



Diplomarbeit

Plasmanitrierte Zahnräder in der Luftfahrt

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines
Diplom Ingenieurs unter der Leitung von

A.o.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Manfred Grafinger

und

Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.-Ing. Michael Weigand

Institut für Konstruktionswissenschaften und Technische Logistik

eingereicht an der Technischen Universität Wien
Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

von

Maximilian Kaiser, BSc (WU) BSc

0965779 (066 445)

Gerlgasse 22/44, 1030 Wien

Kurzfassung

Plasmanitrierte Zahnräder in der Luftfahrt

Die Getriebehersteller sind mit steigenden Anforderungen und einem hohen Kostendruck konfrontiert. Die Entwicklung von neuen Verfahren, sollen die Produktionsprozesse und die Produkteigenschaften verbessern. Plasmanitrieren ist eine Härtetechnik welche viele Vorteile gegenüber den weitverbreiteten Härteverfahren, wie Einsatzhärten und Gasnitrieren, mit sich bringt. Das Kapitel 2 erläutert die Härteverfahren im Detail und stellt die verschiedenen Vor- und Nachteile gegenüber. Eine durch die Firma Rübig (Härtetechnik) in Auftrag gegebenen Tragfähigkeitsuntersuchungen von plasmanitrierten Verzahnungen, am Forschungszentrum für Zahnräder und Getriebbau (FZG) in München, ergaben hervorragende Ergebnisse. Basierend auf diesen Ergebnissen wird in dieser Arbeit untersucht, ob durch die Verwendung von plasmanitrierten Verzahnungen, eine Leistungssteigerung bei bestehenden Getrieben möglich ist. Hierfür wird ein Helikopterantriebsstrang, bestehend aus einem Zwischenkegelgetriebe und einem Heckrotorgetriebe, untersucht. Weiters sollen die Vorteile von Aluminium-Feinguss als Gehäusewerkstoff genutzt werden. Im Kapitel 3 werden konstruktive Änderungen der Gehäuse dargestellt, welche aufgrund der Leistungssteigerung notwendig sind. Durch ein iteratives Verfahren, kombiniert aus einer Finiten Elemente Analyse und einem Verzahnungsberechnungsprogramm, wird im Kapitel 4 die Tragfähigkeit berechnet. Abschließend werden die Ergebnisse im Kapitel 5 zusammengefasst und die Höhe der möglichen Leistungssteigerung angegeben.

INHALTSVERZEICHNIS

1	EINLEITUNG	3
1.1	AUFGABENSTELLUNG	5
1.2	ZIELSETZUNG	6
1.3	AUFBAU UND METHODIK.....	6
2	HÄRTEVERFAHREN FÜR VERZÄHNUNGEN IN DER LUFTFAHRT	7
2.1	EINSATZHÄRTEN	9
2.1.1	Werkstoffwahl	11
2.1.2	Kugelstrahlen	13
2.1.3	Gleitschleifen	17
2.2	NITRIEREN	19
2.2.1	Werkstoffwahl	21
2.2.2	Gasnitrieren	22
2.2.3	Plasmanitrieren - PLASNIT® Fa. Rübig.....	27
2.3	VERGLEICH DER HÄRTEVERFAHREN	37
3	KONSTRUKTIVE ÄNDERUNGEN AN DEN GETRIEBEGEHÄUSEN	43
3.1	HECKROTORGETRIEBE (TGB)	43
3.2	ZWISCHENKEGELGETRIEBE (IGB).....	45
3.3	GEWICHT	47
4	FVA - BERECHNUNG & FEM ANALYSE.....	48
4.1	BERECHNUNGSMETHODE	48
4.2	BERECHNUNGSABLAUF	49
4.3	VARIANTEN	50
4.4	FEM-ANALYSE.....	51
4.4.1	Vorbereitungen für die FEM Analyse	51
4.4.2	Krafteinfluss	51
4.4.3	Randbedingungen.....	55
4.4.4	Werkstoffzuordnung.....	57
4.4.5	Vernetzungseinstellungen.....	59
4.4.6	Spannungsanalyse	62

4.4.7	Ermittlungen der Verschiebungen im letzten iterativen Schritt....	63
4.5	VERSCHIEBUNGEN AUS FEM ANALYSE IN WORKBENCH IMPLEMENTIEREN..	67
4.6	ERGEBNISSE	67
5	CONCLUSIO.....	69
6	VERZEICHNISSE.....	71
6.1	LITERATURVERZEICHNIS.....	71
6.2	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	74
6.3	TABELLENVERZEICHNIS	76
6.4	ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS.....	77

1 Einleitung

Die Anforderungen im Bereich des Motorenbaus und der Antriebs- und Getriebetechnik, sind in den letzten Jahren signifikant gestiegen. Im Speziellen die Spezifikationen der Bereiche Festigkeit und Korrosionswiderstandsfähigkeit. Die altbewährten thermischen Härteverfahren, wie beispielsweise das Einsatzhärten und Gasnitrieren, stoßen in manchen Bereichen an ihre Grenzen. Das pulsierende Plasmanitrieren soll in diesen Bereichen die Anforderungen noch besser erfüllen. Die spezielle Schichtzusammensetzung bringt eine sehr hohe Bauteillebensdauer und eine Reihe an weiteren Vorteilen mit sich. Hier spielt vor allem der geringe Verzug aufgrund der geringen Prozesstemperatur eine wichtige Rolle. In den letzten 15 Jahren ist der Aufwand für die Hartfeinbearbeitung enorm angestiegen. Bei Getriebeherstellern verursacht das Schleifen der Zahnflanken die größten Kosten. Als Beispiel kann die Kostenentwicklung des VW Getriebewerks in Kassel genannt werden. Im Jahr 1998 stiegen die Kosten der Hartfeinbearbeitung um circa 2%. Im Jahr 2005 waren es bereits 14% an zusätzlichen monetärem Aufwand. Dies liegt auch daran, dass die mechanische Nachbearbeitung ausgesprochen teuer ist und bei manchen Bauteilen auch bis zu 40% der Gesamtkosten ausmachen kann.¹

Getriebeproduzenten müssen auch auf die Gewichtsoptimierung achten. Der Leichtbau hat sich in der Luftfahrt als technische Wissenschaft entwickelt und wird als Konstruktionsprinzip zunehmend auch in anderen Bereichen, wie beispielsweise der Kfz-Industrie, angewendet. Erzielte Gewichtseinsparungen reduzieren die Betriebskosten durch den verringerten Treibstoffverbrauch. Es handelt sich hierbei um den sogenannten Öko-Leichtbau, der durch Gewichtsreduktion die kostspieligen Leichtbaukosten für Material, Konstruktion und Herstellung durch die späteren Energieeinsparungen wieder ausgleicht.² Aus diesem Grund sind Magnesium-Gusslegierungen im Leichtbau sehr beliebt, da sie mit einer Dichte von $1,74 \text{ g/cm}^3$ um 30% leichter als Aluminium sind und somit das leichteste technische Metall darstellen. Magnesium hat einige Nachteile die sich auf den Herstellungsprozess und den späteren Betrieb

¹vgl. Gebeshuber et al., 2010, S.221.

²vgl. Wiedermann, 2007, S.35.

auswirken können. Mg ist durch seine Oxidschicht zwar in trockenen oder basischen Medien gut einsetzbar, jedoch in sauren Medien korrosionsgefährdet. Somit benötigt man im Außenbereich einen kostenverursachenden Oberflächenschutz.³ Aluminium kann hingegen als wichtigster Konstruktionswerkstoff des metallischen Leichtbaus genannt werden. Speziell die unterschiedlichen Legierungstypen bieten ein breites Spektrum in den mechanischen und technologischen Eigenschaften. Besonders hervorzuheben sind dabei:⁴

- niedrige Dichte ($\rho_{Al} = 2,7 \text{ kg/dm}^3$)
- guter Elastizitätsmodul ($E_{Al} = 70.000 \text{ MPa}$)
- Festigkeitswerte, ähnlich wie Stähle
- hohe Zähigkeit
- Korrosionsbeständigkeit

Diese Arbeit beschäftigt sich hauptsächlich mit Gusslegierungen, denn auch das Herstellungsverfahren hat Auswirkungen auf die Festigkeitssteigerung. Diese wird bei Gussverfahren mit Aluminium durch die Mischkristallverfestigung der Legierungselemente und durch die Korngrenzenverfestigung über die Ausbildung von feinkörniger Gefüge gesteigert. Die Gießart hat somit einen großen Einfluss auf die Gefügebildung. Beim Feinguss entsteht durch schnelleres Abkühlen ein feineres Gefüge als beim Sandguss. Dieses hat eine Erhöhung der Festigkeit und Bruchdehnung zur Folge.⁵ Sowohl das Plasmanitrieren von Verzahnungen, als auch die Verwendung einer Feinguss Aluminiumlegierung als Gehäusewerkstoff, können Getriebeherstellern helfen die Kundenspezifikationen besser zu erfüllen.

³vgl. Weißbach, 2012, S.213ff.

⁴vgl. Klein, 2011, S.43ff.

⁵vgl. Weißbach, 2012, S.194ff.

1.1 Aufgabenstellung

Bei hochbelasteten Verzahnungsteilen wird die notwendige Härte des Werkstoffes, vorwiegend durch die Methode des Einsatzhärtens, erreicht. Die Auslegung einer Verzahnung erfolgt vorrangig nach den Richtlinien der DIN3990, welche klare Vorgaben an den zu wählenden Werkstoff und die notwendigen Kennwerte der Einsatzhärtung, basierend auf der Belastung des Bauteils, vorgibt. Dadurch haben Ingenieure eine über Jahrzehnte bewährte Methode zur sicheren Auslegung von Verzahnungen zur Verfügung. In dieser Norm fehlen die Dauerfestigkeitswerte für die Plasmanitriertechnologie. Die Firma Rübig ist spezialisiert auf die Härtetechnik von metallischen Bauteilen und ein Pionier in der Entwicklung von Plasmanitrieranlagen. Sie hat am Forschungszentrum für Zahnräder und Getriebebau (FZG) in München, eine Tragfähigkeitsuntersuchung einer von ihnen plasmanitrierten Verzahnung in Auftrag gegeben. Der Dauerfestigkeitskennwert für die Zahnfußbiegespannung (σ_{Flim}) und für die Flankenpressung (σ_{Hlim}) dieser Untersuchung bilden die Grundlage für die Berechnung des Tragfähigkeitsnachweises.

Es soll durch die Verwendung des Berechnungsprogrammes FVA Workbench ein Antriebsstrang eines Helikopters auf eine zulässige Leistungssteigerung untersucht werden. Die Kegelräder sind plasmanitriert und haben die entsprechenden Dauerfestigkeitskennwerte der beschriebenen FZG Untersuchung. Durch die Leistungssteigerung nehmen auch die Belastungen auf die Getriebegehäuse zu. Diese müssen durch geeignete Maßnahmen versteift werden. Erstens wird der Gehäusewerkstoff von einer Magnesium-Sandgusslegierung (G-MgZn4SE1Zr1) auf eine Aluminium-Feingusslegierung (GF-ALSi7Mg0,6) geändert. Zweitens soll durch gezielte konstruktive Veränderungen das Gehäuse versteift und das Gewicht optimiert werden.

