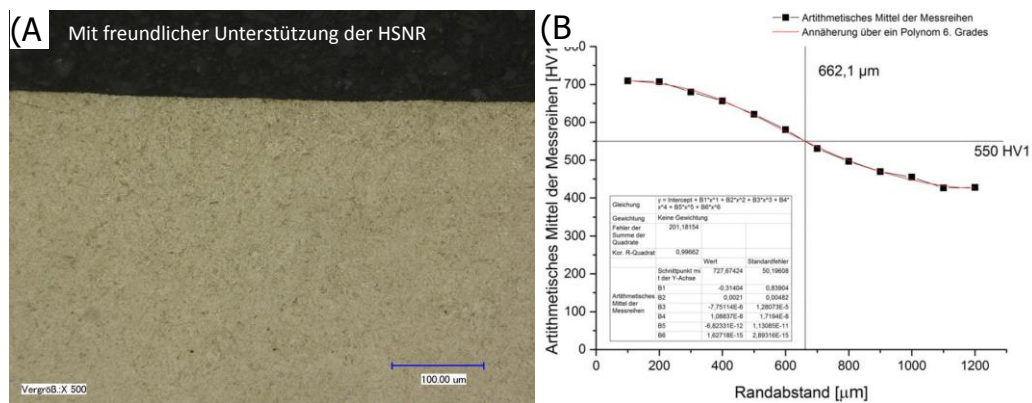


Abbildung 11: Gefüge (A) und Härteverlaufsspur (B) eines Schneckenrades aus 16MnCr5, wärmebehandelt nach Tabelle 2

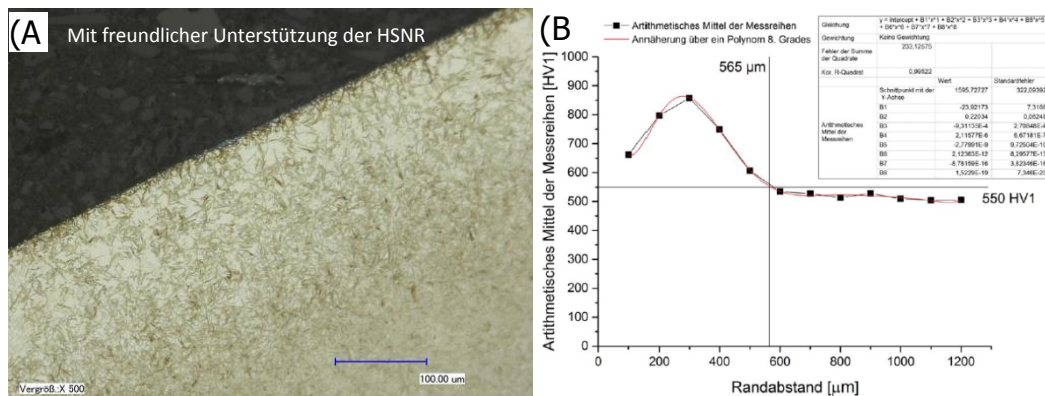


Abbildung 12: Gefüge (A) und Härteverlaufsspur (B) eines Schneckenrades aus 16MnCr5, wärmebehandelt nach Tabelle 3

(B)

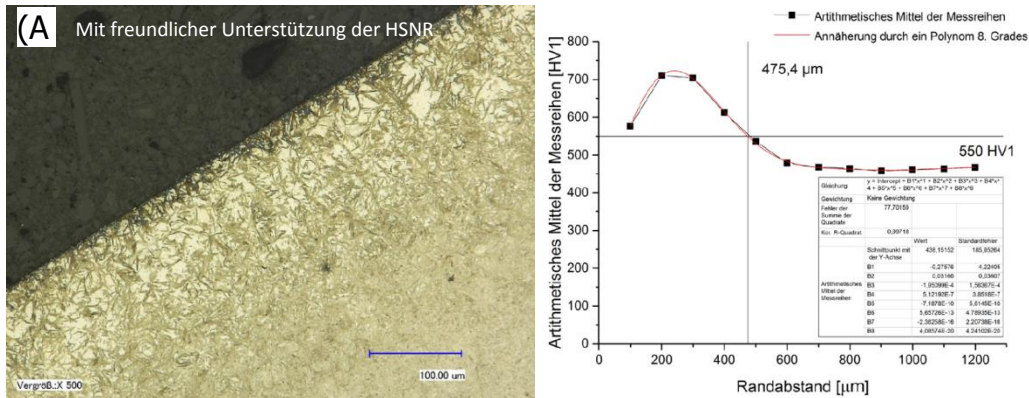


Abbildung 13: Gefüge (A) und Härteverlaufsspur (B) eines Schneckenrades aus 16MnCr5, wärmebehandelt nach Tabelle 5

Tabelle 2: Aufkohlungsrezept für 16MnCr5, Ansatz 1, definierter Härteunterschied

Nr.	Schritt	Temperatur, Druck, Gas	Dauer, G UW*-Leistung
1	Aufheizen	960 °C	80 min
2	Aufkohlen	960 °C	22,5 min, 7 Pulse
3	Abschrecken	18 bar, He	100 %
4	Anlassen	Siehe Tabelle	2 h
5	BK*-Zeit		146,5 min

*G UW = Gasumwäler, BK = Behandlungskammer

Tabelle 3: Aufkohlungsrezept für 16MnCr5, Ansatz 2, hoher Restaustenitgehalt

Nr.	Schritt	Temperatur, Druck, Gas	Dauer, G UW*-Leistung
1	Aufheizen	960 °C	80 min
2	Aufkohlen	960 °C	29 min, 7 Pulse
3	Abschrecken	18 bar	100 %
4	Anlassen	170 °C	2 h
5	BK*-Zeit		109 min

*G UW = Gasumwäler, BK = Behandlungskammer

Tabelle 4: Aufkohlungsrezept für 18CrNiMo7-6 Ansatz 1, definierter Härteunterschied

Nr.	Schritt	Temperatur, Druck, Gas	Dauer, G UW*-Leistung
1	Aufheizen	960 °C	80 min
2	Aufkohlen	960 °C	22,5 min, 7 Pulse
3	Abschrecken	18 bar, He	100 %
4	Anlassen	180, 225 & 280°C (nur an C-Scheiben)	2 h
5	BK*-Zeit		152,5 min

*G UW = Gasumwäler, BK = Behandlungskammer

Tabelle 5: Aufkohlungsrezept für 18CrNiMo7-6, Ansatz 2, hoher Restaustenitgehalt

Nr.	Schritt	Temperatur, Druck, Gas	Dauer, GUW*-Leistung
1	Aufheizen	960 °C	80 min
2	Aufkohlen	960 °C	46 min, 7 Pulse
3	Abschrecken	18 bar	100 %
4	Anlassen	170 °C	2 h
5	BK*-Zeit		126 min

*GUW = Gasumwälzer, BK = Behandlungskammer

Die endgültigen Anlasstemperaturen, wie sie auch für die Prüfstandschargen verwendet wurden, sind in Tabelle 6 gezeigt. Die verschiedenen Anlasstemperaturen die im Projektverlauf gefunden wurden sind in Abbildung 14 gezeigt.

Tabelle 6: Anlasstemperaturen für 16MnCr5, Geometrie B bis D, BGH-Stahl

Nr.	Temperatur	Oberflächenhärte
1	190	60 HRC
2	210	57 HRC
3	290	54 HRC

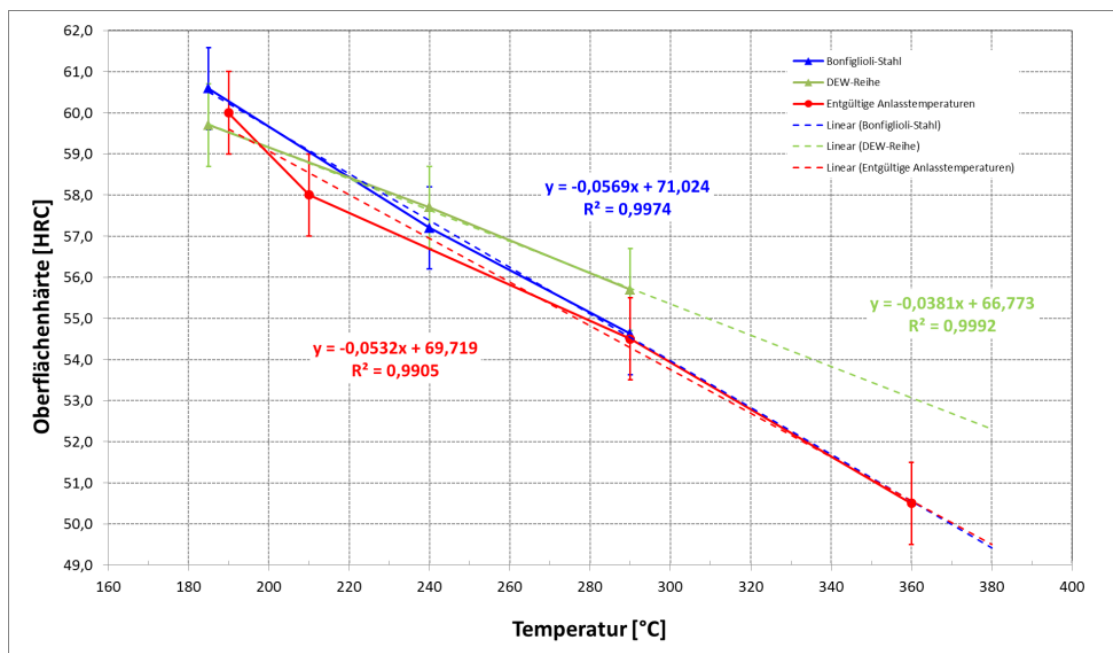


Abbildung 14: Anlasstemperaturen für verschiedene Werkstoffchargen 16MnCr5.

Nachdem alle Rezeptparameter fest standen wurden die Schneckenräder für die Prüfstandsversuche wärmebehandelt. Begonnen wurde mit Schneckenrädern aus 16MnCr5 für den Ansatz des definierten Härteunterschieds, wobei zunächst alle an-

gedachten Oberflächenhärten eingestellt wurden. Im weiteren Verlauf nur noch Schneckenräder vom Typ 60 HRC behandelt. Im Anschluss an die Wärmebehandlung der Schneckenräder der Geometrie „B“ wurden die Geometrien „C“ und „D“ wärmebehandelt, um sie in den Prüfständen der Ruhr-Universität Bochum zu testen. Den Abschluss des Projektes von Seiten der Wärmebehandlung stellte eine Charge mit Schneckenrädern der Geometrie „B“ dar, die auf einen hohen Restaustenitgehalt hin wärmebehandelt werden sollte.

Tabelle 7 fasst die im Projekt wärmebehandelten Chargen für Prüfstände noch einmal zusammen. Aufgeführt sind neben den Spezifikationen, bzw. dem Wärmebehandlungsziel, auch die Durchmesser der Schneckenräder mit Geometriebezeichnung.

Tabelle 7: Übersicht – Prüfstandschargen und Teilmengen

Nr.	Material	Schneckenrad-Durchmesser	Ziel/Spezifikation	Anzahl	Bemerkung
6200	16MnCr5	106 mm (B)	Normal, 60, 57 HRC	120	
6201	16MnCr5	106 mm (B)	Normal, 54 HRC	61	
6375	16MnCr5	106 mm (B)	Normal, 60 HRC	121	
6690	16MnCr5	106 mm (B)	Hoch	1	erste Prüfteile für den Fall "hoher Restaustenitgehalt"
6691	18CrNiMo7-6	106 mm (B)	Hoch	1	erste Prüfteile für den Fall "hoher Restaustenitgehalt"
6780	16MnCr5	106 mm (B)	Normal, 60 HRC	138	
6781	16MnCr5	106 mm (B)	Normal, 60 HRC	136	
6969	16MnCr5	83 mm (D)	Normal, 60 HRC	128	
6970	16MnCr5	176 mm (C)	Normal, 60 HRC	74	
6971	16MnCr5	176 mm (C)	Normal, 60 HRC	74	
7011	18CrNiMo7-6	106 mm (B)	Hoch, N/A	33	

Da das Vorhaben zu diesem Zeitpunkt bereits weit fortgeschritten war wurde auf die Entwicklung von Hochtemperaturprozessen für Behandlungstemperaturen von 1050 °C verzichtet. Auch die Herstellung und Prüfung von Schneckenrädern mit verschiedenen Restaustenitgehalten war aufgrund der zur Verfügung stehenden Zeit nicht mehr realisierbar.

7. Plasmanitrieren (Eltropuls)

Verantwortlich

Eltropuls

Ausführende Stelle

Eltropuls

7.1. Motivation

Im Forschungsprojekt arbeiteten 13 Partner aus Industrie und Hochschule daran, ein neues Konzept für Schneckengetriebe zu entwickeln. Das alternative Getriebe soll die Vorteile von Schneckengetrieben behalten und gleichzeitig ohne den Verschleißwerkstoff Bronze auskommen. Die Bronze soll durch einen konventionellen Stahlwerkstoff substituiert werden. Somit soll eine drastische Senkung der Produktionskosten erreicht werden. Gleichzeitig soll der Wirkungsgrad durch die neue Werkstoffpaarung und entsprechende Oberflächenbehandlungsverfahren gesteigert werden.

Lösungskonzept der ELTRO GmbH

Die Zielstellung sollte durch ein Nitrieren oder Nitrocarburieren im Plasma mit nachfolgender Oxidation erreicht werden.

Durch die ELTRO GmbH wurden Zahnräder aus 42CrMo 4 in einer industriellen Plasmanitrieranlage H75/100 mit nachstehenden Parametern behandelt um eine NHD von ca. 0,38 mm zu erreichen:

Plasmanitrieren bei 530 °C, 13 h
Plasmanitrieren bei 530 °C, 13 h plus nachoxidation
Plasmanitrocarburieren bei 550 °C, 11h

Diese Parameter wurden entsprechend nachstehender Gesichtspunkten gewählt:

- Realisierung einer max. lokalen Festigkeit im Randbereich von 0,1 - 0,15 mm in welchem die max. Beanspruchungen vorausberechnet wurden.
- Mittels Nachoxidation soll der äußere Randbereich der Verbindungsschicht in ein weiches Eisenoxid umgewandelt werden um so unter Belastung ein besseres Einlaufverhalten damit Laufverhalten zu erreichen, (vergleichbarer Effekt wie ein zusätzliches Strahlen oder Gleitschleifen)
- Beim Nitrieren wird ausschließlich mit Wasserstoff / Stickstoffgemischen gearbeitet. Im Fall des Nitrocarburierens wird zusätzlich ein Kohlenstoffspender eingesetzt.
Es sollte untersucht werden, inwieweit sich diese Verfahrensvarianten auf das Laufverhalten der Räder Einfluss haben.
- maximale Wirtschaftlichkeit



Bild 1: Industrielle Plasmanitrieranlage H75/100

7.2. Ergebnisse

Mit den gewählten Behandlungsparametern wurden die Sollvorgaben bzgl. der anzustrebenden Nitrierschichtdicken und Härteprofile erreicht. Einzelne wenige von der Eltro GmbH behandelten Räder wurden auf dem Prüfstand der Elgeti Engineering GmbH getestet. Weiter wurden nitrierte und nitrocarburisierte Räder durch Projektpartner einer zusätzlichen Nachbehandlung durch Strahlen, Gleitschleifen und Beschichten unterzogen. Detaillierte Untersuchungen von Rädern nach dem Testlauf auf dem Prüfstand der Elgeti Engineering GmbH wurden von der Hochschule Niederrhein durchgeführt. Bei der Interpretation der metallografischen Ergebnisse traten Fragen auf, die durch rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen der ELTRO GmbH beantwortet wurden.

Elektronenbild 34



Bild 2: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme des Schnekenzahn 0820V nach dem Testlauf

Enorme Kräfte führten zu Abplatzungen und Rissen. Aus den metallografischen Untersuchungen der Hochschule Niederrhein kann auf eine starke Wälzbelastung geschlossen werden. Lokal wurde eine sehr große Kaltumformung beobachtet. Maximale Kräfte wirken bis ca. 0,1mm Tiefe, was sich relativ gut mit den vorausgerechneten max. Belastungstiefen von ca. 0,1-0,15 mm deckt. Weiter wurde ein starker Abfall der Beanspruchung bis auf ca. 0,3 mm festgestellt. Die Tiefe der Abplatzungen konnte durch das WZL Aachen mit ca. 10 - 18 pm quantifiziert werden. Somit ist nicht allein die Verbindungsschicht ausgebrochen.

Quantitative Ergebnisse aus den Prüfstandläufen der Elgeti Engineering GmbH lagen erst im Dezember 2016 vor. Es wurden jedoch nicht alle zur Verfügung gestellten Verfahrensvarianten geprüft.

Als Ergebnis lässt sich feststellen:

- Die Varianten "PNC + Gleitschleifen", "PN + Gleitschleifen", "PNC + Strahlen + Gleitschleifen" und "PN + Strahlen + Gleitschleifen" liegen gleichauf mit den besten Versuchsergebnissen aller geprüften Varianten. /I/

Als aussichtsreichste Variante wurde von der ELTRO GmbH die Kombination aus Nitrieren/Nitrocarburieren mit Nachoxidation angesehen. Motivation für die Nachoxidation war eine Verbesserung des Einlaufverhaltens und ein Ersatz der Nachbehandlung durch Strahlen und/oder Gleitschleifen. Prüfstandergebnisse zu dieser Variante sind nicht bekannt.

Zusammenfassung

Die ELTRO GmbH hat alle im Projekt eingegangenen Verpflichtungen erfüllt. Es konnte nachgewiesen werden, dass mittels Nitrieren und Nitrocarburieren vielversprechende Lösungsansätze vorliegen, die auf dem Niveau der besten Ergebnisse liegen.

Da durch den Partner Elgeti Engineering GmbH nicht alle zur Verfügung gestellten Varianten wie geplant getestet wurden, kann keine abschließende Bewertung der bereitgestellten Varianten vorgenommen werden.

Gelingt es mittels Nachoxidation die zusätzlichen Arbeitsschritte Strahlen und Gleitschleifen zu eliminieren, liegt die im Vergleich zu den anderen untersuchten Varianten das kostengünstigste Lösungskonzept bei vergleichbaren Prüfstandergebnissen vor.

8. Oberflächenveredelung

Verantwortlich

BONFIGLIOLI Vectron MDS GmbH

Ausführende Stellen

Rösler Oberflächentechnik GmbH (Gleitschleifen, Strahlen)

Oerlikon Balzers (Beschichten)

8.1. Oberflächenstrahlen und Gleitschleifen (Rösler)

8.1.1. Strahlen



Maschinentechnik






Satelliten-Takt-Strahlanlage

► Druckluftverfahren



Strahlmittel

Verwendete Strahlmitteltypen

<p>› GH-KG 05 (0,1 – 0,3 mm)</p>		<ul style="list-style-type: none"> • Kantige Geometrie • Strukturierung der Oberfläche
<p>› SDK 0,4 mm G3</p>		<ul style="list-style-type: none"> • Runde Geometrie • Strukturierung der Oberfläche • Einbringung von Druckspannungen 
<p>› Fineshot 50-150 µm</p>		

8.1.2. Gleitschleifen



Maschinentechnik

SchleppFinish-Anlage

- › Berührungsloses Gleitschleifen





Verfahrensmittel

Verwendete Verfahrensmitteltypen

Schleifkörper

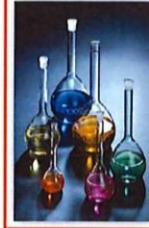
- RCP 2-2,5/05 ZS
- RPKD 02/04 Z
- RFS 03/05 ZS
- RSG 1,5/05 ZS
- RMB/D1 03/05 ZS



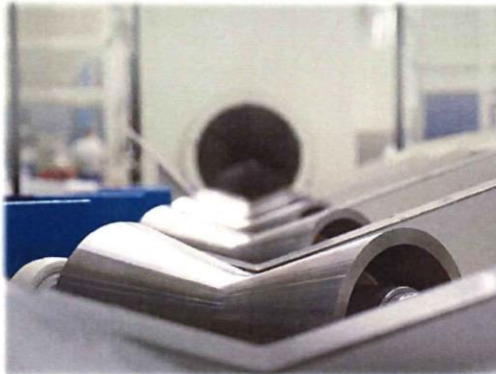
Umwelttechnik



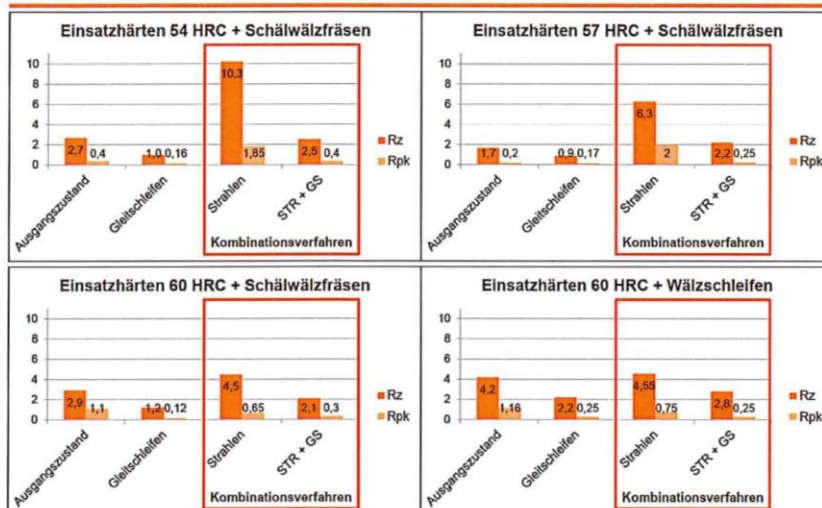
Compound ZF 113



8.1.3. Ergebnisse



Einsatzhärtevarianten (16MnCr5)



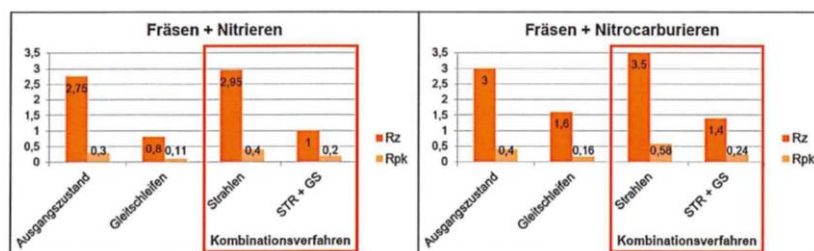
8.1.4. Fazit



Fazit

- ▶ Startrauheiten verhältnismäßig hoch
- ▶ Zwischenstufe Strahlen macht wenig Sinn, da die strukturierte Oberfläche nahezu komplett durch das Gleitschleifverfahren abgetragen werden muss, um die Rauheit zu erreichen!
- ▶ Lange Bearbeitungszeiten im Gleitschleifen (30 – 60 min) zur Erreichung der geforderten Rauheit
- ▶ Starke Veränderung der Bauteilgeometrie
- ▶ Teilweise stark abrasive Schleifmedien + intensive Maschinenteknik notwendig
- ▶ Hoher Verfahrensmittelverbrauch = relativ hohe Prozesskosten pro Werkstück
- ▶ Wirtschaftlichkeit des Verfahrens muss in Frage gestellt werden

Nitriervarianten (42CrMo4)



8.2. Beschichten (Oerlikon Balzers)

Im Rahmen des Verbundprojektes wurden seitens Oerlikon Balzers gemäß Projektplan definierte Schneckenräder mit dünnen Hartstoffschichten beschichtet, um tribologische Vorteile zu erzielen. Dabei wurde eine Auswahl an Schneckenrädern beschichtet, die sämtliche im Projekt definierten, unterschiedlichen Fertigungsabläufe abbilden sollte. Somit stellte die Beschichtung den letzten Fertigungsprozess dieser Schneckenräder dar.

Stichprobenweise wurden für die Beschichtung relevante Kennwerte (wie z.B. Rauheiten und Substrathärte) einzelner Schneckenräder vor und nach dem Beschichten erfasst und mit den Analysen der Projektpartner abgeglichen.

Vor dem Beschichtungsprozess wurden die Schneckenräder mittels wässrig-alkalischer Reinigung in mehreren Reinigungsstufen und einer nachgeschalteten Spülkaskade gereinigt. Als mechanische Vorbehandlung wurde Mikrostrahlen eingesetzt (Strahlgut Aluminiumoxid F500, Ø: 10-30 µm, Druck 1.5 bar).

Die Beschichtung erfolgte jeweils als Reinteilcharge mit einem der Geometrie der Schneckenräder angepassten Sonderprozess und einer Zielschichtdicke von 1-3 µm (abhängig von der Messposition). Die Beschichtungsparameter wurden dabei für sämtliche Chargen unverändert belassen.

Das gewählte Schichtsystem „Balinit C“ (WC/C) gehört zur Familie der diamantartigen Kohlenstoffschichten (DLC) und weist zeichnet sich durch eine hohe Duktilität, ein gutes Einlaufverhalten und seine insgesamt hervorragenden tribologischen Eigenschaften aus. Die Schichtzusammensetzung besteht aus alternierenden Lagen mit hohem Wolframkarbid- und hohem Kohlenstoffanteil. Dieser mikrolemellare Aufbau führt zu einem optimalen Verhältnis aus Duktilität und Härte. Damit ist dieses Schichtsystem hervorragend für Belastungen mit sehr hohen Flächenpressungen geeignet. Durch den Wolframanteil ist zudem eine ausreichende Wechselwirkung mit Schmierstoffadditiven zu erwarten. Zur Bestätigung der Verträglichkeit mit Schmierstoffadditiven wurden der Firma Klüber beschichtete Proben zur Verfügung gestellt.

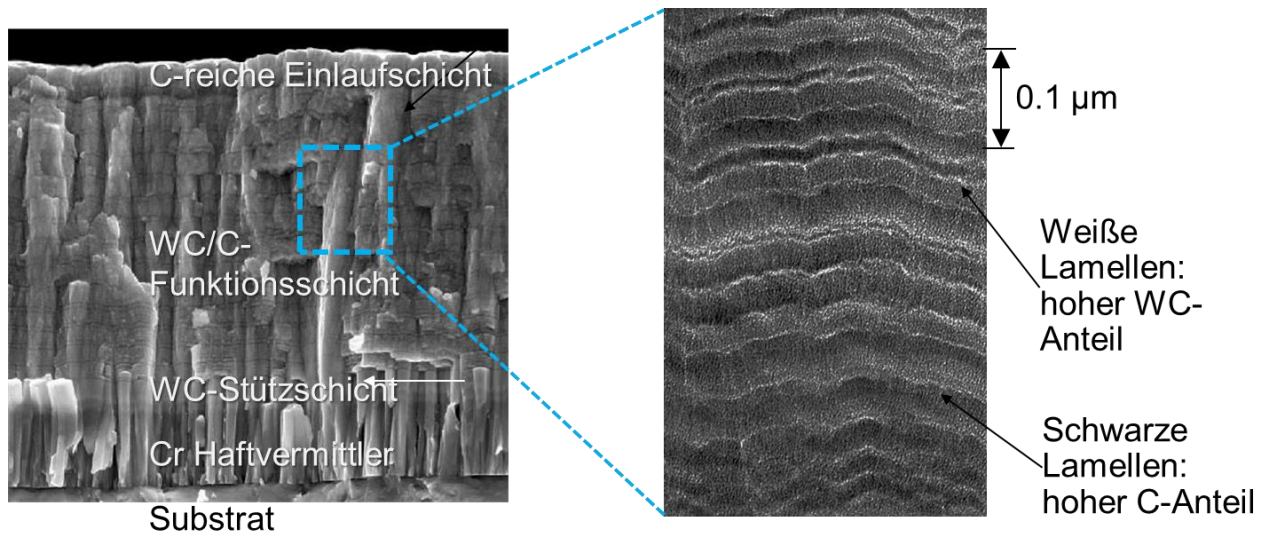


Abb. 1: Schichtaufbau von Balinit C (WC/C) anhand einer REM-Bruch-Aufnahme (links) und einer TEM-Nahaufnahme. Der Mikrolamellare Aufbau der Schicht ist sehr deutlich zu erkennen. Die Schichtdicke beträgt hier ca. 3 μm.

Nach dem Beschichten der Schneckenräder wurde der Schichtdickenverlauf entlang der Zahnflanke mittels mikroskopischer Auswertung von Kalottenschliffen erfasst. Zusätzlich wurden Rauheitsmessungen, Schichthafungs- und Härtemessungen durchgeführt. Insgesamt war die Beschichtungsqualität aller Chargen zufriedenstellend.

Oerlikon Balzers hat u.a. aufgrund des Potentials einer Kombination aus Superfinish-Prozessen mit PVD-Beschichtungen für Getriebeanwendungen die Möglichkeiten bzgl. mechanischer Vorbehandlungen deutlich ausgebaut (u.a. mit einer Anlage von Rössler), so dass durchaus neue Kombinationen aus mechanischer Vorbehandlung und Beschichtung zu einer weiteren Leistungssteigerung führen könnten und somit z.B. ein Ansatz für ein Nachfolgeprojekt aus Sicht von Oerlikon Balzers vorhanden wäre.

9. Schmierstoffentwicklung (Klüber Lubrication)

Verantwortlich

Klüber Lubrication

Ausführende Stellen

Klüber Lubrication

9.1. Einleitung

Für Leistungsschneckengetriebe haben sich Getriebeöle auf Polyglykolbasis mit Extreme Pressure Additiven bewährt. Die DIN 3996 (Norm, 2012)- Tragfähigkeit von Zylinderschneckengetrieben - berücksichtigt das deutlich bessere Verschleißverhalten sowie den besseren Wirkungsgrad von Schneckengetrieben, wenn sie mit Polyglykol geschmiert werden. Durch geeignete Additivierung von Polyglykolen, lassen sich diese Vorteile noch optimieren.

Aufgrund der hohen Gleitanteile und Gleitgeschwindigkeiten in den Kontakten der Schneckengetriebeflanken muss der Schmierstoff darüber hinaus eine hohe Fresstragfähigkeit bei der Materialpaarung Stahl/Stahl aufweisen. Durch gezielte Additivauswahl kann die geforderte Fresstragfähigkeit von Getriebeölen beeinflusst werden. Aufsetzend auf der bekannten Klübersynth GH 6 Additivtechnologie, werden fresstragfähigkeitssteigernde Additivkombinationen entwickelt, die zunächst in Modellprüfungen wie dem Vierkugelapparat nach (51350-1, 2010) auf ihre Wirksamkeit geprüft werden.

Am FZG Verspannungsprüfstand (Hochmann, 2016) wird die Fresstragfähigkeit dann am Stirnradgetriebe verifiziert. Es soll eine Methode entwickelt werden, die eine Übertragung auf fressgefährdete Schneckengetriebe zulässt.

Die Teilprojektziele für die Schmierstoffentwicklung sind folgende:

- Entwicklung von hochfresstragfähigen Schmierstoffen auf Polalkylenglykol für das Tribosystems Stahl/Stahl in Schneckengetrieben
- Entwicklung von Screening Konzepten, die eine Übertragung auf das tribologisch beanspruchte Bauteil Stahlschnecke ermöglichen
- Identifikation von Polyglykolen und Additivsystemen deren tribologische Eigenschaften erfolgversprechend sind
- Anpassung des Schmierstoffs auf weitere Anforderungen des Maschinenbaus, Reibminderer, Stabilisatoren, Korrosionsinhibitoren
- Aufklärung von Reibung und Verschleiß als Funktion verschiedene Werkstoffkombinationen, Geometrien und Lastkollektive
- Funktionsnachweis im Bauteilprüfstand

9.2. Schmierstoffentwicklung

In diesem Kapitel wird die Produktentwicklung des Schmierstoffs im Rahmen des Stahlschnecke-Projektes thematisiert. In **Abbildung 7** sind verschiedene Schritte der üblichen Produktentwicklung des Schmierstoffs dargestellt. Aus dem Entwicklungsziel eines neuartigen Schmierstoffes für ein Schneckengetriebe mit Stahlschneckenrad werden Anforderungen in einem Lastenheft festgehalten. Entsprechend der Anforderungen wird die Formulierung der Schmierstoffmuster abgestimmt.



Abbildung 7: Produktentwicklung Getriebeöl

Die Schmierstoffmuster werden in chemisch-physikalischen Prüfungen getestet und die Ergebnisse fließen in weiterentwickelte Schmierstoffmuster ein. Zeitgleich werden Modell-Prüfungen durchgeführt, welche ebenfalls die Formulierung weiterer Schmierstoffmuster beeinflussen. Anschließend werden die kosten- und zeitintensiveren Bauteilprüfungen durchgeführt.

9.2.1. Screeningmethoden

Das Screening von Schmierstoffmustern im Rahmen des Stahlschnecke-Projekts gliederte sich in 2 Phasen. In Phase 1 wurden 11 Schmierstoffmuster entwickelt und den Prüfungen aus Tabelle 1 unterzogen.

In der Tabelle 1 sind die Screeningmethoden aufgezählt und werden im Folgenden bezüglich ihrer Aussagekraft kurz beschrieben:

Beanspruchung	Screening-Prüfung	Untersuchung
Mechanisch-dynamisch	VKA Verschleiß	Fresstragfähigkeit im Stahl/Stahl-Kontakt
	VKA Verschleiß	Verschleißschutz im Stahl/Stahl-Kontakt
	Brugger	Druckaufnahmevermögen im Stahl/Stahl-Kontakt
	Flender-Schaumtest	Schaumverhalten von Schmierölen
Chemisch-physikalisch	Stahlkorrosion	Korrosionsschutz bei Stahl
	Kupferkorrosion	Korrosionsschutz bei Kupfer
	Stat. Elastomerverträglichkeit	Dichtungsverträglichkeit von Schmierölen
Bauteilprüfung	Klüber-Schneckengetriebe Prüfstand	Verschleiß- und Wirkungsgrad der Paarung Stahl / Bronze

Tabelle 1: Übersicht Screening Prüfungen für Schmierstoffmuster

Der Verschleißtest auf dem Vierkugelapparat (VKA) nach (51350-2, 2010) dient der Beurteilung der Fresstragfähigkeit von Schmierstoffen für die Materialpaarung Stahl / Stahl. Mit derselben Apparatur wird ebenfalls das Verschleißverhalten nach (51350-3, 2010) einer Materialpaarung aus Stahl untersucht. Mit dem Schmierstoffprüfgerät nach Brugger (51347-1, 2000) wird das Verschleißverhalten von Schmierölen mit definierten zylindrischen Probekörpern untersucht (51347-2, 2000). Der Flender Schaumtest (12152, 2012) bezieht das Schaumverhalten der Entwicklungsmuster in die Entwicklung mit ein.

Die chemisch-physikalischen Prüfungen, welche ein Schmierstoffmuster im Screening zu bestehen hat, sind unter anderem die Stahl- und Kupferkorrosion (2160, 1999) (7120, 2000). Zusätzlich wird die statische Elastomerverträglichkeit der Muster mit verschiedenen Materialien nach (1817, 2004) getestet, um die Wechselwirkung mit Dichtungsmaterialien frühzeitig abzuschätzen.

Der Auswahl der mechanisch-dynamischen Prüfungen und deren Übertragbarkeit auf Getriebeanwendungen wurde in (Wald, 2014) erörtert.

Als erste Bauteilprüfung wird in der ersten Screeningphase der Klüber-Schneckengetriebeprüfstand herangezogen, um zusätzlich die Eignung in der Materialpaarung Stahlschnecke / Bronzeschneckenrad zu untersuchen. Der Prüfstand und die angewandte Testprozedur sind nachfolgende beschrieben.

Der Aufbau des Klüber-Schneckengetriebe-Prüfstands ist schematisch in Figure 1 ersichtlich. Ein Elektromotor treibt über ein vorgelegtes Kegelradgetriebe die Schnecke des Prüfgetriebes an. Das Schneckenrad wird über ein Hochtreibergetriebe durch einen Generator gebremst. Die im Generator erzeugte elektrische Leistung wird verwendet, um den Motor anzutreiben, welches als elektrisches Verspannungsprinzip bezeichnet wird.

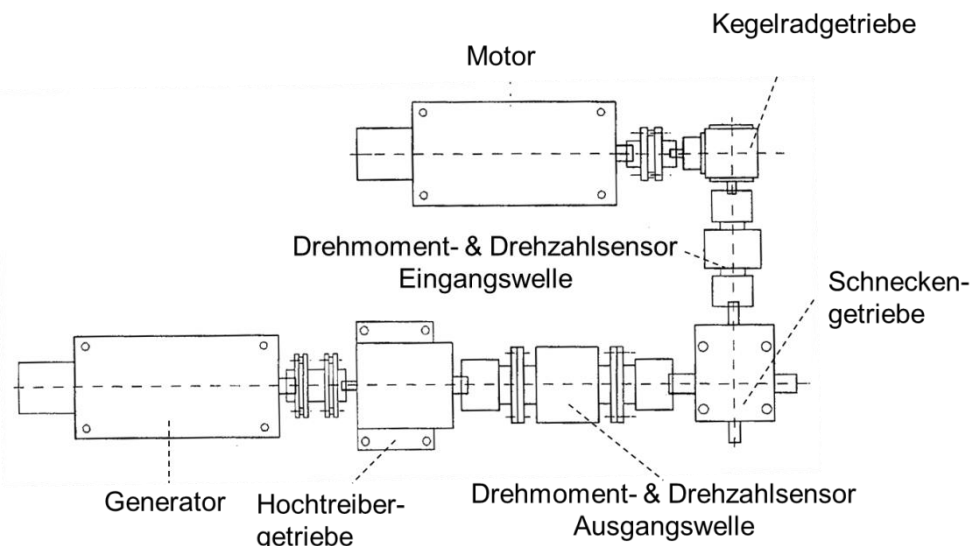


Figure 1: Schematischer Aufbau vom Klüber-Schneckengetriebe-Prüfstand

Das Prüfgetriebe hat einen Achsabstand von 63 mm und eine Übersetzung von 1:39. Unter definierten Versuchsbedingungen werden während des Prüflaufs der Wirkungsgrad über die Drehmoment- und Drehzahlsensoren an der Ein- und Ausgangswelle des Schneckengetriebes bestimmt. Mittels Temperatursensoren werden die Temperaturverläufe von Schnecke, Prüfgetriebegehäuse, Ölsumpf und der Umge-

bung bestimmt. Durch das Auswiegen des Schneckenrads vor und nach der Prüfung wird der Verschleiß ermittelt werden. Zusätzlich zur Wägung wird mittels Drehwinkelsensoren an Eingangs- und Ausgangswelle des Prüfgetriebes der Verschleißbetrag des Bronzeschneckenrades gemessen.

Die Prüfung im Klüber-Schneckengetriebe-Prüfstand wird zur bauteilnahen Untersuchung des Verschleißschutz-, Reibungs-, Temperatur- und Wirkungsgradverhalten herangezogen. Hierzu wird das Prüfgetriebe mit 600 ml vom Ölmuster befüllt. Nachdem der Prüflauf gestartet ist, wird das Prüfgetriebe mit einem Abtriebsdrehmoment von 300 Nm und einer Antriebsdrehzahl von 350 min⁻¹ beaufschlagt. Das Prüfgetriebe wird unter konstanten Bedingungen 300 h lang belastet, wodurch sich ein Beharungszustand einstellt.

Die Ölmuster, die im Rahmen des Projektes entwickelt wurden, basieren vorwiegend auf Polyglykol und orientieren sich an gängigen Schneckengetriebeölen in der Praxis. Die kinematische Viskosität der Ölmuster wurde mit der ISO VG 460 (3448, 2010) definiert und der Viskositätsindex VI lag über 200 nach (2909, 2002). Die Additivkonzepte der unterschiedlichen Ölmuster aus der Screening-Phase wurden für eine hohe Fresstragfähigkeit ausgelegt und basieren auf gängigen Additiv-Technologien.

9.2.2. Ergebnisse Schmierstoff Screening

Die Differenzierungsmerkmale aus Screeningphase 1 sind in Tabelle 2 zusammengefasst. Muster 01 zeigte einen sehr niedrigen Verschleiß am Schneckengetriebe-Prüfstand. Der VKA Verschleiß war ebenfalls sehr niedrig, jedoch wurden nicht die gewünschten hohen Werte für VKA Schweißkraft und Brugger erreicht. Muster 02 zeigte deutlich höheren VKA Verschleiß als Muster 01, jedoch einen höheren Bruggerwert. Das Muster 02 wurde daher als Referenz für weitere Verbesserungen im Rahmen des Projektes herangezogen. Muster 03 scheiterte an der Elastomerverträglichkeit. Muster 04 zeigte sowohl sehr hohe Bruggerwerte als auch eine sehr hohe VKA Schweißkraft. Muster 05 absolvierte ebenfalls alle Screeningtests und wies bessere Werte als Muster 01 und 02 auf. Muster 06 und 07 schieden aufgrund des Schauerhaltens aus. Muster 08 disqualifizierte sich aufgrund seiner Korrosivität gegenüber Stahl, was bei einem Schneckenrad aus Stahl nicht vertretbar war. Außerdem war der Bruggerwert sehr niedrig. Muster 09 scheiterte am Schaumtest, weshalb dieses nicht weiterhin betrachtet wird. Das Muster 10 besteht den Screeningtest, jedoch basiert es auf einem mineralischen Grundöl, weshalb es nicht weiter betrachtet wird. Muster 15 erzielte vielversprechende Werte für die Schweißkraft und Brugger, jedoch zeigte es die schlechteste Elastomerverträglichkeit.

	VKA Schweißkraft [N]	VKA Verschleiß [mm]	Brugger [N/mm ²]	SG Verschleiß [g]	E	S	K
01	Sehr niedrig	niedrig	niedrig	Sehr niedrig	✓	✓	✓
02	Sehr niedrig	Sehr hoch	niedrig	niedrig	✓	✓	✓
03	Sehr niedrig	mittel	niedrig	-	✗	✓	✓
04	Sehr hoch	Sehr hoch	hoch	Sehr hoch	✗	✓	✓
05	niedrig	mittel	mittel	niedrig	✓	✓	✓

06	niedrig	niedrig	mittel	mittel	✓	X	✓
07	niedrig	niedrig	mittel	hoch	✓	X	✓
08	mittel	hoch	niedrig	-	✓	✓	X
09	Sehr niedrig	Sehr niedrig	Sehr niedrig	-	✓	X	✓
10	mittel	Sehr hoch	Sehr niedrig	-	✓	✓	✓
15	hoch	niedrig	mittel	hoch	X	✓	✓

Tabelle 2: Übersicht der Prüfergebnisse aus Screeningphase 1, SG: Schneckengetriebe, E: Elastomerverträglichkeit, S: Flender-Schaumtest, K: Korrosionsbeständigkeit Stahl

Für die Screeningphase 2 wurden die Schmierstoffmuster 02 und 04 von der Additivierung angepasst. Schmierstoffmuster 05 dient als positive Referenz für weitere Tests.

Anhand der Schmierstoffmuster von Screeningphase 1 konnten die Prüfungen eine unterschiedliche Eignung zur Differenzierung der Schmierstoffmuster aufzeigen. In Screeningphase 2 wurden deshalb die VKA Schweißkraft, der VKA Dauerverschleiß, der Bruggerwert und die statische Elastomerverträglichkeit als geeignete Tests ausgewählt und zum Screening der neuen Muster herangezogen.

	VKA Schweißkraft [N]	VKA Verschleiß [mm]	Brugger [N/mm ²]	E1	E2	E3
11	niedrig	Sehr hoch	niedrig		✓	X
13	hoch	hoch	mittel		X	X
16	Sehr hoch	Sehr hoch	Sehr hoch		X	X
17	Sehr hoch	niedrig	hoch	✓	X	X
18	hoch	niedrig	hoch	✓	X	X
19	hoch	Sehr niedrig	hoch	✓	X	X
20	Sehr hoch	Sehr niedrig	Sehr hoch	✓	X	X
21	hoch	Sehr niedrig	Sehr hoch	✓	X	X
22	Sehr hoch	-	Sehr hoch	✓	X	X
30	niedrig	Sehr niedrig	mittel	✓	X	X
37	hoch	mittel	mittel	✓	X	X
38	niedrig	mittel	niedrig	✓	X	✓
39	niedrig	niedrig	niedrig	✓	X	X
49	hoch	Sehr niedrig	Sehr hoch	✓	X	✓

Table 1 Übersicht der Prüfergebnisse aus Screeningphase 2, Elastomerverträglichkeit E1; 72NBR902, E2: 75FKM585, E3: 75FKM260466

Von den Mustern aus Screeningphase 2 wurde das Muster 49 am vielversprechendsten für externe Bauteilprüfungen identifiziert. Es zeigte eine hohe Schweißkraft gepaart mit niedrigem Verschleiß, was einen guten Fressstest versprach. Ebenso war der

Bruggerwert sehr hoch und es wurde lediglich die statische Elastomerverträglichkeit mit einem der drei Elastomere nicht bestanden.

9.2.3. Externe Bauteilprüfungen

Die Muster 05 und 49 aus den Screeningphasen 1 und 2 werden nachfolgend als BMBF Gear Oil 05 und 49 bezeichnet. Die externen Bauteilprüfungen zur besseren Beurteilung der Leistungsfähigkeit der Schmierstoffe im Schneckengetriebe der Paarung Stahl / Stahl sind in Table 1 Table 2 aufgeführt.

Prüfprozedur	Prüfmethode	Prüfergebnis
Verzahnungsschutz	FZG S-A10/16.6R/90	Schadenskraftstufe im Fresstest
	FZG GF-C/8.3/90	Graufleckenschutz
Elastomerkompatibilität	FST FB 73 11 008 Rev. 5	Dynamische Elastomer-Schmierstoffkompatibilität

Table 2: Übersicht externe Bauteilprüfungen

Der Verzahnungsschutz der hochfressgefährdeten Paarung Stahlschneckenrad und Stahlschnecke wurde mit den Sprungtest auf den FZG Verspannungsprüfstand nach (Getriebebau, Verfahren zur Bestimmung der Freßtragfähigkeit hochlegierter Schmierstoffe in der FZG-Zahnrad-Verspannungs-Prüfmaschine) beurteilt. Außerdem folgte eine Beurteilung der Graufleckentragfähigkeit, welche einem Ermüdungsschaden von einsatzgehärteten Verzahnungen entspricht nach (Getriebebau, Testverfahren zur Untersuchung des Schmierstoffeinflusses auf die Entstehung von Grauflecken auf Zahnrrädern). Des Weiteren wurden wurde die dynamische Dichtungsverträglichkeit nach (Freundenberg Sealing Technologies, 2013) untersucht. In Tabelle 3 sind die Ergebnisse der dynamischen Elastomerverträglichkeit für das BMBF Gear Oil 05 und 49 enthalten.

Das Schmierstoffmuster 05 bestand den dynamischen Tests mit dem Elastomermaterial 72NBR902 weder hinsichtlich der Grenzwerte noch der optischen Befundung. Die bestandene statische Elastomerverträglichkeit korrelierte nicht mit den dynamischen Ergebnissen.

Dynamische Elastomerverträglichkeit <i>FB 73 11 008 Rev. 5/3</i>		Ergebnisse	
		Grenzwerte	Optische Befundung
BMBF Gear Oil 05	72 NBR 902	FAIL	FAIL
BMBF Gear Oil 49	72 NBR 902	PASS	PASS

Tabelle 3: Ergebnisse dynamische Elastomerverträglichkeit

Dahingegen zeigte das BMBF Gear Oil 49 ein positives Testergebnis für sowohl die Grenzwerte als auch die optische Befundung.

Mit den beiden Schmierstoffmustern 05 und 49 wurde der Sprungtest nach durchgeführt, der die Fresstragfähigkeit an Zahnrädern testet. Der Sprungtest gilt als der am schwersten zu bestehende Test, nachdem verschärfte Testbedingungen vorliegen. Als Schadenskraftstufe wird die Kraftstufe definiert, in der ein Fressen erwartet wird. Beide Öle überschritten die Schadenskraftstufe 9 und erhielten die Klassifizierung API GL 5, was dem Höchstmaß an Fresstragfähigkeit für Getriebeöle entspricht. Das BMBF Gear Oil 49 erreichte eine höhere Fresstragfähigkeit als das BMBF Gear Oil 05. Dies korrelierte mit der höheren VKA Schweißkraft und den höheren Bruggerwerten aus den Screeningtests. Siehe Abbildung 8.

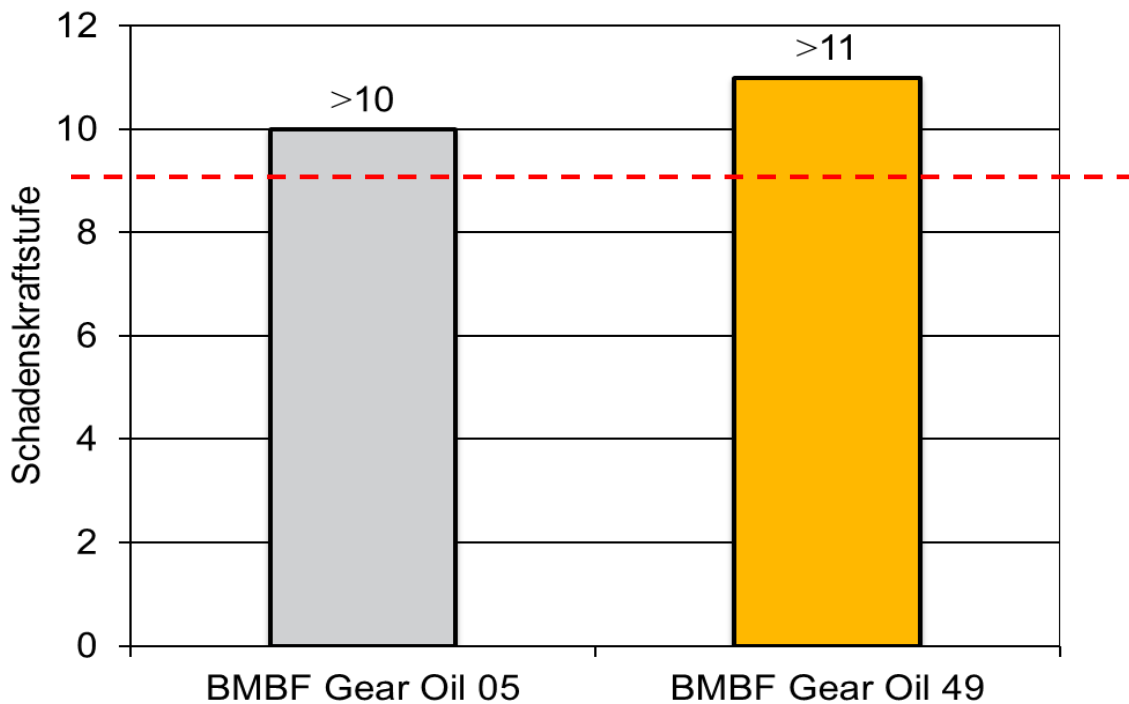


Abbildung 8: Ergebnisse Fressetest FZG S-A10/16,6R/90 der Schmierstoffmuster BMBF Gear Oil 05 und 49

Die Schmierstoffmuster 05 und 49 wurden mit dem FZG Graufleckentest nach getestet. Unter Grauflecken wird ein Ermüdungsschaden der Zahnflankenoberfläche verstanden, der bei langen Betriebsdauern und unter hohen Lasten auftritt. Im Vergleich zum Fressen handelt es sich nicht um eine spontane Schadensentstehung, sondern um einen Dauerschaden. Das Ergebnis ist Abbildung 9 zu entnehmen. Beide Schmierstoffe erreichten eine hohe Graufleckentragfähigkeit.

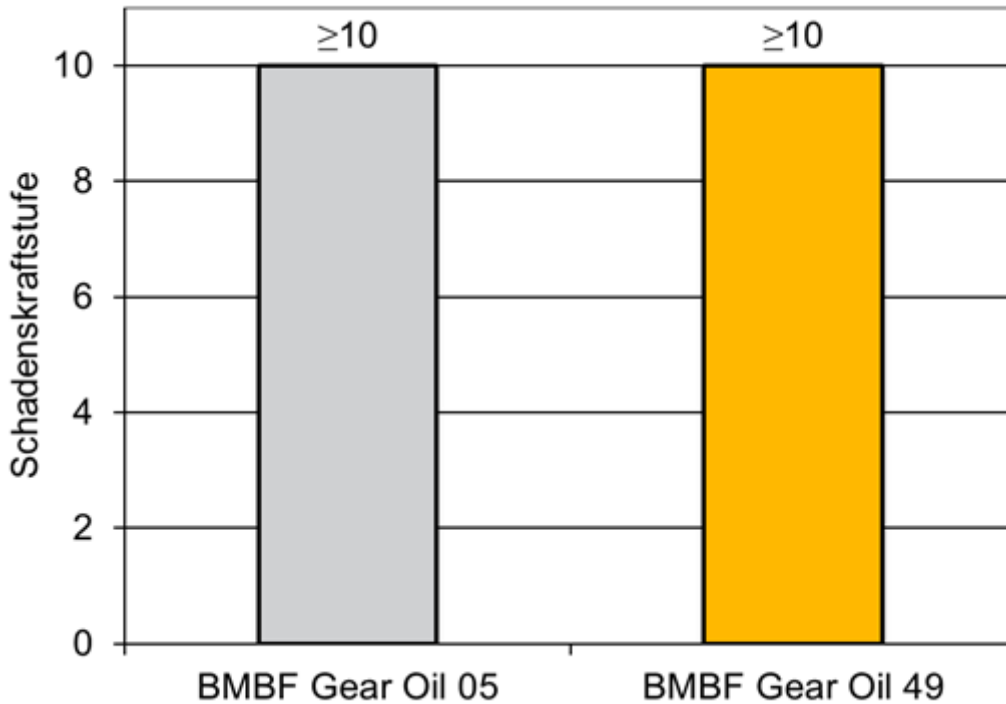


Abbildung 9: Ergebnisse Graufleckentest FZG C-GF/8,3/90 der Schmierstoffmuster 05 und 49 im Stufentest

Die entwickelte Screeningmethode konnte verschiedene Schmierstoffmuster differenzieren und auf Ihre Eignung im Schneckengetriebe der Paarung Stahl / Stahl prüfen. Als aussagekräftigen Prüfungen kristallisierten sich der VKA, Brugger und die statische Elastomerverträglichkeit heraus. Anhand dieser Prüfungen hat sich gezeigt, dass eine Erhöhung der Verschleiß- und Fresstragfähigkeit zu einem schlechteren Abschneiden in Hinsicht der Elastomerverträglichkeit führte. Eine Feinabstimmung der Additivkomponenten und -mengen war notwendig um den bestmöglichen Kompromiss zu erhalten. Die externen Bauteilprüfungen haben eine unzureichende Korrelation der statischen Elastomerverträglichkeit mit den dynamischen Testergebnissen verdeutlicht. Im Gegensatz dazu zeigten VKA und Brugger eine gute Korrelation mit der sowohl hohen als auch differenzierbaren Fress- und Graufleckentragfähigkeit. Das BMBF Gear Oil 49 wurde umfassend abgetestet und stellt einen vielversprechenden Kandidaten für die Prüfläufe im Schneckengetriebe der Paarung Stahl / Stahl dar.

10. Montage (ZEMA)

Verantwortlich

ZeMa – Zentrum für Mechatronik und Automatisierungstechnik

Ausführende Stelle

ZeMa – Zentrum für Mechatronik und Automatisierungstechnik

10.1. Ausgangslage und Motivation

Schneckenradgetriebe bestehen nach dem derzeitigen Stand der Technik aus einer Schneckenwelle aus Stahl und einem Schneckenrad aus Bronze. Die Bronze des Schneckenrades wird während des Einlaufvorgangs des Getriebes in den ersten Betriebsstunden teilweise abgetragen und gleicht dadurch Fertigungs- und Montagetoleranzen aus. Durch das Einlaufen stellt sich so ein optimales Tragbild auf den Zahnflanken ein.

Durch den Einsatz von Bronze ergeben sich jedoch mehrere Nachteile: So besteht Bronze aus den Metallen Kupfer und Zinn. Kupfer wird wegen seiner hohen spezifischen Leitfähigkeit bevorzugt in der Elektroindustrie eingesetzt. Deswegen ist von einem weltweit weiterhin steigenden Kupferbedarf auszugehen, insbesondere auf innovativen Gebieten wie erneuerbare Energien und in der Elektromobilität. Kupfer ist somit ein wertvoller Rohstoff und der Einsatz als Verschleißwerkstoff im Schneckengetriebe nicht mehr erstrebenswert. Zusätzlich ist eine einfache Verschrottung und ein Recycling bei der Kombination von Stahl und Bronze im Schneckengetriebe erschwert, da das Getriebe entweder aufwändig demontiert werden muss oder die Bronze bei der Herstellung von Stahl zu unerwünschten Verunreinigungen des Stahls führt. Zudem sind im Hinblick auf die wachsende Weltbevölkerung und die wachsende Energie- und Rohstoffnachfrage bei begrenzten Ressourcen innovative Lösungen für die Nutzung der Ressourcen nötig.

Neben den Nachteilen der Verwendung von Bronze zeigen sich bei der Verwendung von einer Stahl-Stahl-Paarungen in Getrieben mehrere Vorteile. Ein wirtschaftlicher Vorteil ist die günstige und zudem in Deutschland realisierbare Herstellung. Technische Vorteile sind die höhere mechanische Belastbarkeit, ein höherer Wirkungsgrad und der geringere Abrieb einer Stahl-Stahl-Paarung im Gegensatz zu einer Stahl-Bronze- Paarung. Durch die höhere Belastbarkeit ergeben sich Downsizing-Potenziale für das Getriebe, da das Getriebe durch die höhere Festigkeit insgesamt kleiner ausgelegt werden kann. Dies führt zu Materialeinsparungen und trägt somit zur Ressourceneffizienz bei. Durch den höheren Wirkungsgrad bieten sich auch Downsizing-Potenziale bei der elektrischen Maschine, die das Getriebe antreibt an. Durch den geringeren Abrieb des Stahls wird das Getriebeöl weniger kontaminiert als bei einer Stahl-Bronze-Paarung. Die Reibung der Stahl-Stahl-Paarung ist geringer und gleichbleibend und wirkt sich so positiv auf die CO₂-Emissionen des Getriebes aus. Der geringere Abrieb steigert zudem die Lebensdauer des Getriebes und reduziert den Wartungs- und Wiederbeschaffungsaufwand.

Bisherige Vorversuche zeigten, dass eine Stahl-Stahl-Paarung in Schneckengetrieben grundsätzlich möglich ist. Die Vorversuche fanden jedoch unter bestimmten Randbedingungen und innerhalb bestimmter Einsatzgrenzen statt. Die Verallgemeinerung der Ergebnisse und die Übertragung auf die Praxis fehlten bisher.

Ziel des Forschungsprojektes war deswegen die Entwicklung neuer Technologien und Prozessketten zur Substitution von Bronze aus Schneckengetrieben durch einen niedrig legierten Stahl.

Um dieses Ziel zu erreichen, wurden zwei Herangehensweisen als Teilziele definiert: Die Substitution kann durch den Einsatz eines einlauffähigen Stahls erzielt werden (Teilziel 1) oder durch die Eliminierung des Einlaufs (Teilziel 2).

Als Teilziel des ZeMA wurde die Eliminierung des Einlaufs durch die Wahl geeigneter Fertigungs- und Montagetoleranzen definiert. Zudem wurden Empfehlungen für ein Toleranzkonzept für die Konstruktion und die Montage eines Stahl-Schneckengetriebes erarbeitet.

10.2. Ziele und Vorgehensweisen im Forschungsprojekt und im Arbeitspaket

Die Produktion von Schneckenradgetrieben mit Schnecken aus Stahlwerkstoffen wird grundsätzlich anderen Anforderungen, insbesondere anderen Bauteil- und Montagetoleranzen unterworfen sein, als dies bisher der Fall ist. Deswegen werden mit Hinblick auf das Ziel des Arbeitspakets Konzepte für die Konstruktion und die Produktion von Schneckengetrieben aus Stahlwerkstoffen erarbeitet. Für die Erarbeitung der Konzepte wurden Methoden des Toleranzmanagements kombiniert und durchgängig angewandt.

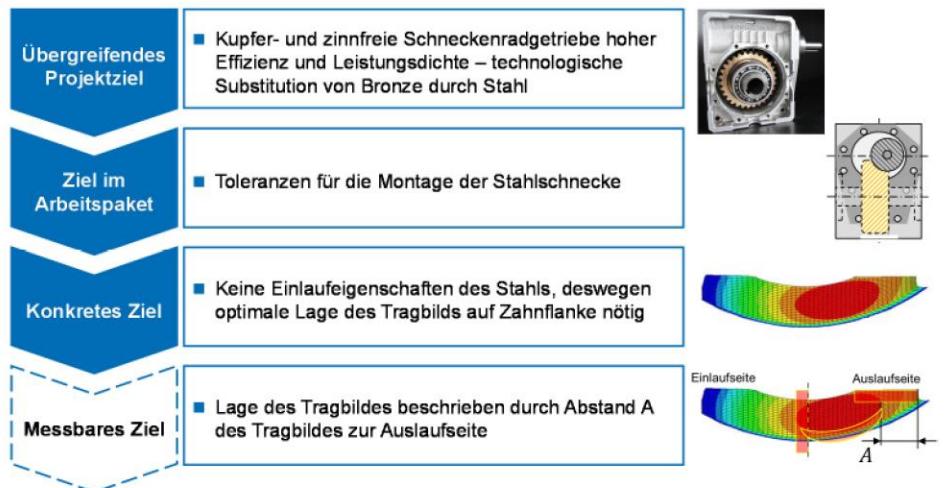


Abbildung 1: Konkretisierung des Projektziels auf ein tolerierbares Merkmal für das Arbeitspaket

In einem ersten Schritt wurde dazu das sehr allgemein gehaltene Ziel des Arbeitspakets in ein quantisiertes und damit messbares und tolerierbares Ziel umformuliert, (siehe Abbildung 1). Das Ziel des Arbeitspaketes der geeigneten Toleranzen für eine Stahlschnecke ergibt sich aus Teilziel 2 „Eliminierung des Einlaufs“ des Forschungsprojekts. Der Einlauf muss dann nicht stattfinden, wenn das Tragbild von der

ersten Betriebsstunde an optimal auf der Zahnflanke des Stahlschneckenrades liegt. Dann sind die Einlaufesigenschaften der Bronze nicht mehr nötig. Das Ziel „optimale Lage des Tragbildes“ wurde wiederum durch die Anwendungen von Expertenwissen und mithilfe der Simulation des Zahnkontaktes in Zusammenarbeit mit der Ruhr-Uni Bochum (RUB) und dem Werkzeugmaschinenlabor an der RWTH Aachen (wzl) weiter konkretisiert. Gemeinsam wurde der Abstand A des Tragbildes zur Auslaufseite als mess- und tolerierbare Größe für die Bestimmung der Lage des Tragbildes definiert. Ist der Abstand A kleiner als 3mm ist die Lage des Tragbildes als kritisch anzusehen.

So konnten alle weiteren Schritte im Arbeitspaket auf die Erzielung eines tolerierbaren Abstandes A gerichtet werden.

Neben diesem technischen, messbaren Ziel wurden zudem weitere wirtschaftliche Forderungen wie realistische Kosten bei der Erarbeitung der Konzepte mit betrachtet.

Die Analyse des derzeitigen Produktes (Stahl-Bronze) und der derzeitigen Prozesse sowie die Erarbeitung von Richtlinien für die Konstruktion und Produktion einer Stahlschnecke wurden durch das Vorgehen „Produkt-Prozess-Betriebsmittel“ gegliedert (siehe Abbildung 2). Durch das Vorgehen ist eine ganzheitliche Betrachtung des Produktes und der Produktion gegeben. Zudem wurde darauf geachtet den Betrachtungsraum klein zu halten, um eine tiefgehende Analyse bei gegebenen Ressourcen durchzuführen. Die Getriebe des Projektpartners Bonfiglioli dienen für die Analyse als Beispiel.

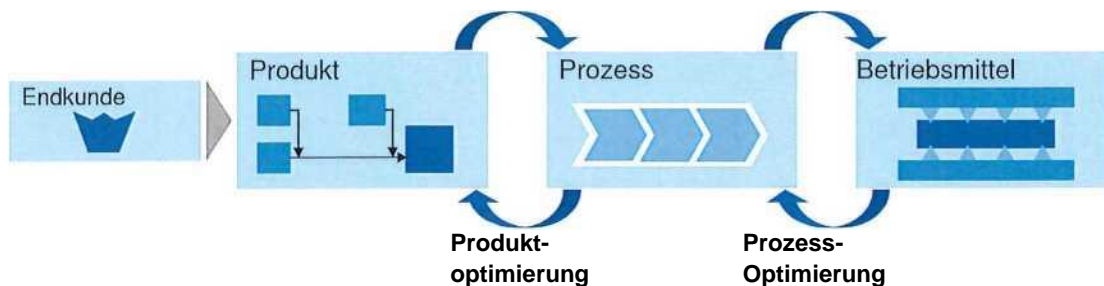


Abbildung 2: Das Vorgehen nach dem Schema "Produkt-Prozess-Betriebsmittel" (Müller et al. 2012, S.98)

Übergreifendes Endziel aller Analyse und Optimierungsbemühungen muss immer die Kundenforderung sein. Der Begriff Kunde umschließt dabei gleichermaßen den Endkunden sowie einen Prozesskunden. Im Projekt wurde das Projektziel als Kundenziel definiert.

In Hinblick auf die definierte Kundenforderung wurde zunächst eine Produktanalyse durchgeführt. Die Identifikation der für die Erfüllung der Kundenanforderung wichtigen Toleranzen geschah durch die Anwendung der Methode der Key Characteristics (KG). Aufbauend auf den KC erfolgte anschließend das Aufstellen und die Berechnung von Toleranzketten. Die Toleranzketten wurden sowohl arithmetisch als auch statistisch berechnet. Die Soll-Werte für die Toleranzketten sowie tolerierbare Abweichungen



wurden durch Simulation ermittelt. Außerdem wurde ein Benchmark verschiedener Konstruktionen von Schneckengetrieben durchgeführt.

An die Produktanalyse schloss sich die Prozessanalyse an. Hierfür wurde zunächst die Montageprozesskette ermittelt. Die Montageprozesskette wurde anschließend analysiert, indem die Bestandteile der realen Montage mit den Bestandteilen einer idealen Montage verglichen wurden. Zudem wurden stichprobenartig einzelne Prozesse auf ihre Fähigkeit geprüft.

Auf Basis der Analyse wurden anschließend Optimierungsmaßnahmen abgeleitet. Als Optimierungsmaßnahmen wurden im Projekt Aspekte beschrieben, die bei einem Wechsel von einer Stahl-Bronze-Paarung auf eine Stahl-Stahl-Paarung nötig sind.

Die Produktoptimierung hat die montagegerechte Anpassung und Vereinfachung der Toleranzgebung zum Ziel. Im Projekt wurden sowohl die Fertigungstoleranzen angepasst, als auch Richtlinien für die Konstruktion eines Schneckengetriebes mit Stahlrad erarbeitet.

Die Prozessoptimierung zielt dabei auf eine Prozessvereinfachung und die Einführung neuer Technologien ab. Im Projekt wurden Inbetriebnahmeprozesse zur Justage und zur Funktionsprüfung des Getriebes neu eingeführt.

10.3. Produkt- und Prozessanalyse eines Bronze-Schneckengetriebes

Bei der Produktanalyse werden die KG des Produktes ermittelt und in einem KC Flow-down hierarchisch miteinander verknüpft. Auf Basis des KC Flowdown werden anschließend Toleranzketten aufgestellt, deren Schließtoleranz immer ein KC darstellt. Die Toleranzketten werden anschließend arithmetisch und statistisch berechnet und mit dem aus Simulationen bekannten Soll verglichen. (Vgl. Abbildung 3) Bei der Prozessanalyse werden anschließend die Montageprozesse eines Schneckenrades mit Bronzerad untersucht.

Identifikation der Key Characteristics

Unter dem Begriff Key Characteristic (KC) wird „ein quantitative Merkmal eines Produktes, eines Teils oder eines Prozesses verstanden, dessen Abweichungen von dem spezifizierten Sollwert inakzeptable Auswirkungen auf Kosten, Funktion oder Sicherheit des Produkts hat“ (Thornton 2004, S.34). Aufgrund ihrer Definition eignen sich KC besonders gut für die Toleranzanalyse und die Weiterführung der Zieldetaillierung auf Produktebene. Durch die Nutzung der KC wird dabei garantiert, dass die betrachteten Merkmale und Toleranzen relevant und messbar im Hinblick auf die Zielerreichung sind. Der Betrachtungsraum wird klein gehalten, sodass eine tiefgehende Analyse möglich ist und die quantifizierbaren Merkmale mit Toleranzen belegt und eindeutig bewertet werden können.

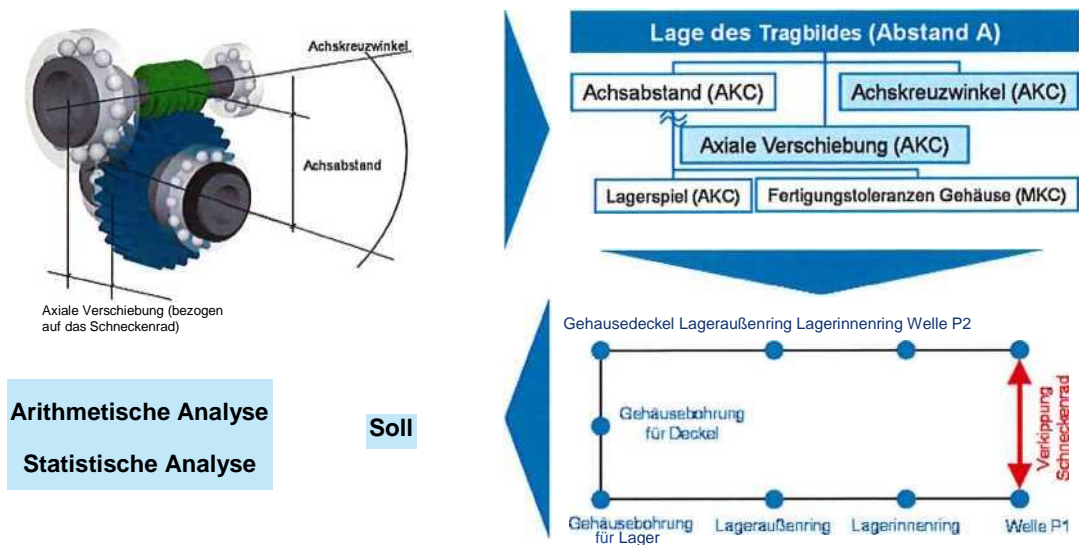


Abbildung 3: Vorgehensweise bei der Produktanalyse

In Zusammenarbeit mit dem Werkzeugmaschinenlabor an der RWTH Aachen und der Ruhr-Universität Bochum wurden drei KC identifiziert: Der Abstand der Drehachse des Schneckenrades (SR) zur Drehachse der Schneckenwelle (SW), die axiale Verschiebung des Schneckenrades und der Achskreuzwinkel zwischen der Drehachse des SR und der Drehachse der SW. (siehe oben links Abbildung 3) Durch Simulation wurde ermittelt, dass vor allem die axiale Verschiebung SR und der Achskreuzwinkel Auswirkungen auf die Lage des Tragbildes haben. Diese wurden im weiteren Verlauf betrachtet, da Abweichungen der beiden KC eine direkte Auswirkung auf die Lage des Tragbildes haben.