Die versteiften Getriebegehäuse werden im Programm CATIA mit einer Finiten Elemente Analyse untersucht. Dabei werden die Belastungen der Lagerstellen im Gehäuse aus der FVA Workbench entnommen. Die FEM Analyse berechnet die Lagerversätze, welche wiederum in der Verzahnungsberechnung implementiert werden. Durch dieses iterative Verfahren soll gezeigt werden, in welchem Ausmaß die Leistung gesteigert werden kann ohne die Tragfähigkeitssicherheiten im Betrieb zu verringern.

1.2 Zielsetzung

Es sollen die Vorteile des Plasmanitrierens im Vergleich zu anderen Härteverfahren erarbeitet werden. Dabei sollen die Auswirkungen auf die Tragfähigkeit der Verzahnung im Betrieb untersucht werden. Des Weiteren sollen die verfahrenstechnischen Vorteile des Plasmanitrierens im Produktionsprozess beschrieben werden. Schlussendlich soll nachgewiesen werden, ob die Kombination aus einer plasmanitrierten Verzahnung und einem Aluminium-Feingussgehäuse eine Leistungssteigerung hinsichtlich der Tragfähigkeit zulässt.

1.3 Aufbau und Methodik

Der Hauptteil der vorliegenden Arbeit ist in drei Kapitel gegliedert. Als Grundlage für das erste Kapitel wurde eine ausführliche Literaturrecherche in Fachbüchern und Berichten der Forschungsvereinigung für Antriebstechnik (FVA) durchgeführt. Es gibt Aufschluss über die Unterschiede der verschiedenen Härteverfahren von Verzahnungen. Es werden Vor- und Nachteile beschrieben und anschließend die Härteverfahren verglichen.

Kapitel 3 beschreibt die konstruktiven Änderungen der Getriebegehäuse und deren Auswirkungen auf die Verschiebungen im Betrieb. Die Optimierungen werden in Abbildungen aufgezeigt und beschrieben.

Das darauffolgende Kapitel 4 beschäftigt sich mit den notwendigen Analysen, um die Tragfähigkeit der Verzahnung und Festigkeit des Gehäuses zu gewährleisten. Für diese Überprüfungen wird in einem iterativen Verfahren die Finite-Elemente-Methode (FEM) und das Berechnungsprogramm für Verzahnungen (FVA Workbench) kombiniert. Dies ermöglicht Aufschluss über die Veränderungen der relevanten Sicherheiten beim Tragfähigkeitsnachweis der Verzahnung. Des Weiteren werden auch die zulässigen Spannungen und Verschiebungen im Gehäuse untersucht.

In abschließenden Kapitel 5 wird ein zusammenfassender Bogen über die vorgestellten und diskutierten Inhalte gezogen und die zentrale Fragestellung dieser Arbeit beantwortet.

2 Härteverfahren für Verzahnungen in der Luftfahrt

Die Werkstoffeigenschaften Härte und Zähigkeit stehen fast immer in einem entgegengesetzten Verlauf und lassen sich aus diesem Grund nicht gleichzeitig maximieren. Verzahnungswerkstoffe benötigen an den Berührflächen der Flanken einen hohen Verschleißwiderstand und man spricht hierbei von der Oberflächenhärte. Des Weiteren benötigt der Kern des Bauteils eine ausreichende Zähigkeit, um spröde und verformungslose Brüche zu vermeiden. Aus dem Zusammenhang der notwendigen Härte und einem zähen Kern haben sich verschiedene Wärmebehandlungsverfahren bewährt.⁶ Entsprechend der vorhandenen Beanspruchung gibt es unterschiedliche Anforderungen an die Eigenschaften des Werkstoffs und des Wärmebehandlungsverfahren. Die Tabelle 1 zeigt die Wirkung der unterschiedlichen Beanspruchung und die daraus resultierenden notwendigen Eigenschaften der Randschicht.

Wirkung der Beanspruchung	Anforderungen an die Eigenschaften der Randschicht
Volumenermüdung (Ermüdungsbruch); Kontaktermüdung (Grübchen); Grenzschichtermüdung (Graufleckigkeit)	Hohe Dauerfestigkeit bei möglichst hoher Zähigkeit, besonders im Randbereich hohe Gefügehomoogenität (ferritfrei), kontinuierlicher Abfall der Härte vom Rand zum Kern, Druckeigenstressungen in der Randschicht
statische Überlast (plastische Deformation bis zum Gewaltbruch)	Hohe statische Festigkeit bei hoher Zähigkeit, Gefügehomoogenität
Abrasion (Abtrag)	Hohe Härte und ausreichende Zähigkeit, Gefüge mit harten Phasen (z. B. Carbide, Nitride) in einem sich verfestigenden Grundwerkstoff
Adhäsion (Fressen)	Artfremde Randschicht mit geringer adhäsiver Bindungskraft, d. h. Vermeidung der Metall-Metall-Paarung, geringe Deformationsneigung, jedoch gutes Einlaufverhalten (Tragbild)
Tribooxidation (Abtrag, Grübchen)	Reaktionsbeständige Schutzschicht, z. B. Oxidschicht

Tabelle 1 Beanspruchungsgerechte Eigenschaften der Randschicht von Zahnrädern

⁶vgl. Weißbach et al., 2015, S.238.

Weiters sind noch die Biegeweichselfestigkeit und somit die Ausbildung des Kerngefüges, in Hinblick auf Festigkeit und Zähigkeit, von Bedeutung. Im ersten Schritt wird ein geeigneter Werkstoff gewählt. Die Auswahl des Wärmebehandlungsverfahrens hängt in erster Linie von der Stahlsorte ab und in zweiter Linie von der Belastungsart und den Einsatzbedingungen.⁷

Die Härteverfahren von Verzahnungsteilen werden in thermische und in thermochemische Verfahren unterteilt. Diese Unterteilung und die jeweils wichtigsten Verfahren sind in der Tabelle 2 ersichtlich.

Härteverfahren für Verzahnungsteile	
Thermische Härteverfahren	Thermochemische Härteverfahren
Induktionshärten Flammhärten Laserhärten Schalenhärtung Vergüten	Einsatzhärten Carbonitrieren Nitrieren Nitrocarburieren Borieren

Tabelle 2: Härteverfahren für Verzahnungsteile

Die thermischen Härtungsverfahren ändern grundsätzlich nur die Werkstückrandeigenschaften durch eine martensitische Härtung. Aus diesem Grund verwendet man hierbei den Begriff der Randschichthärtung. Eine durchgehende Härtung des gesamten Querschnitts ist eine absolute Ausnahme und ist nur mit gewissen Legierungssystemen möglich. Heutzutage werden in der Praxis hauptsächlich das Induktions-, Flammhärte- und Laserhärteverfahren eingesetzt, da die Durchführung als auch der Anlagenaufbau verhältnismäßig einfach gestaltet ist.⁸ Die thermischen Verfahren werden in dieser Arbeit nicht weiter behandelt, denn der Hauptfokus liegt auf den thermochemischen Härteverfahren.

Der wesentliche Unterschied liegt darin, dass die chemische Zusammensetzung im oberflächennahen Bereich an die Anforderungen

⁷vgl. Zoch, 2011, S.1.

⁸vgl. Klingelberg, 2008, S.298.

angepasst werden kann. Die Verschleißbeständigkeit der Oberfläche der Verzahnung wird durch Härten erreicht. Die notwendige Festigkeit und Zähigkeit des Bauteilkerns kann durch die Wahl der geeigneten Legierungselemente verbessert werden⁹. In den folgenden Unterpunkten werde die wichtigsten Härteverfahren beschrieben und anschließend verglichen.

2.1 Einsatzhärten

Bei diesem Verfahren wird im Allgemeinen als Grundwerkstoff ein kohlenstoffarmer Stahl verwendet. Durch Diffusion wird Kohlenstoff in atomarer Form in das Werkstück eingebracht. Dieser Vorgang ist als Aufkohlen, Einsetzen oder Zementieren bekannt. Da der Kern oft über eine gewisse Zähigkeit verfügen soll, ist der Kohlenstoffgehalt bei Einsatzstählen mit 0,25% beschränkt. Vorwiegend wird jedoch eine eutektoidische Zusammensetzung der aufgekohlten Schicht realisiert, da ein Kohlenstoffgehalt über 0,8% zu Zementitausscheidung an den Korngrenzen führt und diese die Schlagzähigkeit stark reduziert und Rissbildung begünstigt. Der Diffusionsvorgang des Kohlenstoffs muss bei einer ausreichend hohen Temperatur erfolgen, um die Bildung des spröden Werkstoffs Fe_3C zu vermeiden und der notwendige Kohlenstoffgehalt ($\leq 0,8\%$) im Stahl gelöst werden kann. Der zu härtende Stahl muss über Ac_3 erhitzt werden und dieser Vorgang wird als austenitisieren bezeichnet. Es müssen auch die variierenden Diffusionsgeschwindigkeiten des Kohlenstoffs in den unterschiedlichen Mischkristallphasen beachtet werden. Ein hoher Legierungsgehalt schränkt die Beweglichkeit der Kohlenstoffatome ein und dadurch die mittlere Eindringtiefe. So ist als Beispiel bei unlegierten Kohlenstoffstählen eine Aufkohlungstiefe von etwa 2-3mm mit Einsatzzeiten von 16 Stunden zu planen.¹⁰ Das Aufkohlen ist notwendig, da Stahl nur im austenitischen Zustand C-Atome lösen kann und aus diesem Grund muss der Werkstoff über 900°C (Ac_3) erhitzt werden. Die Grundlage für den Diffusionsvorgang bildet der notwendige Überschuss von Kohlenstoff im Außenbereich. Dieser dringt je nach Aufkohlungstiefe in das Randgefüge ein.

⁹vgl. Klingelberg, 2008, S.299.

¹⁰vgl. Bargel, 2008, S.188.

Beim Einsatzhärten von Zahnrädern wird in der Praxis in drei Möglichkeiten unterschieden:

- Direkthärten
- Härten nach isothermischer Umwandlung
- Einfachhärten

Einfachhärten erfolgt nach Abkühlen auf niedrige Temperaturen. Durch die $\gamma - \alpha$ -Umwandlung kommt es zu einer Kornverfeinerung, wobei hier entweder auf Kernhärtetemperatur Ac_{3Kern} oder auf Randhärtetemperatur Ac_{3Rand} erhitzt wird. Anschließend wird das Werkstück in Öl oder Warmbad abgeschreckt. Je nach Anforderungen an das Bauteil wird die richtige Härtetemperatur gewählt. Bei Erhitzung auf Ac_{3Rand} , kommt es beispielsweise zu optimalen Randeigenschaften, allerdings ist der Kern nicht vollständig austenitisiert und somit unterhärtet. Man könnte den Bauteil durch Doppelhärten auf beide Temperaturen Ac_{3Rand} und Ac_{3Kern} hintereinander erhitzen, jedoch ist diese Variante mit hohem Bauteilverzug und Härtungskosten verbunden.

Das Härten nach isothermischer Umwandlung bei Temperaturen zwischen 580-680 °C in der Perlitstufe erzeugt bei legierten Stählen ein gutes Ausgangsgefüge für die spätere Austenitisierung.