Mit den ermittelten KC wurde anschließend eine KC Flowdown erstellt. Der KC Flowdown verknüpft die Anforderungen des Kunden mit den Merkmalen und Toleranzen der einzelnen Komponenten und Module. Der KC Flowdown wird top-down erstellt, indem die Kundenforderungen immer weiter in messbare KC aufgespalten werden, bis die Ebene der Fertigungstoleranzen erreicht ist. (Müller et al. 2012, S.99) Der fertige KC Flowdown ist eine hierarchische Baumstruktur, wobei nur die top-level KC permanent sind, während die anderen KC variieren, bspw. durch unterschiedliche Modulgrenzen oder Montagesequenzen. (Whitney 2004, S.23-24)

Die KC werden in drei Gruppen eingeteilt. Performance Key Characteristics (PKC) sind top-level KC, direkt mit der Kundenforderung verknüpft und verändern sich nicht. Assembly Key Characteristics (AKC) werden in der Montage realisiert und garantieren die Merkmale für den nächsten Montageprozess. Manufacturing Key Characteristics werden schließlich in der Fertigung realisiert und beschreiben grundlegende Merkmale wie die Geometrie einzelner Elemente. (Müller et al. 2012, S.99)

Für das Schneckengetriebe ergeben sich folgende KC: Das Performance Key Characteristic ist die Lage des Tragbildes auf der Zahnflanke. Das Tragbild ergibt sich aus Achskreuzwinkel, axiale Verschiebung des Schneckenrades und dem Abstand der beiden Wellen zueinander. Diese drei Kriterien stellen die AKC dar. MKC sind die



tolerierten Fertigungsmerkmale des Gehäuses, der Lager, der Schneckenwelle und des Schneckenrades. Die MKC sind im Beispiel des Bonfiglioli Getriebes teilweise in Fertigungszeichnungen, teilweise durch Normen festgelegt.

Ein Benchmark unterschiedlicher Schneckengetriebe unterschiedlicher Hersteller zeigt, dass alle Schneckengetriebe ähnlich aufgebaut sind, gleiche KC und sehr ähnliche KC Flowdowns besitzen. Das Getriebe des Projektpartners Bonfiglioli ist als Beispiel gut geeignet, da der Vergleich zeigt, dass es durchschnittlich bezüglich Größe, Teilezahl, etc. abschneidet.

Aufstellen der Toleranzketten

Die weitere Detaillierung der Zusammenhänge der Toleranzen geschieht mithilfe von Toleranzketten. Toleranzketten bilden die Grundlage zur Beantwortung der Fragen „Welche Toleranzen und Abweichungen beeinflussen meine KC?“ (Qualitative Analyse) und „Sind die Werte die für einzelne Toleranzen festgelegt wurden passend?“ (Quantitative Analyse). Zur Beantwortung der beiden Fragen werden die Toleranzketten mit einem KC als Schließtoleranz aufgestellt und anschließend berechnet. Toleranzketten dienen wie Maßketten der Visualisierung und Berechnung. Im Gegensatz zu Maßketten werden in Toleranzketten jedoch auch nicht-geometrische Abweichungen und Toleranzen dargestellt. Dabei repräsentieren die Knoten der Toleranzkette Merkmale des Produktes, während die Kanten Prozessunsicherheiten sowie die Toleranzen bzw. Abweichungen zwischen zwei Merkmalen beschreiben. Die Visualisierung der Toleranzzusammenhänge, auch die Kombination von Produkt- und Prozesstoleranzen, dient als Grundlage für interdisziplinären Diskussion und das systematische Erkennen von Optimierungspotenzial durch die Aufteilung eines Gesamtsystems in kleinere Subsysteme. (Müller et al. 2012, S. 100)

Eine qualitative Toleranzkette aus dem Forschungsprojekt ist beispielhaft in Abbildung 3 unten rechts dargestellt. Ausgehend vom KC „Verkippung Schneckenrad“, das vom KC „Achskreuzwinkel“ abgeleitet ist wird die Toleranzkette mit den Elementen Punkt 1 an der Welle, den beiden Lagern mit Lagerinnenring und Lageraußenring, den Gehäusebohrungen für Lager und Deckel sowie der Bohrung für das Lager im Gehäusedeckel aufgestellt. Die Abweichungen zwischen den Knoten sind bspw. der Durchmesser der Lageraußen- und Innenringe sowie die Koaxialität der Bohrungen im Gehäuse für die Aufnahme der Lager und des Deckels.

Quantitative Analyse der Toleranzketten

Ziel der quantitativen Analyse der Toleranzkette ist die zahlenmäßige Ermittlung der Schließtoleranz bzw. des KC der Toleranzkette, d.h. die Beantwortung der Frage ob bei den gegebenen Bauteil- und Zusammenbautoleranzen die gewünschte Zusammenbautoleranz erfüllt wird. Zur quantitativen Analyse der Toleranzketten stehend drei Verfahren zur Auswahl: die arithmetische (Worst-Case-) Rechnung, die analytische statistische Rechnung und die numerische statistische Rechnung (Bohn und Hetsch 2013, S.38). Im Gegensatz zur arithmetischen (Worst-Case-) Rechnung wird bei der statistischen Berechnung mit einbezogen, dass der Fall dass alle Toleranzen



gleichzeitig ihren schlechtesten Wert annehmen nur sehr selten eintritt. Außerdem beachtet die statistische Berechnung, dass sich die Verteilung der Schließtoleranz bei langen Prozessketten an die Normalverteilung annähert, auch wenn die Abweichungen der Einzeltoleranzen aus einer nicht-normalverteilten Menge stammen.

Die analytische Worst-Case-Rechnung wird deswegen nur unter der Prämisse angewandt, dass keine Möglichkeit zur Nacharbeit besteht, das Schließmaß zu 100% erreicht werden muss und bei einfachen geometrischen Zusammenhängen. Für die Berechnung werden jeweils die ungünstigsten Extremwerte der Abweichungen aufaddiert, d.h. die Summentoleranz ist gleich die Summe aller Einzeltoleranzen. Die Berechnung kann per Hand oder Excel-gestützt passieren. Dies hat sehr enge Toleranzgrenzen für die Einzelteile zur Folge, welche meist die Kosten in die Höhe treiben. Die Berechnung ist einfach, unterliegt jedoch einer eingeschränkten Genauigkeit und ist realitätsfern. Deswegen wird sie in der Praxis mehr zur Schaffung eines grundlegenden Verständnisses der Zusammenhänge verwendet. (Jorden und Schütte 2014)

Auch im Projekt wurde die arithmetische Analyse zur Schaffung eines grundlegenden Verständnisses und zur Ermittlung der Größenordnung genutzt, in der die Schließtoleranzabweichungen liegen. Bei der Analyse ergab sich für die axiale Verschiebung ein Worst-Case-Wert von 0,518mm und für den Achskreuzwinkel eine maximale Abweichung von 0,1766° für den Worst Case bei eingehaltenen Einzelbauteiltoleranzen.

Die arithmetische Analyse zeigte außerdem, dass ca. 2/3 der Schließmaßabweichungen durch Toleranzen des Gehäuses verursacht werden. Ein weiteres Viertel der Abweichungen ist in Toleranzen der Lager und Passungen begründet. Fertigungstoleranzen der Welle spielen nur eine untergeordnete Rolle.

Um realitätsnähere Analyseergebnisse zu erhalten, wird die statistische Analyse genutzt. Idee ist dabei, dass nicht nur die Randwerte eines Toleranzfensters auftreten, sondern dass die tatsächlichen Abweichungen innerhalb eines Toleranzfeldes einer bestimmten Verteilung unterliegen. Die analytische statistische Rechnung geht dabei von normalverteilten Einzeltoleranzen aus. Die Rechnung ist damit einfach und erreicht eine mittlere Genauigkeit. In der Praxis ist diese Analyseart für einfache Zusammenhänge weit verbreitet. Tatsächlich liegen die Werte eines Toleranzfensters nicht immer in einer Normalverteilung vor und insbesondere bei Mittelwertverschiebungen der Prozessabweichungen liefert die analytische statistische Rechnung falsche Ergebnisse. (Bohn und Hetsch 2013, S. 38-41)

Die numerische statistische Rechnung unterliegt keinen Randbedingungen wie bestimmten Verteilungen und die Ergebnisse sind realitätsnah und genau. Die betrachteten Beziehungen können zudem beliebig kompliziert sein. Allerdings ist der Aufwand für die Analyse hoch und die Analyse nicht mehr ohne Rechnerunterstützung durchführbar. Außerdem gilt immer noch: Besitzen die realen Prozesse eine sehr große Mittelwertverschiebung liefert die Analyse ungenaue Ergebnisse. (Bohn und Hetsch 2013, S. 38-41) Bei der numerischen statistischen Analyse werden die einzelnen



Fertigungsverteilungen miteinander addiert, also miteinander gefaltet. Dabei kommen zwei Effekte zum Tragen: Bei den Verteilungen der einzelnen Merkmale können statt der idealen Normalverteilung auch realistischere Verteilungen wie eine Trapezverteilung oder eine Rechteckverteilung angenommen werden. Zudem greift der zentrale Grenzwertsatz der Statistik: je länger die Toleranzkette und je mehr Verteilungen miteinander gefaltet werden, desto mehr nähert sich die resultierende Verteilung an die Normalverteilung an. Diese beiden Aspekte machen die numerische statistische Analyse so realitätsnah. Dabei markiert die Rechnung nur mit der Rechteckverteilung den „statistischen Worst-Case“, da die Rechteckverteilung beschreibt, dass alle Abweichungen eines Toleranzfensters mit der gleichen Wahrscheinlichkeit auftreten. Die Rechnung mit nur normalverteilten Abweichungen ist der Idealfall.

Im Forschungsprojekt werden deswegen zwei numerische statistische Analysen durchgeführt, um sehr realitätsnah den schlechtesten und den besten Fall für die Schließtoleranzen zu ermitteln. Die tatsächlichen Abweichungen der Schließtoleranz müssen zwischen diesen beiden berechneten Werten liegen. Zur Berechnung der Faltungen wird die Software simTol genutzt, die neben der Faltung die Ermittlung von Hauptbeitragsleister einer Toleranzkette unterstützt. Bei einer angenommenen Rechteckverteilung der Einzeltoleranzen ergibt sich bei der Analyse des Schneckengetriebes eine axiale Verschiebung von 0,465mm sowie ein Achskreuzwinkel von 0,1622°. Werden die zugrundeliegenden Verteilungen der Toleranzen alle als normalverteilt angesehen ergeben sich eine axiale Verschiebung von 0,365mm und ein Achskreuzwinkel von 0,1600°. Die Ergebnisse der unterschiedlichen Analyseansätze sind in Abbildung 4 dargestellt.

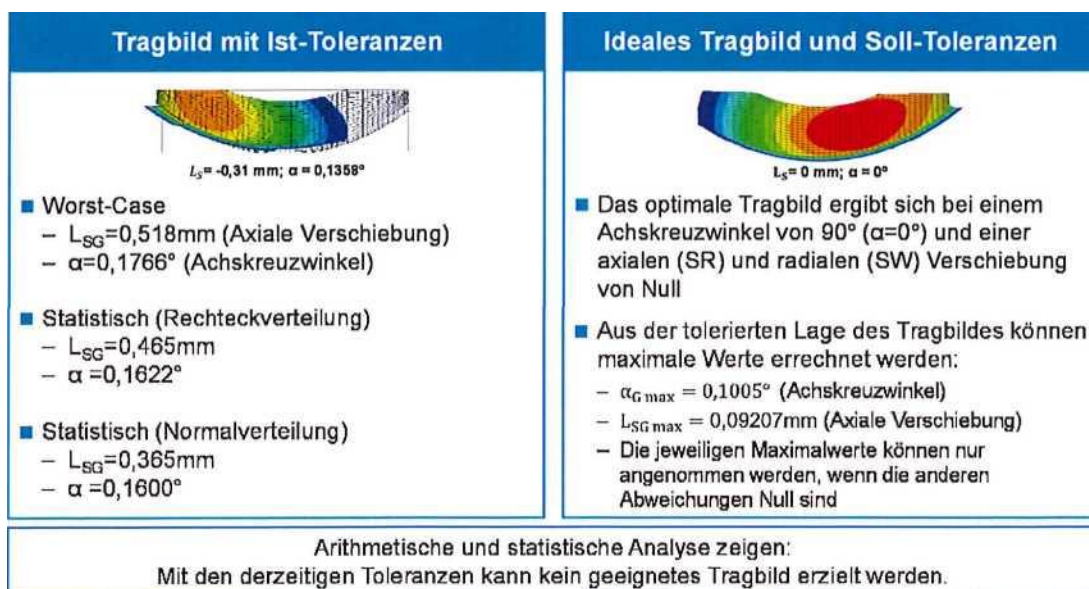


Abbildung 4: Vergleich der Analyseergebnisse bei unterschiedlichen Analyseverfahren

Die Berechnung der Hauptbeitragsleister zeigt zudem, wie schon in der arithmetischen Analyse, dass vor allem die Toleranzen des Gehäuses und die Toleranzen der Lager zur



Größe der Schließtoleranzen beitragen. Dies gilt übergreifend für alle Toleranzketten und alle KG.

Ermittlung Soll-Werte

Die Ermittlung der Soll-Werte für die axiale Verschiebung und den Achskreuzwinkel geschah über die Simulation des Tragbildes und die Rückwärtsrechnung auf die KC.

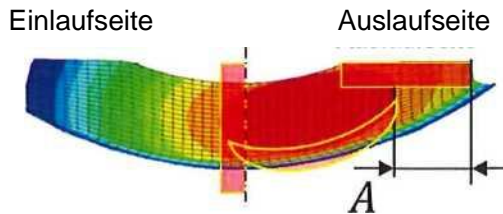


Abbildung 5: Abstand A zur Beschreibung des Tragbildes

Abbildung 5 zeigt mit den roten Kästen die Begrenzungen einer optimalen Lage des Tragbildes. Das Tragbild darf nicht zu nah am Zahnfuß liegen, da sonst Zerrüttungserscheinungen auftreten. Liegt das Tragbild zu nah an der Einlaufseite ist die Gefahr eines Schmierfilmabrisses gegeben. Als besonders wichtig wird der Abstand des Tragbildes zur Auslaufseite angesehen, da bei zu kleinem Abstand Kantentragen eintritt, was schließlich zum Versagen führt. Weil dieser Abstand besonders wichtig ist, dient er zu Beschreibung der Lage des Tragbildes und wird mit dem Buchstaben A bezeichnet. Wird der Abstand A eingehalten, werden im Allgemeinen auch der Abstand zum Zahnfuß und der Abstand zur Einlaufseite eingehalten. Durch Expertenwissen in Zusammenarbeit mit wzl und RUB wurde die tolerierbare Lage des Tragbildes und somit ein tolerierbarer Wert für den Abstand A festgelegt. Durch systematische Variation der beiden Parameter „Axiale Verschiebung“ und „Achskreuzwinkel“ und die Beobachtung deren Auswirkung auf das Tragbild wurden schließlich tolerierbare Werte für die beiden KC festgelegt. Der minimale Wert für A ist demnach 3mm. Daraus ergeben sich ein maximaler Wert für die axiale Verschiebung von 0,09207mm und ein maximaler Wert für den Achskreuzwinkel von 0,1005°, wobei die Werte jeweils nur gelten, wenn der andere Wert null ist. Die Simulation ergab zudem, dass eine Veränderung der axialen Verschiebung um 0,005mm eine Verschiebung des Tragbildes Richtung Auslaufseite von 0,101mm ergibt. Eine Veränderung des Achskreuzwinkels um 0,01° resultiert in einer Verschiebung des Tragbildes um 0,185mm. Das Tragbild reagiert also sehr sensitiv auf Veränderung der KC, teilweise war der Einfluss von Parameterkombinationen der KC so groß, dass auf der Zahnflanke kein Tragbild mehr zu sehen war.

Der Vergleich der Soll-Werte und der in verschiedenen Analysen ermittelten Ist- Werte für die KC „Axiale Verschiebung“ und „Achskreuzwinkel“ zeigen, dass mit den aktuellen Fertigungstoleranzen kein Tragbild erzielt werden kann, das eine Stahl-Stahl-Paarung ermöglicht.



Analyse der Montageprozesse

Arbeitsplatz 1	Arbeitsplatz 2	Arbeitsplatz 3	Arbeitsplatz 4
Presse 1	Presse 2	Presse 3	Presse 4

Abbildung 6:
Schematischer
Aufbau der Ge-
triebemontage

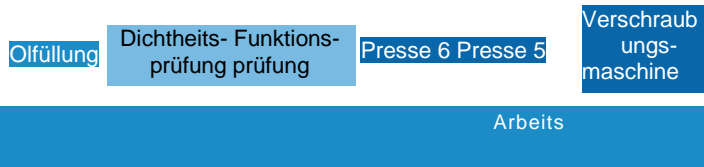


Abbildung 6 zeigt schematisch den Aufbau der Schneckentriebmontage bei Bonfiglioli. Die Montage besteht aus sechs manuellen Arbeitsplätzen, sowie sechs automatisierten Pressstationen. Die Verschraubungsmaschine fügt den Deckel des Getriebes und verschraubt alle Schrauben gleichzeitig. Die Stationen sind ringförmig über ein Transportband verbunden. Im Inbetriebnahmebereich finden eine Funktionsprüfung, eine Dichtheitsprüfung und die Ölbefüllung statt. Bei der Funktionsprüfung wird manuell überprüft, ob sich Schneckenwelle und Schneckenrad gegeneinander drehen lassen. Die Dichtheitsprüfung erfolgt pneumatisch und automatisiert. Weitere Justageprozesse oder Funktionsprüfungen finden bisher nicht statt.

10.4. Toleranzgerechte Produkt- und Prozessgestaltung für Stahl-Schneckengetriebe

Aus der vorangegangenen Analyse können Rückschlüsse gewonnen werden, inwiefern das existierende Produkt Bronzeschnecke und die zugehörigen Prozesse angepasst werden müssen, um ein Schneckengetriebe mit Stahlschneckenrad zu realisieren. Dabei werden jeweils aus der Analyse Optimierungspotenziale abgeleitet, Konzepte für die Optimierung erstellt und ggf. kombiniert. Auch werden die Wechselwirkungen beachtet, denn die Festlegung einer Toleranz ist ein Kompromiss zwischen der Funktion eines Produktes, den Herstellungskosten und den verfügbaren Produktionsverfahren (Müller et al. 2009, S. 632). Im Forschungsprojekt wurden drei große Optimierungsthemen aufgegriffen: die Anpassung der Fertigungstoleranzen, die Anpassung der Konstruktion des Getriebes und eine Änderungen in der Prozesskette. Alle Optimierungen zielen auf eine Veränderung der Toleranzkette, weshalb die Auswirkungen der einzelnen Änderungen an dieser gezeigt werden.

Toleranzkettenoptimierung

Grundsätzlich stehen zwei Arten der Toleranzkettenoptimierung zur Verfügung: Eine Verkürzung der Toleranzkette entspricht einer Steigerung der Genauigkeit der Schließtoleranz bzw. des zugehörigen KC. Zudem kann die Toleranzkette wechselseitig verändert werden, was zu keiner Veränderung der Schließtoleranz führt, aber die Effizienz einer Toleranzkette erhöht. Für jede Änderung der Toleranzkette gilt, dass bei einer Änderung eines Kettenglieds immer auch eine Änderung an einer anderen Stelle der Toleranzkette ausgelöst wird (Bohn und Hetsch 2013, - • S. 85).

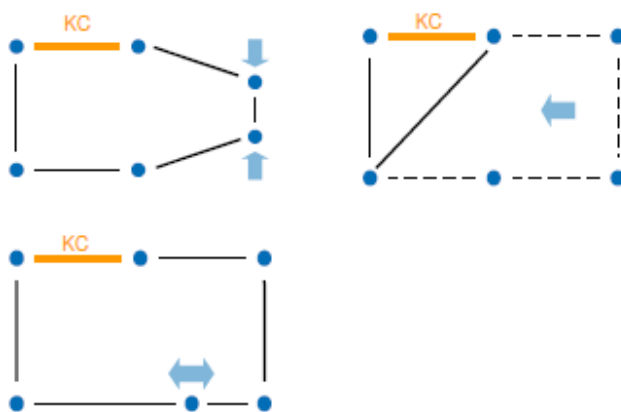


Abbildung 7:
Toleranzkettenoptimierungen;
oben links: Verkürzung eines
Gliedes; oben rechts:
Eliminierung mehrerer
Glieder; unten: Wechselseitige
Änderung von Gliedern

Eine Verkürzung der Toleranzkette kann auf zwei verschiedene Arten passieren. Zum einen verkürzt eine Reduktion der Länge eines einzelnen Gliedes die Länge der gesamten Toleranzkette. Die Reduktion der Länge einzelner Glieder in der Toleranzkette entspricht der Verringerung der Abweichung zwischen zwei Merkmalen. Die Verkürzung einzelner Glieder ist in der Toleranzkette leicht zu sehen, aber in der Realität nicht immer leicht umzusetzen bzw. durch hohe Kosten nicht immer optimal für das Gesamtsystem. Die Verkürzung einzelner Glieder entspricht im Forschungsprojekt einer Anpassung der Fertigungstoleranzen. Die zweite Möglichkeit ist die Verringerung der Anzahl der Glieder. Die Reduktion der Anzahl der Glieder entspricht der Eliminierung von Abweichungen bzw. Merkmalen. Die Möglichkeiten zur Verringerung der Anzahl der Glieder sind im Gegensatz zur Verkürzung der Glieder nicht intuitiv erkennbar, erbringen jedoch bei ihrer Durchführung oftmals größere Verbesserungen für das Gesamtsystem. Im Projekt wird die Verringerung der Anzahl der Glieder durch die Integration eines Justageprozesses realisiert. (Müller et al. 2009, S. 636)

Die wechselseitige Änderung zweier Glieder ändert die Effizienz einer Toleranzkette. Die Reduktion der Länge eines Kettengliedes in Kombination mit der Verlängerung eines anderen Kettengliedes dient nicht zur Erhöhung der Genauigkeit des Systems. Diese Art der Optimierung steigert vielmehr die Effizienz des Gesamtsystems, wenn die Verkürzung eines Glieds weniger kostet, als die Verlängerung eines anderen Gliedes einspart. In Kombination mit der Verkürzung einzelner Glieder ist die wechselseitige Änderung zur Genauigkeitssteigerung einsetzbar: Wenn die Verkürzung eines Gliedes die Systemgenauigkeit steigert, diese technisch aber nicht realisierbar oder aber mit zu

020 Axiale (bezogen auf SR) Verschiebung 020-1 Sonst Funktion in XY Richtung Pareto-Analyse

Funktionsmaßgruppe*	020 Axiale Ifoeragen auf SR) Verschiebung	Berechnungsmodus:	statistische Analyse	Erstellung Letzte	14.04.2016
QualiUiUmtrmal	020-1 Sonst Funktion «n XY Richtung	Vorgabe Q-Merkmal:	Nennmaß = 0.000	Änderung	14.04.2016
Bearbeiter / Abteilung	Oberes Abmaß « 0.000 Unteres Abmaß = 0.000			Drucrdatum:	13.04.2016
EmtrVung Dateiname.	USER 020-1 K BP 1C0413 XY 1-1 Axiale (berogen auf SR) Verschiebung ana			Pareto-Analyse	1/1 (2/4)

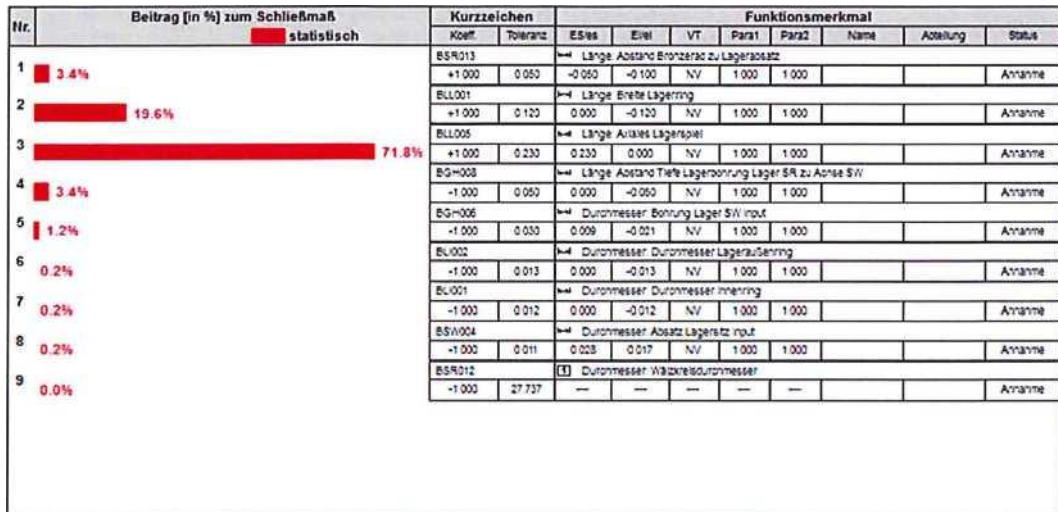


Abbildung 9: Pareto-Analyse zur Ermittlung der Hauptbeitragsleister

Die Toleranzketten der Bronzeschnecken zeigen, dass die Fertigungstoleranzen im Mittel auf ein Fünftel verkleinert werden müssen. Einige Toleranzen können gut angepasst werden, wie die Fertigungstoleranzen an Gehäuse, Deckel und Wellen. Andere Toleranzen können nur in Grenzen angepasst werden (Normteile Lager) oder sind sogar erwünscht (Axialspiel der Lager).

Deswegen sollten bei einer Stahlschnecke die Toleranzen am Gehäuse kleiner gewählt werden; andere Toleranzen können gleich gewählt werden, da sie entweder nicht sinnvoll verändert werden können oder keinen signifikanten Einfluss auf die KC haben.

Anpassung des Konstruktionskonzepts

Die Analyse des bestehenden Toleranzkonzepts an einer Bronzeschnecke zeigt zum einen, dass eine isolierte Verkleinerung der Toleranzen nicht zielführend ist und zum anderen, dass bei einer Stahlschnecke ein neues Konstruktionskonzept wünschenswert ist. Dies betrifft insbesondere die Referenzen der Gehäusetoleranzen zueinander und das Lagerkonzept für Schneckenrad und Schneckenwelle.

Für die optimale Lage des Tragbildes ist vor allem die Lage der Schneckenwelle und des Schneckenrades zueinander wichtig. Insbesondere die Lage der Bohrungen für die Aufnahme der Lager und der Wellen sind für die Ausrichtung der Wellen zueinander verantwortlich. Dementsprechend müssen die Bohrungen im Gehäuse so genau wie möglich zueinander ausgerichtet werden. Eine direkte Tolerierung windschiefer Wellen zueinander ist aus fertigungstechnischer Sicht schwierig. Ein neues Konstruktionskonzept sollte dem Rechnung tragen, indem auf durchgehende

Referenzpunkte und -flächen geachtet wird. Als Referenzfläche bieten sich die Oberseite- oder die Unterseite sowie eine Seitenfläche des Gehäuses an.

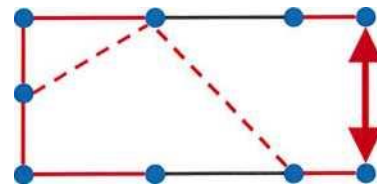
Das Lagerkonzept für Schneckenrad und Schneckenwelle zeichnet sich derzeit zwar durch seine Einfachheit aus, lässt aber auch ein hohes axiales Spiel zu. Das axiale Spiel der Lager ist zwar einerseits gewünscht, um Temperaturschwankungen auszugleichen. Andererseits trägt das axiale Spiel zur Verschiebung des Tragbildes bei, was insbesondere bei einer Stahl-Stahl-Paarung nicht erwünscht ist. Den großen Einfluss zeigt auch die Pareto-Analyse, siehe Abbildung 9. Deswegen ist bei einer Anpassung des Konstruktionskonzepts die Wahl eines anderen Lagerkonzepts als bisher empfehlenswert. Bei der Nutzung von Kegelrollenlagern kann das Axialspiel von derzeit ca. 0,23mm auf ca. 0,03mm reduziert werden. Die Reduzierung hat z.B. wiederum positive Auswirkungen auf die axiale Verschiebung des Schneckenrades und somit auf die Lage des Tragbildes hat.

Anpassung der Prozesskette: Einführung eines Justageprozesses

Die Anpassung der Prozesskette in der Montage bedeutet im Fall der Schneckengetriebeproduktion die Aufnahme eines Justageprozesses und ggf. zudem die Aufnahme einer Funktionsprüfung in die Inbetriebnahme des Getriebes. Die Analyse der Montageprozesse zeigt, dass bisher weder Justage noch eine Funktionsprüfung genutzt werden.

Justage bedeutet die Veränderung einzelner Produktmerkmale, sodass „es die für die gewünschte Funktion des gesamten technischen Gebildes oder Verfahren notwendigen Kennwerte bekommt.“ (Hansen 1967, S.20) Justageprozesse sind geplant und vorgesehen, im Gegensatz zur Nacharbeit. Die Justage entspricht der Optimierung der Toleranzkette durch die Verringerung der Anzahl der Toleranzkettenglieder.

Abbildung 10: Optimierung der Toleranzkette durch Verringerung der Anzahl der Glieder durch Justage (gestrichelte Linien)



Bei der Justage wird der Wert des KC auf einen bestimmten Wert eingestellt. Die Streuung der Prozessergebnisse der statistischen Montage wird durch die Streuung der Justage ersetzt, wobei die Streuung der Justageergebnisse sehr viel geringer ausfällt. (Warnecke 1996, S.221) Der geringeren Streuung stehen wiederum die erhöhten Kosten die durch die Einführung eines Justageprozesses entstehen gegenüber. (Warnecke 1996, S. 239)

Justageprozesse können grundsätzlich in zwei unterschiedliche Arten aufgeteilt werden. Bei der passiven Justage erfolgt keine Messung der Produktmerkmale. Die Merkmale/KC werden auf einen immer gleichen Wert eingestellt, bspw. durch eine Vorrichtung. Vorteile der passiven Justage durch Vorrichtungen sind die gezielte Referenzierung der Bauteile und ihre Einfachheit. Als Nachteile ergeben sich die aufwändige Bedienung der Vorrichtung und die Möglichkeit der falschen Nutzung. (Leuschel 2013, S.5-6) Bei der aktiven Justage kommen Messmittel zum Einsatz. Die

Abweichung des Ist-Wertes vom Soll wird gemessen und auf dieser Basis das Merkmal justiert. Die aktive Justage wird häufig durch das Vorsehen von Einstellungsmöglichkeiten am Produkt realisiert. Durch die Einstellung werden vorangegangene Abweichungen ausgeglichen und es werden alle bis zur Justage noch offenen Freiheitsgrade entzogen. Vorteile der aktiven Justage durch Einstellen sind die Eignung auch für schwierige Toleranzsituationen und die Möglichkeit direkt auf KG einzuwirken. Als Nachteile ergeben sich der hohe Aufwand durch den benötigten Messprozess und die Prozessstreuung die bei der Justage entstehen, (vgl. Leuschel 2013, S. 6)

Zunächst erscheint die Einführung eines Justageprozesses viel Aufwand. Die Einführung ist jedoch wirtschaftlich, wenn

- nachträglich große Veränderungen der KC nötig sind,
- eine weitere Verkleinerung der Fertigungstoleranzen technisch nicht mehr möglich ist
- eine weitere Verkleinerung der Fertigungstoleranzen unwirtschaftlich ist oder nur einzelne Module und Teile des Produktes angepasst werden können.

Im Forschungsprojekt ist die Einführung eines Justageprozesses sinnvoll, weil sich ein neues KC ergibt („Lage des Tragbildes“) und eine weitere Verkleinerung der Fertigungstoleranzen wirtschaftlich nicht für alle Toleranzen sinnvoll ist.

Die Justage eines Schneckengetriebes kann durch mehrere mögliche Prozesse geschehen. Einen Überblick gibt Abbildung 11.



Bildquellen: Hesse,

Abbildung 11: Übersicht der Justagemöglichkeiten eines Schneckengetriebes

Bei der Justage des Schneckengetriebes müssen radiale und axiale Abweichungen des Schneckenrades und der Schneckenwelle ausgeglichen werden. Als drei Justagemöglichkeiten wurden der Einsatz von Passscheiben und/oder der Einsatz von Exzenterbuchsen in einer aktiven Justage sowie die Nutzung einer Vorrichtung in einer



passiven Justage identifiziert. Die Messung für die aktive Justage kann mithilfe von Tuschierpaste oder flankenspielorientiert stattfinden.

Die Justage durch Passscheiben gleicht axiale Abweichungen der Wellen aus. Bei der bisherigen Konstruktion von Schneckengetriebegehäusen ist die Axialverschiebung der Räder die einzige durch das Gehäuse zugelassene Justagemöglichkeit (Warnecke 1996, S. 252). Vorteile dieser Justageart sind die Automatisierbarkeit, die Möglichkeit des Einsatzes relativ günstiger Normteile und die Möglichkeit der Justage ohne Anpassung der Gehäusekonstruktion. Nachteil ist der hohe Messaufwand. Für eine optimale Justage muss die Justage durch Passscheiben zudem mit einer Justage für die radialen Abweichungen kombiniert werden.

Die Justage durch Exzenterbuchsen gleicht radiale Abweichungen der Wellen aus. Die Exzenterbuchsen die für diese Justageart benötigt werden, muss die Konstruktion des Getriebegehäuses für den Einsatz von Exzenterbuchsen vorgesehen werden. Die Vorteile der Justage durch Exzenterbuchsen ist die Möglichkeit der schnellen Einstellung und Nachstellung und die stabile Verbindung. Nachteile sind wiederum der hohe Messaufwand und die Notwendigkeit einer Anpassung der Konstruktion des Getriebegehäuses.

Die passive Justage durch eine Vorrichtung kann gleichzeitig axiale und radiale Abweichungen der Wellen ausgleichen. Zudem wird keine Messeinrichtung benötigt. Neben diesen beiden Vorteilen ist die Justage durch eine Vorrichtung außerdem schnell und reproduzierbar. Dem gegenüber steht der Nachteil der sehr aufwändigen Konstruktion der Vorrichtung.

Bei den beiden Arten der aktiven Justage muss zudem ein Messprozess eingeführt werden. Die Messung kann durch die Verwendung von Tuschierpaste geschehen oder durch die flankenspielorientierte Justage.

Die eigentliche Messung und Beurteilung des Tragbildes geschieht bei der Verwendung von Tuschierpaste durch den Menschen. Die Tuschierpaste wird dabei auf die Zahnflanken aufgetragen und das Getriebe läuft danach einige Umdrehungen mit oder ohne Last. Die Tuschierpaste wird während des Laufs auf den Wälzpartner übertragen bzw. an den Stellen mit der höchsten Pressung abgetragen. Die Beurteilung erfolgt anschließend durch den Menschen. Dadurch ergeben sich direkt die Nachteile dieser Messmethode: die subjektive Beurteilungskraft des Menschen und der Bedarf an geschulten Mitarbeitern. Als Vorteile ist die direkte Beurteilung des Tragbildes zu nennen. (Warnecke 1996, S. 252)

Im Gegensatz dazu wird bei der flankenspielorientierten Messung das Spiel zwischen den Zähnen des Getriebes als Ersatzkriterium für die Lage des Tragbildes genutzt. (Warnecke 1996) Dabei wird bei der Justage das Verdrehflankenspiel als Kurve aufgenommen. An dem Punkt des höchsten Flankenspiels ist das Getriebe optimal justiert, da in diesem Punkt die Flanken der Zahnräder optimal gegenüber liegen.