Das Direkthärten ist das Abschrecken aus der Salzbad- oder Gasaufkohlung. Die Vorteile sind verringerter Verzug und ein geringerer Restaustenitgehalt, da der Bauteil von der Aufkohlungstemperatur auf die Randhärtetemperatur von 840°C vorerst abkühlt, bevor er im Warmbad abgeschreckt wird.¹¹ Das Direkthärten hat den geringsten verfahrenstechnischen Aufwand und die niedrigsten Herstellungskosten. Die Ofenzeiten sind um bis zu 20% geringer als beim Einfachhärten. Des Weiteren ist der Verzug wesentlich geringer, wodurch die Verzahnungsqualität verbessert wird.¹² Die grafische Darstellung der drei beschriebenen Zeit-Temperatur-Folgen beim Einsatzhärten sind in Abbildung 1 dargestellt.

¹¹vgl. Weißbach et al., 2015, S.163ff.

¹²vgl. Tobie, Schwienbacher, 2002,S.1.

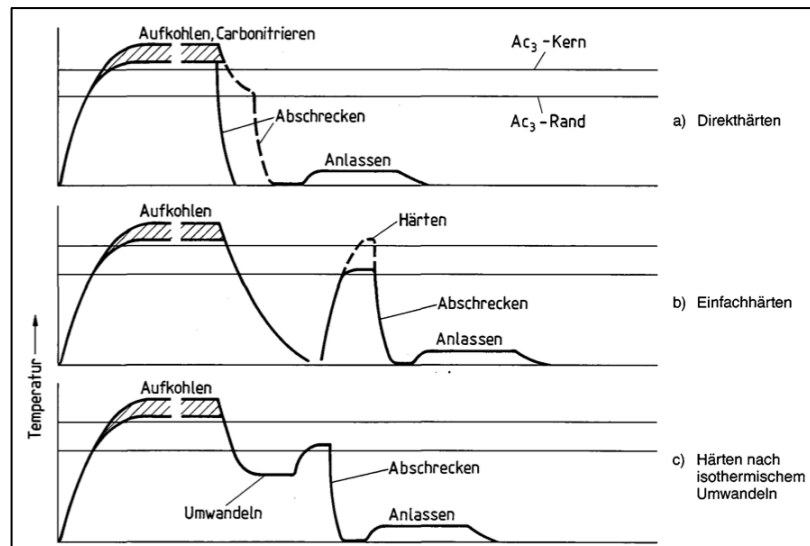


Abbildung 1 Grafische Darstellung der möglichen Zeit-Temperatur-Folgen beim Einsatzhärten¹³

Die Abbildung 2 zeigt die unterschiedlichen Auswirkungen der Zeit-Temperatur-Folge auf die Tragfähigkeit der Verzahnung (je mehr (+) desto höher ist der Einfluss). Es werden auch wirtschaftliche Aspekte des Härteverfahrens verglichen, welche mit (o) bewertet sind.¹⁴

Wärmebehandlung		Zahnflankenbelastbarkeit	Zahnfußbelastbarkeit	Fressicherheit Verschleiß	Reproduzierbarkeit des Verfahrens	Maß- und Formänderung (Verzug)	Kosten der Wärmebehandlung	Verzahnungsschleifen erforderlich	Gesamtkosten
Einsatzhärten	Direkthärten kleiner Räder	++++	++++	++++	++++	oo	oo	ja (gering)	oo
	Einfachhärten großer Räder	++++	++++	+++	+++	ooo	ooo	ja	oooo

Abbildung 2 Qualitativer Vergleich der Härtingsverfahren Direkt-/Einfachhärtung

2.1.1 Werkstoffwahl

Kegelräder werden in der Regel sehr hoch beansprucht, wodurch das Anforderungsprofil an den Werkstoff und das Fertigungsverfahren sehr hoch sind. Für das Einsatzhärten ist ein Werkstoff notwendig, welcher einerseits die nötige Oberflächenhärte aufweist und im Kern über eine ausreichende Zähigkeit

¹³vgl. D.I.N. EN 100 52, 1993,S.15.

¹⁴vgl. Tobie, Schwienbacher, 2002,S.10.

verfügt. Weiters soll der Gradient der Härte von der Oberfläche zum Kern durch die richtigen Parameter einstellbar sein. Diese Anforderungen lassen sich am besten mit Einsatzstählen und Einsatzhärten abdecken. Diese haben einen geringen Kohlenstoffgehalt von unter 0,2% und geringe Mengen an Eisenbegleitern wie Mangan, Chrom, Molybdän oder Nickel. Dieser Ausgangszustand garantiert die Erreichbarkeit der gewünschten Härte und ist noch relativ gut zerspanbar. Die wichtigen Vertreter 16MnCr5, 15NiCr13, 20NiCrMo2-2, 25MoCr4 und 18CrNiMo7-6 sind in der Abbildung 3 angeführt. Hierbei wird die Kernhärte in Abhängigkeit des Durchmessers angegeben. Es ist zu erkennen, dass verschiedene Einsatzstähle für manche Bauteilgrößen besser geeignet sind. So ist beispielsweise der 16MnCr5 eher für kleine Bauteile zu bevorzugen.¹⁵

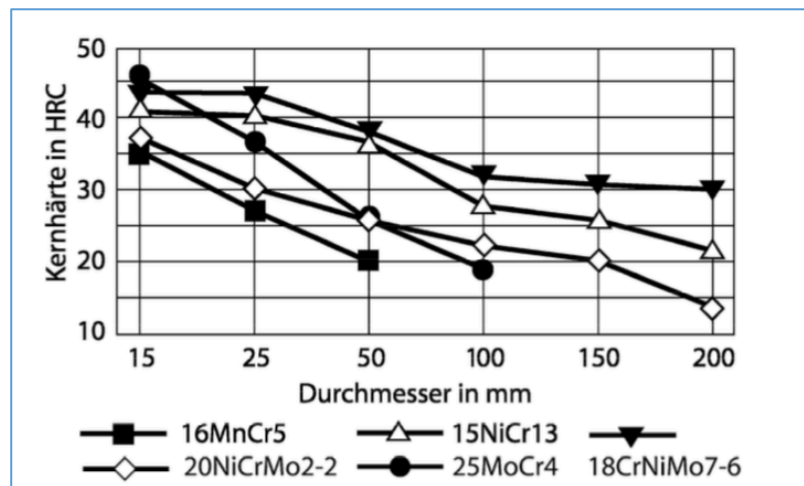


Abbildung 3 Kernhärte unterschiedlicher Einsatzstähle für unterschiedliche Bezugsdurchmesser

¹⁵vgl. Klingelnberg, 2008, S.111.

2.1.2 Kugelstrahlen

Die Wärmebehandlung in Einsatzstählen führt zu thermischen Eigenspannungen. Diese ergeben sich aus den unterschiedlichen Abkühlkurven der Oberfläche gegenüber dem Kern eines Werkstücks.

Das Kugelstrahlen kann gezielt zur Verfestigung von Bauteiloberflächen eingesetzt werden. Dabei werden Eigenspannungen durch eine Strahlbehandlung in das Werkstück eingebracht. Bei der Anwendung kann in Schleuderrad- und Druckluftstrahlen unterschieden werden. Die Auswahl wird nach Anforderungen an die Strahlparameter, den gewünschten Bauteileigenschaften und der Stückzahl entschieden.¹⁶ Die folgende Abbildung 4 zeigt Variationsparameter des Strahlprozesses.

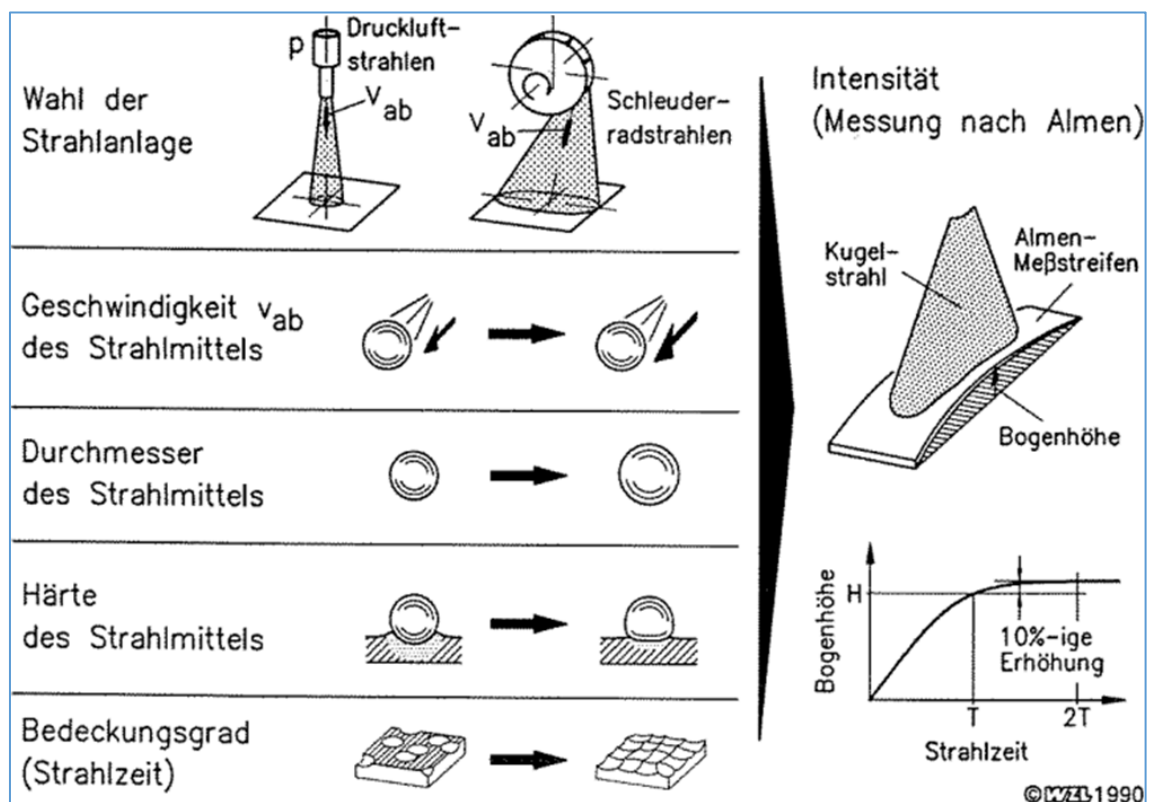


Abbildung 4 Variationsparameter beim Kugelstrahlen und Definition der Intensität

Die Druckluftstrahlanlage erzeugt einen wesentlich homogenen Bearbeitungsstrahl. Das Strahlgut wird mit Druckluft durch eine Düse beschleunigt und ausgestoßen. Die Strahlfläche ist dabei relativ gering. Somit können komplexe Bereiche eines Werkstücks gezielt bearbeitet werden. Auch

¹⁶vgl. Tobie, König, 2002, S.10ff.

können gewissen Teilbereiche von der Bearbeitung ausgenommen werden. Das Strahlmittel ist meist arrondiertes Stahlkorn oder Stahlguss, wobei die Härte und der Durchmesser variiert werden können. Eine wesentliche Rolle spielt auch der Überdeckungsgrad, denn dieser sollte mindestens 98% betragen.

Die Strahlbehandlung stellt einen mechanischen Eingriff in der oberflächennahen Randschicht dar und führt zu mikrostrukturellen Veränderungen des Werkstoffs. Diese führen zu den gewünschten Eigenspannungen. Der Betrag und die Tiefenlage des Maximums hängt von den Bauteileigenschaften und Strahlparametern ab. Es gibt dafür zwei Modelle, wobei die Wirkungen anschließend zusammengefasst werden.