Im Hinblick auf die Vor- und Nachteile der unterschiedlichen Justagemöglichkeiten wird die Justage durch eine Vorrichtung empfohlen. Insbesondere weil für ein Schneckengetriebe mit Stahlrad Konstruktionsanpassungen nötig werden. Im Zuge

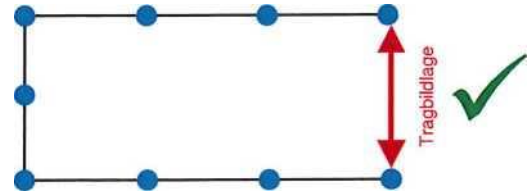
dieser Anpassungen können die Wellen und das Gehäuse so gestaltet werden, dass die Justage über eine Vorrichtung möglich ist.

Anpassung der Prozesskette: Einführung einer Geräuschprüfung

Im Gegensatz zu den bereits vorgestellten Möglichkeiten der Toleranzkettenoptimierung verändert die Einführung einer Funktionsprüfung die Toleranzkette nicht. Die Funktionsprüfung stellt nur sicher, dass das angestrebte KC in tolerierbaren Grenzen erzielt wird, (siehe Abbildung 12)

Abbildung 12: Sicherstellen des KC durch eine Funktionsprüfung

Funktionsprüfungen sind wie Teil der Inbetriebnahme, die typischerweise nach der Montage eines Produktes stattfindet.



Für die Prüfung der Schneckengetriebe mit einer Stahl-Stahl-Paarung bietet sich die Einführung einer Geräuschprüfung an, um die optimale Lage des Tragbildes zu garantieren. Dabei wird entweder der Schall oder die Vibrationen die von einem Getriebe ausgehen aufgenommen und analysiert. Das Wellenspektrum wird anschließend mit einem idealen Spektrum verglichen und auf bestimmte Geräuschmerkmale gefiltert. Vorteile der Prüfung durch Geräusche/Schall sind die berührungslose Messung und die Notwendigkeit nur eines Sensors. Als Nachteil ist zu nennen, dass eine Mindestdrehzahl zu Messung erreicht werden muss, ansonsten werden keine für den Schalltransport geeigneten Schwingungen produziert. Die Vorteile der Vibrationsprüfung sind die Messung direkt am Ort der Entstehung und die Möglichkeit der Messung auch bei niedrigen Drehzahlen. Der Nachteil ist die wesentlich höhere Anzahl an Sensoren die für eine Messung nötig ist.

Als weiterer Vorteil und als weiteres Potenzial ist die Verknüpfung der Ergebnisse von Geräuschprüfungen mit weiteren Qualitätsdaten der Produktion zur Ursachenbestimmung von Fehlern und somit zur kontinuierlichen Verbesserung der Produktion.

Die Geräuschprüfung wird zur Getriebeprüfung industriell genutzt, insbesondere die Verknüpfung von Prüfungsergebnissen und weiteren Qualitätsdaten ist jedoch auch Gegenstand weiterer Forschungsprojekte. Deswegen ist die Einführung einer Geräuschprüfung eher als eine langfristige Möglichkeit zu sehen.

10.5. Zusammenfassung und Ausblick

Ziel des Arbeitspakets zehn im Forschungsprojekt war die Substitution von Bronze durch Stahl durch ein auf die Stahl-Stahl-Paarung abgestimmtes Toleranzkonzept. Die Toleranzen sollten so gewählt werden, dass das Tragbild von Anfang an optimal auf der Zahnflanke liegt, ein Einlaufen somit nicht mehr nötig ist und die Einlaufeigenschaften der Bronze so überflüssig werden.

Die Forschungsergebnisse zeigen, dass dieses Ziel erreicht werden kann, jedoch Anpassungen im Vergleich zur derzeitigen Konstruktion und Toleranzvergabe stattfinden müssen. Anpassungen sind insbesondere dann nötig, wenn zukünftig Schneckengetriebe mit Stahlrad industriell und in Serie hergestellt werden sollen.

So zeigte sich, dass mit den aktuellen Toleranzen kein akzeptables Tragbild erzielt werden kann. Zudem findet derzeit weder eine Justage noch ein Funktionsprüfung statt.

Als Ergebnisse des Forschungsprojektes ergeben sich folgende Vorschläge für die Konstruktion und Produktion eines Schneckengetriebes mit Stahl-Stahl-Paarung:

Anpassung der Gehäusetoleranzen nach Beitragsleister: Die Analyse der Fertigungstoleranzen zeigte, dass vor allem Toleranzen des Gehäuses für die Abweichungen der Key Characteristics verantwortlich sind. Deswegen wird empfohlen diese Toleranzen zu verkleinern. Dazu sollte mit denjenigen Toleranzen angefangen werden, die den größten Einfluss auf das KC haben, also mit den Hauptbeitragsleistern.

Durchgängige Nutzung von Referenzflächen am Gehäuse zur Positionierung der Bohrungen im Gehäuse und somit der darin gelagerten Wellen zueinander: Da die Lage der Bohrungen direkt zueinander schwierig ist, da diese windschief im Raum stehen, sollte bspw. die Unterseite und eine Seitenfläche des Gehäuses als Referenz für die Lage der Bohrungen dienen.

« Neues Lagerkonzept für die Lagerung von Schneckenwelle und Schneckenrad: Bei der Lagerung der beiden Wellen ist insbesondere Lagerspiel für den Ausgleich temperaturbedingter Schwankungen unerlässlich. Jedoch sollte insbesondere das axiale Lagerspiel auf ein Mindestmaß reduziert werden, da es große Auswirkungen auf die Lage des Tragbildes hat. Ein neues Lagerkonzept, bspw. mit Kegelrollen- oder Schrägkugellagern, weist ein definiertes Lagerspiel auf und verringert so die Streuung der Abweichungen des Lagerspiels und des Tragbildes.

© Einführung eines Justageprozesses in der Montage: Da die Anpassung der Toleranzen als alleinige Lösung nicht zielführend ist, sollte ein Justageprozess zum Ausgleich der unvermeidbaren Abweichungen eingeführt werden. Insbesondere die Nutzung einer Vorrichtung zur Ausrichtung der Wellen zueinander bietet sich an. Eine Alternative dazu wäre die Nutzung von Passscheiben und Exzentrerschrauben in Kombination mit einer flankenspielerorientierten Messung.



- Einführung einer Funktionsprüfung: Die Einführung einer Funktionsprüfung ist eher als langfristige Lösung und Ausblick zu sehen. Jedoch ergibt sich insbesondere bei der Verknüpfung der Prüfdaten mit weiteren Qualitätsdaten ein hohes Verbesserungspotenzial.

Zudem ist auch eine Kombination der Justage und der Geräuschprüfung möglich: Die Geräuschanalyse dient als Messmittel für eine aktive Justage, die anschließend durchgeführt wird.

Zusammenfassend ist zudem festzustellen, dass durch die Verwendung eines Stahlrades ein gänzlich neues KC entstehe („Lage des Tragbildes“). Diese neue KC ist nicht mit alten sondern nur mit neuen Konzepten erzielbar. Die Erarbeitung und Umsetzung neuer Konzepte sollte in Zusammenarbeit zwischen Konstruktion und Produktion entstehen, um ein gesamtoptimales Produkt zu gestalten.

Außerdem muss erwähnt werden, dass vor allem die Kombination mit den Ergebnissen aus den weiteren Arbeitspaketen des Forschungsprojektes ein Schneckengetriebe mit Stahlrad möglich macht.

Mit Blick auf das Toleranzmanagement kann gesagt werden, dass die Anwendung und Kombination der unterschiedlichen Methoden des Toleranzmanagements im Forschungsprojekt zielführend war. Trotzdem konnte festgestellt werden, dass bisher wenige Methoden für das Toleranzmanagement bestehen und diese miteinander nicht verknüpft werden. Eine strukturierte Methodensammlung für das Toleranzmanagement und die industrielle Anwendung fehlt bisher (Krogstie et al. 2015, S. 30).

11. Oberflächenanalyse (Hochschule Niederrhein)

Verantwortlich

Hochschule Niederrhein

Ausführende Stelle

Hochschule Niederrhein

11.1. Einleitung

Die Hochschule Niederrhein übernahm im Forschungsvorhaben das Arbeitspaket 16 zur Oberflächenanalyse, welches als Bindeglied zwischen den Projektpartnern die einzelnen Fertigungsschritte bis hin zum Prototypentest begleitet. Unter der Oberflächenanalyse werden eine Vielzahl von Aktivitäten und Analyseverfahren subsummiert. Diese Arbeitsschritte wurden zu Beginn des Projektes in einzelnen Arbeitspaketen zusammengefasst und ein Standardprozess (Abbildung 10) festgelegt.

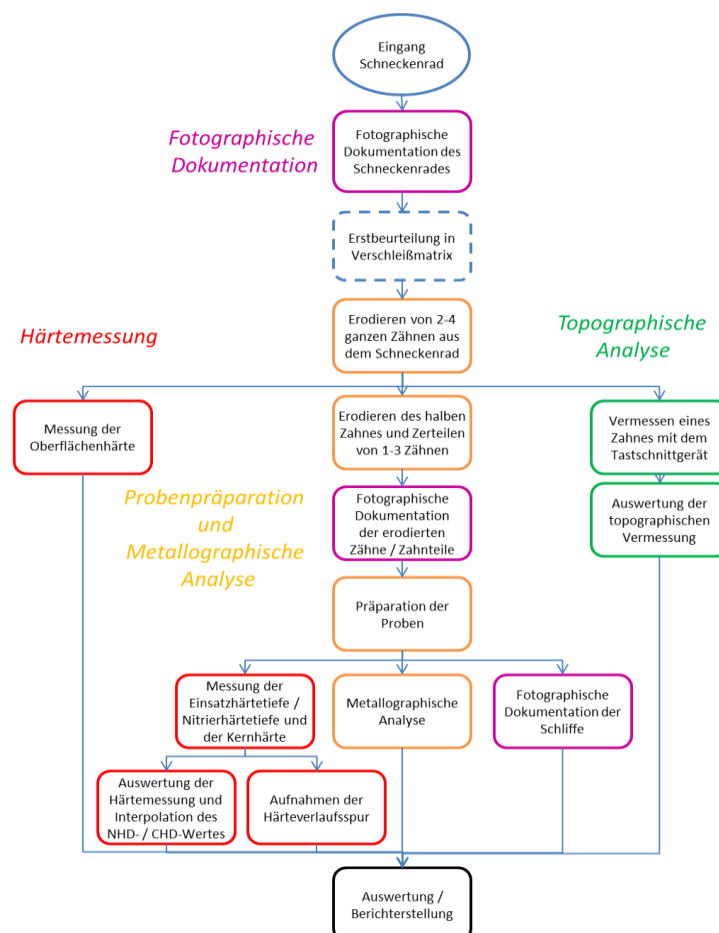


Abbildung 10: Standardprozess zur Oberflächenanalyse von Schneckenrädern

11.2. Oberflächenanalyse der gefertigten Zahnräder

11.2.1. Metallografische Analyse

Insgesamt konnte für die analysierten Schneckenräder eine gute Prozesssicherheit nachgewiesen werden. In Abbildung 11 sind die definierten Merkmale in ihrer gefundenen Intensität aufgetragen. Karbide wurden nur bei einem einsatzgehärteten Schneckenrad aus 16MnCr5 in schwach ausgeprägter Form entdeckt. Zeiligkeit wurde ebenso nur schwach ausgeprägt in wenigen Zahnrädern entdeckt. Kugelige Einschlüsse traten in der Hälfte der Zahnräder auf, jedoch zum größten Teil nur in schwacher ausgeprägter Form. Stärkere Ausprägungen konnten in drei Zahnrädern aus 42CrMo4 und einem Zahnrad aus 16MnCr5 entdeckt werden. Wellenstruktur im Gefüge wurden nahezu ausschließlich in nitrierten Zahnrädern aus 42CrMo4 entdeckt. Analog dazu wurden Unregelmäßigkeiten der Oberfläche, die als kleinere Unebenheiten, Dellen o.ä. zusammengefasst sind, zum größeren Teil in einsatzgehärteten und/oder beschichteten Zahnrädern aus 16MnCr5 entdeckt.

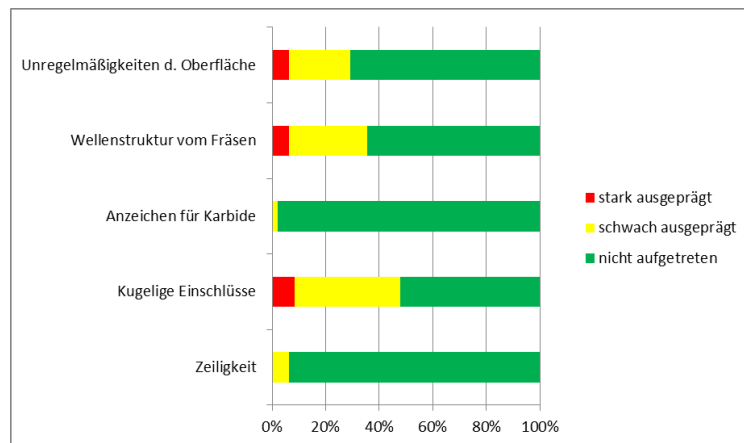


Abbildung 11: Ausprägung der Merkmale in allen Varianten

Bei den beschichteten Zahnradvarianten konnte für nitrierte Zahnräder eine mittlere Schichtdicke der Verbindungsschicht von 10,2 μm und für nitrocarburierte eine mittlere Schichtdicke von 14,2 μm ermittelt werden. Die mittlere Beschichtungsdicke schwankt für die nitrierten und nitrocarburierten Zahnradvarianten zwischen 1,2 μm und 2,2 μm . Sie liegt durchschnittlich bei 1,6 μm .

Ergebnisse der Härtemessungen

Die Härtemessungen umfassen die Messung der Oberflächenhärte, der Kernhärte sowie die Ermittlung der Einsatzhärte- bzw. Nitrierhärte tiefe einzelner Prozessschritte und fertiger Schneckenräder. Es konnte eine hohe Prozesssicherheit für alle Varianten festgestellt werden, die gemessenen Härten entsprechen weitestgehend den geplanten Werten (Oberflächenhärte für einsatzgehärtete Schneckenräder: 54 HRC, 57 HRC und 60 HRC; für nitrierte Zahnräder: 42 HRC). Es sind keine steigenden oder fallenden Tendenzen mit zunehmenden Bearbeitungsschritten sichtbar. Gemessene Schwankungen liegen innerhalb der Messtoleranz.

11.2.2. Ergebnisse der topografischen Analyse

Auf Grundlage des Rauheitsprofils lassen sich verschiedene Parameter ermitteln. Dabei ist zwischen 2D Parametern und 3D Parametern zu unterscheiden. Für die Ermittlung der 2D Parameter ist eine einzelne Profilschnittmessung ausreichend; die 3D Parameter erfordern die Vermessung einer Fläche.

In der Norm ISO 25178 werden 33 verschiedene 3D Parameter definiert. Die Parameteranzahl konnte mit Korrelationsuntersuchungen auf zehn Parameter als Prozessführungsgröße zur Charakterisierung der Zahnoberflächen reduziert werden. Eine Übersicht über die gewählten Parameter findet sich in Tabelle 4.

Bezeichnung	Parameter	Einheit	gemessener Bereich
Arithmetischer Mittelwert der absoluten Ordinatenwerte	Sa	µm	0,20 - 0,80
Kurtosis	Sku	-	3 - 25
Kern-Rauheitstiefe	Sk	µm	0,4 - 1,5
Reduzierte Spitzenhöhe	Spk	µm	0,2 - 0,8
Reduzierte Muldentiefe	Svk	µm	0,2 - 0,9
Spitzendichte der Oberfläche	Spd	1/mm ²	17 - 98
Zehn-Punkte Höhe der Oberfläche	S10z	µm	1,0 - 6,0
Autokorrelationslänge der Oberfläche	Sal	mm	0,04 - 0,12
Isotropiekoeffizient der Oberfläche	Str	-	0,06 - 0,24

Tabelle 4: Ausgewählte Prozessführungsgrößen

Es erfolgte die Analyse der Änderung der ausgewählten 3D Parameter für einzelne Prozessschritte in den verschiedenen Fertigungsketten. Die Änderung der Topographie und die Verbesserung der Oberflächengüte entlang der Bearbeitungsschritte konnte durch die Parameter dargelegt werden. Abbildung 12 stellt bspw. den Verlauf des 3D Rauheitswertes Sa dar.

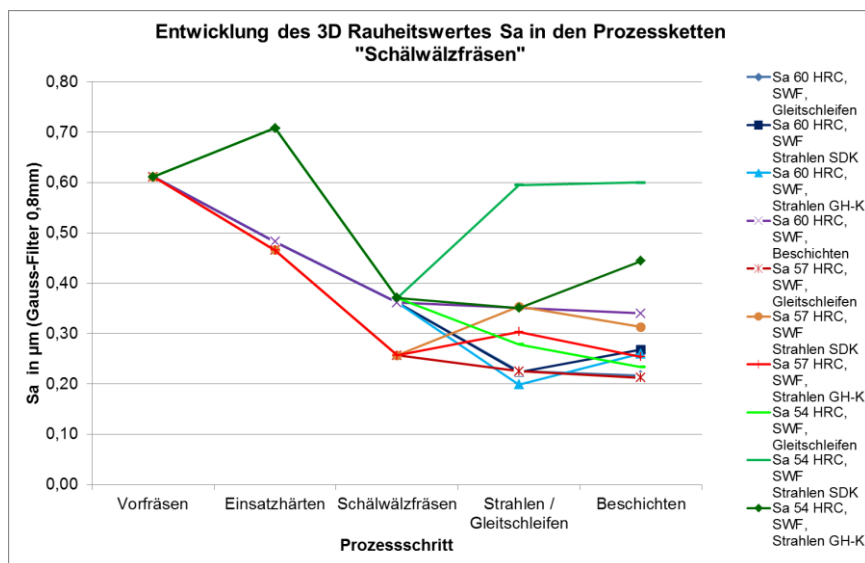


Abbildung 12: Parameterwerte Sa für die Prozessketten der schälwälzgefrästen Zahnradvarianten

11.3. Oberflächenanalysen der tribologisch beanspruchten Schneckenrädern aus den Screeningtests

11.3.1. Erstbeurteilung gelaufener Schneckenräder

Für die Erstbeurteilung getesteter Zahnflanken wurde die tiefenscharfe und hochauflösende Makrofotografie eingesetzt. Analog zur metallografischen Analyse wurde anhand von Verschleißmerkmalen und Verschleißidentitätsstufen eine kumulierende Verschleißkennzahl entwickelt, die auf einzelne Zahnflankenabschnitte (Messstellen MST 1 bis MST 6) angewandt wurden. Bei einer Differenzierung der Schneckenräder in nitrierte, beschichtete und einsatzgehärtete Räder ergeben sich aus der optischen Erstbeurteilung folgende Bilder:

In Abbildung 13 wird die gemittelte Verschleißintensität, aufgeteilt auf sechs gleich breite definierten Messstellen (MST 6: Einlaufzone, MST 1: Auslaufzone), dargestellt. Während gehärtete als auch beschichtete Räder in ihrer Verschleißintensität zum Auslaufbereich hin zunehmen, weisen nitrierte Räder ihr Maximum in MST 3 auf und korrelieren damit mit dem berechneten Tragbild (s. Abbildung 14).

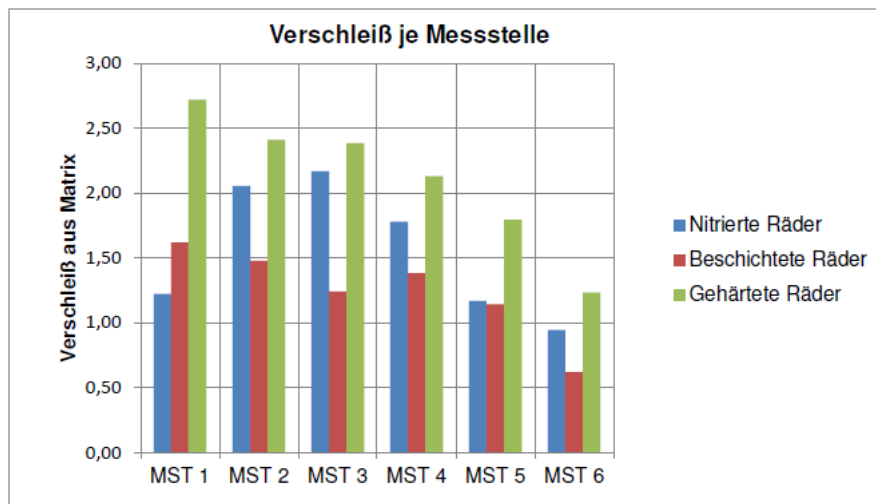


Abbildung 13: Gemittelter Verschleiß je Messstelle

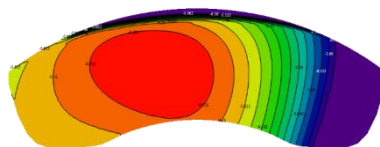


Abbildung 14: Berechnetes Tragbild des Projektpartners RUB (Ruhr-Universität Bochum)

In Abbildung 15 wurden die Ergebnisse hinsichtlich der Messstellen gemittelt und über die Verschleißtypen aufgetragen. Es zeigt sich, dass bei der Gruppe der nitrierten Zahnräder bis auf die Gratbildung alle Verschleißtypen gleichermaßen vorkommen. Weiterhin fällt auf, dass die Rissbildung fast ausschließlich in dieser Gruppe zu beobachten war, was den mechani-

schen Eigenschaften der Verbindungsschicht zugeschrieben werden kann. Die Risse auf den Zahnflanken sind quer zur Gleitrichtung und befinden sich meist in der Mitte der Zahnflanke.

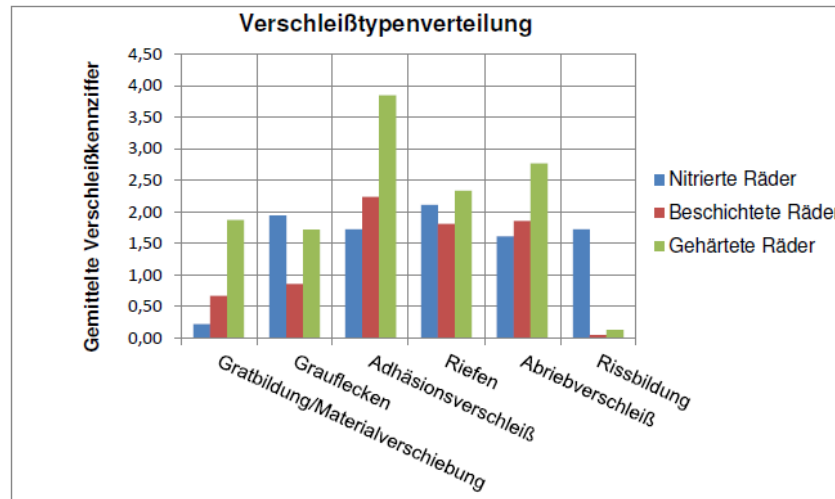


Abbildung 15: Verschleißtypenverteilung

Die beschichteten Räder spiegeln das Diagramm der gehärteten Räder in einer abgeschwächten Form wieder. Die Beschichtung ist sehr widerstandsfähig gegen mechanische Belastungen, zeigt aber bei Versagen der Beschichtung lokal sehr starken Verschleiß. Kommt es zu Spannungsspitzen, welche die Beschichtung beschädigen, zeigen sich dieselben Verschleißerscheinungsformen wie bei den gehärteten Rädern. Abgesehen von Rissbildung zeigen sich hier verstärkt Adhäsionsverschleiß, Abriebverschleiß und Riefenbildung. Gratbildung bzw. Materialverschiebung und Grauflecken sind weniger stark ausgeprägt.

Bei den gehärteten Rädern sind bis auf die Rissbildung alle Verschleißtypen stark ausgeprägt. Adhäsionsverschleiß ist am häufigsten vertreten und somit die Hauptursache für die Schädigungen der Zahnflanke. Abriebverschleiß und Riefenbildung hängen auch hier zusammen, da durch die abgetragenen Materialpartikel im Zahnkontakt weitere Riefen und somit auch weiterer Abrieb entsteht. Gratbildung und Grauflecken sind bei dieser Gruppe der Zahnräder am stärksten zu beobachten.

In Abbildung 16 sind die Verschleißkennziffern über das jeweilige Ausfallmoment (Wirkungsgrad im Prüfstand kleiner als 40%) aufgetragen und in den Bearbeitungsvarianten nitriert, beschichtet und gehärtet differenziert worden. Es ist zu erkennen, dass beschichtete Zahnflanken trotz höherer Belastungen zum Ausfallzeitpunkt einen niedrigeren Verschleiß aufweisen, wohingegen gehärtete Räder bereits bei kleinen Belastungen sehr ausgeprägt Verschleißerscheinungen aufweisen. Nitrierte Räder siedeln sich im Vergleich zwischen den beiden anderen Varianten an.

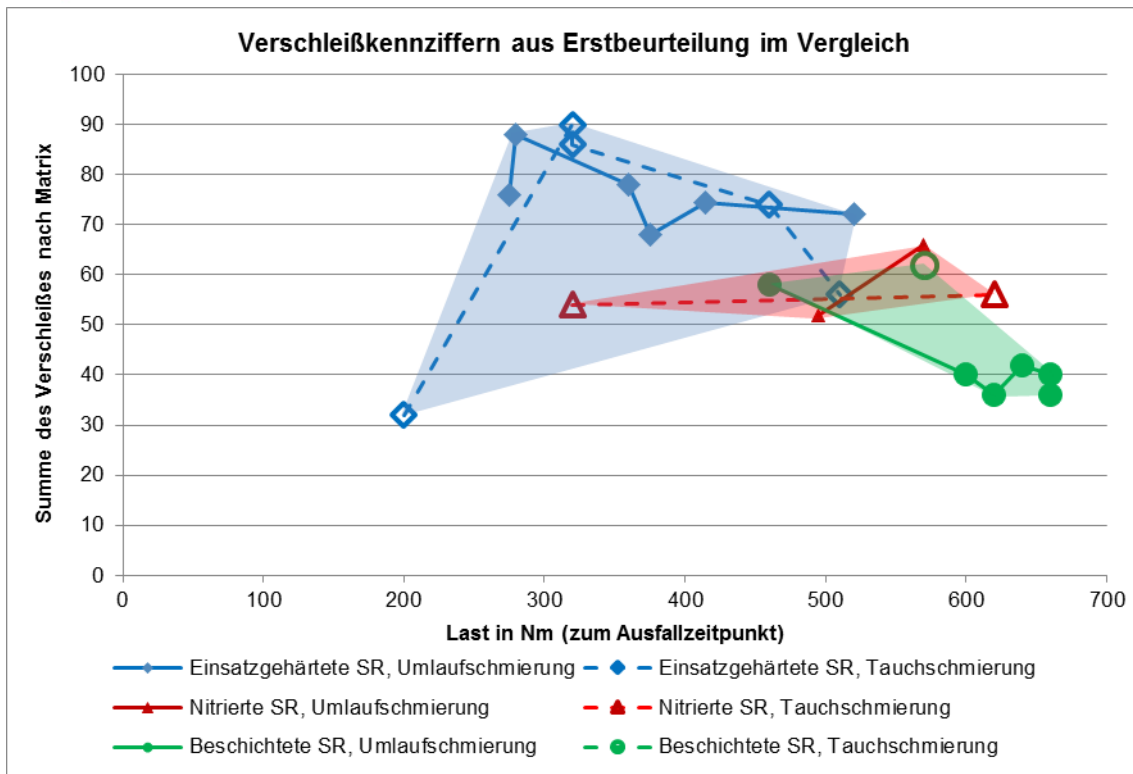


Abbildung 16: Verschleißkennziffern der Prozessvarianten

11.3.2. Metallografische Analyse der auf dem Prüfstand gelaufenen Schneckenräder

Die beobachteten Verschleißmerkmale sind analog zur Erstbeurteilung für die analysierten Schneckenräder aus den Prüfstandtests in Form einer Matrix an zuvor definierten Lagen bewertet und dokumentiert worden. Neben dem Verschleißmerkmal und dem Ort des Auftretens spiegelt die metallografische Verschleißmatrix auch die Intensität des Verschleißes wider. Für die Neuhärtungszonen gilt, dass sie bis zu einer Tiefe von 50 μm mit „1“ bewertet werden, bis zu einer Tiefe von 150 μm mit „2“ und über 150 μm mit „3“. Für alle anderen Verschleißmerkmale erfolgte die Beurteilung folgendermaßen:

- "0": Verschleißmerkmal tritt nicht auf,
- "1": Verschleißmerkmal tritt nur geringfügig auf,
- "2": Verschleißmerkmal tritt intensiv auf,
- "3": Verschleißmerkmal tritt sehr intensiv auf.

Für die nitrierten Schneckenräder (Material 42CrMo4) tritt der Verschleiß am häufigsten im unteren Zahnflankenbereich am Zahnfuß auf. Neben der Abtragung der Verbindungsschicht sind die Neuhärtungszonen, gefolgt vom Materialübertrag die Verschleißerscheinungen mit den höchsten Punktwerten.

Bei den einsatzgehärteten Schneckenrädern (Material 16MnCr5) ist der Verschleiß auf den mittleren und unteren Flankenabschnitten am höchsten. Die höchsten Punktwerte treten hier für die Neuhärtungszonen (s. Abbildung 17), gefolgt von den Anlasszonen und dem Materialübertrag auf.

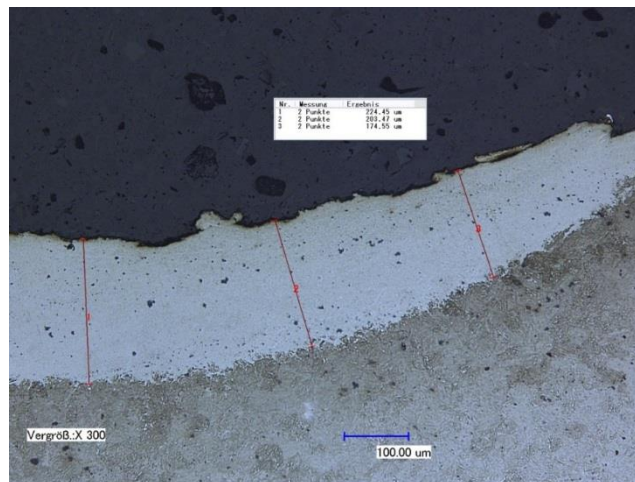


Abbildung 17: Neuhärtungszone an der rechten, unteren Flanke von einem Zahn des Schneckenrades 0354 (Variante 33: 16MnCr5, 60 HRC, schälwälzgefräst, gleitgeschliffen)

Die nachfolgende Abbildung 18 zeigt die summierten, metallografischen Verschleißkennziffern für die analysierten Schneckenräder im Vergleich, aufgetragen über dem im Versuchsplan definierten Ausfallmoment bei Erreichen eines Getriebewirkungsgrades von 40%. Die Tendenz zu den beschichteten Rädern ist auch hier ähnlich wie in Abbildung 16 zu erkennen.

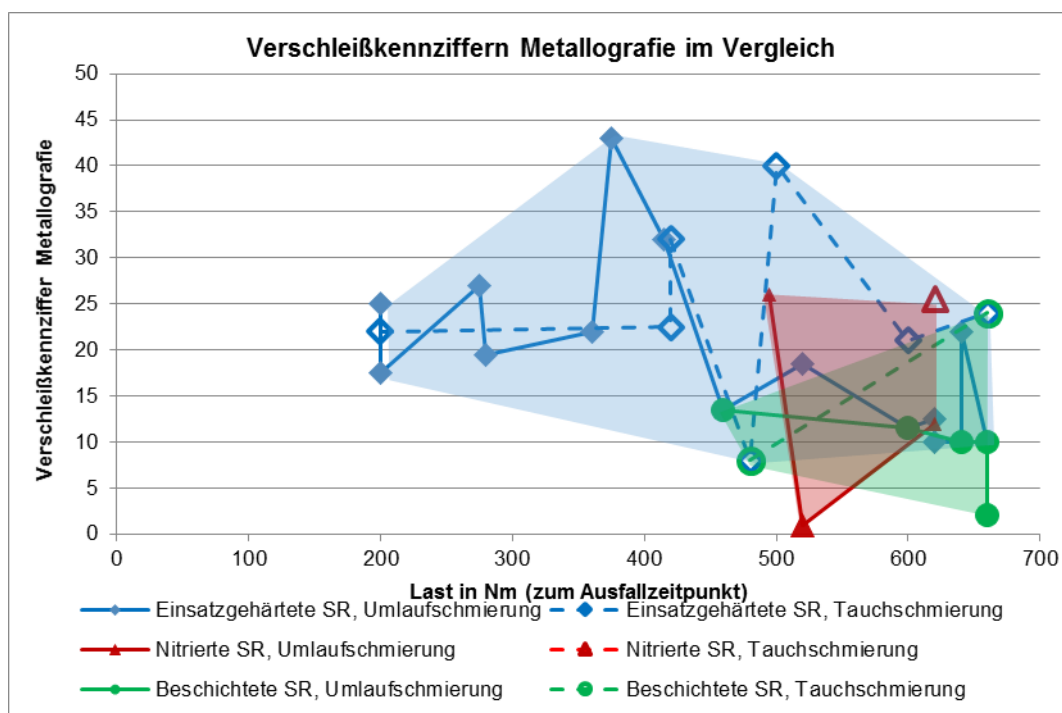


Abbildung 18 : Metallografischer Verschleiß der gelaufenen Zahnradvarianten im Vergleich

Insgesamt zeigt der Vergleich der metallografischen Analyse, dass der Verschleiß der ein-
satzgehärteten und nitrierten Schneckenräder sehr stark variiert (für die ein-
satzgehärteten Schneckenräder zwischen 2 und 43 Punkten und für die nitrierten Schneckenräder zwischen

1 und 26 Punkten). Dabei weisen die zu einem späteren Zeitpunkt ausgefallenen Schneckenräder nicht den höchsten metallografischen Verschleiß auf.

Die nitrierten und beschichteten Schneckenräder sind frühestens mit einer Last von 495 Nm bzw. 460 Nm ausgefallen; 3 der einsatzgehärteten Schneckenräder bereits mit einer Last von 200 Nm.

Die beschichteten Schneckenräder weisen mit durchschnittlich 11 Punkten den geringsten metallografischen Verschleiß auf, gefolgt von den nitrierten Schneckenrädern mit 16 Punkten. Der metallografische Verschleiß der einsatzgehärteten Schneckenräder liegt bei 20 Punkten im Durchschnitt.

11.3.3. Härtemessungen gelaufenen Schneckenräder

Die Härtemessungen der gelaufenen Schneckenräder umfassen, wie bei der Untersuchung der Zahnradvarianten aus dem Herstellungsprozess, die Messung der Oberflächen- und Kernhärte sowie die Ermittlung der Einsatzhärte bzw. Nitrierhärte. Während bei der Oberflächenhärte keine nennenswerten Unterschiede zu gelaufenen Rädern festgestellt werden konnte, konnte eine deutliche Verringerung der Einsatzhärte festgestellt werden. Dies ist auf den Einfluss der Bildung von Neuhärtungs- und damit verbundenen „weichere“ Anlasszonen zurückzuführen.

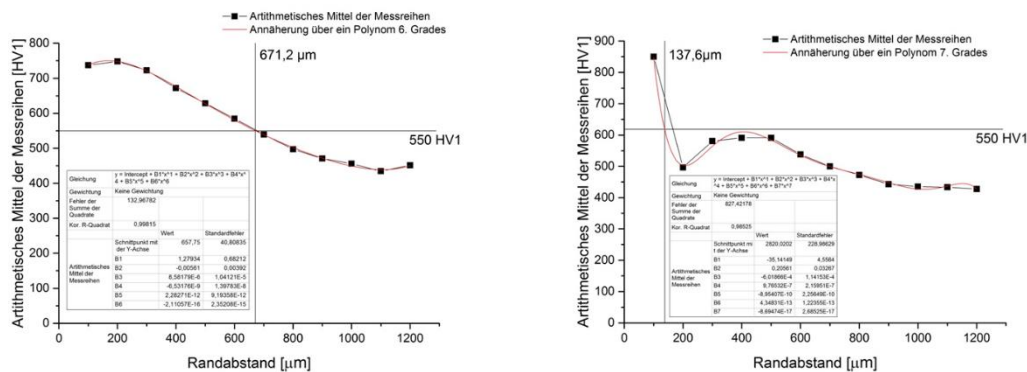


Abbildung 19: Härteverlaufskurve vor (links) und nach dem Prüfstandtest (rechts)

Topografische Analyse der gelaufenen Schneckenräder

Eine Veränderung der zuvor analysierten zehn 3D Parameter ist in allen Varianten zu erkennen. Der Rauheitswert Sa, die Zahn-Punkt-Höhe S10z sowie die Parameter Sk, Spk und Svk der Abbott-Kurve sind in allen Varianten nach den Prüfstandtests deutlich gestiegen. Die 3D Parameter zeigen die Veränderungen der Oberfläche durch die tribologischen Einwirkungen deutlich an.

11.3.4. AFM Analyse zur Qualifizierung physikalischer Änderungen im Grundgefüge

Motivation und Gerätekonfiguration

Ein Rasterkraftmikroskop (*atomic force microscope*/ „AFM“) ermöglicht Untersuchungen auf Basis der Wechselwirkungen zwischen einer Probenoberfläche und der Kontaktspitze eines biegebalkengleichen Tasters („cantilever“) als Sonde. Dieses relativ einfache Grundprinzip kann durch unterschiedliche technische Umsetzungen seitens der makroskopischen Gerätschaft, der mikroskopischen Tastergestaltung und der Prozessführung des Messvorganges in ein multifunktionales Messwerkzeug zur Charakterisierung von Oberflächen überführt werden.^{1, 2, 3} Im Vergleich zur optischen Mikroskopie erhält man bei der Rasterkraftmikroskopie nicht nur einen bildlichen Eindruck einer Probe, sondern kann Messwerte zu Werkstoffeigenschaften, zu Wechselwirkungskräften und zur Topographie erzeugen.

Schneckenrad 0342 nach Fresstest: Neuhärtungszone

Nachfolgend werden Neuhärtungszone, die durch mechanische und thermische Belastung während der Fresstests entstanden sind, intensiver analysiert. Die Lokalisierung des interessanten Bereichs erfolgt über das im AFM eingebaute Digitalmikroskop bei einem Vergrößerungsfaktor von 1000. Die Größe dieses Bereiches beträgt ca. 90 x 90 μm .

Abbildung 20 zeigt die analysierte Topografie einer mit Nitalsäure angeätzten Querschliffprobe. Darin sind Informationen über die Rauheit und die jeweilige Höhe der Bereiche enthalten.

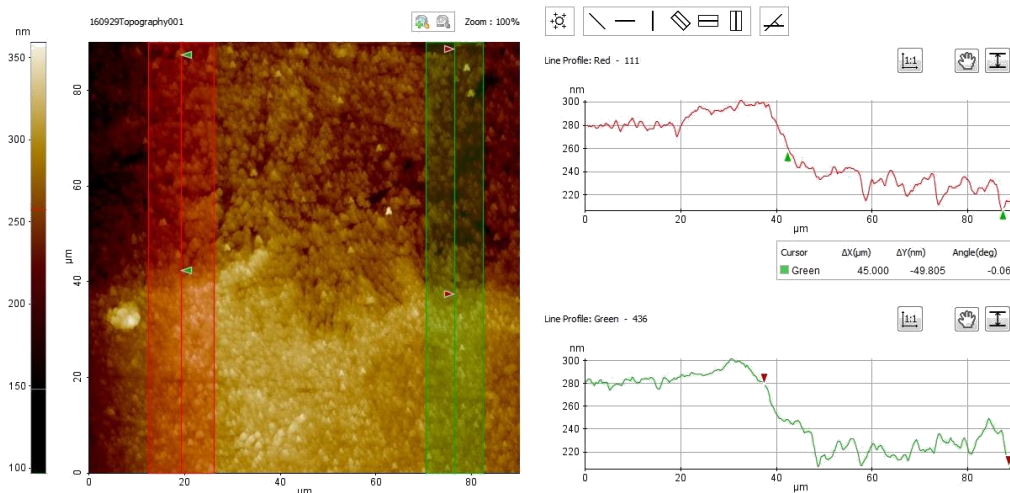


Abbildung 20: Topografie des Randbereiches des Schneckenrades 0342

¹ vgl. Haugstad, Greg: Atomic Force Microscopy: Understanding Basic Modes and Advanced Applications, Wiley, 2012, ISBN 978-0-470-63882-8

² vgl. Butt, Hans-Jürgen, Kappl, Michael: Surface and Interfacial Forces, Wiley-VCH Verlag Weinheim, 2010, ISBN 978-3-527-40849-8

³ vgl. Butt, Hans-Jürgen, Graf, Karlheinz, Kappl, Michael: Physics and Chemistry of Interfaces, Wiley-VCH Verlag Weinheim, 2010, ISBN 978-3-527-41216-7

Auf Basis einer Bereichsanalyse (rote und grüne vertikale Linien) wurden durchschnittliche Topographieverläufe ermittelt. Es ist zu erkennen, dass die Neuhärtungszone auf einer Höhe von ca. 290 bis 320 nm liegt. Das Grundgefüge hingegen liegt auf einer Höhe von 225 bis 250 nm, ca. 67 nm tiefer. Dieser Sachzusammenhang untermauert die Aussage, dass die Bereiche der Neuhärtungszone resistenter gegen Nital säure sind.

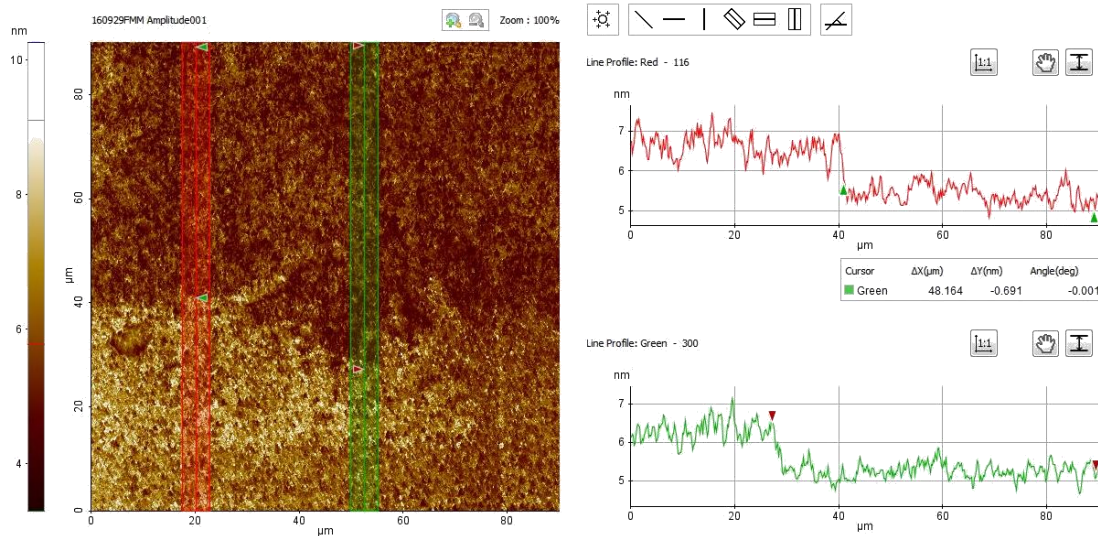


Abbildung 21: Amplitudenantwort des Cantilevers im Bereich der Neuhärtungszone und des Grundgefüges des Schneckenrades 0342

Abbildung 21 zeigt die Amplitudenantwort des Cantilevers im Bereich der Neuhärtungszone und des Grundgefüges. Es ist zu erkennen, dass die Amplitude im Bereich der Neuhärtungszone mit einem Wert von durchschnittlich 6,5 nm höher ist als im Bereich des Grundgefüges. Hier beträgt die Amplitudenantwort durchschnittlich 5,5 nm. Nach dem Funktionsprinzip des genutzten Force modulation mode (FMM) bedeutet dies, dass die Neuhärtungszone härter als das Nachbargefüge ist. Dieser Zusammenhang wurde auch im Rahmen von Härtemessungen nachgewiesen.

Die dargelegten Zusammenhänge konnten ebenfalls am Schneckenrad 0354 nachgewiesen werden: Auch hier ist der Bereich der Neuhärtungszone glatter, und durch die Nitalätzung erfolgte weniger Materialabtrag. Die Amplitudenantwort und die Phasenverschiebung sind auch hier im Bereich der Neuhärtungszone höher.

11.4. Zusammenfassung „AP16 Oberflächenanalyse“

Die Hochschule Niederrhein hat das Arbeitspaket 16 „Oberflächenanalyse“ des Projektes Stahlschnecke erfolgreich abgeschlossen. Alle aus der Projektphase 1 eingegangenen Schneckenradtypen konnten analysiert und die Ergebnisse ausführlich dokumentiert werden.

Als zentrale und prozessübergreifende Anlaufstelle hat die Hochschule Niederrhein einen wesentlichen Beitrag zur Qualitätssicherung im Projekt geleistet und Projektpartner an unterschiedlichen Positionen in der Fertigungskette in laufenden Optimierungsprozessen unterstützt. Für die einsatzgehärteten Schneckenräder wurde beispielsweise überprüft, ob die angestrebten Härte werte erreicht und die vorgegebenen Toleranzen bzgl. des Anteils

Restaustenit eingehalten wurden. Ergänzend kamen Untersuchungen auf Schleifbrand und Karbide hinzu. Mögliche Risikofaktoren (z.B. Eckenabrundung durchs Gleitschleifen, Porenraum oder Einschlüsse) konnten anhand der untersuchten Schneckenräder aus den Herstellungsprozessen identifiziert werden.

Ein umfassender Vergleich der hergestellten Zahnradvarianten in den Teilaspekten Metallografie, Topografie und Härtemessung ist erfolgt. Hierzu wurden im Bereich der Topografie aus einer Vielzahl von 3D- Kennzahlen geeignete Prozessführungsgrößen ausgewählt und festgelegt.

Für die im Screeningverfahren „Fresstest“ untersuchten Schneckenräder der Phase 1 wurden Matrizen zur Verschleißbewertung entwickelt und Verschleißkennzahlen abgeleitet. Diese ermöglichen den Vergleich und die Einordnung der getesteten Zahnradvarianten nach Verschleißgesichtspunkten. Die verschiedenen, aufgetretenen Verschleißerscheinungsformen konnten identifiziert, gewichtet und klassifiziert werden. Zudem wurden verschiedene Verschleißanalyseverfahren (Erstsichtung, Metallografie, Rasterkraftmikroskopie und Topografiemessung) einander gegenübergestellt. Es konnte gezeigt werden, dass alle Verfahren zur Verschleißdetektion geeignet sind, die Aussagen ineinander überführt werden können und Klassifizierungen ermöglicht werden.

Aus tribologischer Sicht zeigten sich mittels PVD beschichtete Zahnflanken als besonders leistungsstark. Ihnen nahe kommen die untersuchten nitrierten Varianten. Einzelne einsatzgehärtete Probanden erreichten hohe Belastungsstufen, es wurden im Test jedoch auch bei niedrigen Belastungen bereits intensive Verschleißvorgänge beobachtet.

12. Versuchsplanung (Bonfiglioli Vectron MDS GmbH)

Verantwortlich

Bonfiglioli Vectron MDS GmbH

Ausführende Stellen

**Bonfiglioli Vectron MDS GmbH; Ruhr-Universität Bochum,
Elgeti Engineering**

Beschreibung

In der ersten Projektphase wurde eine Vielzahl von Werkstoff-, Wärmebehandlungsverfahren- und Oberflächenkombinationen untersucht, um geeignete Varianten für Phase 2 zu ermitteln.

Die Kombination aus Makrogeometrie, Werkstoff, Wärmebehandlungszustand, Hartfeinbearbeitungsverfahren, Oberflächenveredlungsverfahren und Schmierstoff ergibt nach Abzug der technisch nicht sinnvollen Varianten einen Lösungsraum von ca. 1000 möglichen Kombinationen. Da dieser Versuchsaufwand nicht innerhalb der Projektlaufzeit abzuleisten war, wurden die Untersuchungen mehrstufig durchgeführt. Nach einer Reduzierung der Varianten im Bereich Makrogeometrie und Werkstoff sowie Öl, wurde eine Screening-Test-Reihe im Hinblick auf Fressen durchgeführt. Anschließend wurden die Varianten, die sich im Screening-Test als vielversprechende Kombinationen herausgestellt haben in umfangreicheren Dauerversuchen auf ihre Betriebsgrenzen und ihren Wirkungsgrad hin untersucht.

Stufe 1	Reduzierung der Varianten <ul style="list-style-type: none"> ○ 1 Makrogeometrie (a = 63 mm) ○ 1 Öl ○ Je 1 Werkstoff
Stufe 2	Fresstest (ca. 120 Versuche), (Elgeti)
Stufe 3	Reduzierung der Varianten
Stufe 4	Dauertest (RUB, Bonfiglioli), Aufteilung der Varianten nach den erfolgreichen Varianten
Stufe 5a	Weiterführende Tests an (RUB): Makrogeometrie 2 (a = 100 mm)
Stufe 5b	Weiterführende Tests an (Bonfiglioli): Makrogeo 3 (a = 49 mm)

Phase 1: Screeningtests

1	42CrMo4	Fertigfräsen	Plasmanitrocarburieren						
2	42CrMo4	Fertigfräsen	Plasmanitrieren						
3	42CrMo4	Fertigfräsen	Plasmanitrocarburieren	und Oxidation					
4	42CrMo4	Fertigfräsen	Plasmanitrocarburieren						Gleitschleifen
5	42CrMo4	Fertigfräsen	Plasmanitrieren						Gleitschleifen
6	42CrMo4	Fertigfräsen	Plasmanitrocarburieren				Strahlen SDK 0.4 mm		Gleitschleifen
7	42CrMo4	Fertigfräsen	Plasmanitrocarburieren						Gleitschleifen Beschichten
8	42CrMo4	Fertigfräsen	Plasmanitrieren						Gleitschleifen
9	42CrMo4	Fertigfräsen	Plasmanitrocarburieren				Strahlen SDK 0.4 mm		Gleitschleifen Beschichten
10	42CrMo4	Fertigfräsen	Plasmanitrieren				Strahlen SDK 0.4 mm		Gleitschleifen Beschichten
11	16MnCr5	Fräsen + Aufmaß	Einsatzhärten	HRC54	Schälwälzfräsen				
12	16MnCr5	Fräsen + Aufmaß	Einsatzhärten	HRC54	Schälwälzfräsen				Gleitschleifen
13	16MnCr5	Fräsen + Aufmaß	Einsatzhärten	HRC54	Schälwälzfräsen	Strahlen SDK 0.4 mm			Gleitschleifen Beschichten
14	16MnCr5	Fräsen + Aufmaß	Einsatzhärten	HRC57	Schälwälzfräsen				
15	16MnCr5	Fräsen + Aufmaß	Einsatzhärten	HRC60	Wälzschleifen				
16	16MnCr5	Fräsen + Aufmaß	Einsatzhärten	HRC60	Wälzschleifen				Gleitschleifen
17	16MnCr5	Fräsen + Aufmaß	Einsatzhärten	HRC57	Schälwälzfräsen	Strahlen SDK 0.4 mm			Gleitschleifen
18	16MnCr5	Fräsen + Aufmaß	Einsatzhärten	HRC60	Schälwälzfräsen				
19	16MnCr5	Fräsen + Aufmaß	Einsatzhärten	HRC60	Schälwälzfräsen				
20	16MnCr5	Fräsen + Aufmaß	Einsatzhärten	HRC60	Schälwälzfräsen				Gleitschleifen
21	16MnCr5	Fräsen + Aufmaß	Einsatzhärten	HRC60	Schälwälzfräsen	Strahlen SDK 0.4 mm			Gleitschleifen
22	16MnCr5	Fräsen + Aufmaß	Einsatzhärten	HRC60	Schälwälzfräsen				Gleitschleifen Beschichten
23	16MnCr5	Fräsen + Aufmaß	Einsatzhärten	HRC60	Schälwälzfräsen				Gleitschleifen Beschichten
24	18CrNiMo7-6	Fertigfräsen	Einsatzhärten	Hoher Restaustenit					
25	16MnCr5	Fräsen + Aufmaß	Einsatzhärten	HRC60	Schälwälzfräsen	Strahlen GH-K G05			Gleitschleifen
26	16MnCr5	Fräsen + Aufmaß	Einsatzhärten	HRC54	Schälwälzfräsen	Strahlen GH-K G05			Gleitschleifen Beschichten
27	42CrMo4	Fertigfräsen	Plasmanitrieren				Strahlen GH-K G05		Gleitschleifen
28	42CrMo4	Fertigfräsen	Plasmanitrocarburieren				Strahlen GH-K G05		Gleitschleifen
29	16MnCr5	Fräsen + Aufmaß	Einsatzhärten	HRC60	Schälwälzfräsen				Beschichten
30	Bronze	Fräsen + Aufmaß			Schälwälzfräsen				
31	Bronze	Fräsen + Aufmaß			Wälzschleifen				

Abbildung 12.1 Aufstellung der getesteten Varianten in der Screening Test Reihe (Bronze Referenztest in Orange)

Phase 2 Weiterführende Tests

Ausführende Stelle: Bonfiglioli Vectron MDS GmbH

a=49 mm	Material	Weichbearbeitung	Wärmebehandlung	Härte und Oxidation	Hart-Fein-Bearbeitung	Veredelung 1	Veredelung 2	Veredelung 3
18	16MnCr5	Fräsen + Aufmaß	Einsatzhärten	HRC60	Schälwälzfräsen			
19	16MnCr5	Fräsen + Aufmaß	Einsatzhärten	HRC60	Schälwälzfräsen		Gleitschleifen	
28	16MnCr5	Fräsen + Aufmaß	Einsatzhärten	HRC60	Schälwälzfräsen			Beschichten

Abbildung 12.2 Varianten für weiterführende Tests in der Baugröße a=49mm i=60

a=63 mm	Material	Weichbearbeitung	Wärmebehandlung	Härte und Oxidation	Hart-Fein-Bearbeitung	Veredelung 1	Veredelung 2	Veredelung 3
30	Bronze	Fräsen + Aufmaß			Wälzschleifen			
19	16MnCr5	Fräsen + Aufmaß	Einsatzhärten	HRC60	Schälwälzfräsen		Gleitschleifen	
21	16MnCr5	Fräsen + Aufmaß	Einsatzhärten	HRC60	Schälwälzfräsen		Gleitschleifen	Beschichten

Abbildung 12.3 Varianten für weiterführende Tests in der Baugröße a=63mm i=30

Schmierstoffvariation										
	Geometrie	Schmierstoff	Material	Weichbearbeitung	Wärmebehandlung	Härte und Oxidation	Hart-Fein-Bearbeitung	Veredelung 1	Veredelung 2	Veredelung 3
18_1	a=63mm; i=30	Standard	16MnCr5	Fräsen + Aufmaß	Einsatzhärten	HRC60	Schälwälzfräsen			
18_2	a=63mm; i=30	GH09	16MnCr5	Fräsen + Aufmaß	Einsatzhärten	HRC60	Schälwälzfräsen			
18_3	a=63mm; i=30	GH49	16MnCr5	Fräsen + Aufmaß	Einsatzhärten	HRC60	Schälwälzfräsen			
28_1	a=49mm; i=60	Standard	16MnCr5	Fräsen + Aufmaß	Einsatzhärten	HRC60	Schälwälzfräsen			Beschichten
28_2	a=49mm; i=60	GH09	16MnCr5	Fräsen + Aufmaß	Einsatzhärten	HRC60	Schälwälzfräsen			Beschichten
28_3	a=49mm; i=60	GH49	16MnCr5	Fräsen + Aufmaß	Einsatzhärten	HRC60	Schälwälzfräsen			Beschichten

Abbildung 12.4 Varianten zur Schmierstoffvariation

Ausführende Stelle: Ruhr-Universität-Bochum

a=100 mm	Material	Weichbearbeitung	Wärmebehandlung	Härte und Oxidation	Hart-Fein-Bearbeitung	Veredelung 1	Veredelung 2	Veredelung 3
15	16MnCr5	Fräsen + Aufmaß	Einsatzhärten	HRC60	Wälzschleifen			
18	16MnCr5	Fräsen + Aufmaß	Einsatzhärten	HRC60	Schälwälzfräsen			
19	16MnCr5	Fräsen + Aufmaß	Einsatzhärten	HRC60	Schälwälzfräsen		Gleitschleifen	
24	16MnCr5	Fräsen + Aufmaß	Einsatzhärten	HRC60	Wälzschleifen			Beschichten
28	16MnCr5	Fräsen + Aufmaß	Einsatzhärten	HRC60	Schälwälzfräsen			Beschichten

Abbildung 12.522 Varianten für weiterführende Tests in der Baugröße a=100mm i=20,5

12.1. Fresstest (Elgeti Engineering)

Verantwortlich

Elgeti Engineering

Ausführende Stelle

Elgeti Engineering



12.1.1. Einleitung

Zur Untersuchung stehen verschiedene Schneckenräder, die sich durch Werkstoff und Wärmebehandlungszustand unterscheiden. In einem Getriebeprüfstand werden Schnecke und Schneckenrad elektronisch gegeneinander verspannt und stufenweise mit steigendem Drehmoment bis zu einer Schädigung beansprucht.

12.1.2. Lebensdauertests - Methodik

In Abbildung 23 ist der Testaufbau zu sehen. Der Antriebsmotor befindet sich im Bild hinten links, zwischen dem Motor und dem Prüfgehäuse (im Bild links, Vordergrund) ist eine Drehmomentmesswelle (rot) montiert. Angetrieben wird die Schnecke, das Schneckenrad liegt unterhalb der Schnecke. Die Abtriebsseite führt vom Prüfgehäuse über eine weitere Drehmomentmesswelle zu einem Getriebe (grau) und schließlich zu einem weiteren Schrittmotor. Der Motor auf der Abtriebsseite dient einerseits als Dynamo, um eine Energierückgewinnung zu ermöglichen, andererseits wird mit ihm das erforderliche Antriebsdrehmoment definiert.

In das Prüfgehäuse ist ein Schauglas eingelassen zur Überprüfung des einzustellenden Tragbilds, siehe Abbildung 24 und Abbildung 25. Jedes Lager auf der Schnecke und auf der Schneckenradwelle liegt in einer Exzenterbuchse. Der Bohrungsversatz in der Buchse beträgt 0,5 mm, so dass jedes Lager in seiner Drehebene um 0,5 mm exzentrisch positioniert werden kann. Die Buchsen werden mit Spannsätzen im Gehäuse befestigt. Vor der Positionierung wird jeweils das axiale Lagerspiel mit Passscheiben minimiert.

Der Prüfstand verfügt über eine Ölumlaufschmierung mit Ölheizung, Ölkühler und Partikelfilter (10 μm). Die Schmierung erfolgt am Kontakt zwischen Schnecke und

Schneckenrad über zwei Düsen, die sich direkt rechts und links neben dem Zahneingriff befinden.

Zur Temperaturüberwachung sind Sensoren am Prüfgehäuse angebracht, so dass Ölzulauf, Ölablauf und jeweils eine Lagertemperatur an den beiden Wellen gemessen werden kann.

Die Steuerungssoftware überwacht Drehzahlen, Temperaturen, Zeiten und Drehmomente. Die Dokumentation der Messwerte erfolgt automatisch mit 1 Hz. Die Software ermittelt den Wirkungsgrad, dieser sinkt bei erhöhtem Verschleiß. Neben den Notabschaltkriterien aus erhöhten Temperaturen und Drehmomenten ergibt sich als Abschaltkriterium für den Prüfdurchlauf weiterhin ein Wirkungsgradniveau, das einen Verschleiß anzeigt.



Abbildung 23: Getriebeprüfstand

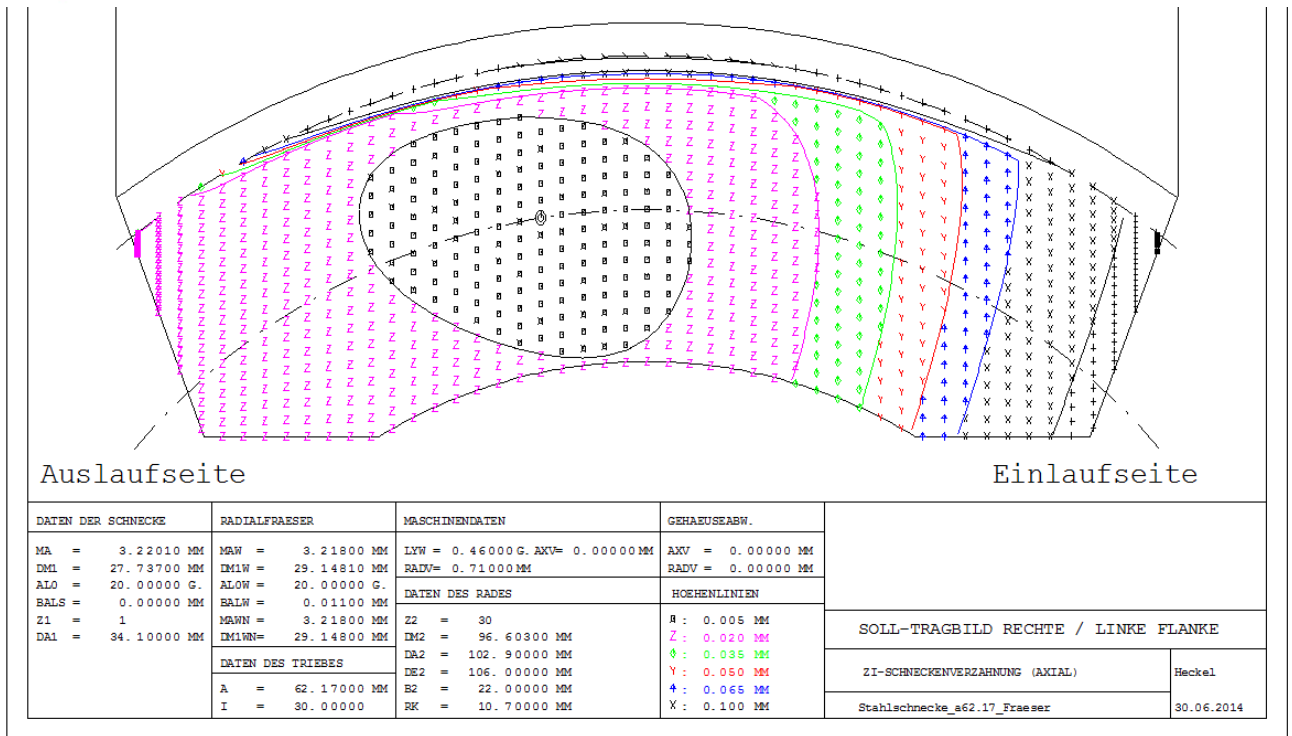


Abbildung 24: Leerlauftragbild

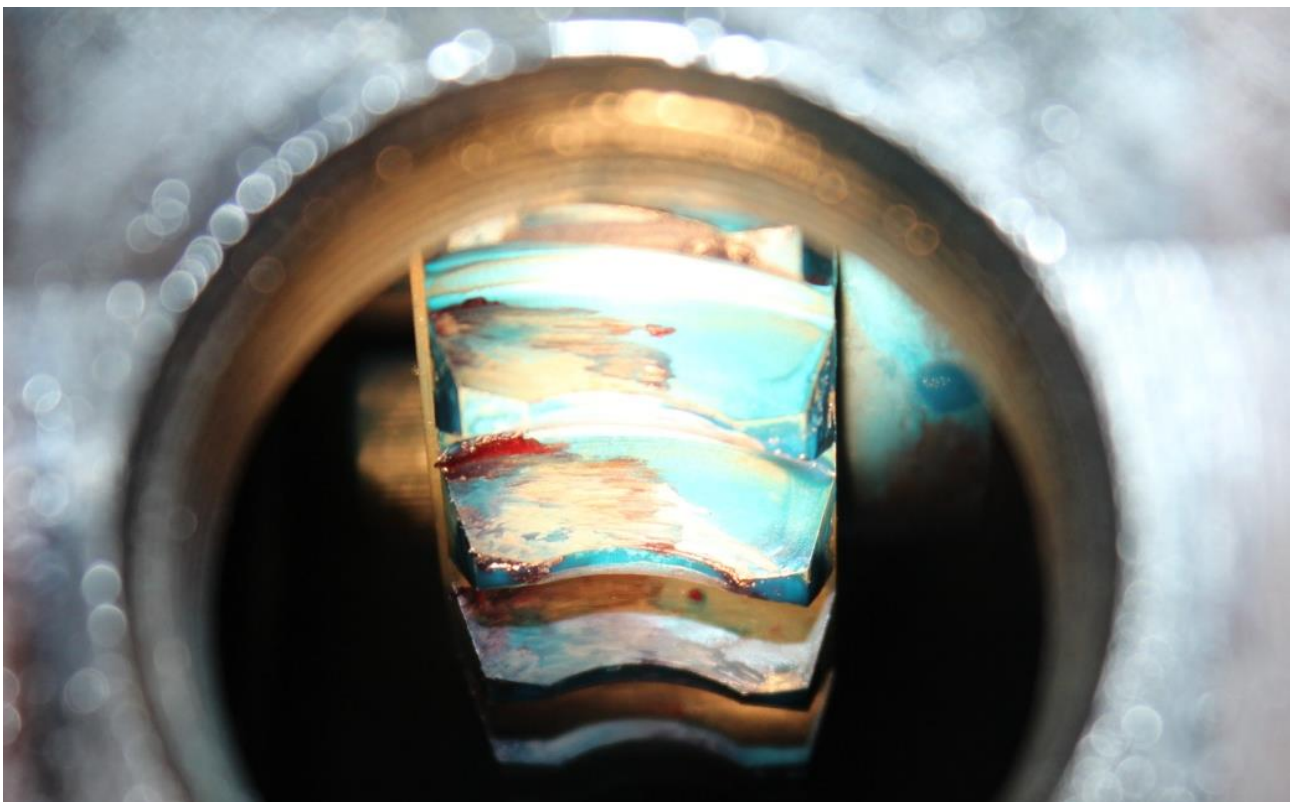


Abbildung 25: Einstellen des Tragbilds

12.1.3. Parameter

Aus vier Vorversuchen (V2, Rad 820) werden die Versuchsparameter und der Prüfdurchlauf nach Tabelle 5 und **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** festgelegt. Die Tabellen mit den Lastintervallen der ersten vier Vorversuche befinden sich im Anhang.

Ölsorte	Klüber, BMBF Gear Oil 05
Ölregeltemperatur	90 °C
Ölstrom	5 l/min
Partikelfilter	10 µm
Drehzahl der Schnecke	1400 rpm
Dauer einer Laststufe	30 min
Minimale Laststufe	255 Nm
Maximale Laststufe	495 Nm
Laststufenhöhe	20 Nm
Minimaler Wirkungsgrad	0,40
Maximale Temperatur	100 °C

Tabelle 5: Parameter und Abschaltsschwellen

12.1.4. Ergebnisse

Versuch 1 diente dem Einstellen des Prüfstands, Verifizierung von Abschaltkriterien und Optimieren der Steuerungssoftware. Das Ergebnis aus Versuch 2 D ergab sich aus weiteren Vorversuchen (A, B, C), mit denen die Höhe der Laststufen (insbesondere die Höhe der letzten Laststufe) festgelegt wurde.

Das angegebene Drehmoment in Tabelle 6 gibt die Laststufe wider, auf der der minimale Wirkungsgrad unterschritten wurde, d.h. ein Schaden detektiert wurde.

Versuchsnummer	Werkstoff	Schneckenrad	Schnecke	Drehmoment [Nm]
1	42CrMo4	821	0001	70
2 D	42CrMo4	820	0002	495
3	16MnCr5	0004	0023	375
4	16MnCr5	0069	0024	415
5	16MnCr5	0068	0025	375
6	16MnCr5	0067	0026	275
7	16MnCr5	0066	0027	295
8	16MnCr5	0061	0028	315
9	16MnCr5	0057	0029	295
10	16MnCr5	0056	0030	275
11		0055	0031	255
12		0065	0032	200
13		0065	0032	380
14		0064	0033	220
15		0064	0033	200
16		0063	0034	360
17		0063	0034	300
18		0062	0035	200

Tabelle 6: Ergebnisse

Schadensbilder

Versuch 1, Schneckenrad 821, Schnecke 0001

Die Verzahnung aus Versuch 1 wurde mit 70 Nm bei 1500 rpm belastet. Mit diesem Versuch wurde der Prüfstand eingerichtet.



Abbildung 26: Auslaufseite links

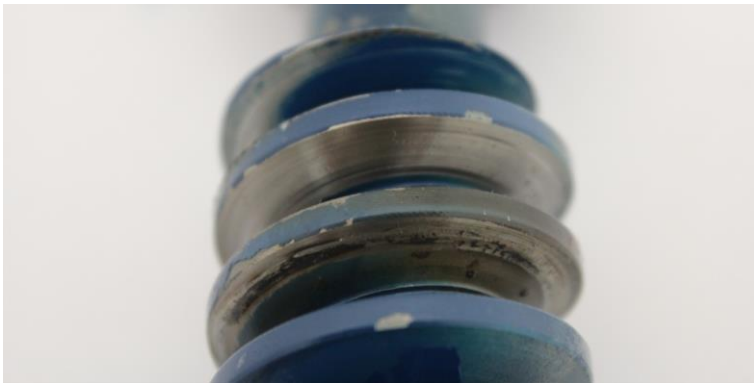


Abbildung 27: Schnecke 0001

Versuch 2, Schneckenrad 820, Schnecke 0002

Der Versuch 2 diente der Ermittlung der höchsten Laststufe. Die Verzahnung wurde bei einer Belastung von 495 Nm beschädigt.