Modell 1

Dieses Modell beschreibt die elastisch-plastische Verformung der Oberfläche, hervorgerufen durch die hohe Anzahl der Strahleinschläge. In der Abbildung 5 wird auf der rechten Seite dargestellt, dass die Verformung der Werkstoffoberfläche zu einer Ausbildung des Druckeigenspannungsmaximums an der Oberfläche führt. Darüber hinaus führt eine Kugelstrahlbehandlung zu einer Steigerung der Oberflächenrauheit und -härte. Dieses Modell tritt meist auf, wenn das Strahlmittel wesentlich härter ist als der Werkstoff.

Modell 2

Dieses Modell basiert auf der Hertzschen Pressung, welche zwischen Strahlmittel und dem Werkstoff auftritt. Der maximale Wert der Schubspannung entsteht, laut der Hertzschen Theorie, bei der Tiefe von ca. der halben Abplattungsbreite (a). Dies ist in der Abbildung 5 auf der linken Seite dargestellt. Bei einer ausreichend großen Hertzschen Pressung wird die Fließgrenze des Werkstoffs aufgrund der maximalen Schubspannungen lokal überschritten. Die entstehenden Verformungen führen zu Druckeigenspannungen. Dieses Modell beschreibt die Wirkungsweise bei einem bestrahlten Bauteil mit hoher Härte und einem weicheeren Strahlmittel.

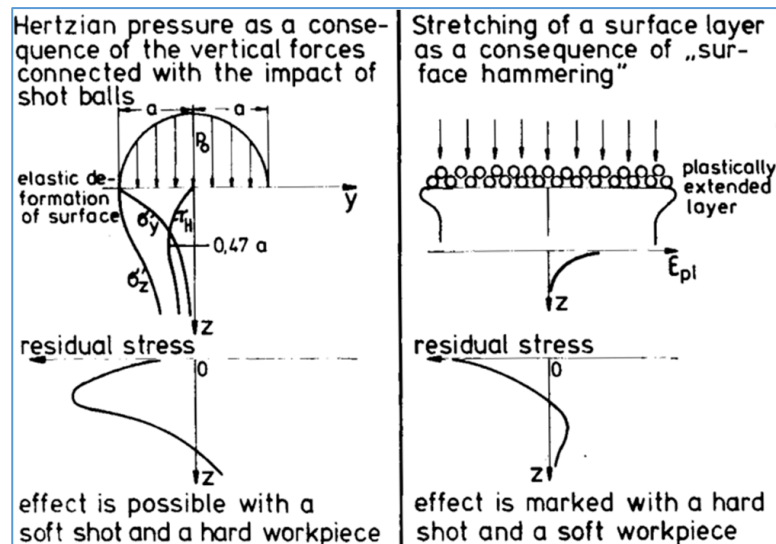


Abbildung 5 Modelle zur Beeinflussung der oberflächennahen Randschicht durch Kugelstrahlen¹⁷

Aus der Kombination der beschriebenen Modelle ergibt sich die tatsächliche Spannungsverteilung. Beispielsweise hat bei einsatzgehärteten Stählen wie 16MnCr5 das zweite Modell einen wesentlich größeren Einfluss. Des Weiteren ist bei einsatzgehärteten Stählen der Restaustenitgehalt zu beachten. Dieser kommt von der unvollständigen Martensitumwandlung beim Einsatzhärten. Die Strahlenbehandlung führt zu einer Abnahme dieses Restaustenitgehalts. Dies wird auf die verursachte Verformung der Randschicht zurückgeführt, welche zu einer verformungs- bzw. spannungsinduzierten Restaustenitumwandlung führt. Die daraus resultierenden Druckeigenspannungen werden aus der umwandlungsbedingten Volumenzunahme des Gefüges, welche jedoch vom umgebenden Material begrenzt wird, hervorgerufen. In der Abbildung 6 wird die beschriebene Abnahme des Restaustenitgehalts dargestellt. Die durchgehende Linie zeigt einen ungestrahlten, einsatzgehärteten Stahl. Die beiden anderen Kurven zeigen den gleichen Werkstoff, jedoch mit unterschiedlichen Strahlenparametern bearbeitet. Die Abnahme des Restaustenitgehaltes ist bei den strichlierten Kurven gut ersichtlich.

¹⁷vgl. Tobie, König, 2002, S.14.

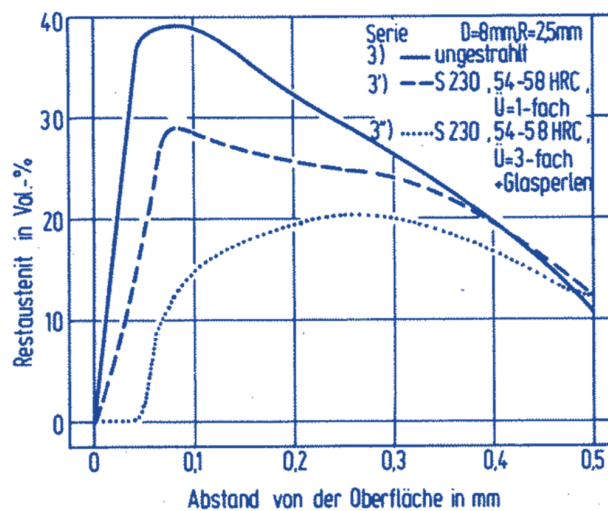


Abbildung 6 Restaustenitgehalt in Abhängigkeit der Strahlbehandlung

Der Einfluss der Eigenspannungen auf die Zahnflankentragfähigkeit wurde mit einem geradzahnten Stirnrad mit Modul $m_n=3\text{mm}$ untersucht. Diese ergaben eine deutlich Steigerung im Zeit- und Dauerfestigkeitsbereich. Die Abbildung 7 veranschaulicht die um 35% gesteigerte ertragbare Flankenpressung bei $>2 \cdot 10^7$ Lastwechsel. Im Zeitfestigkeitsbereich konnte bei einer Pressung von $p_H=3200\text{ N/mm}^2$, die Lastwechselzahl um das 28-fache Wert gesteigert werden. Die deutliche Tragfähigkeitssteigerung kann auf die eingebrachten Druckeigenspannungen beim Kugelstrahlen zurückgeführt werden. Diese erschweren eine Rissbildung an der Zahnflankenoberfläche. Weiters ist auch zu beachten, dass die Untersuchungen bei einer sehr hohen Hertzschen Pressung durchgeführt wurden.¹⁸

¹⁸vgl. Tobie, König, 2002, S.11ff.

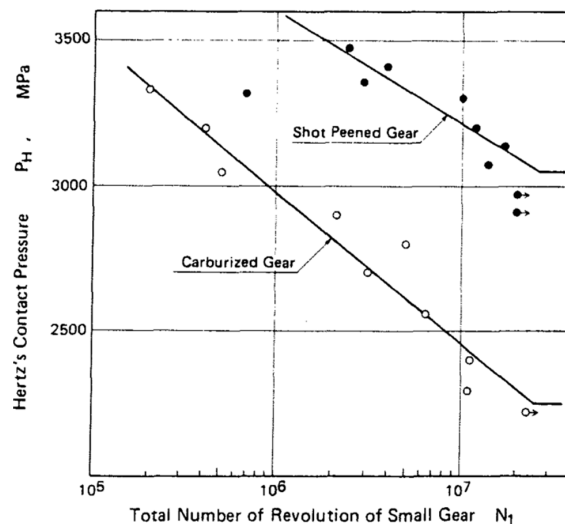


Abbildung 7 Steigerung der Grubchentragfähigkeit einsatzgehärteter Verzahnungen durch Kugelstrahlen

2.1.3 Gleitschleifen

Ein weiteres Oberflächenbearbeitungsverfahren ist das Gleitschleifen. Das Werkstück wird wie in Abbildung 8 dargestellt in einen Arbeitsbehälter gelegt. Dieser ist mit einem Gemisch aus Schleifkörpern und einem wässrigen Zusatzmittel befüllt. Durch die Bewegung des Behälters kommt es zu einem Kontakt zwischen Schleifkörper und dem Werkstück, wodurch es zu dem Gleitschleifprozess kommt. Die wässrige Lösung soll den Abrieb binden und den Schleifprozess unterstützen.

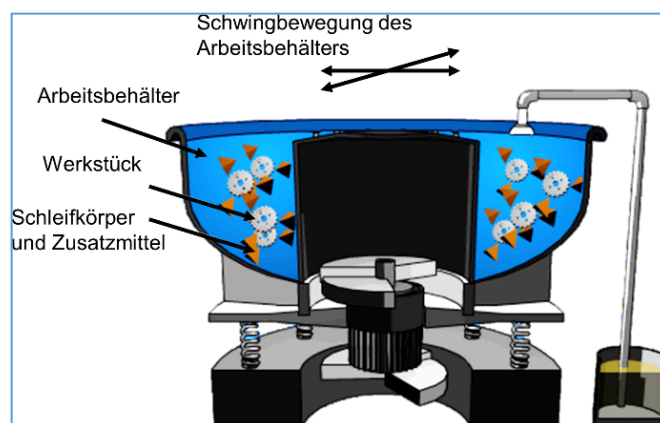


Abbildung 8 Schematische Darstellung des Vibrations-Gleitschleifens

Es wird zwischen dem „chemisch unterstützten Gleitschleifen“ und „rein mechanischem Gleitschleifen“ unterschieden. Hierbei ist die Wirkung des Zusatzmittels (Compound) als Hauptunterschied zu erwähnen.

Beim mechanischen Gleitschleifen dient dieses nur um den Abrieb zu binden. Dadurch wird die Verschmutzung der Schleifkörper verhindert und die

Schleifwirkung über längere Prozesszeiten gewährleistet. Normalerweise liegen diese Bearbeitungszeiten beim mechanischen Gleitschleifen zwischen 8 und maximal 24 Stunden.

Die Besonderheit des chemisch unterstützten Gleitschleifen ist, dass das Zusatzmittel direkt mit der zu bearbeitenden Oberfläche des Werkstücks reagiert. Im Speziellen wird dieses Verfahren bei einsatzgehärteten Verzahnung angewendet, da hier als Compound beispielsweise Säurezusätze verwendet werden können. Diese ätzen die Oberfläche an und es bildet sich eine weiche Umwandlungsschicht. Diese Oxidschicht ermöglicht wesentlich kürzere Prozesszeiten.

Im Wesentlichen wurde von der Forschungsgemeinschaft für Antriebstechnik festgestellt, dass die Unterschiede zwischen den Gleitschleifverfahren keinen großen Einfluss auf die Zahnflankentragfähigkeit haben. Nur die Oberflächenkennwerte, unabhängig vom Verfahren, fließen in die Beurteilung ein. Zusätzlich zu den Betriebsbedingungen und dem Schmierstoff, ist die Flankenrauheit ein wichtiger Einfluss auf die Zahnflankentragfähigkeit. Dieser wird als Rauheitsfaktor Z_R in den entsprechenden Normen berücksichtigt. Als Beispiele können die 3990 und ISO 6336 genannt werden. Die Oberflächenrauheit kann vor dem Schleifen beispielsweise $R_a = 0,32 \mu\text{m}$ betragen und danach $R_a = 0,08 \mu\text{m}$. Die FVA konnte in Untersuchungen zeigen, dass die verbesserte Zahnflankenoberfläche durch Gleitschleifen zu einer signifikanten Steigerung der Grübchentragfähigkeit führt. Es ist auch die Fress- und Verschleißtragfähigkeit positiv beeinflusst. Im Speziellen konnte eine wesentliche Steigerung der Graufleckentragfähigkeit festgestellt werden. Im Versuch fiel die geschliffene Referenz bereits nach 150 Stunden aus, wobei die gleitgeschliffenen Verzahnungsvarianten erst nach 2000 Stunden ohne einen ersichtlichen Fehler beendet wurde. Grund hierfür kann das Abtragen der schädlichen Rauheitsspitzen durch das Gleitschleifen und eine erhöhte spezifische Schmierfilmdicke genannt werden. Darüber hinaus haben gleitgeschliffene Verzahnungen sowohl vor als auch nach dem Einlaufvorgang geringe Reibungsverluste.¹⁹

¹⁹vgl. Tobie, König, 2002, S.18ff.

2.2 Nitrieren

Dieses Härteverfahren ist in der DIN EN 10 052 als thermochemische Wärmebehandlung definiert. Beim Nitrieren wird die Randschicht mit Stickstoff angereicht, hingegen wird beim Nitrocarburieren auch Kohlenstoff dazu verwendet. Der Aggregatzustand des Behandlungsmediums ist namensgebend für die unterschiedlichen Verfahren:

- Gasnitieren / Gasnitrocarburieren
- Plasmanitieren / Plasmanitrocarburieren
- Salzbadnitrocarburieren
- Pulvernitrocarburieren

Die Gemeinsamkeit all dieser Härteverfahren ist, dass sich an der Werkstoffoberfläche durch katalytische Zerfallsreaktionen atomarer Stickstoff bildet. Dieser diffundiert in die Randschicht des Werkstücks und es bildet sich eine Nitrierschicht. Diese hat einen zweilagigen Aufbau und besteht aus einer Verbindungsschicht (VS) und einer Diffusionsschicht (DS). Die Zusammensetzung der VS enthält Eisennitride und/oder – carbonitride. Des Weiteren sind Nitride und/oder Carbonitride der Legierungselemente des verwendeten Stahls vorhanden.²⁰

Die Abbildung 9 veranschaulicht eine solche Nitridschicht. Es bildet sich eine sehr harte Verbindungsschicht, welche zwischen 5 – 30 µm dick werden kann. Diese enthält ϵ - und γ' -Eisennitride und mehr oder weniger stark ausgebildete Porensäume, welche beispielsweise als Träger für Schmiermittel verwendet werden können. Die Härte dieser Schicht liegt zwischen 500-1000HV. Die Diffusionsschicht ist ca. 0,2 – 1,5mm dick und enthält den zwangsgelösten Stickstoff oder ausgeschiedene Nitride. Die Härte liegt zwischen 300-1500HV.²¹

²⁰vgl. Hoja et al., 2011, S.4.

²¹vgl. Weißbach et al., 2015, S.252.

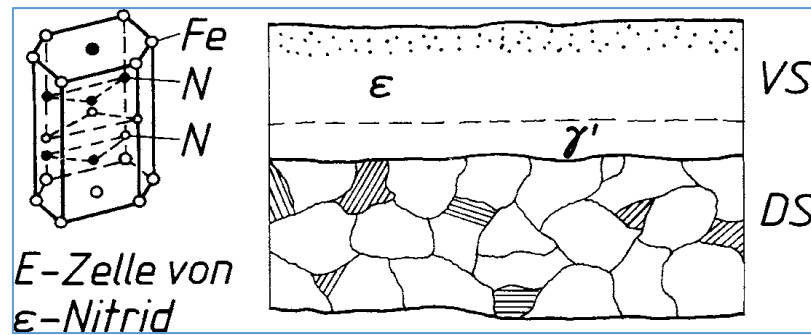


Abbildung 9 Zweilagiger Aufbau einer Nitrierschicht

Es kann auch zusätzlich zum Nitrierverfahren eine Oxidschicht aufgebracht werden. Diese hat normalerweise eine Dicke von bis zu 0,3 μm . Die Abbildung 10 beschreibt die Eigenschaften der einzelnen Schichten. Je nach Anforderungen müssen die Nitrierparameter so gewählt werden, dass die entsprechenden Schichtdicken und ihre Eigenschaften entstehen.

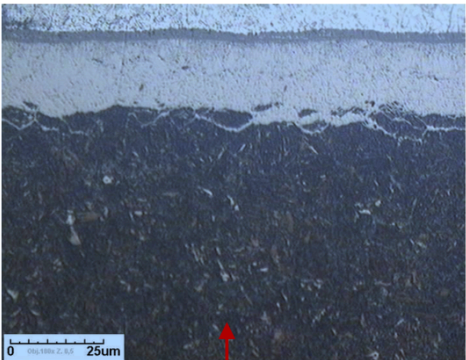
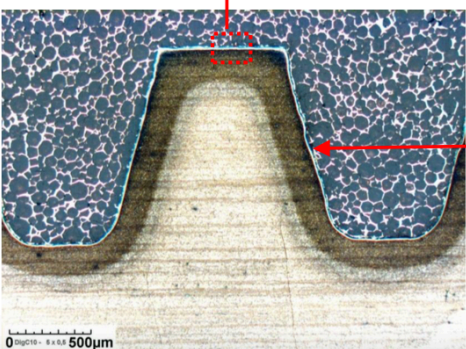
Schichtaufbau	
 	Oxidschicht (OS): bis 3 μm ▪ dekorativ ▪ hoher Korrosionswiderstand
	Verbindungsschicht: bis 30 μm ▪ Schutz gegen abrasiven (dicke VS) & adhäsiven (dünne VS) Verschleiß ▪ niedrige Reibwerte, keramikähnlicher Zustand ▪ Korrosionswiderstand
	Diffusionszone: bis 1,5mm ▪ Oberflächenhärte ▪ Druckfestigkeit ▪ Dauerfestigkeit ▪ in DZ wird die NHD ermittelt

Abbildung 10 Schichtaufbau beim Nitrieren (inkl. Oxidschicht) und deren Eigenschaften²²

²²vgl. Holecek, o.J, S. 11.

2.2.1 Werkstoffwahl

Zur Erzielung der optimalen Härte ist die Auswahl des richtigen Werkstoffs für das Nitrieren von größter Bedeutung. Es ist besonders auf die nitridbildenden Legierungselemente zu achten. Je höher der Gehalt dieser ist, desto steiler ist der Härtegradient. Es wird dadurch die Maximalhärte und der Härte-Tiefenverlauf durch diese Legierungselemente beeinflusst. Ein solcher Verlauf und seine charakteristischen Größen sind in Abbildung 11 dargestellt.

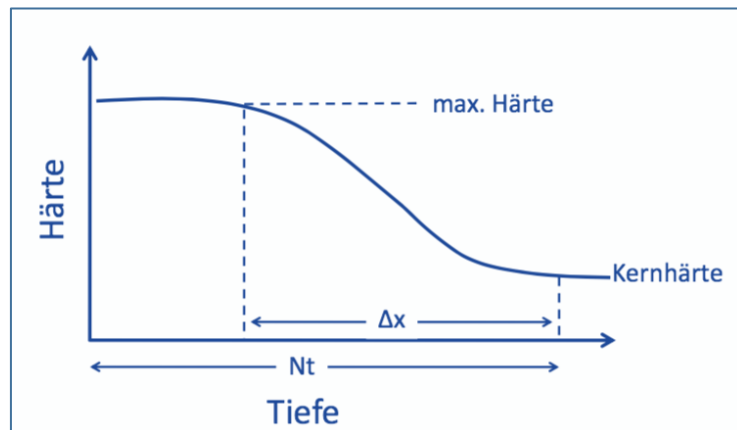


Abbildung 11 Härte-Tiefenverlauf nitrierter Werkstoffe

Der Einfluss auf die Zielgrößen Randhärte, Nitriertiefe und den Härtegradient kann der Abbildung 12 entnommen werden. Es ist zu beachten, dass die Neigung zur Nitridbildung und damit die maximal erreichbare Oberflächenhärte mit der Reihenfolge $Mn < Mo < Cr < Ti, Al$ zunimmt. Allerdings nimmt bei einer höheren Nitridbildung die Nitriertiefe ab, weil ein Teil des eindiffundierenden Stickstoffs zur Bildung der Sondernitride verwendet wird.

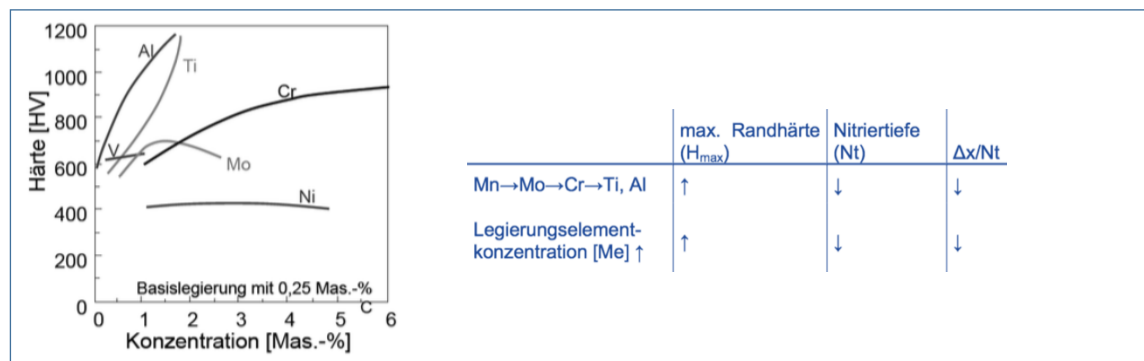


Abbildung 12 Einfluss der Legierungselemente auf Randhärte, Nitriertiefe und Härtegradient

Es konnte gezeigt werden, dass die Tragfähigkeitskennwerte bei plasmanitrierten Zahnrädern denen von einsatzgehärteten entsprechen. Diese hohen Zahnfuß- und Zahnflankentragfähigkeiten können beim Nitrieren jedoch

nur bei Werkstoffen mit erhöhtem Anteil an Chrom, Molybdän und Vanadium erzielt werden. Die Tabelle 3 zeigt empfohlene Werkstoff und die notwendigen Nitriertiefen für Getriebeteile.

Werkstoff	Vorwärmebehandlung	einzusetzen bis zu einer Flankenbelastung nach Hertz von
16MnCr5 20MnCr5	gehärtet bei 850 °C im Öl, angelassen bei 580 °C	800 N/mm ²
25CrMo4 42CrMo4	etwa 900 N/mm ² Vergütungsfestigkeit	... 900 N/mm ²
14CrMoV6-9	etwa 900 bis 1000 N/mm ² Vergütungsfestigkeit	... 1200 bis 1400 N/mm ²
Modul (m)	Nitrierhärte tiefe (NHD)	
m ≤ 1	0,1 mm	
1 < m < 3	0,2 bis 0,3 mm	
m ≥ 3	0,5 bis 1,0 mm	

Tabelle 3 Empfohlene Werkstoffe und Nitriertiefen für Getriebeteile

Im folgenden Abschnitt werden die beiden Verfahren Gasnitrieren und Plasmanitrieren beschrieben.²³

2.2.2 Gasnitrieren

Der Nitriervorgang im Gasstrom wird in der Geschichte im Jahre 1921 von A.Fry zum ersten Mal angewendet. Grundsätzlich definiert die DIN 17014 den Prozess als „Anreichern der Randschicht eines Werkstücks mit Stickstoff durch Halten in einem stickstoffabgebenden Mittel bei einer Temperatur unterhalb AC₁ des Ausgangswerkstoffes“. Als Grundwerkstoff eignen sich besonders Stähle, welche eine große Affinität zu Stickstoff aufweisen. Als Beispiel können hierfür Nitrierstähle, Vergütungsstähle, Einsatzstähle, Werkzeugstähle und Baustähle genannt werden.