Abbildung 28: Auslaufseite rechts

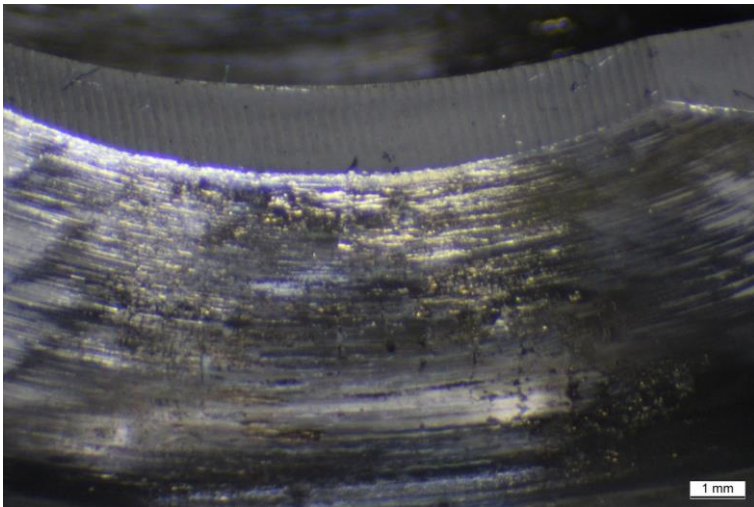


Abbildung 29: Auslaufseite rechts



Abbildung 30: Schnecke 0002

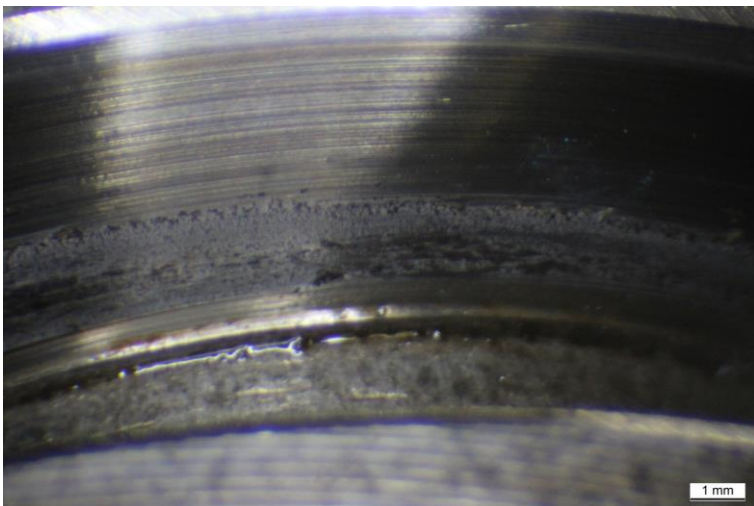


Abbildung 31: Detail aus dem Fressschaden an der Schnecke

Versuch 3, Schneckenrad 0004, Schnecke 0023

Versuch 3 stoppte nach Erreichen von 375 Nm.

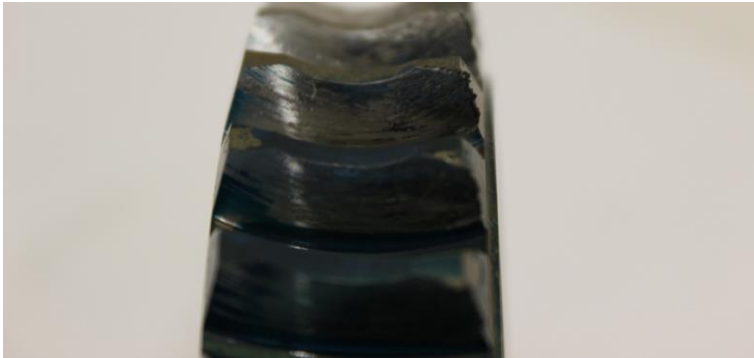


Abbildung 32: Auslauf rechts mit Gratbildung



Abbildung 33: Schnecke 0023, Gratbildung
Versuch 4, Schneckenrad 0069, Schnecke 0024
Versuch 4 stoppte nach Erreichen von 415 Nm.



Abbildung 34: Auslaufseite rechts mit Gratbildung



Abbildung 35: Schnecke 0024, Gratbildung
Versuch 5, Schneckenrad 0068, Schnecke 0025
Versuch 5 stoppte nach Erreichen von 375 Nm.

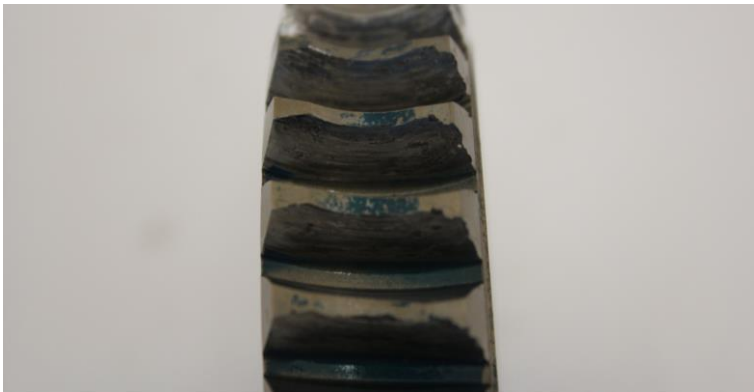


Abbildung 36: Auslaufseite rechts mit Gratbildung



Abbildung 37: Schnecke 0025, Gratbildung
Versuch 6, Schneckenrad 0067, Schnecke 0026
Versuch 6 stoppte nach Erreichen von 275 Nm.

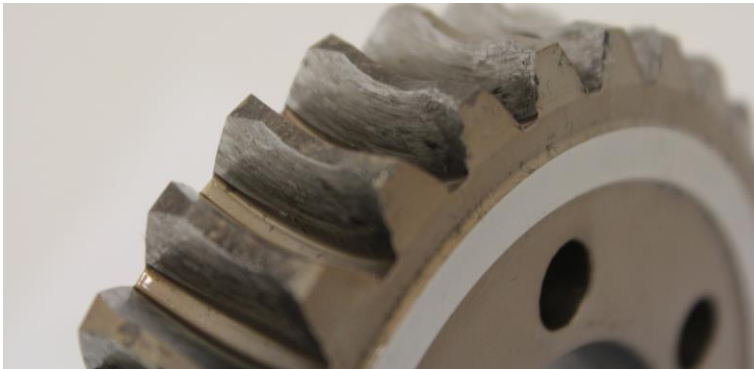


Abbildung 38: Auslaufseite rechts mit Gratbildung



Abbildung 39: Schnecke 0026, Gratbildung
Versuch 7, Schneckenrad 0066, Schnecke 0027
Versuch 7 stoppte nach Erreichen von 295 Nm.



Abbildung 40: Auslaufseite rechts, Gratbildung am Zahnkopf



Abbildung 41: Schnecke 0027, Gratbildung
Versuch 8, Schneckenrad 0061, Schnecke 0028
Versuch 8 stoppte nach Erreichen von 315 Nm.



Abbildung 42: Auslaufseite rechts



Abbildung 43: Schnecke 0028
Versuch 9, Schneckenrad 0057, Schnecke 0029
Versuch 9 stoppte nach Erreichen von 295 Nm.



Abbildung 44: Auslaufseite rechts mit Gratbildung



Abbildung 45: Schnecke 0029, Gratbildung und Wärmeeinfluss (Ölwechsel im Anschluss)

Versuch 10, Schneckenrad 0056, Schnecke 0030

Versuch 10 stoppte nach Erreichen von 275 Nm.



Abbildung 46: Auslaufseite rechts, Gratbildung

12.2. Weiterführende Tests $a=49$ mm; $a=63$ mm

Verantwortlich

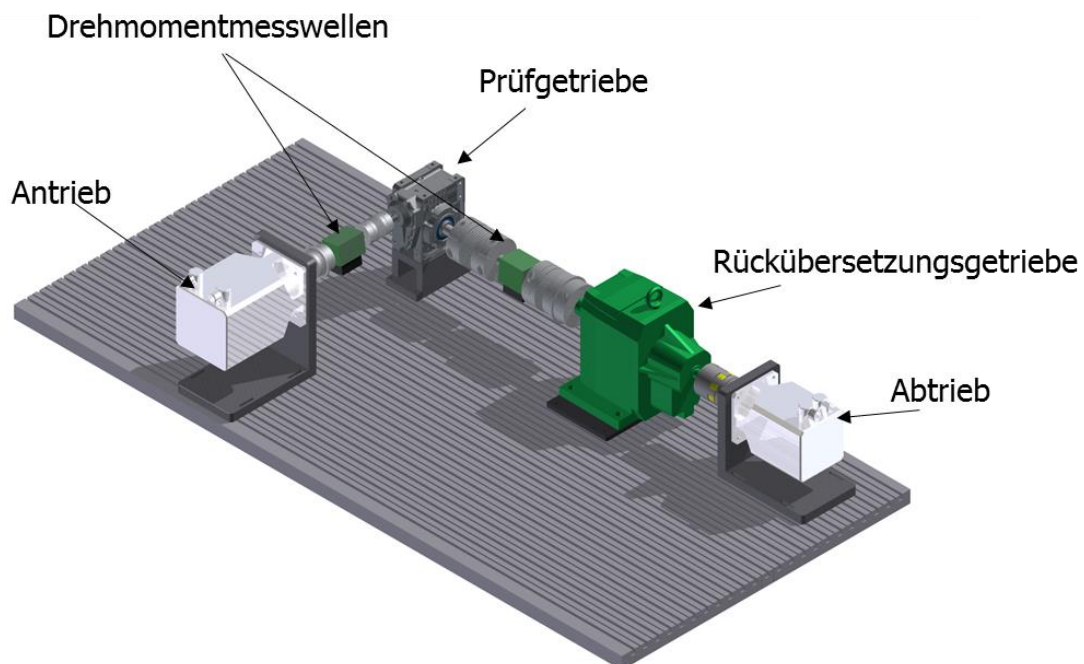
Bonfiglioli Vectron MDS GmbH

Ausführende Stelle

Bonfiglioli Vectron MDS GmbH

12.2.1. Bonfiglioli Prüfstand

Parallel zu dem bei Elgeti Engineering aufgebautem Prüfstand wurde ein vergleichbarer Prüfstand bei Bonfiglioli aufgebaut, um die weiterführenden und verifizierenden Untersuchungen in der 2. Prüfphase durchzuführen. Im Gegensatz zu dem Prüfstand bei Elgeti Engineering wurde hierbei allerdings die Bonfiglioli Standardgehäuse verwendet und die Tests dementsprechend unter real ähnlichen Bedingungen und mit Ölsumpfschmierung durchgeführt.





Test bench performance data

Performance of tested gearbox:

Rated output power: 5 kW
 Rated output torque: 450 Nm
 Rated output speed: 130 min⁻¹
 Rated input power: 8.6 kW
 Rated input torque: 27,5 Nm
 Rated input speed: 3000 min⁻¹

Back transmission:

Spur gearbox C 51 3 P 30.1 HS B3:

Ratio: 30.1
 Stages: 3
 Rated output torque: 1000 Nm
 Rated efficiency: 95 %
 Rated input power: 5.2 kW

Planetary gearbox 300 L 2 30.7 PC V01B E:

Ratio: 30.7
 Stages: 2
 Rated output torque: 810 Nm
 Rated efficiency: 95 %
 Rated input power: 4.1 kW

Drive:

BMD 170 34 3000 400 165 32 K 65 PTC ENB4 P1 S1:

Rated power: 8.6 kW
 Stand still torque: 34 Nm
 Rated torque: 27.5 Nm
 Max torque: 90 Nm
 Rated speed: 3000 min⁻¹
 Feedback: Encoder, 1024 periods per revolution

ACU-401 22A:

Rated current output: 22 A
 Interfaces: Encoder module, Serial CM-232, Control unit

Break:

BMD 145 16.8 3000 400 165 28 K 65 PTC ENB4 P1 S1:

Rated power: 5 kW
 Stand still torque: 16.8 Nm
 Rated torque: 16 Nm
 Max torque: 46 Nm
 Rated speed: 3000 min⁻¹
 Feedback: Encoder, 1024 periods per revolution

ACU-401 19A:

Rated current output: 14 A
 Interfaces: Encoder module, Serial CM-232, Control unit

Test bench measurement performance data

Measurement data processing:

Dewe-43:

Analog inputs: 8
 Sampling rate: 200k Samples/s
 Counter inputs: 8
 Counter resolution: 32-bit
 Digital inputs: 24
 CAN-Bus inputs: 2

Software:

DasyLab 12.0
Dewesoft X

Measurement equipment :

1. Measuring shaft:

Torque: ± 10 Nm ± 0,05 % v.E.
 Speed: 6000 min⁻¹
 Angle: 0.09°

2. Measuring shaft:

Torque: ± 200 Nm ± 0.05 % v.E.
 Speed: 6000 min⁻¹
 Angle: 0.09°

3. Measuring shaft:

Torque: ± 500 Nm ± 0.05 % v.E.
 Speed: 3000 min⁻¹
 Angle: 1°

4 x Thermocouple:

Range: -40 ° C ... 1000 ° C
 Deviation: ± 1.5 ° C (-40° C ... 375° C)

1 x Pt100:

Range: -200 ° C ... 850 ° C
 Deviation: ± 0.55 ° C (at 200 ° C)

12.2.2. Ergebnisse der weiterführenden Tests

26 Laststufen, $\Delta t = 1$ h; $\Delta M = 20$ Nm

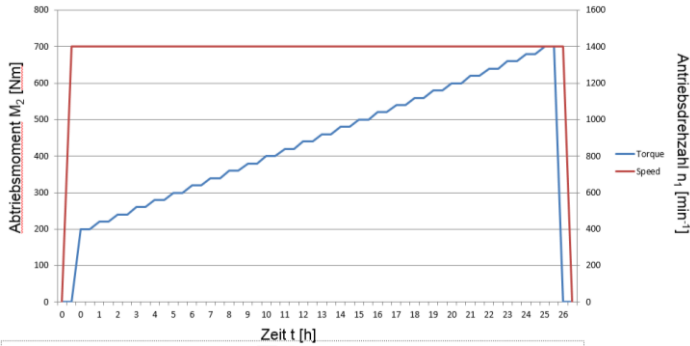


Abbildung 47 Lastkollektiv für $a=63$ $i=30$

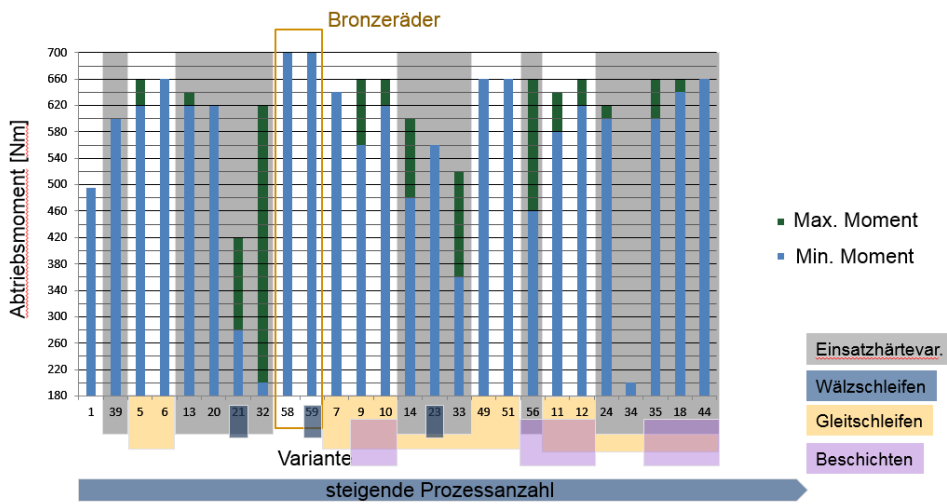


Abbildung 48 Testergebnisse $a=63$ mm $i=30$ (Umlaufschmierung, alle Tests)

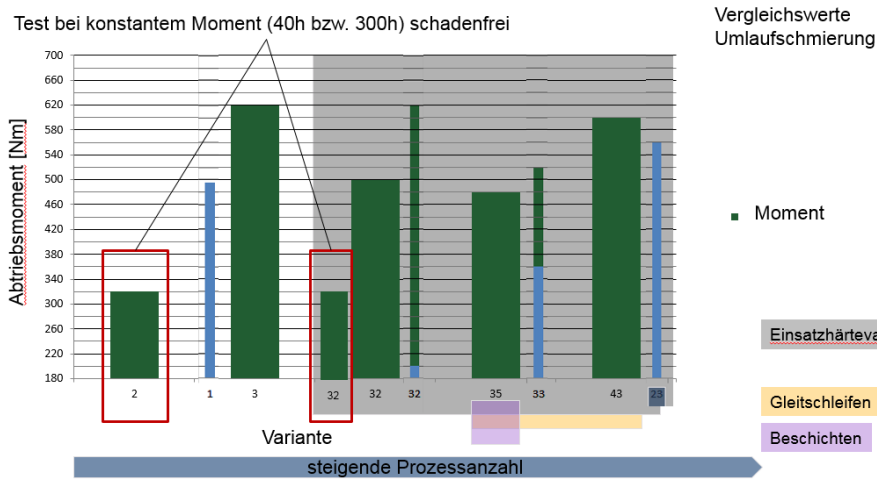


Abbildung 49 Testergebnisse $a=63$ mm $i=30$ (Tauchschmierung; alle Tests)

- 2_1 schälwälzgefräst
- 2_2 schälwälzgefräst gleitgeschliffen
- 2_3 schälwälzgefräst beschichtet

26 Laststufen, $\Delta t = 1$ h; $\Delta M = 10$ Nm

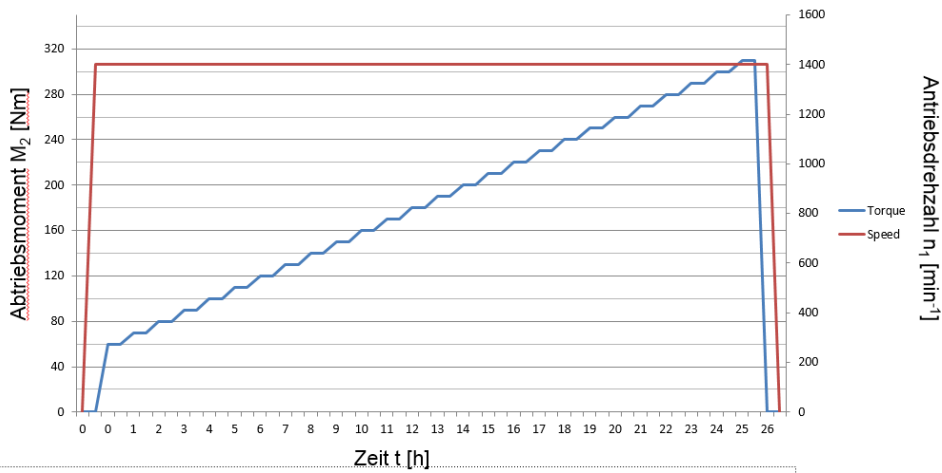


Abbildung 50 Lastkollektiv $a=49$ mm $i=60$; Bonfiglioli Prüfstand

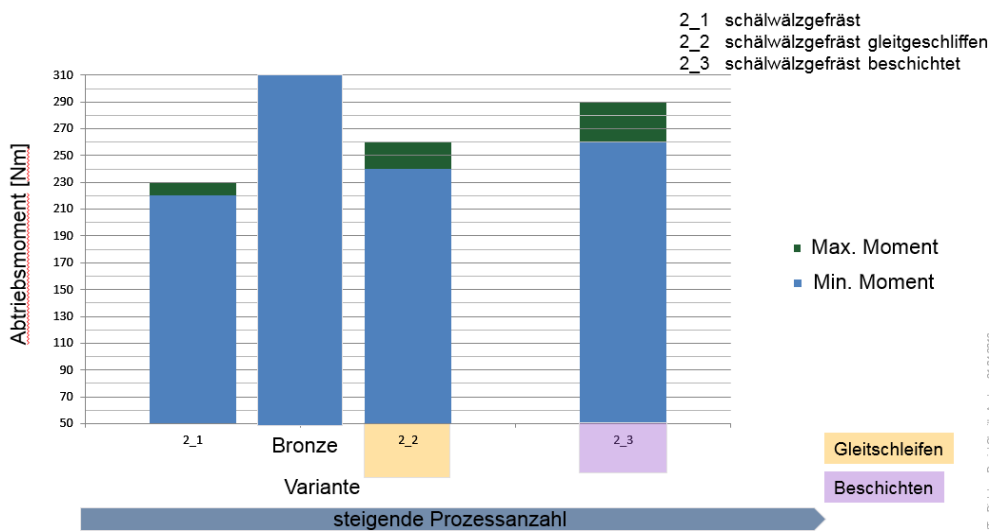
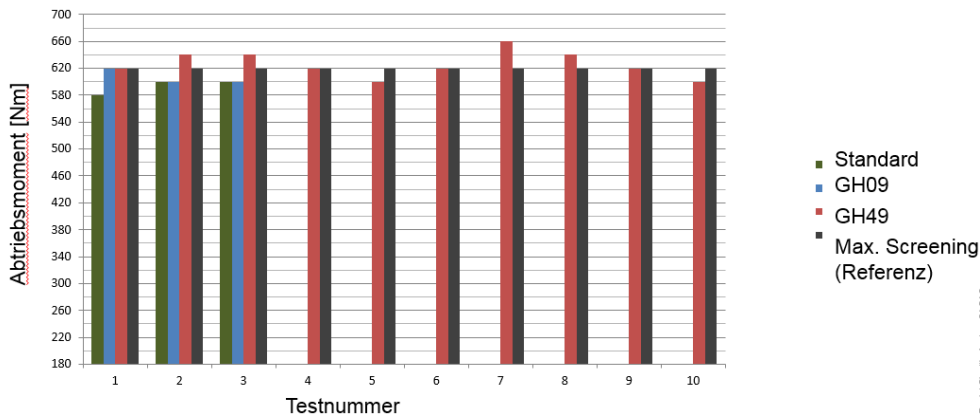
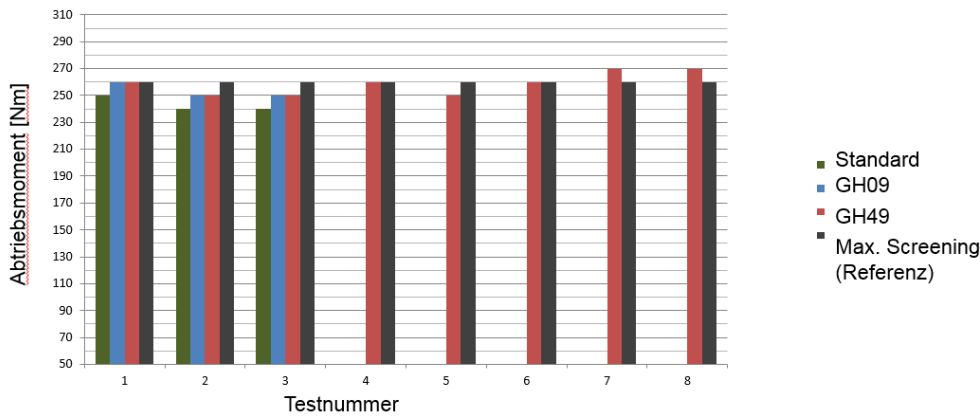


Abbildung 51 Testergebnisse $a=49$ mm $i=60$ (Tauchschmierung Seriengehäuse)



GH09 Ergebnisse aus den Screeningtests validiert
Standard äquivalent zu GH09
GH49 zeigt leichte Verbesserungen gegenüber den Alternativen

Abbildung 52 Testergebnisse Ölvariation a=63mm; i=30



GH09 Ergebnisse aus den Screeningtests validiert
Standard minimal schlechter als GH09
GH49 erzielt max. Moment aber nicht so deutlich wie bei a=63mm,i=30; ca. äquivalent zu GH09

Abbildung 53 Testergebnisse Ölvariation a=49mm; i=60

12.2.3. Zusammenfassung

Die Ergebnisse aus den Screeningtests konnten erfolgreich in der Baugröße a=49mm i=60 validiert werden. Die Schmierstoffvariation zeigt mit ansteigendem Achsabstand steigende Vorteile des eingesetzten Schmierstoffs GH49. Dazu wurde die prinzipielle Lauffähigkeit der neu entwickelten Radsätze unter realistischen Bedingungen und in beiden Baugrößen aufgezeigt.

12.3. Weiterführende Tests mit $a = 100 \text{ mm}$

Verantwortlich

Ruhr-Universität Bochum

Ausführende Stelle

Ruhr-Universität Bochum



12.3.1. Prüfstandsuntersuchungen

Im Arbeitspaket 11.6 wurden an der Forschungsstelle Prüfstandsversuche mit der Geometrie G5 (Tabelle 8) durchgeführt. In Laststeigerungsversuchen wurden die Tragfähigkeitsgrenzen der gefertigten Verzahnungen mit der Paarung Stahl/Stahl ermittelt. Die Fertigungsvarianten, die in den Laststeigerungsversuchen erfolgsversprechende Resultate zeigten, wurden dann noch in Dauerversuchen hinsichtlich ihrer Lebensdauer getestet.

Größe	Symbol	Einheit	Schnecke	Rad
Flankenform		[-]	I (evolventisch)	
Achsabstand	a	[mm]	100,000	
Übersetzung	i	[-]	20,500	
Steigungsrichtung		[-]	rechts	
Axialmodul	m_x	[mm]	4.000	
Zähnezahl	$z_{1,2}$	[-]	2	41
Mittensteigungswinkel	γ_0	[°]	12,529	
Eingriffswinkel	α_0	[°]	20,000	
Verzahnungslänge Schnecke	L	[mm]	60,000	
Radbreite	b_2	[mm]	-	30,000
Fusskreisdurchmesser	$d_{f1,2}$	[mm]	26,500	154,500
Mittlenkreisdurchmesser	d_{m2}	[mm]	36,000	164,000
Kopfkreisdurchmesser	$d_{a1,2}$	[mm]	44,000	172,000
Außendurchmesser	$d_{e1,2}$	[mm]	-	176,000
Profilverschiebung	x_2	[-]	-	0,000

Tabelle 8: Geometriedaten von der Verzahnung G5

Prüfstände

Die Laststeigerungs- und Dauerversuche für die Stahlräder der Geometrie G5 ($a=100$, $i=20,5$) wurden an zwei Schneckengetriebeprüfständen durchgeführt, die nach dem Prinzip der elektrischen Verspannung aufgebaut sind. In Abbildung 20 ist der Aufbau eines der beiden Prüfstände dargestellt. Zwei Gleichstrommotoren (1) und (7) mit jeweils 69,7kW Leistung verspannen den Prüfstand. Der Motor (1) dient als Antriebsmaschine, während der zweite Motor (7) als Generator bzw. Bremse betrieben wird. Über die Messwellen (2) und (4) werden die Drehmomente am Prüfgetriebe (3) gemessen. Die Messwelle (2) misst das Antriebsmoment an der Schneckenwelle, die Messwelle (4) das Abtriebsmoment an der Schneckenradwelle. Im Prüfgetriebe (3) befindet sich der in einer Sumpfschmierung betriebene Schneckenradsatz. Durch die hohe Übersetzung der Prüfverzahnung ($i=20,5$) entstehen an der Schneckenradwelle hohe Abtriebsmomente bei gleichzeitig niedrigen Drehzahlen. Durch die Verwendung eines zweistufigen Stirnradgetriebes (5) sowie eines Riementriebes (6) werden das Drehmoment und die Drehzahl auf geforderte Betriebswerte des Abtriebsmotors (7) gewandelt.

Die an- und abtriebsseitig am Schneckengetriebe angeschlossenen Drehmomentmesswellen (2) und (4) erlauben die Bestimmung des Gesamtwirkungsgrades η_{ges} des Prüfgetriebes. Über Ni-CrNi Thermoelemente werden im Prüfgehäuse die Ölsumpftemperatur und im Raum die Umgebungstemperaturen während des Versuchs gemessen. Weiterhin wird am Prüfstand die Antriebsdrehzahl gemessen.

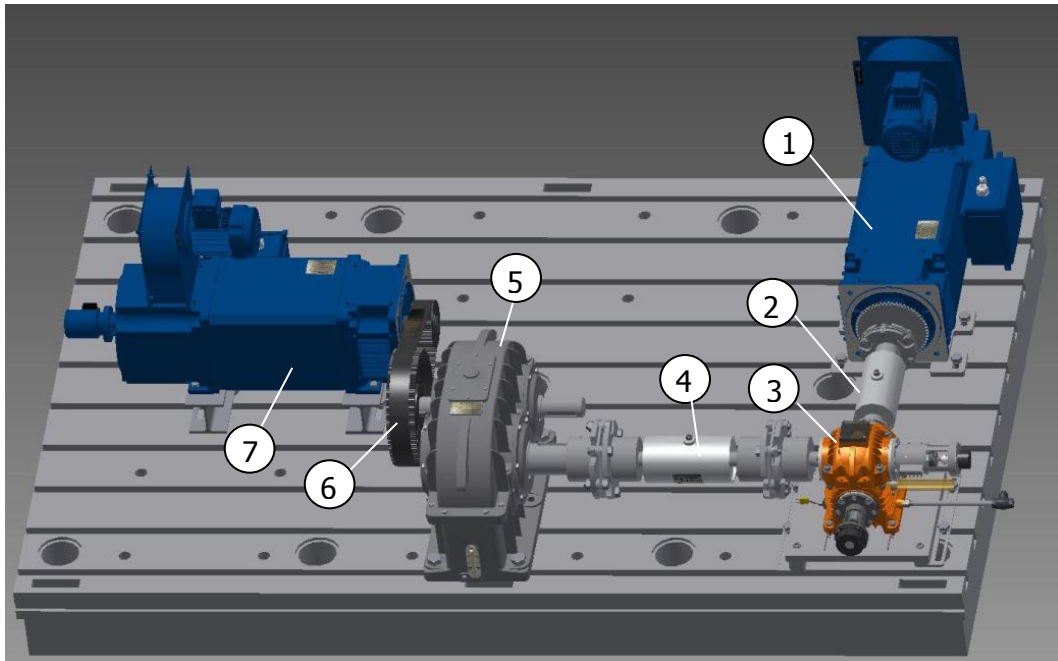


Abbildung 20: Aufbau des Schneckengetriebeprüfstands

Versuchsergebnisse

Insgesamt wurden an der Forschungsstelle 17 Schneckenradsätze in Prüfstandsversuchen getestet. Die untersuchten Schneckenwellen wurden aus dem Einsatzstahl 16MnCr5 gefertigt, einsatzgehärtet und anschließend geschliffen. Die Schneckenräder der Geometrie G5 wurden ebenfalls aus dem Einsatzstahl 16MnCr5 gefertigt. Die Schneckenräder der einzelnen Radsätze wurden anschließend allerdings unterschiedlichen Hart-Fein-Bearbeitungs- und Oberflächenveredelungsverfahren unterzogen. Sechs von den 17 getesteten Schneckenrädern wurden zunächst wälzgeschliffen und anschließend mit einer Wolframcarbid-Kohlenstoffschicht (WC/C) beschichtet. Drei Schneckenräder sind in einem Schälwälzvorgang gefräst und ebenfalls mit einer WC/C-Schicht beschichtet worden. Drei weitere schälwälzgefräste Schneckenräder wurden hinsichtlich der Oberflächenveredelung gleitgeschliffen. Weiterhin wurden an der Forschungsstelle zwei schälwälzgefräste und drei wälzgeschliffene Schneckenräder am Prüfstand getestet, die keine Oberflächenveredelung aufwiesen. In der Tabelle 9 sind die untersuchten Schneckenradvarianten zusammengefasst.



Schneckenradnr.	Fertigungsprozess	Oberflächenveredelung
R033	wälzgeschliffen	WC/C-Beschichtung
R034	wälzgeschliffen	WC/C-Beschichtung
R036	wälzgeschliffen	WC/C-Beschichtung
R043	wälzgeschliffen	-
R044	wälzgeschliffen	-
R045	wälzgeschliffen	-
R048	wälzgeschliffen	WC/C-Beschichtung
R049	wälzgeschliffen	WC/C-Beschichtung
R050	wälzgeschliffen	WC/C-Beschichtung
R084	schälwälzgefräst	-
R086	schälwälzgefräst	-
R092	schälwälzgefräst	WC/C-Beschichtung
R093	schälwälzgefräst	WC/C-Beschichtung
R094	schälwälzgefräst	WC/C-Beschichtung
R112	schälwälzgefräst	gleitgeschliffen
R117	schälwälzgefräst	gleitgeschliffen
R118	schälwälzgefräst	gleitgeschliffen

Tabelle 9: Bearbeitungszustände der Schneckenradvarianten

Laststeigerungsversuche

Bei den Laststeigerungsversuchen sollten die Schneckenverzahnungen hinsichtlich ihrer Tragfähigkeit untersucht werden. Bei der Werkstoffpaarung Stahl/Stahl ist mit einem Schadensfall durch Fresser an den Verzahnungen zu rechnen. Unter Fressen wird, wie bereits oben erwähnt, das wiederholte lokale Verschweißen und Losreißen zweier Gleitpartner aufgrund mangelnder Schmierung und hoher Kontakttemperaturen verstanden. Maßgeblichen Einfluss auf die Entstehung von Fressschäden haben neben der Gleitgeschwindigkeit, der Flankenpressung und der Oberflächenbeschaffenheit auch die Fresstragfähigkeit des Schmierstoffes sowie die Schmierstofftemperatur. Durch hohe Umfangsgeschwindigkeiten und große Belastungen an den Zahnflanken wird durch die Reibung im Kontaktbereich Wärme produziert. Durch die steigende Wärme sinkt die Viskosität des Schmierstoffes und es kann zum Abriss des Schmierfilms kommen, der in einem direkten Kontakt der beiden Gleitpartner resultiert. Tritt ein Fressschaden auf, welcher sich durch Materialausbrüche auf der Zahnflanke des Schneckenrades bemerkbar macht, kommt es zu einem

Anstieg der Verlustleistung und folglich zum Anstieg der Ölsumpf-temperatur des Schneckengetriebes.

Durch die Beobachtung der Ölsumpftemperatur und des Getriebewirkungsgrades können die Fressschäden detektiert werden. Da sich allerdings erste kleine Fresserscheinungen nicht immer sofort in den beiden genannten Kriterien sichtbar machen, wurden die Verzahnungen zusätzlich in definierten Zeitabschnitten optisch untersucht.

Für die Fressstestuntersuchungen wurden die Laststeigerungstest bei einer Antriebsdrehzahl der Schnecke von $n_1=1400$ 1/min durchgeführt. Am Schneckenrad wurde zunächst ein Abtriebsmoment von 400Nm eingestellt. Stündlich wurde die Last um 70Nm erhöht bis die Verzahnung durch einen Schaden ausfiel oder ein Überschreiten des Grenzwertes der Ölsumpftemperatur auftrat. Das verwendete Lastkollektiv für die Tragfähigkeitsuntersuchungen ist in der Tabelle 10 zu sehen.

Laststufe	Drehzahl n_1 [1/min]	Drehmoment T_2 [Nm]	Dauer [h]
L1	1400	400	1
L2	1400	470	1
L3	1400	540	1
L4	1400	610	1
Ln	1400	$400 + (n-1)*70$	1

Tabelle 10: Lastkollektiv Laststeigerungstests

Der Ablauf für die Laststeigerungsversuche hat sich wie folgt gegliedert:

Vermessen der Verzahnung vor dem Test

Einbau der Verzahnung in das Prüfgehäuse und Einstellen des Leerlauftragbildes

2 Liter Schmieröl in das Prüfgehäuse einfüllen

Starten des Laststeigerungsversuchs

Unterbrechen des Versuchs nach 2 Laststufen, optische Kontrolle der Verzahnung und Fotodokumentation vom Zustand der Radzahnflanke

Ausbau der Verzahnung nach Auftreten des Fressschadens

Reinigen des Prüfgehäuses

Vermessen der Verzahnung nach dem Test

WC/C-beschichtete Schneckenräder

Bereits in den Screeningtests bei der Elgeti Engineering GmbH in der Projektphase 1 wurde festgestellt, dass die beschichteten Räder sehr gute Ergebnisse lieferten und die höchsten Drehmomente bei deren Laststeigerungstests erreichten. Aus diesem Grund wurden insgesamt 9 WC/C-beschichteten Schneckenrad-Varianten der Geometrie G1 getestet.