Die Behandlungsumgebung während des Härteprozesses ist vorwiegend Ammoniakgas (NH₃), wobei dieses Gas durch N₂ und H₂ verdünnt sein kann. Die Teilung des Ammoniaks läuft im Nitrierprozess nach folgender Reaktionsgleichung (1) ab:



Durch den Zersetzungsgrad des Ammoniakgases kann das Angebot an Stickstoff in der Umgebung geregelt werden. Mit Hilfe der Nitrierkenngröße oder Nitrierkennzahl K_N kann der komplexe Zusammenhang zwischen der

²³vgl. Hoja, Hofmann, 2011, S. 7ff.

$$K_N = \frac{p_{NH_3}}{p_{H_2}^{1,5}} \quad (2)$$

Die Steuerung der Nitrierwirkung bedeutet, dass die Grenzflächenreaktionen beeinflusst werden. Dadurch können die Diffusionsvorgänge in den Randschichten bzw. im Grundwerkstoff verändert werden. In der folgenden Abbildung 13 ist der thermochemische Prozess der Nitrierschichtbildung veranschaulicht. Die Grafik zeigt auf der linken Seite den Zusammenhang zwischen N-Konzentration und Randabstand. Es ist ersichtlich, dass diese in der Verbindungsschicht zum Rand hin immer höher wird. In der Strömungsgrenzschicht wird im Zusammenhang mit dem umgewälzten Nitriergas die bereits erwähnte chemische Reaktion aus Gleichung (1) gezeigt.



Der Nitrierprozess beinhaltet die Nitridkeimbildung, wobei hier die unterschiedlichen Phasen zu beachten sind. Diese wirken sich ebenso wie die Oberflächenreinheit auf die Keimbildungsgeschwindigkeit aus. Die Menge des eindiffundierenden Stickstoffs in die Randschicht kann in drei Reaktionsschritte unterteilt werden:

1. Dissoziation des Nitriermittels an der Oberfläche des Werkstoffs, bis sich ein Gleichgewicht zwischen der Nitrieratmosphäre und dem im α -Eisen gelösten Stickstoff ergibt.
2. Es wird ein ausreichend großes Partialdruckverhältnis (siehe Gleichung 1) benötigt, um die erwähnte Gleichgewichtslinie zu überschreiten. Dies führt zur Bildung von γ' -Nitrid. Die Stickstoffaufnahme in dieser Reaktionsphase ist abgeschlossen, sobald das Gleichgewicht zwischen Nitrieratmosphäre und γ' -Nitrid eingestellt ist.
3. Bei weitersteigendem Partialdruckverhältnis wird das γ' -Nitrid umstrukturiert und es kommt zu einer Ausscheidung des stickstoffreicheren ε -Nitrids, bis sich wieder ein Gleichgewicht mit der Nitrieratmosphäre einstellt.

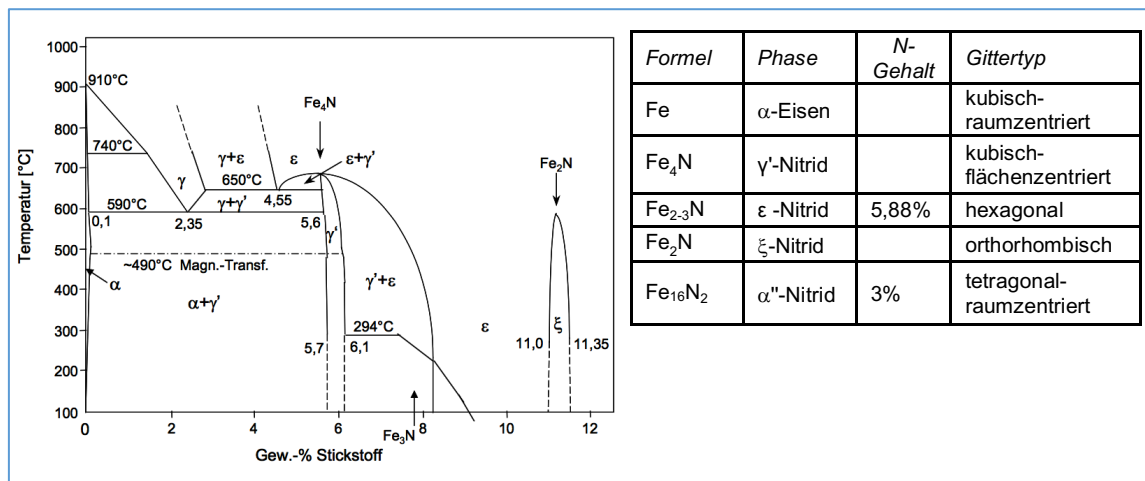


Abbildung 14 Zustandsschaubild Eisen-Stickstoff & Phasenerklärung

Die beschriebenen Reaktionsschritte können in Abbildung 14 nachvollzogen werden. Das Verfahren startet bei 490°C, da in diesem Bereich optimale, feinstdisperse Ausscheidungen entstehen. Die Folge der niedrigen Temperaturen sind lange Nitrierdauern, welche oft über 80 Stunden betreffen und somit entsprechend hohe Nitriertiefe entstehen kann. Die im Eisen-Stickstoff Zustandsschaubild vorkommenden Phasen, deren Gittertyp und der Stickstoff Gehalt können der Abbildung 14 entnommen werden. Mit 5,88% Stickstoffgehalt

ist die ϵ -Nitrid Phase die stickstoffreichste, diese entsteht im dritten Reaktionsschritt.²⁴

Um die gewünschte Nitridschicht erzeugen zu können, müssen die notwendigen Prozessparameter eingestellt werden. Für diesen Vorgang kann das Eisennitridphasendiagramm nach Lehrer herangezogen werden. Hierbei werden Nitriertemperatur und der notwendige NH_3 –Gehalt in der Prozessatmosphäre gegenübergestellt. Dieses Diagramm ist in der Abbildung 15 ersichtlich. So benötigt man beispielsweise bei einer Nitriertemperatur von 500°C und ϵ -Nitrid in der Randphase eine Gasatmosphäre von mehr als 60% NH_3 .

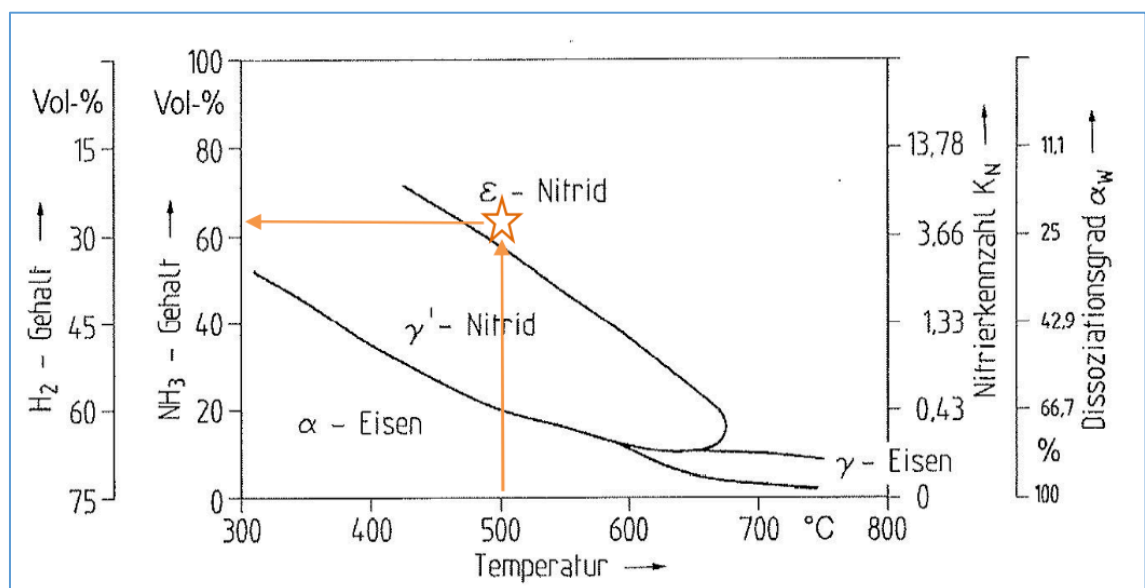


Abbildung 15 Eisennitridphasen nach Lehrer- Bestimmung der Prozessparameter

Vorteile des Gasnitrierens sind:

- Geringer Aufwand des Härteprozesses- unabhängig von Geometrie, Masse und Abmessungen des Bauteils (Groß- und Kleinteile).
- Der Härteprozess kann über Messungen von Wasserstoff und Sauerstoff genau kontrolliert werden.
- Die Bauteile können als Schüttgut gehärtet werden.
- Die gleichmäßige Härtung von speziellen Geometrien, wie bspw. kleine Bohrungen.

²⁴vgl. Tobie et al., 2012, S.6ff.

- Erzeugung von unterschiedlichen Verbindungsschichten – je nach Bauteilanforderungen.
- Durch eine thermische Nachverbrennung können die Prozessmedien umweltgerecht entsorgt werden.

Nachteile des Gasnitrieren:

- Um ein gleichmäßiges Nitrierergebnis zu erhalten, müssen die zu härtenden Bauteile aufwendig gereinigt werden.
- Der Härteprozess verwendet brennbare Gase, wodurch gewisse Sicherheitsvoraussetzungen für den Ofenbetrieb gelten. Des Weiteren darf das verwendete Ammoniakgas nicht austreten.
- Der Medienverbrauch ist vergleichsmäßig hoch.²⁵

²⁵vgl. Dipolt, 2015, S. 16ff.

2.2.3 Plasmanitrieren - PLASNIT® Fa. Rübig

Das Plasmanitrieren wird angewendet, um das Verschleiß-, Ermüdungs- und Korrosionsverhalten von Bauteilen zu verbessern. Ursprünglich wurde das Verfahren bereits vor dem zweiten Weltkrieg erfunden und von da an stetig weiterentwickelt. Den größten Entwicklungsschritt brachte die gepulste Entladung, durch welche die Nitriertemperatur wesentlich gleichmäßiger geregelt werden kann.²⁶

Die Niederdruck – Gasentladung in Stickstoff, bildet das Grundprinzip des Plasmanitrierens. Dabei dient das zu härtende Bauteil als Kathode und die Behälterwand als Anode. Hierbei wird eine Spannung von mehreren hundert Volt angelegt. Der beim Nitrieren benötigte Stickstoff wird als molekularer Stickstoff eingebracht. Um diese Stickstoffmoleküle zu spalten ist mehr Energie als die Prozesstemperatur notwendig. Aus diesem Grund wird dazu Plasma als Energiequelle in das Verfahren eingebracht. Plasma wird grundsätzlich als der vierte Aggregatzustand definiert. Darüber hinaus ist es ein elektrisch leitfähiges Gas, welches je nach Umgebungsdruck eine unterschiedliche Anzahl an freien Ladungsträgern zur Verfügung stellt. Dies ist der Grund, weshalb der Rezipient unter Vakuum (1-5mbar) betrieben wird. Dadurch können die Prozesstemperaturen geringgehalten werden, da beispielsweise bei einem Druck von 0,1 bar eine Temperatur von 8000 Kelvin notwendig ist um freie Ladungsträger zu erhalten.²⁷

Die Stromdichte ist abhängig von der Leitfähigkeit des verwendeten Gases und der angelegten Spannung. Beim Plasmanitrieren kommt es zur sogenannten Glimmentladung, welche in Abhängigkeit von Spannung und Stromdichte steht. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 16 als Potentialkurve einer Glimmentladung dargestellt. Beim Prozess des Plasmanitrierens wird die anormale Entladung für eine gleichmäßige Beglimmung verwendet.

²⁶vgl. Gebeshuber et al., 2010, S.222.

²⁷vgl. Dipolt, 2015, S. 17.

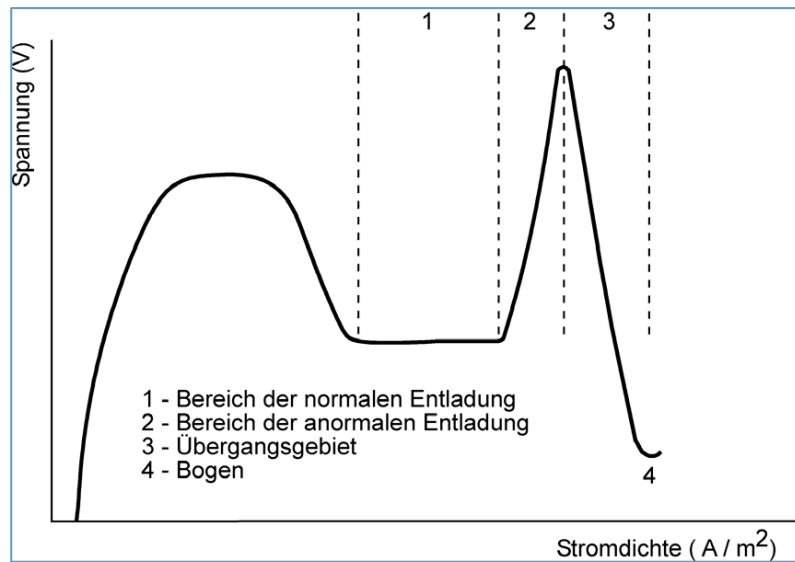


Abbildung 16 Stromdichte Potentialkurve einer Glimmentladung

Ein großes Problem des Plasmanitrierens in den 1980er Jahren waren großen Temperaturdifferenzen in einer Charge und damit unterschiedliche Härteergebnisse. Dies konnte durch Veränderung der Prozessparameter und der gepulsten Entladung verbessert werden.²⁸

Die Pulsdauer liegt in der Regel zwischen 50 bis 100µs mit einer Pulswiederholungszeit von 100-300µs. Dadurch wird der Energieeintrag in die Anlage reduziert und die Temperaturgleichmäßigkeit wesentlich verbessert. Der Einfluss der Pulsdauer und Pulswiederholzeit auf den Energieeintrag beim Plasmanitrieren wird in Abbildung 17 dargestellt.

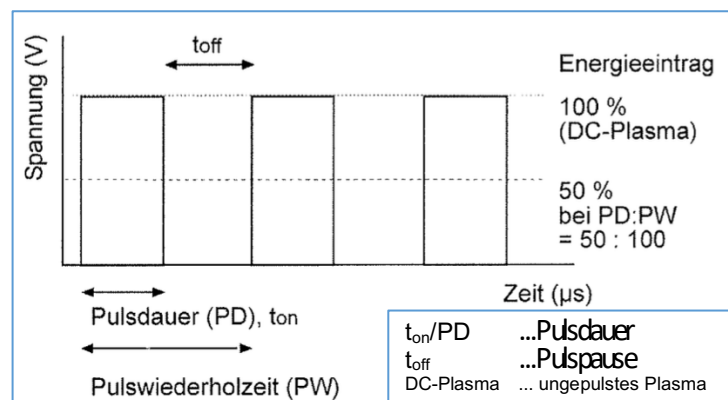


Abbildung 17 Darstellung des Pulsens der Spannung beim Plasmanitrieren²⁹

²⁸vgl. Liedtke, Dieter, 2014, S.171f.

²⁹vgl. Dipolt, 2015, S.17f.

Die Gasversorgung wird normalerweise über Flaschen gewährleistet, da das Verfahren sehr Mediensparsam ist und der Verbrauch lediglich wenige Liter/Stunde beträgt. Die folgende Abbildung 18 zeigt einen Schnitt durch eine Plasmanitrieranlage. Die Wärme wird durch eine externe Heizung erzeugt und ist in Grafik mit TW 1-5 gekennzeichnet. Die Verfahrenstemperatur wird direkt an einem Bauteil der Charge gemessen. Die gleichmäßige Temperaturverteilung und -regelung wird durch externe und interne Ventilatoren gewährleistet.

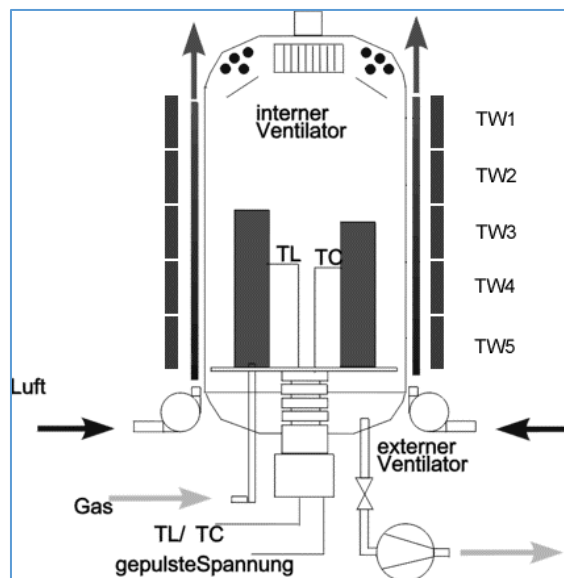


Abbildung 18 Schnitt durch eine Plasmanitrieranlage³⁰

Im Modell des Plasmanitrierens nach Kölbl wird davon ausgegangen, dass durch den Beschuss der Kathode (Werkstück) mit Stickstoff, Eisenatome abgesputtert (abgetrennt) werden. Diese Fe-Teilchen verbinden sich mit dem gespaltenen Stickstoff N zu FeN. Anschließend absorbiert das Bauteil FeN und der Stickstoff diffundiert ein. Moderne Untersuchungen zeigen, dass dieser Vorgang nur eine geringe Auswirkung auf die Nitrierschicht hat.

Bei neuen Modellen wird gezeigt, dass Stickstoff, welcher direkt an der Oberfläche erzeugt wird, einen wesentlichen Einfluss auf den Plasmanitrierprozess hat. Dieser Prozess ist in der folgenden Abbildung 19 dargestellt. Hierbei werden die Stickstoffmoleküle angeregt und in Richtung Kathode (Werkstück) beschleunigt. Es kommt dadurch zu einer Adsorption am

³⁰vgl. Liedtke, Dieter, 2014, S.172f.

Bauteil, welche auf der Dissoziation der Teilchen beruht. Unter Dissoziation versteht man eine selbsttätige Teilung einer chemischen Verbindung in mehrere Moleküle. Die Energie der Teilchenanregung und die des Bauteils sind dafür notwendig. Anschließend kommt es zur Chemisorption des atomaren Stickstoffs an der Oberfläche, welche wie eine sehr starke Oberflächenbindung zu verstehen ist. Darauf folgt der Diffusionvorgang des N in das Bauteil.

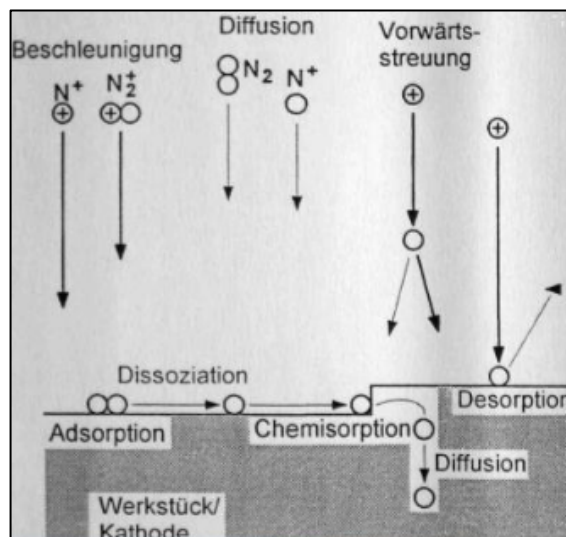


Abbildung 19 Plasmanitrieren- Diffusion von N in Gefüge

Die wichtigsten Prozessparameter zur Steuerung des Härteprozesses beim Plasmanitrieren sind:

- Temperatur, Dauer der Nitrierung
- Gaszusammensetzung (Partialdrücke), Prozessdruck
- Plasma: Spannung, Pulswiederholzeit und die Pulsdauer

Der Temperaturbereich des Härteprozesses liegt zwischen 450- 580°C. Die notwendigen Medien sind Stickstoff und Wasserstoff. Die Prozessdauer liegt zwischen 2-300 Stunden, wobei dies abhängig von der gewünschten Nitrierhärte ist.³¹ Die Steuerung über eine Nitriernummer wie beim Gasnitrieren ist nicht möglich, da es zu keinem katalytischen Zerfall des Spendermediums kommt. Beim Plasmanitrieren wird der molekulare Stickstoff im Glimmsaum direkt in „reaktiven Stickstoff“ umgewandelt. Dadurch erhält man die Möglichkeit den Prozess unter anderem über die Gasphase zu steuern. Hohe

³¹vgl. Holecek, o.J, S. 50ff.