Im Folgenden sollen die Versuchsergebnisse für beschichtete Schneckenräder beispielhaft am Schneckenrad R092 erläutert werden. Das Rad ist durch den Schälwälzprozess gefräst worden. Zudem wurde die Oberfläche des Schneckenrades mit einer WC/C-Schicht beschichtet. In der Abbildung 21 sind die Messergebnisse für den Versuchslauf mit dem Schneckenrad R092 zu sehen. Dabei sind die einzelnen Messgrößen wie Abtriebsdrehmoment T_2 (schwarz), Antriebsdrehzahl n_1 (rot), Gesamtwirkungsgrad des Getriebes η_{ges} (grün), Raumtemperatur t_R (blau) sowie die Ölsumpftemperatur t_s (orange) über der Prüfdauer aufgetragen. Das Lastmoment T_2 am Schneckenrad und die Antriebsdrehzahl n_1 beziehen sich auf die linke vertikale Achse. Die Temperaturen und der Wirkungsgrad werden mit der rechten vertikalen Achse skaliert.

Die Antriebsdrehzahl der Schnecke (rot) ist während des ganzen Versuchs konstant und beträgt $n_1=1400$ 1/min. Das Abtriebsmoment T_2 (schwarz), zu Beginn des Versuchs auf 400Nm eingestellt, wird anschließend stündlich um eine Last von 70Nm erhöht. In regelmäßigen Abständen von 60min ist ein Abfallen der Drehzahl und Drehmomentes zu erkennen. Der Prüfstand wurde nach jeder Laststufe angehalten, damit die Verzahnung einer Sichtprüfung unterzogen und Fotos von dem aktuellen Zustand der Radflanke gemacht werden konnten.

Die Umgebungstemperatur im Raum variierte während des Prüflaufs um die 30°C.

Der Getriebewirkungsgrad bewegt sich während des gesamten Tests auf einem konstant hohen Niveau. Es konnte ein Spitzenwirkungsgrad von 90% erreicht werden, was für ein Schneckengetriebe mit der Paarung Stahl/Stahl einen hohen und sehr guten Wert darstellt.

Die Ölsumpftemperatur (orange) steigt stetig mit der Lasterhöhung an. Dies ist auf die steigende Verlustleistung zurückzuführen. Bei konstant bleibender Drehzahl und steigender Last erhöht sich die umgesetzte Leistung im Getriebe. Bei konstantem

Wirkungsgrad bleibt die relative Verlustleistung zwar konstant, allerdings erhöht sich der absolute Betrag der Verlustleistung mit steigender Antriebs- bzw. Abtriebsleistung.

Bei der Last von $T_2=1030\text{Nm}$ und einer Dauer von $t=640\text{min}$ ist zu erkennen, dass der Wirkungsgrad sich verschlechtert und auf einen Wert von 85% fällt. Zusammenhängend mit dem Wirkungsgradverlust steigt die Ölsumpftemperatur noch stärker an.

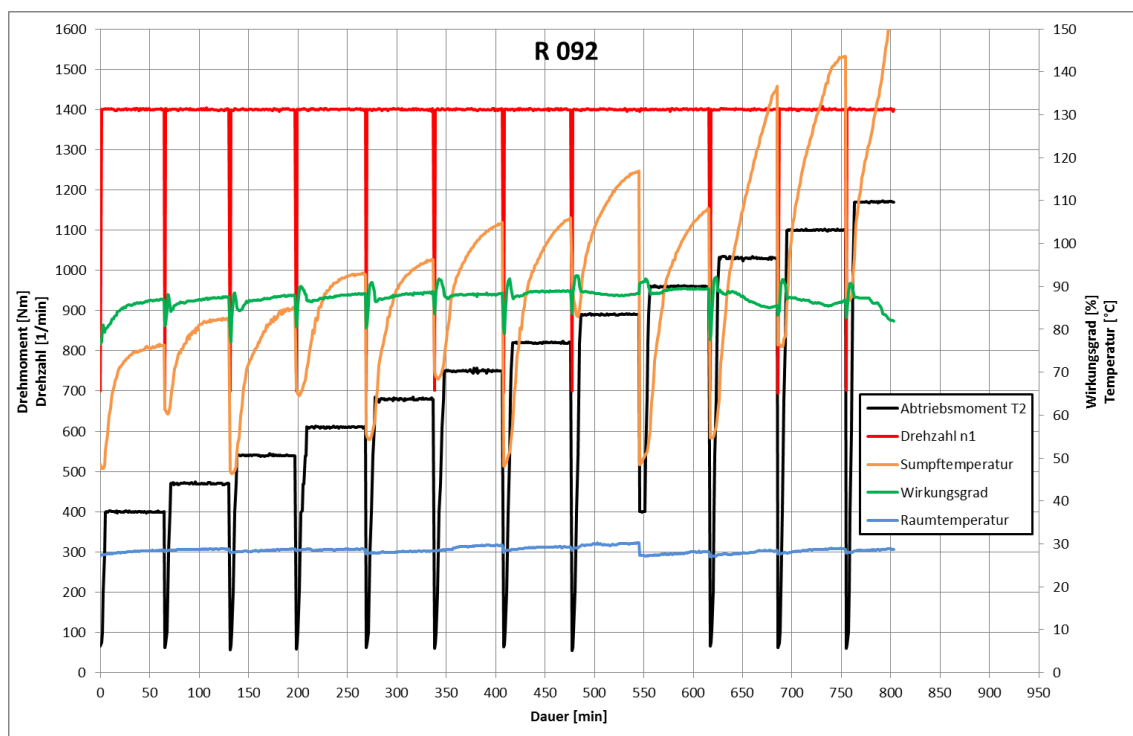


Abbildung 21: Messdaten für das Schneckenrad R092, rechte Flanke

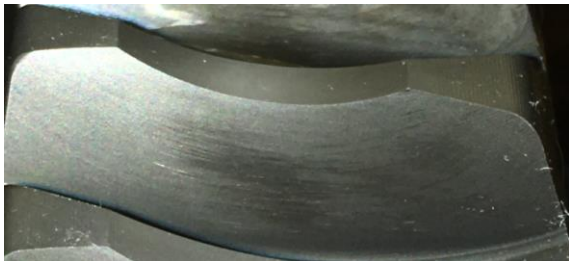
Ein Fressschaden auf Radflanke ist der Grund für diesen Effekt. Die Verzahnung kann zunächst noch eine kurze Dauer weiterbetrieben werden, bis sich der Fressschaden auf der Zahnflanke ausweitet und der Wirkungsgrad zunehmend schlechter wird. Bei einer Ölsumpftemperatur von 150°C und einem Wirkungsgrad von knapp über 80% wurde der Test abgebrochen.

Anhand der Dokumentationsbilder, die während des Testlaufs gemacht wurden, kann man den Schadenseintritt bzw. das Abnutzen der Beschichtung und das Eintreten des Fressers sehr gut nachverfolgen. In der Abbildung 22 sieht man das Leerlauftragbild nach dem Einbau des Radsatzes. Um den grauen Bereich (das Tragbild) herum sieht

man die blaue Tuschierpaste, die nach dem Abwälzen außerhalb der Kontaktzone zwischen der Schnecke und dem Schneckenrad noch auf der Zahnflanke verblieben ist. Das Tragbild liegt wie bei der Auslegung gewünscht auslaufseitig bis mittig (siehe Lasttragbild in Abb. 16).



Abb. 22: Leerlauftragbild

Abb. 23: Tragbild nach $T_2=610\text{Nm}$ Abb. 24: Tragbild nach $T_2=820\text{Nm}$ Abb. 25: Tragbild nach $T_2=890\text{Nm}$ Abb. 26: Tragbild nach $T_2=1030\text{Nm}$ Abb. 27: Tragbild nach $T_2=1170\text{Nm}$

In Abbildung 23 ist der Zustand des gleichen Radzahnes nach der Laststufe L4 ($T_2=610\text{Nm}$) zu sehen. Man erkennt erste Gebrauchsspuren in der Mitte der Zahnflanke. Die Wolframcarbid-Kohlenstoff-Schicht auf der Flanke ist noch intakt. Nach der Laststufe L7 ($T_2=820\text{Nm}$), siehe Abb. 24, ist ein ähnlicher Zustand der Radflanke zu beobachten. Die Radflanke weist neben kleinen Abschliffrückständen an der Beschichtung keine Schäden auf. In der Abbildung 25 können nach der Laststufe L8 ($T_2=890\text{Nm}$) bereits kleine Riefen in der Beschichtung im Bereich des Mittenkreises und des Zahnfußes beobachtet werden. In der Abbildung 26 sind dagegen bereits erste Fressspuren im Bereich des Zahnfußes gut erkennbar. Bei dieser Laststufe L10 ($T_2=1030\text{Nm}$) zeigt die Messdatenaufzeichnung (Abb. 21) eine Verschlechterung des

Wirkungsgrades. In der Abb. 27 können auf der Zahnflanke bereits große Fressschäden beobachtet werden. In diesem Zustand lässt sich die Verzahnung nicht mehr weiter betreiben. Der Verzahnungswirkungsgrad fällt rapide ab, womit die Verlustleistung und somit auch die Ölsumpftemperatur stark ansteigen.

Der beschriebene Schadensverlauf konnte bei den weiteren beschichteten Schneckenrädern ebenfalls festgestellt werden. Die WC/C-Beschichtung wird mit steigender Belastung immer mehr beansprucht. Sobald die Schutzschicht durchbrochen ist, bildet sich unmittelbar ein Fressschaden auf der Zahnflanke aus. Dieser tritt zunächst im Bereich des Zahnfußes auf, weil dort die größten Umfangsgeschwindigkeiten vorliegen. Nachdem der erste Fresser aufgetreten und ein Materialausbruch auf der Zahnflanke erfolgt ist, erhöht sich die Flächenpressung in den umliegenden Bereichen der Flanke, da bei gleicher Belastung sich die Kontaktfläche verringert hat. Folgend wächst der Fressschaden entlang der Zahnflanke.

In Tabelle 11 sind die Versuchsergebnisse von den Laststeigerungstests für die beschichteten Räder aufgelistet. Bei vier von sieben getesteten Verzahnungen wurden maximale Lastmomente von über 1000Nm erreicht. Das Nennmoment des Prüfgetriebes, welches standardmäßig mit einem Bronzerad betrieben wird, liegt bei $T_{2N}=800\text{Nm}$. Das maximale Abtriebsmoment von $T_{2\text{max}}=1120\text{Nm}$ wurde mit der Variante R049 erreicht und übersteigt das Nennmoment des Prüfgetriebes um 40%.

Radnummer	Bearbeitung	Flanke	T ₂ max.
R033	wälzgeschliffen+beschichtet +Schnecke beschichtet	LF	980Nm
		RF	1050Nm
R034	wälzgeschliffen+beschichtet	LF	980Nm
		RF	600Nm
R036	wälzgeschliffen+beschichtet	LF	540Nm
		RF	-
R049	wälzgeschliffen+beschichtet	LF	700Nm
		RF	1120Nm
R092	schälwälzgefräst+beschichtet	LF	1050Nm
		RF	1030Nm
R093	schälwälzgefräst+beschichtet	LF	700Nm
		RF	-
R094	schälwälzgefräst+beschichtet	LF	1100Nm
		RF	700Nm

Tabelle 11: maximal erreichte Drehmomente mit beschichteten Schneckenrädern

Die Versuchsergebnisse zeigen, dass die beschichteten Räder die Nenntagfähigkeit von Bronzerädern erreichen und diese sogar deutlich übersteigen können. Allerdings ist ebenfalls festzustellen, dass einige beschichtete Räder bereits bei kleineren Drehmomenten ausgefallen sind. Das geringste erreichte Abtriebsmoment beträgt 540Nm mit dem Rad R036. Bei vier weiteren Prüfläufen wurden ebenfalls Lastmomente von unter 800Nm erreicht. Der Fertigungsprozess der Verzahnung scheint bei den beschichteten Rädern eine untergeordnete Rolle zu spielen. Sowohl die wälzgeschliffenen als auch die schälwälzgefrästen Varianten zeigen ähnliche Ergebnisse. Für weitere Aussagen und statistische Belege müssten aber noch weitere Tests durchgeführt werden. Diese ersten Versuche zeigen aber bereits erfolgsversprechende Ergebnisse für die WC/C-beschichteten Schneckenräder.

Gleitgeschliffene Schneckenräder

Bei den Laststeigerungstests wurden drei Schneckenräder getestet, die im Bearbeitungsprozess zunächst schälwälzgefräst und anschließend gleitgeschliffen wurden. Bei den Versuchen mit den gleitgeschliffenen Rädern konnten im Vergleich zu den beschichteten Rädern nur kleinere Lastmomente erreicht werden (Tabelle 12). Das größte Abtriebsmoment konnte mit dem Schneckenrad R118 erzielt werden. Der Fressschaden entstand bei einem Drehmoment von 800Nm. Bei den anderen Tests wurden nur maximale Drehmomente von 400Nm bzw. 700Nm erreicht.

Radnummer	Bearbeitung	Flanke	T₂ max.
R112	schälwälzgefräst+gleitgeschliffen	LF	-
		RF	400Nm
R117	schälwälzgefräst+gleitgeschliffen	LF	700Nm
		RF	700Nm
R118	schälwälzgefräst+gleitgeschliffen	LF	800Nm
		RF	400Nm

Tabelle 12: maximal erreichte Drehmomente mit gleitgeschliffenen Schneckenrädern

Am Beispiel des Testlaufs mit dem Rad R117 sollen die Ergebnisse der gleitgeschliffenen Räder diskutiert werden.

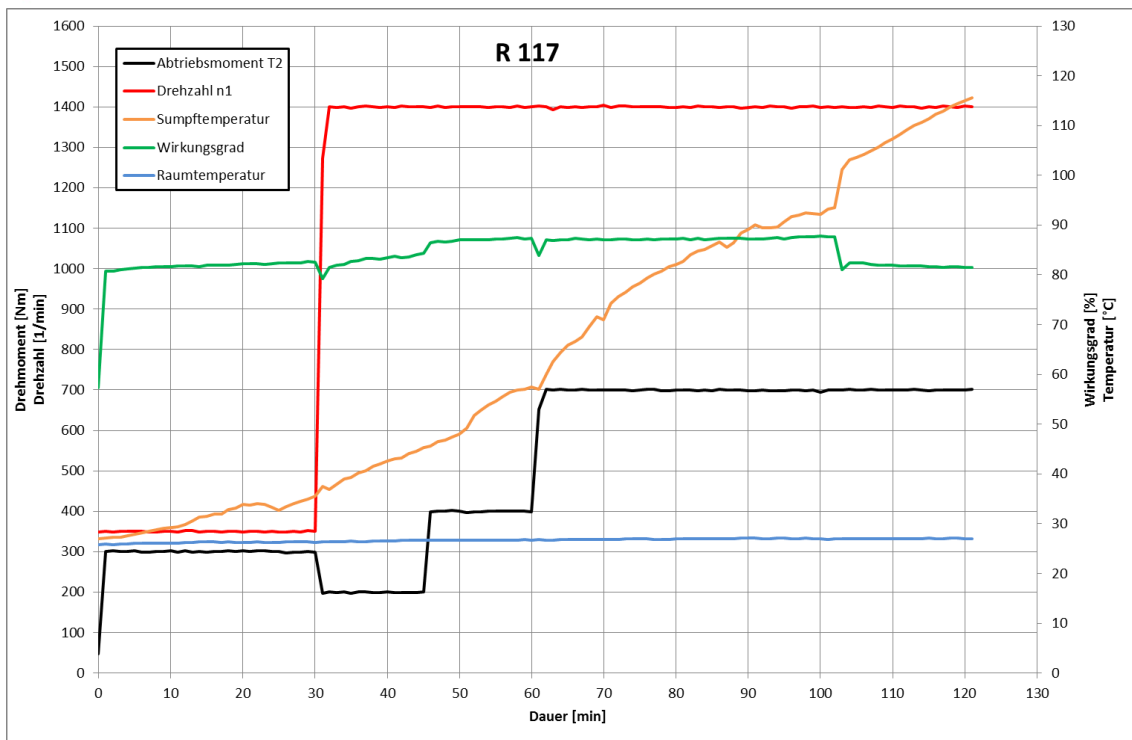


Abbildung 28: Messdaten für das Schneckenrad R117, rechte Flanke

In der Abbildung 28 sind die Messwertaufzeichnungen von diesem Versuchslauf zu sehen. Um einen Fresser bereits zu Beginn des Tests zu vermeiden, wurde die Verzahnung zunächst mit einer kleinen Drehzahl (rot) von $n_1=350$ 1/min und einer geringen Last (schwarz) von $T_2=300$ Nm angefahren. Nach einem halbstündigen Betrieb wurde der eigentliche Fressstest gestartet. Wie am Verlauf des Wirkungsgrades (grün) gut erkennbar ist, ist der Fressschaden bei einem Drehmoment von 700 Nm entstanden. Der Wirkungsgrad, der während des Laststeigerungsversuchs bis zu 87% betrug, fällt nach knapp 103min Versuchsdauer rapide ab. Der Gradient der Ölsumpftemperatur (orange) nimmt an dieser Stelle stark zu.

Die Bilder 29 bis 31 zeigen den Schadensvorgang an der Radflanke während des Testlaufs. In der Abbildung 29 ist zunächst das Leerlauftragbild zu sehen. Die Kontaktfläche zwischen der Schnecke und dem Schneckenrad liegt wie gefordert zwischen der Mitte der Zahnflanke und der Auslaufseite. Die Abbildung 30 zeigt die Gebrauchsspuren der Zahnflanke nach einer Last von 600 Nm. Es ist gut sichtbar, dass die Stahlflanke kaum verschleißt bzw. einläuft. Die Schleifspuren von der Schnecke befinden sich genau im Bereich des Leerlauftragbildes. In Abbildung 31 ist der Fress-

schaden, der bei einem Drehmoment von 700Nm aufgetreten ist, gut erkennbar. Die Fressspuren reichen von der Auslauf- bis zur Einlaufseite hinein.

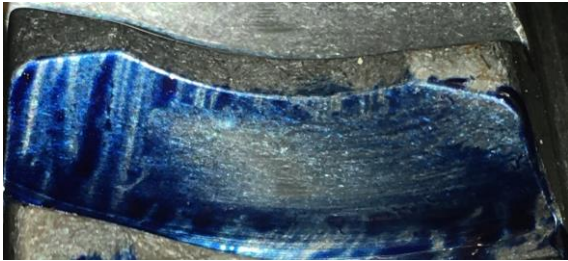


Abb. 29: Leerlauftragbild



Abb. 30: Tragbild nach $T_2=600\text{Nm}$



Abb. 31: Tragbild nach $T_2=700\text{Nm}$

Schälwälzgefräste und wälzgeschliffene Schneckenräder ohne Beschichtung

Mit den schälwälzgefrästen und wälzgeschliffenen Schneckenrädern ohne Beschichtung konnten wie schon vor den Tests erwartet im Durchschnitt nur kleinere Lastmomente erreicht werden. Bei fünf von neun Testläufen fielen die Verzahnungen bereits bei 400Nm oder sogar schon bei 300Nm aus (Tabelle 13). Bei den restlichen vier Versuchen konnte das Lastmoment, bei dem der Fressschaden aufgetreten ist, nicht eindeutig belegt werden (eingeklammerte T_2 -Werte in Tabelle 13).

Radnummer	Bearbeitung	Flanke	T_2 max.
R043	wälzgeschliffen	LF	(500Nm)
		RF	300Nm
R044	wälzgeschliffen	LF	400Nm
		RF	400Nm
R045	wälzgeschliffen	LF	400Nm
		RF	-
R084	schälwälzgefräst	LF	400Nm
		RF	(700Nm)
R086	schälwälzgefräst	LF	(700Nm)
		RF	(700Nm)

Tabelle 13: maximal erreichte Drehmomente mit wälzgeschliffenen und schälwälzgefrästen Schneckenrädern

An den Messergebnissen (Abb. 32) des Schneckenrades R043 soll dieser Effekt beispielhaft dargestellt werden. Bei einer konstanten Antriebsdrehzahl (rot) von 1400/min an der Schnecke wird das Lastmoment (schwarz) am Schneckenrad beginnend bei 200Nm stufenweise erhöht. Die Umgebungstemperatur (blau) während des Laufs schwankt um 28°C. Die Ölumpftemperatur (orange) erhöht sich mit steigender Last bis der Test bei Erreichen der Grenztemperatur von 130°C abgebrochen wird. Der Wirkungsgrad des Getriebes beträgt bis zu Drehmomenten von 500Nm maximal 78%. Mit Erhöhen der Last steigt der Wirkungsgrad an. Bei einem Drehmoment von 770Nm hat der Wirkungsgrad einen Wert von knapp 80%. Anhand der Messdatenerfassung kann der Zeitpunkt des Fressers nicht identifiziert werden. Die Dokumentationsbilder (Abb. 33-36) von der Radflanke bestätigen allerdings, dass ein Fressschaden spätestens ab einem Drehmoment von 500Nm vorgelegen hat. Bilder von dem Zustand der Radflanke nach den ersten Laststufen liegen nicht vor. Insofern kann der Zeitpunkt des Fressers nicht eindeutig bestimmt werden.

In der Abbildung 33 ist das auslaufseitige Leerlauftragbild dargestellt. In der Abbildung 34 ist bereits ein großflächiger Fressschaden auf der Radflanke zu beobachten. Der Wirkungsgrad betrug zu diesem Zeitpunkt 78%. In den Abbildungen 35 und 36 sind die Fressschäden an der Zahnflanke nach 600Nm bzw. 700Nm zu sehen. Der Getriebewirkungsgrad steigt derweil zu diesem Zeitpunkt auf 80% an. Bei einem Drehmoment von 770Nm musste der Versuch abgebrochen werden, da die Ölumpftemperatur den Grenzwert überschritten hat.

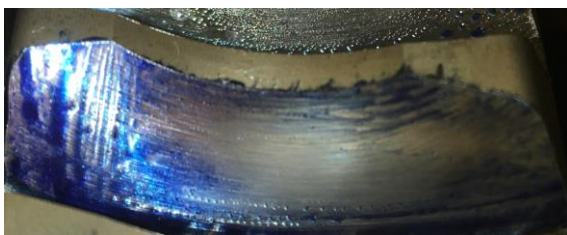


Abb. 33: Leerlauftragbild



Abb. 34: Tragbild nach $T_2=500\text{Nm}$



Abb. 35: Tragbild nach $T_2=600\text{Nm}$



Abb. 36: Tragbild nach $T_2=700\text{Nm}$

Bei den Untersuchungen der weiteren schälwälzgefrästen und wälzgeschliffenen Stahlräder wurde ein ähnlicher Verlauf der Messergebnisse festgestellt. Bei allen Rädern mit den nicht beschichteten Oberflächen zeigte sich somit eine große Unempfindlichkeit des Wirkungsgrades hinsichtlich eines auftretenden ersten Fressschadens.

Dauerlauf

In den Laststeigerungsversuchen wurde ermittelt, dass die mit Wolframcarbid-Kohlenstoff beschichteten Schneckenräder die höchsten Fresstragfähigkeiten erreichen. Mit mehreren Rädern konnten Lastmomente über 1000Nm erzielt werden. Das Rad R049 fiel erst bei einem Drehmoment von 1120Nm aus (siehe Tabelle 11). Dieser Wert liegt um 40% höher als das Nenndrehmoment von 800Nm eines dem Prüfgetriebe vergleichbaren Schneckengetriebes mit einer Schneckenradverzahnung aus Bronze.

Ausgehend von den hohen erzielten Fresstragfähigkeiten der beschichteten Räder im Laststeigerungsversuch wurden deshalb noch Verzahnungen dieser Fertigungsverfahren im Dauerversuch hinsichtlich der erreichbaren Lebensdauer beim Nenndrehmoment (800Nm) getestet.

Um einen vorzeitigen Ausfall der Verzahnung durch einen möglichen Fresser beim Anfahren des Prüfstandes zu vermeiden, wurde vor dem eigentlichen Testlauf ein kurzer Einlaufvorgang der Verzahnung vorgenommen (Tabelle 14). Hierdurch sollte sichergestellt werden, dass die WC/C-Schutzschicht nicht gleich beim Aufbringen der hohen Last durchbricht, sondern dass sie die Möglichkeit erhält einzulaufen, um lokale Pressungsüberhöhungen auf der Schutzschicht zu vermeiden. Insofern wurde zunächst bei einer Antriebsdrehzahl von 350 1/min die Last von 0Nm auf 600Nm in 200Nm-Abstufungen stündlich erhöht. Anschließend wurde die Nenndrehzahl von 1400 1/min an der Schneckenwelle eingestellt und das Lastmoment von 200Nm bis 600Nm erneut in 200Nm-Abstufungen stündlich erhöht. Schließlich wurde das Lastmoment in zwei 100Nm-Stufen auf das Nenndrehmoment von 800Nm hochgefahren. Bei diesem Lastpunkt wurde der Prüfstand solange betrieben, bis an der

Verzahnung ein Fressschaden auftrat. Dazu wurde alle 120 Stunden der Test kurzzeitig unterbrochen, um die Verzahnung einer optischen Sichtprüfung zu unterziehen.

Laststufe	Drehzahl n_1 [1/min]	Drehmoment T_2 [Nm]	Dauer
E1	350	0	1
E2	350	200	1
E3	350	400	1
E4	350	600	1
L1	1400	200	1
L2	1400	400	1
L3	1400	600	1
L4	1400	700	1
LN	1400	800	bis Ausfall

Tabelle 14: Lastkollektiv für die Dauerversuche

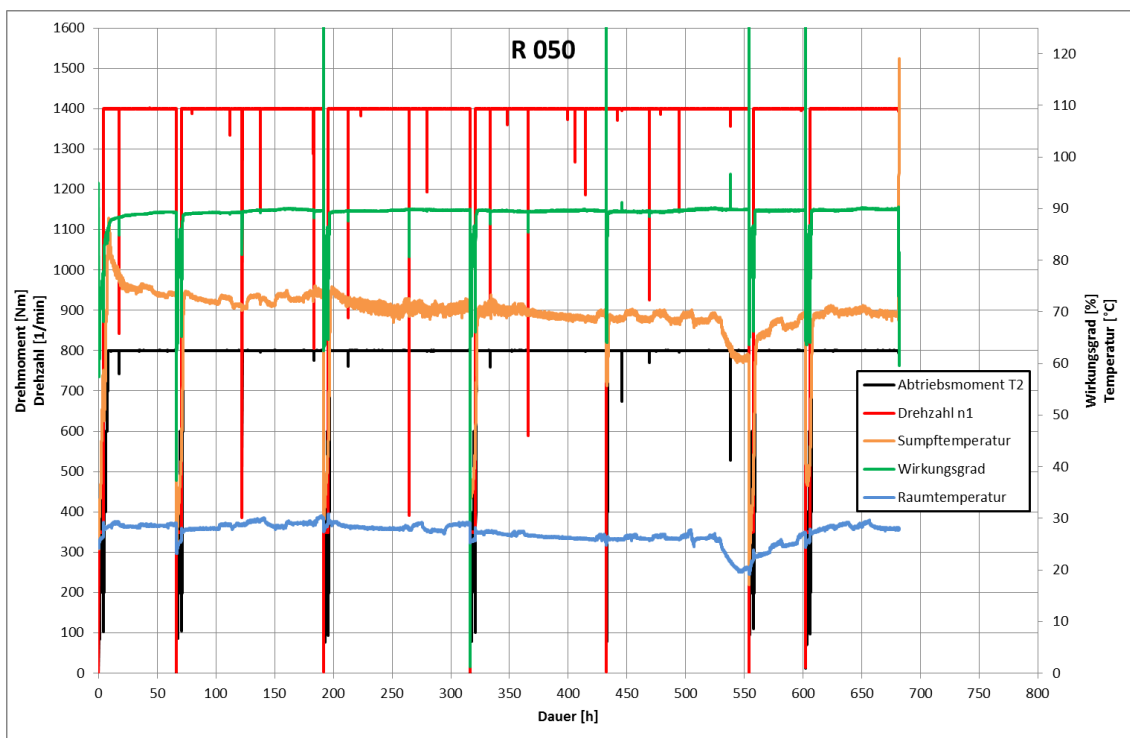


Abbildung 37: Messdaten von dem Dauerlauf des Rades R050, rechte Flanke

In Abbildung 37 ist die Messdatenaufzeichnung von dem Dauerlauf mit dem Rad R050 zu sehen. Die Verzahnung lief 681 Stunden schadensfrei, bis ein Fressschaden auf der Radflanke auftrat. Die Antriebsdrehzahl (rot) betrug 1400 1/min und das Drehmoment (schwarz) 800Nm während der Versuchslaufzeit bei Nennlast des

Schneckengetriebes. Es konnte ein hoher und konstanter Wirkungsgradverlauf (grün) zwischen 89-90% verzeichnet werden. Im Ölsumpf (orange) hat sich während des Versuchs eine Beharrungstemperatur von ca. 70°C eingestellt. In der Zeitspanne von 530h-550h ist ein Abkühlen der Ölsumpftemperatur auf bis zu 60°C festzustellen. Dies ist damit begründet, dass die Umgebungstemperatur in diesem Zeitraum durch das Fremdbelüften des Raumes von 27°C auf 19°C fiel. Nach 550h Testdauer ist wieder ein Anstieg der Umgebungs- und damit zusammenhängend der Anstieg der Ölsumpftemperatur zu erkennen. Nach Eintreten des Fressschadens (nach 681h) erkennt man einen plötzlicher Abfall des Wirkungsgrades und einen starken Anstieg der Ölsumpftemperatur. Der Versuch wurde daraufhin beendet.

In Tabelle 15 sind die Ergebnisse der weiteren Dauerlaufversuche aufgelistet. Beim Dauerversuch mit der Rückflanke (Linke Flanke) des Rades R050 konnte gerademal eine Laufzeit von einer halben Stunde erreicht werden, ehe die Verzahnung durch einen Fresser ausfiel. Mit einem weiteren wälzgeschliffenen und beschichteten Schneckenrad (R048) konnte eine Laufzeit von 120h erreicht werden.

Radnummer	Bearbeitung	Flanke	Dauer
R048	wälzgeschliffen+beschichtet	LF	120h
		RF	-
R050	wälzgeschliffen+beschichtet	LF	0,5h
		RF	681h

Tabelle 15: Lastkollektiv für die Dauerversuche

Die Ergebnisse der Dauerversuche zeigen, dass mit den beschichteten Schneckenrädern in einem Versuch eine sehr hohe Lebensdauer bei Nennbelastung des Getriebes erzielt werden konnte, in den anderen Versuchen fielen die Radsätze aufgrund von Fressern auf den Radflanken vorher aus. Eine statistische Aussage lässt sich nach so wenigen Versuchen aber noch nicht machen.

Es zeigt sich aber auch in den Dauerversuchen, wie auch schon bei den Laststeigerungstests, dass die Ergebnisse zum Teil stark schwanken. In diesem Zusammenhang muss die Wolframcarbidge-Kohlenstoff-Beschichtung insbesondere in Hinblick auf Homogenität und Verlauf der Schichtdicke entlang der Flankenoberfläche untersucht

werden. Gerade die Auswertung des Schadensfortschritts auf der Schneckenradflanke mit Hilfe der gemachten Bilder während der Versuchsdauer lässt darauf schließen, dass der Fressschaden unverzüglich auf der Radflanke auftritt, sobald die Schutzschicht beschädigt bzw. gebrochen ist. Es müssten somit weitere, detaillierte Untersuchungen der beschichteten Räder, insbesondere in Bezug auf die Qualität der Schutzschicht, durchgeführt werden.

12.3.2. Verzahnungsmessung

Die Fertigung von Schnecken und Schneckenrädern mit hoher Genauigkeit war für den Erfolg des Projektes unerlässlich. Je nach dem Fertigungsprozess und dem erzeugenden Werkzeug entstehen Fertigungsungenauigkeiten an den herzustellenden Bauteilen. Für das Erreichen hoher Tragfähigkeiten und langer Lebensdauern sind gerade bei der Werkstoffpaarung Stahl/Stahl hohe Verzahnungsqualitäten erforderlich. Durch Vermessen der Verzahnungsteile nach den einzelnen Fertigungsschritten konnten zum einen die Qualitäten der Verzahnungen ermittelt und zum anderen die auftretenden Fertigungsabweichungen den einzelnen Bearbeitungsschritten zugeordnet werden.

Für die experimentellen Untersuchungen sind Verzahnungen mit geringen Verzahnungsabweichungen notwendig, damit ungleichmäßige Lastverteilungen auf den Schnecken- und Schneckenradzähnen möglichst vermieden werden. Hohe Profil-, Teilungs-, Rundlauf- und Zahndickenabweichungen können bei den Versuchen zu vorzeitigen Ausfällen der Verzahnung führen. Weiterhin kann durch überhöhte Abweichungen bei den Verzahnungen ein ungleichmäßiger Lauf des Getriebes verursacht werden. Für erfolgsversprechende Versuchsergebnisse sollen die Schneckenräder eine Verzahnungsqualität 6 oder besser nach DIN 3974 **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** aufweisen. Für die Schneckenwellen wird eine um mindestens eine Stufe bessere Verzahnungsqualität gefordert.

Die Forschungsstelle verfügt über ein Verzahnungsmesszentrum PNC 65 der Fa. Klingelberg (Abb. 38 links), mit welchem die Verzahnungen von Schnecken und Schneckenräder beliebiger Geometrie vermessen werden können. Die Verzahnungsteile

werden zwischen zwei Zentrierkegeln auf einem Drehtisch eingespannt und anschließend mittels eines Tasters, welcher in einem verfahrbaren Messarm gelagert ist, abgetastet (Abb. 38 Mitte und rechts).

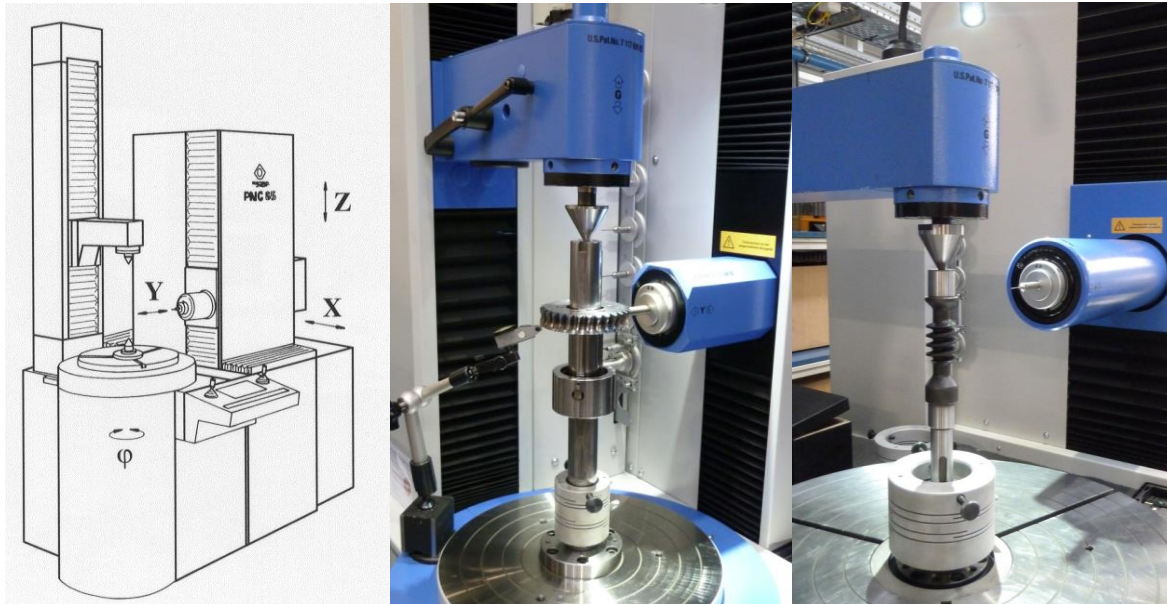


Abbildung 38: Klingelnberg PNC 65, Vermessung von Schneckenrad und Schnecke

Mit diesem Vermessungszentrum können an der Schnecke die Profil-, Teilungs- sowie die Steigungsabweichungen gemessen werden. Am Schneckenrad erfolgt neben der Messung der Profil-, Teilungs-, Rundlauf- und Zahndickenabweichungen eine Topographiemessung der Zahnflanke. Bei der Topographiemessung werden die Abweichungen zwischen einer idealen Schneckenradflanke, welche mittels des Computerprogramms TRABI 8.1 berechnet wird, und der realen Radflanke entlang eines definierten Rasters dargestellt. Die Topographieabweichungen werden in der DIN 3974 **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** nicht berücksichtigt und haben somit keinen Einfluss auf die nominelle Verzahnungsqualität.

Insgesamt wurden während der Projektlaufzeit 68 Stahlräder und 2 Bronzeräder der Geometrie G1 ($a=62,17\text{mm}$) vermessen. Von den beiden Bronzerädern erreichte eines nicht die geforderte Qualitätsstufe 6 nach DIN 3974, weil es eine zu hohe Rundlaufabweichung aufwies. Von den 68 Stahlrädern wiesen 38 Räder eine schlechtere Qualität als 6 auf. Bei 31 Rädern wurden zu hohe Rundlauffehler und bei 7 Rädern zu hohe Teilungsabweichungen festgestellt.

Zusätzlich wurden mit dem Verzahnungsmesszentrum 2 Schneckenräder der Geometrie G3 ($a=49,5\text{mm}$) vermessen. Beide Stahlräder erfüllten die geforderte Qualität 6.

Weiterhin wurden 18 Stahlräder der Geometrie G5 ($a=100\text{mm}$) vermessen. Hier erreicht nur 1 Schneckenrad die Qualität 6 aufgrund einer zu hohen Teilungssprungabweichung nicht.

Es fällt auf, dass die Schneckenräder, die die Qualität 6 nicht erreichten, überwiegend zu hohe Rundlaufabweichungen aufwiesen. Zudem tritt dieser Effekt nur bei der Geometrie G1 auf. Dies kann damit begründet werden, dass die Schneckenräder der Geometrie G1 keinen Prüfbund am Radkranz enthalten. Somit lassen sich die Räder in der Verzahnungsmessmaschine deutlich schlechter ausrichten. Einige Vergleichsmessungen mit Liebherr-Verzahntechnik ergaben, dass bei Liebherr keine überhöhten Rundlaufabweichungen festgestellt werden konnten.

Da die Radkränze vor dem Test auf eine Schneckenradwelle aufgezogen und an dieser zentriert werden, können die geringen Rundlaufabweichungsüberhöhungen vernachlässigt werden. Bei den Profil- und Teilungsabweichungen wurden bei nahezu allen Verzahnungen die geforderten Werte eingehalten.

Neben den Schneckenrädern wurden an der Forschungsstelle 20 Schneckenwellen der Geometrie G1 und 16 Schneckenwellen der Geometrie G5 vermessen. Von den insgesamt 36 vermessenen Schnecken erreichte keine Verzahnung die geforderte Qualität 5. Hierbei ist allerdings zu vermerken, dass jeweils eine von den vermessenen Zahnflanken die Grenzwerte überschritt, während auf der anderen Zahnflanke die Profil-, Teilungs- und Steigungsabweichungen eingehalten wurden.

Die Tabellen mit den zusammengefassten Messergebnissen sind im Anhang beigefügt.

12.3.3. Zusammenfassung und Ausblick

Zu Beginn des Projektes führte die Forschungsstelle eine umfassende Literaturrecherche durch. Aus diversen Dissertationen, Veröffentlichungen und Artikeln in technischen Zeitschriften wurde der Stand der Technik zu Fresstragfähigkeiten, Lastkollektiven, bisherigen Untersuchungen von Stahl- und Gusschneckenrädern, relevanten Messgrößen, alternativen Verzahnungsgeometrien sowie Beschichtungen in einem ausführlichen Bericht zusammengefasst und den Projektpartnern zur Verfügung gestellt. Auf mögliche Problemstellungen wurde hingewiesen.

Anschließend legte die Forschungsstelle für drei verschiedene Schneckengetriebe-Größen je eine ZI- und eine ZC-Verzahnungsgeometrie aus. Neben Berechnungen von Leerlauftragbildern, Berührlinien und Tragfähigkeitsnachweisen entstanden für die Verzahnungen FE-Simulationen und Sensitivitätsanalysen für fertigungstechnisch realisierbare und experimentell erfolgsversprechende Verzahnungen.

Um alle während des Projektes erzielten Resultate mit den bisherigen Forschungsergebnissen, insbesondere mit Referenzschneckenrädern aus Bronze vergleichen zu können, wurde von den Projektpartnern entschieden, für alle Getriebebaugrößen nur Verzahnungen mit der Flankenform ZI zu fertigen. Schneckenräder mit ZC-Verzahnungsgeometrien wurden nicht hergestellt.

Bei den Prüfstandsversuchen mit Schneckenradsätzen der Baugröße $a=100\text{mm}$ erreichten die wälzgeschliffenen und schälwälzgefrästen Schneckenräder ohne nachfolgende Oberflächenbeschichtung die geringsten Tragfähigkeiten mit nur 700Nm . Die Identifikation eines Fressschadens erwies sich bei diesen Varianten oftmals als schwierig, da der Getriebewirkungsgrad während dieser Tests trotz erster Fresser nahezu konstant bei Werten von $80\text{-}82\%$ lag.

Mit den gleitgeschliffenen Rädern wurden schon höhere maximale Lastmomente erreicht. Diese lagen mit $700\text{Nm-}800\text{Nm}$ bereits auf dem Niveau der in Katalogen angegebenen Nenndrehmomente von $T_N=800\text{Nm}$ für vergleichbare Schneckengetriebe mit Schneckenrädern mit Verzahnungen aus Bronze.

Die Schneckenräder, deren Verzahnungen nach der Hart-Fein-Bearbeitung eine WC/C-Oberflächenbeschichtung bekamen, erreichten in den Laststeigerungstest die

größten Fresstragfähigkeiten bei Lastmomenten bis 1120Nm, ehe sie wegen Fressschäden ausfielen. Die Getriebewirkungsgrade lagen dabei mit bis zu 90% auf einem hohen Niveau. Bei den Dauerversuchen mit den WC/C-beschichteten Schneckenrädern konnte eine Verzahnung im Dauerlauf 681 Stunden lang betrieben werden, bis sie mit einem Fressschaden ausfiel. Während des gesamten Dauerlaufs wurde ein Wirkungsgrad von ca. 90% verzeichnet.

Insgesamt wurde noch eine große Streuung der Versuchsergebnisse beobachtet. So fielen mehrere Verzahnungen unabhängig vom Herstellungsverfahren bereits bei niedrigen Lasten. Hier sollten weiterführende Untersuchungen durchgeführt werden, um alle Verfahrensprozesse zu stabilisieren und eine statistische Aussage über die Ergebnisse tätigen zu können.

Abschließend lässt sich somit sagen, dass mit den WC/C-beschichteten Schneckenrädern durchaus gute Versuchsergebnisse erzielt wurden. Die Verzahnungen erreichten in der Tragfähigkeit, im Wirkungsgrad und in einem Versuch auch in der Lebensdauer ein hohes Niveau. Wenn sich in weiteren Arbeiten diese positiven Ergebnisse bestätigen lassen, können Zylinderschneckengetriebe mit Radverzahnungen aus Stahl für bestimmte Anwendungen in der Industrie geeignet sein.

Zudem wurden bei den bisherigen Versuchen lediglich Verzahnungsgeometrien mit der Flankenform ZI untersucht. Versuchsergebnisse von Bronzeverzahnungen mit der Flankenform ZC zeigen aufgrund ihrer günstigen Lage der Berührlinien gute Resultate. Es wäre wichtig, in weiteren Forschungen alternative und erfolgsversprechende Geometrien für die Paarung Stahl/Stahl zu testen. Es ist davon auszugehen, dass mit einer speziell an die Paarung Stahl/Stahl angepassten Verzahnungsgeometrie noch bessere Ergebnisse erreicht werden können.

13. Prozesskettenbewertung Bonfiglioli Vectron

Verantwortlich

Bonfiglioli Vectron MDS GmbH

Ausführende Stelle

Bonfiglioli Vectron MDS GmbH

13.1. Ergebnisse

Als Projektleiter übernahm die Bonfiglioli Vectron MDS GmbH die Koordination und die Durchführung der halbjährlichen Verbundtreffen und richtete hierbei auch das Kickoff- und 1. Verbundtreffen am Standort in Krefeld aus, wo bei letzterem auch der für das Projekt genutzte Prüfstand besichtigt werden konnte. Durch die Organisation, Einrichtung und Pflege des von der Ruhr-Universität Bochum zur Verfügung gestellten SharePoint Servers stellte Bonfiglioli Vectron MDS GmbH den Datenaustausch und Kommunikation zwischen der Vielzahl an unterschiedlichen Projektpartnern auf einer vertrauensvollen Ebene sicher und war darüber hinaus stets als Ansprechpartner für Fragen jeglicher Art zu erreichen.

Neben den Projektleitertätigkeiten lag die Verantwortlichkeit der Bonfiglioli Vectron MDS GmbH schwerpunktmäßig in den Bereichen Geometrieauslegung, Bereitstellung von Versuchsradständen und der Versuchsplanung, sowie der abschließenden Prozesskettenbewertung. Darüber hinaus wurden auf den eigens dafür konstruierten Prüfstand Vergleichsversuche zu den Tests bei Elgeti Engineering und der Ruhr-Universität Bochum durchgeführt.

Insgesamt wurden auf den vorhandenen drei Prüffeldern aller Partner 156 Prüfsätze in 39 Prüfvariationen mit dem Ziel getestet, verlässliche Grenzbelastungen zu ermitteln, um im Folgenden daraus Einsatzbedingungen für spätere Anwendungen abzuleiten. Die ermittelten Belastungen dienen weiterhin als Vergleichsbasis zur Bestimmung des technischen Nutzens der jeweiligen Prozesskette und wird bei der Prozesskettenanalyse den jeweiligen abgeschätzten Kosten gegenübergestellt.

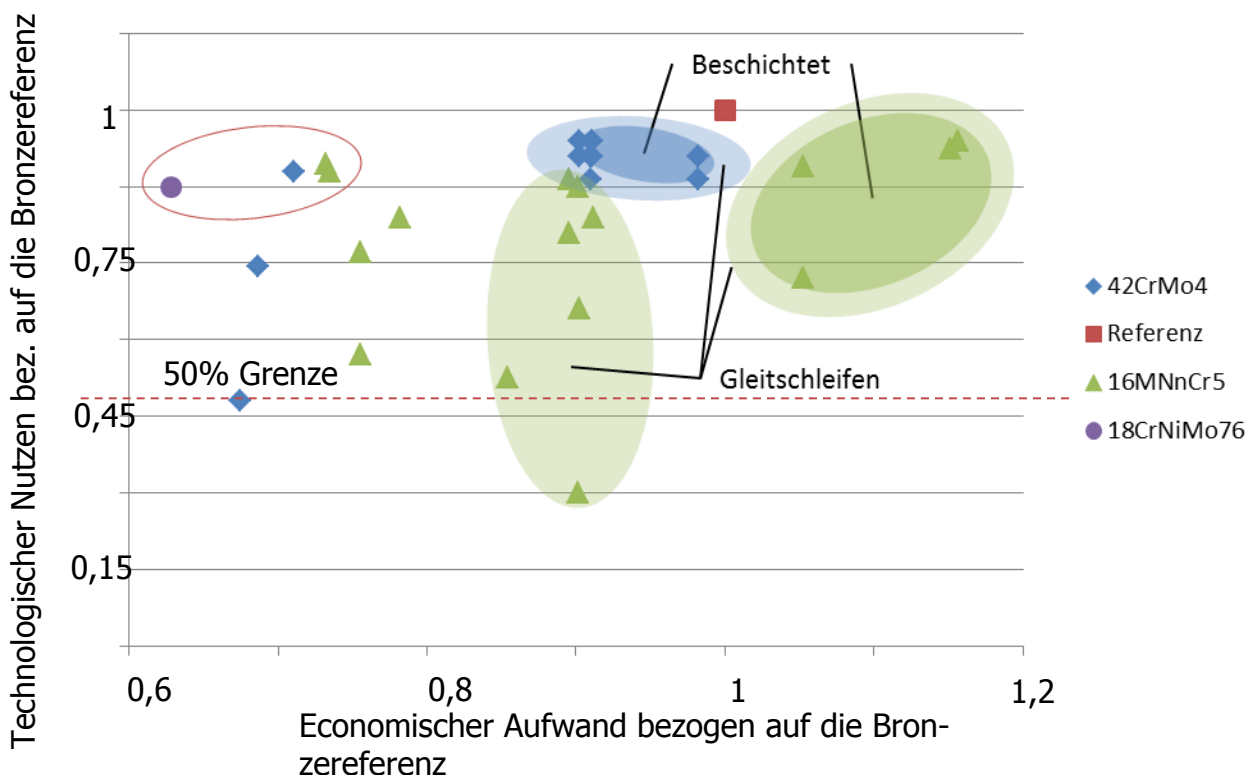
Für die Prozesskettenanalyse wurde bei Bonfiglioli ein Auswertungsprogramm entwickelt, das auf Basis aller zur Verfügung stehender Daten, eine Kosten/Nutzen-Abschätzung der einzelnen getesteten Prozessketten ermöglicht. Hierzu werden zwei charakteristische Werte gebildet, Z_{Tech} und Z_{Eco} , die den technologischen Erfolg und die Kosten für die Prozesskette abbilden. Die für die ökonomische Schätzung der Zahnradproduktion benötigten Eingangsdaten können in die Daten der Makrogeometrie, benötigte Fertigungsprozesse, allgemeinen Daten der wirtschaftlichen Situation (z.B. Strom und Löhne) und die Daten für die benötigten Maschinen eingeteilt werden. Z_{Eco} berücksichtigt auch die Komplexität der Prozesskette und die daraus resultierenden zusätzlichen Logistikkosten. Die allgemeinen Daten der ökonomischen Situation beschreiben die Situation in der Industrielandschaft. Dort werden die Einflüsse von Energiekosten und Gehalt sowie die Produktionskapazität und die Abschreibung der Maschinen berücksichtigt. Die Maschinendaten berücksichtigen die fixen und variablen Kosten für die verschiedenen Prozessketten. Beispielsweise be-

stehen diese aus Investitionskosten, Stromverbrauch, Ressourcen, Wartungszeit und Personal für den Betrieb. Das Ergebnis ist ein Vergleich aller Prozessketten bezogen auf die Referenzprozesskette (Bronzeradfertigung mit den im Projekt benutzten Werkzeugen => gleiche Mikrogeometrie) und beschreibt einen prozentualen Wert des ökonomischen Aufwands gegenüber der Referenz.

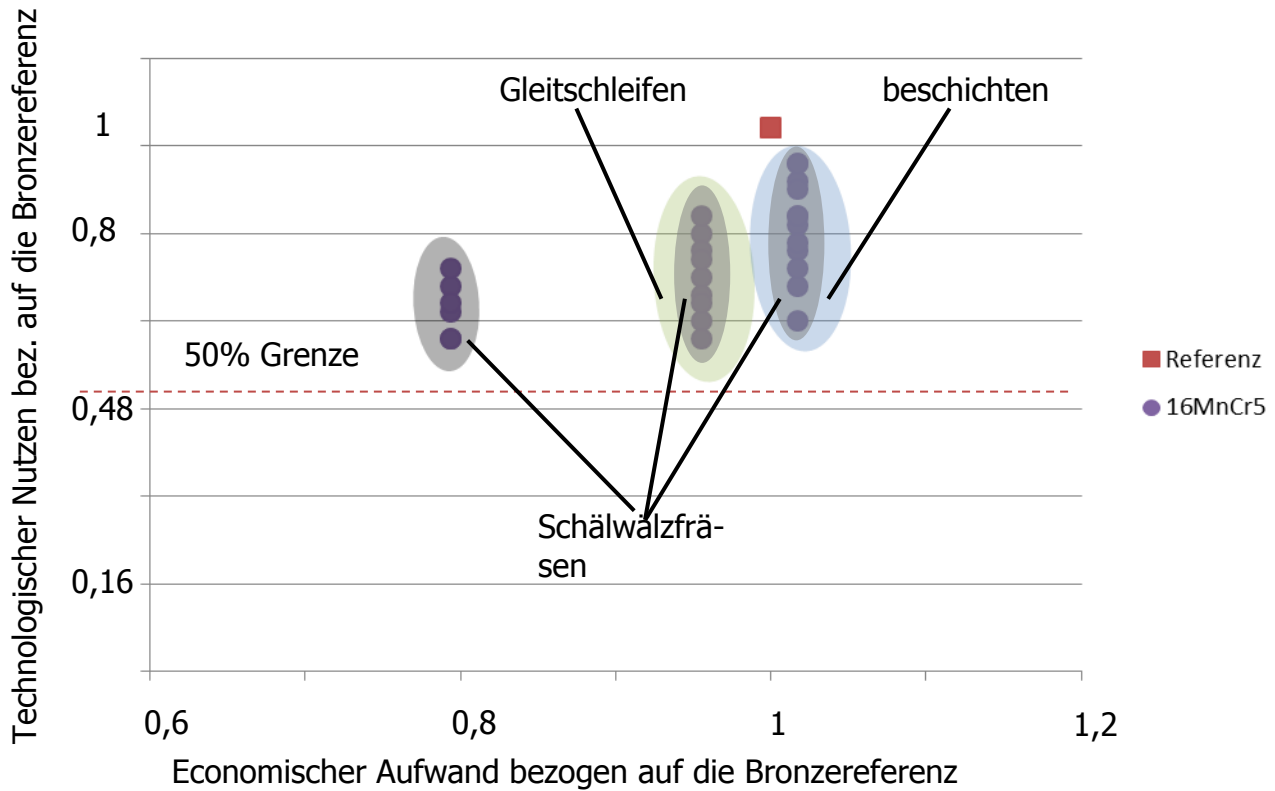
Ebenso bildet der Parameter für die technische Machbarkeit Z_{Tech} einen Vergleich des ertragbaren Drehmomentes bevor es zur Schadensausbildung im Getriebe kommt. Hierbei dienen die Bronzereferenzgetriebe mit einem Wert von $Z_{Tech} = 1$ als Vergleichswerte, berücksichtigt dabei aber auch die unterschiedliche Anzahl an durchgeführten Versuchen in Form einer Verlässlichkeitsbetrachtung und die Art, Ausprägung und Verlauf des erzeugten Schadens aus den Untersuchungen der Hochschule Niederrhein.

13.1.1. Kosten/ Nutzen Analyse

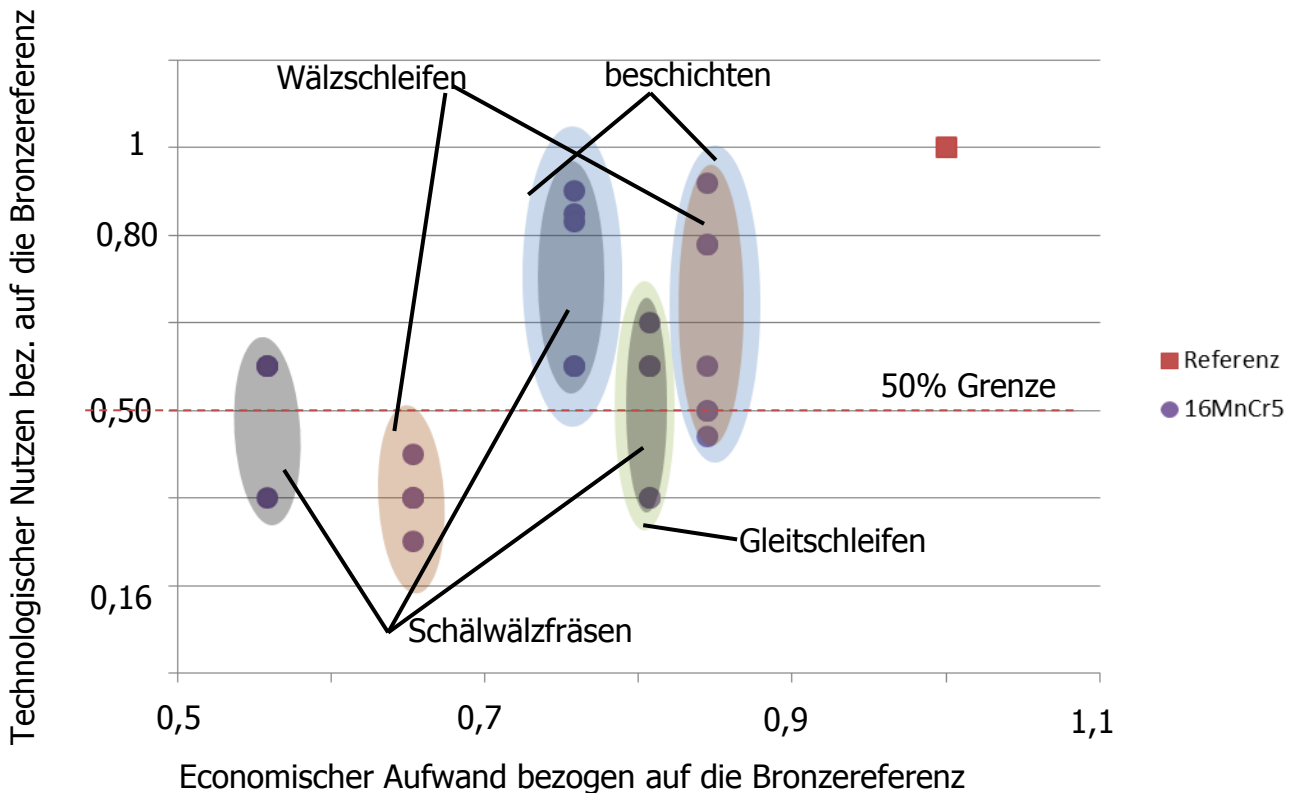
Testergebnisse nach Varianten in der Geometrie a=63mm i=30



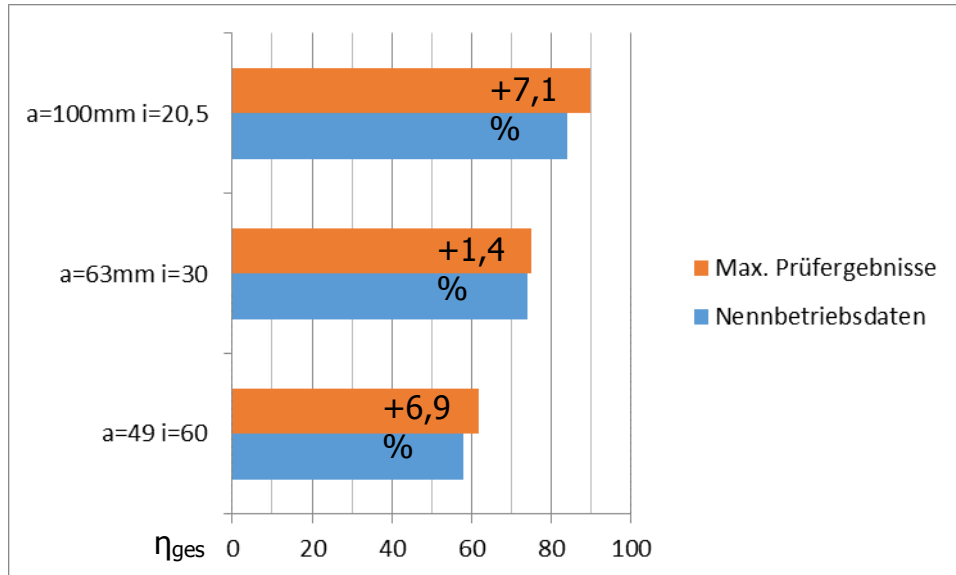
Testergebnisse nach Varianten in der Geometrie a=49mm i=60



Testergebnisse nach Varianten in der Geometrie a=100mm i=20,5



Wirkungsgradsteigerung nach Baugröße



13.1.2. Erfolgsaussichten und Verwertung

Insgesamt zeigen die Ergebnisse im Projekt, dass ein niedrig legierter Stahl wie 16MnCr5 oder 42CrMo4 als Grundmaterial ausreicht um einen vergleichbaren Stahl-Stahl Radsatz herzustellen. Dabei lassen sich die Ergebnisse in allen drei getesteten Getriebebaugrößen validieren. Es zeigt sich mit der steigenden Belastung in den größeren Radsätzen zunehmend der Bedarf höherer Oberflächenanforderungen, wobei gerade bei der Verzahnung mit Achsabstand 100 mm eine Beschichtung oder ein Gleitschleifen als notwendig erscheint, um über der geforderten 50% Grenze des Ausfallmomentes des Bronzegetrieberadsatzes zu liegen. Allerdings steigen mit zunehmendem Achsabstand auch die Kosten für die Referenzbronzeräder, womit sich mit steigender Getriebegröße selbst bei Beschichtungen ein Kostenvorteil erkennen lässt. Der niedrigste Kostenspielraum liegt bei den Getrieben des Achsabstandes 49mm, wobei hier mit 80% der Kosten eines Bronzerades ein lauffähiger Stahl-Stahl Radsatz erzeugt werden konnte.

Die erreichten Wirkungsgrade zeigen eine Steigerung von ca. 7% bei den Baugrößen $a=100$ und $a=49$ bei einer Antriebsdrehzahl von $n = 1400 \text{ min}^{-1}$ gegenüber den Bronzerädern gleicher Baugröße. Der max. Wirkungsgrad in der größten Baugröße ist mit $\eta_{\text{ges.}_a100i20,5} = 90\%$ für ein Schneckengetriebe durchaus erwähnenswert. In der Baugröße $a=63 \text{ i}=30$ bleibt die Wirkungsgradverbesserung zwar hinter den Erwartungen zurück, allerdings wird auch hier eine Verbesserung von ca. 1,5% gegenüber einem Bronzeradsatz derselben Größe erreicht.

Im Einzelnen lassen sich aus Sicht von Bonfiglioli folgende Aussagen zu den getesteten Herstellungsverfahren aus den Prüfergebnissen ableiten:

Schälwälzfräsen

Das Schälwälzfräsen stellt die im Test kostengünstigste Alternative zur Herstellung der Verzahnungen dar. Die erreichten Oberflächen- und Geometriequalitäten haben die vor Projektstart prognostizierten Erwartungen übertroffen, wodurch sogar eine Beschichtung ohne weiteren Zwischenschritt möglich wurde. Diese bei Projektstart nicht für realistisch gehaltenen Varianten zeigten in der Baugröße Achsabstand 100mm die besten Ergebnisse bezogen auf einen Kosten/Nutzen Vergleich. Bei mittleren Drehmomenten oder höheren Erwartungen an die Wirkungsgrade reicht das Schälwälzfräsen als alleinige Bearbeitung allerdings nicht aus.

Wälzschleifen

Die Ergebnisse des Wälzschleifen sind insofern erwähnenswert, da das Projekt die Prinzipielle Machbarkeit der schleifbrandfreien Herstellung bewiesen hat und dabei auch aus qualitativer Sicht gute Ergebnisse erzielte. Aufgrund der aufwändigen Herstellung der Schleifschnecke und der leider etwas schlechteren Ergebnisse gegenüber dem Schälwälzfräsen ist diese Methodik wirtschaftlich allerdings noch nicht sinnvoll einsetzbar.

Einsatzhärten

In Bezug auf das Einsatzhärten lässt sich die Tendenz ableiten, dass höhere Härten auch zu besseren Prüfstandsergebnissen geführt haben. Die aufgetretenen Verzüge sind geringer als erwartet, was zu kostengünstigeren Rädern führt, da weniger Aufwand bei den Rohlingen vorgehalten werden muss und auch die Hartfeinbearbeitung schneller und kostengünstiger ausfallen kann als erwartet. Dies bietet auch im Weiterverfolgung dieser Varianten ein weiteres Kosteneinsparungspotential.

Die Sondervariante über die Einstellung eines definierten Restaustenitgehaltes konnte zwar nur mit 3 Versuchen begutachtet werden, aber auch hier zeigt sich ein Ansatz, der durchaus weiter verfolgt werden kann. Die entsprechenden Radsätze erreichten bei gerade einmal 62% der Kosten eines Bronzerades fast 90% dessen Drehmoments. Bei den im Projekt geprüften Rädern werden zukünftig in Zusammenarbeit mit der HSNR über das Projekt hinaus Untersuchungen des Gefüges des Materials stattfinden, die die Einsatzmöglichkeiten dieser Variante weiter verbessern soll. Nachteilig ist hier lediglich der höher legierte Stahl zu nennen, den man als Grundmaterial für diese Variante benötigt. Ziel soll es sein, auch hier mit einem vergleichbaren Stahl zum 16MnCr5 auszukommen.

Plasmanitrocarburieren/Plasmanitrieren

Es konnte kein qualitativer Unterschied im Zusammenhang mit einem höheren übertragbaren Drehmoment zwischen Plasmanitrieren und Plasmanitrocarburieren aufgezeigt werden. Die plasmagehärteten Varianten zeigten im Vergleich zu den einseitig gehärteten Rädern bereits bei weniger Bearbeitungsschritten höhere Drehmomente

bis zur Schadensbildung. Aus diesem Grund ist ein fertiggefrästes, plasmagehärtetes Zahnrad gerade in den kleineren Baugrößen kostentechnisch interessant. In Kombination mit einer Beschichtung konnten mit plasmagehärteten Bauteilen bei einer Kosten/Nutzen Abschätzung mitunter die besten Ergebnisse erzielt werden. Ein Gleitschleifen ist bei diesen Varianten wirtschaftlich und technisch nicht sinnvoll, da die Leistungssteigerung vernachlässigbar klein ist und aufgrund der geringen Nitrierhärte tiefe von einem Abtrag der Randschicht abgesehen werden sollte. Der positive Effekt der Kopfkantenabrundung beim Gleitschleifen (Verhindern von Kantenträgern) kann technisch auch kostengünstiger beim Fräsen berücksichtigt werden.

Strahlen

Der Strahlprozess, der bei Rösler vor dem Gleitschleifen eingesetzt wurde um definierte Schmiertaschen auf der Oberfläche zu erzeugen lieferte leider nicht die gewünschten Ergebnisse. Im Vergleich zu einem reinen Gleitschleifen konnte ein gestrahltes und gleitgeschliffenes Rad keine Leistungssteigerung oder bessere Schmierbedingungen im Zahnkontakt erreichen. Vielmehr zeigte sich, dass die Mikrostrahlbehandlung die bei Balzers zur Säuberung der Oberfläche vor dem Beschichten eingesetzt wird gute Ergebnisse liefert. Gerade bei Kombination mit einer Beschichtung kann also auf einen separaten Strahlvorgang verzichtet werden, was sich kostengünstig auf die Varianten mit einem abschließenden Beschichtungsprozess auswirkt.

Gleitschleifen

Der Gleitschleifprozess zeigte sich im Projekt trotz der sehr guten Ausgangsqualität aus dem Schälwälzfräsen oder dem Wälzschleifen als sehr zeitintensiv und lag daher über den vorkalkulierten Kosten. In der Geometrie $a=63\text{mm}$ kam es darüber hinaus zu starken Streuungen der Gleitschleifvarianten. Hier müssten für eine wirtschaftliche Nutzung weitere Prüfungen erfolgen, um die Anforderungen des Gleitschleifen zu verringern. Tätigkeiten in diese Richtung sind bei Bonfiglioli aktuell nicht geplant, können zukünftig aber noch relevant werden.

Beschichten

Die besten Ergebnisse lieferten im Projekt die Prozessketten, die als abschließenden Prozess eine Beschichtung erhielten. Auch die Ausbreitung eines Schadens verlief tendenziell etwas langsamer, wenn eines der Verzahnungspartner beschichtet war. Eine Beschichtung der Schnecke und des Schneckenrades wird von uns nicht als kostentechnisch notwendig angesehen, da die Erhöhung des übertragbaren Momentes um ca. 1% bei Beschichtung beider Partner die zusätzlichen Kosten einer Beschichtung der Schnecke nicht rechtfertigt. Interessant dagegen ist die Beschichtung von lediglich der Schnecke, da dieses kostengünstiger in den größeren Baugrößen bewerkstelligt werden könnte. Nachteilig sind aber in allen Fällen die Kosten die eine Beschichtung mit sich bringt, auch wenn sich gezeigt hat, dass deutlich weniger Vorbehandlungen nötig sind, um eine gute Schichtverbindung herzustellen. Daher sehen wir den Einsatz beschichteter Getriebe eher im Bereich der großen Achsabstände und somit der höheren Drehmomente.

Ausblick

Ein weiterer Aspekt, der die Vermarktung der getesteten Räder begünstigt, ist die erfolgreiche Durchführung der Dauertests. Hier konnten bei einer Nenndrehzahl von 1400 min^{-1} und der Geometrie $a=100\text{mm}$ $i=20,5$ mehr als 680h Laufzeit bei Nennmoment von baugleichen Bronzerädern erzielt werden. In der Baugröße $a=63\text{mm}$ $i=30$ waren es 300h Laufzeit bei doppeltem Nennmoment und in der Baugröße $a=49\text{mm}$ $i=60$ ca. 250h bei 2,5-fachem Nennmoment.

Diese Versuche zeigen eine prinzipielle Einsatzfähigkeit der Getriebe auf deren Grundlage sich erste Prototypen für kleinere Serien herstellen lassen, insbesondere da die Dauertests im Achsabstand 49mm und Referenztests im Achsabstand 63mm bereits im Seriengehäuse von Bonfiglioli durchgeführt wurden. Längere Tests, die im Projekt aus Zeitgründen nicht durchgeführt werden konnten müssen noch vor Serienstart durchgeführt werden. Insgesamt ist es für Bonfiglioli denkbar, langfristig Getriebereihen mit Achsabstand $a < 63\text{mm}$ durch reine schälwälzgefräste Räder zu ersetzen. Bei größeren Achsabständen wäre eine Kombination aus nitrieren und beschichten bzw. schälwälzfräsen und beschichten Rädern wirtschaftlich sinnvoll. Gemäß einer Abschätzung mit Verkaufszahlen aus den Jahren 2014 und 2015 ergebe sich bei einer Umstellung der drei in diesem Projekt getesteten Baugrößen eine jährliche Ersparnis von ca. 1 Mio. € / Jahr. Bei einer Umstellung der gesamten Getriebereihen würde sich eine Ersparnis von 17 Mio. € (2014) bzw. 19 Mio. € (2015) ergeben. Zusätzlich ist mit einer Energiekosteneinsparung beim Endkunden aufgrund des verbesserten Wirkungsgrads zu rechnen, der als verkaufssteigerndes Argument dienen kann. Diese beträgt bei einer Antriebsleistung von 1 kW und einem angenommenen Strompreis von 0.15€/kW für die in 2015 verkauften Getriebe der Baugrößen $a=49\text{mm}$, $a=63\text{mm}$ und $a=110\text{mm}$ ca. 34,6 Mio. kWh/Jahr oder 5,2 Mio. €/Jahr.