Stickstoffpartialdrücke sind mit einer hohen Nitrierkennzahl beim Gasnitrieren vergleichbar.³² Aus diesem Grund kann man über die Gaszusammensetzung den Verbindungsschichttyp steuern. Eine Übersicht der verschiedenen Zusammensetzungen und deren Auswirkung ist folgender Tabelle 4 zu entnehmen:

VS-type	Gaszusammensetzung	
ϵ -Nitride	$H_2 < N_2$	1 : 3 to 1 : 4
γ' -Nitride	$H_2 > N_2$	3 : 1
VS-frei	$H_2 \gg N_2$	8 : 1

Tabelle 4 Gaszusammensetzung und Auswirkung auf VS-Typ

Darüber hinaus hat der Prozessdruck auf die Beglimmung und die daraus folgende Glimmsaumdicke einen wesentlichen Einfluss. Beispielsweise muss der Druck ausreichend groß sein um auch Bohrungen nitrieren zu können. Wird der Druck zu gering gewählt, wird die Bohrung entweder gar nicht nitriert oder es besteht durch die Bildung einer Hohlkathode Überhitzungsgefahr am Bauteil. Dies wird in folgender Abbildung 20 anschaulich dargestellt:³³

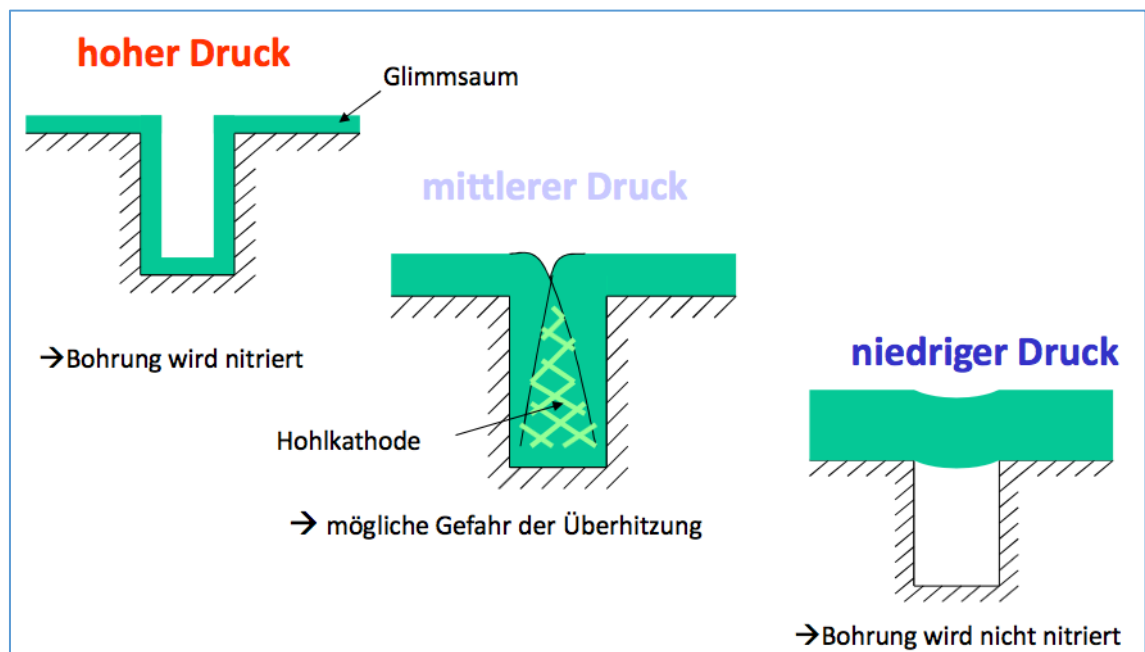


Abbildung 20 Auswirkung des Prozessdrucks auf Beglimmung

³²vgl. Liedtke, Dieter, 2014, S.174.

³³vgl. Holecek, o.J, S. 50ff.

Das Verfahren des Plasmanitrierens kann in verschiedene Prozessschritte unterteilt werden, welche stark vereinfacht in Abbildung 21 ersichtlich sind.

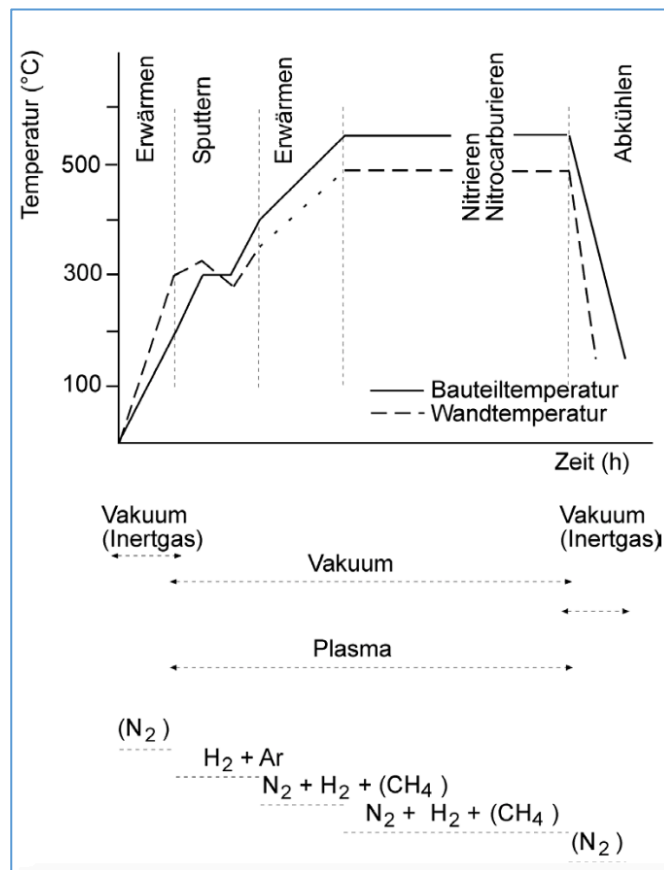


Abbildung 21 Prozessschritte beim Plasmanitrieren

Im ersten Schritt werden die zu härtenden Bauteile mit der Wandheizung der Anlage erwärmt. Innerhalb von 10-15 Minuten wird ein Vakuum erzeugt. Anschließend wird die Oberfläche über einen Teilchenbeschuss im Wasserstoffplasma aktiviert und Passivschichten werden beseitigt. Dabei ist hinzuzufügen, dass dieser Prozess des Sputterns die vorab Reinigung der Bauteile von Fertigungsrückständen nicht ersetzt. Danach wird die Anlage bis auf die gewünschte Nitriertemperatur erhitzt. Nun beginnt der Vorgang des Nitrierens und dieser wird über die Anforderung und entsprechender Wahl der Prozessparameter definiert. Nach der gewünschten Haltedauer wird die Wandheizung deaktiviert und die zu härtenden Bauteile werden über Ventilatoren gekühlt.³⁴

³⁴vgl. Liedtke, Dieter, 2014, S.178f.

Derzeitige Einsatzgebiete von plasmanitrierten Verzahnungen

Das Verfahren wird hauptsächlich eingesetzt, wenn eine gleichzeitige Steigerung von Korrosions-, Verschleiß- und Festigkeitseigenschaften erzielt werden soll. Beispielsweise: Hochleistungsgetriebe, Synchronringe, Ventile, Werkzeug und Gesenke, Auswerferstifte und eng tolerierte Hydraulikkolben (welche nach der Härtung einbaufertig sein sollen).

Potential von plasmanitrierten Zahnrädern:

Die Firma Rübig hat Ermüdungsversuche von Zahnrädern am Forschungszentrum für Getriebe (FZG) München in Auftrag gegeben. Die Ergebnisse der Zahnfußbiegefestigkeit wurden anschließend mit einsatzgehärteten Zahnrädern verglichen. Es wird gezeigt, dass die optimale Auswahl des Werkstoffs und die dazu passenden Plasmanitrierparameter zu einer ebenbürtigen Biegefestigkeit wie einsatzgehärtete Stähle führt.³⁵ In der Abbildung 22 ist zu erkennen, dass Zahnfußfestigkeit σ_{Flim} und die Zahnflankentragfähigkeit σ_{Hlim} wesentlich höher sind als bei anderen Wärmebehandlungsmethoden. Der Balken PN beschreibt die Ergebnisse aus der Dissertation von Schlötermann im Jahre 1988 zu nitrierten Werkstoffen. Die Festigkeitswerte konnten durch die Untersuchungen am FZG bestätigt werden.

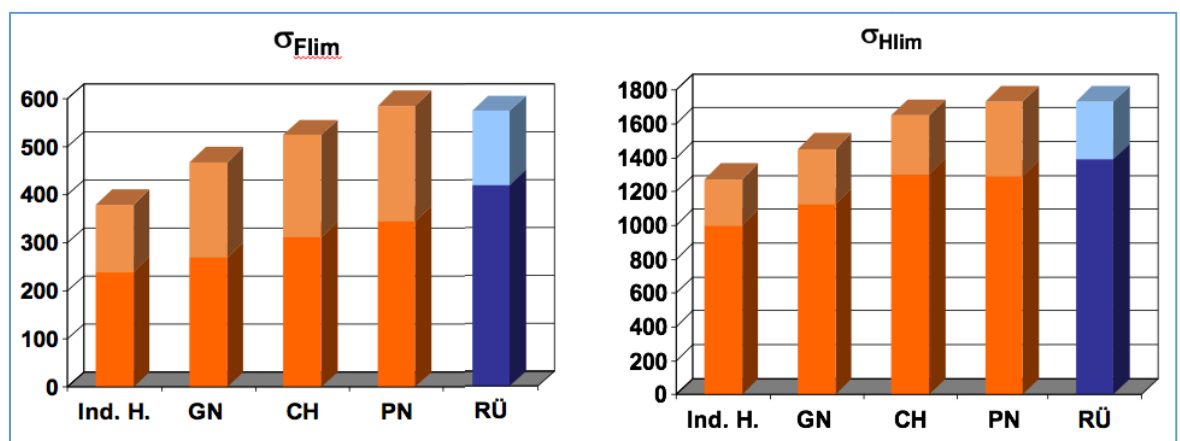


Abbildung 22 Biegefestigkeit: Vergleich Fa. Rübig und Literatur³⁶

Ind. H Induktionshärten
GN Gasnitrieren
CH Case hardening (Einsatzhärten)
PN Dissertation Schlötermann (1988)
RÜ Rübig SIR Verfahren (Plasmanitrieren)

³⁵vgl. Gebeshuber et al., 2010, S.223f.

³⁶vgl. Firma Rübig, S. 8.

Evaluierung der wirtschaftlichen Vorteile des Plasmanitrierens

Grundsätzlich verbinden viele Hersteller mit plasmanitrierten Werkstücken höhere Produktionskosten. Grund dafür ist oft der dazu notwendige Stahl, welcher teurer in der Anschaffung ist. Das Nitrieren mittels Plasma hat im Vergleich zu anderen Wärmebehandlungsmethoden, wie Einsatzhärten, den großen Vorteil eines geringen Verzugs. Bei Umstieg von einer einsatzgehärteten Verzahnung auf plasmanitrierte Zahnräder erspart sich der Hersteller sehr kostspielige Nachbearbeitungsschritte. Diese sind notwendig um die Verzahnungsqualität nach dem Einsatzhärten wieder das Niveau wie zuvor zu erreichen. Beim Plasmanitrieren können die Werkstücke montagefertig aus dem Wärmebehandlungsprozess entnommen werden.

Das Unternehmen Wilhelm Oberaigner GmbH ist ein Spezialist in der Produktion von Automobil-Systemkomponenten, wie beispielsweise Antriebskomponenten. Im Zuge eines Versuchs wurde bei einem Allradantrieb eines Mercedes Sprinter das Hohlrad verändert. Die bewährte Variante ist aus 20MnCrS5 und Dorn-Einsatzgehärtet. Das Versuchshohlrad ist aus 31CrMoV9 und plasmanitriert. Die Verzahnungsqualität soll wie in der Automobilindustrie üblich zwischen 6-7 liegen.

Die Verzugsverhalten wurden nach dem Härteprozess verglichen und es ist ersichtlich, dass der Verzug des plasmanitrierten Hohlrades nur ein Bruchteil des einsatzgehärteten Hohlrades ist. Dies ist in der Abbildung 23 ersichtlich.

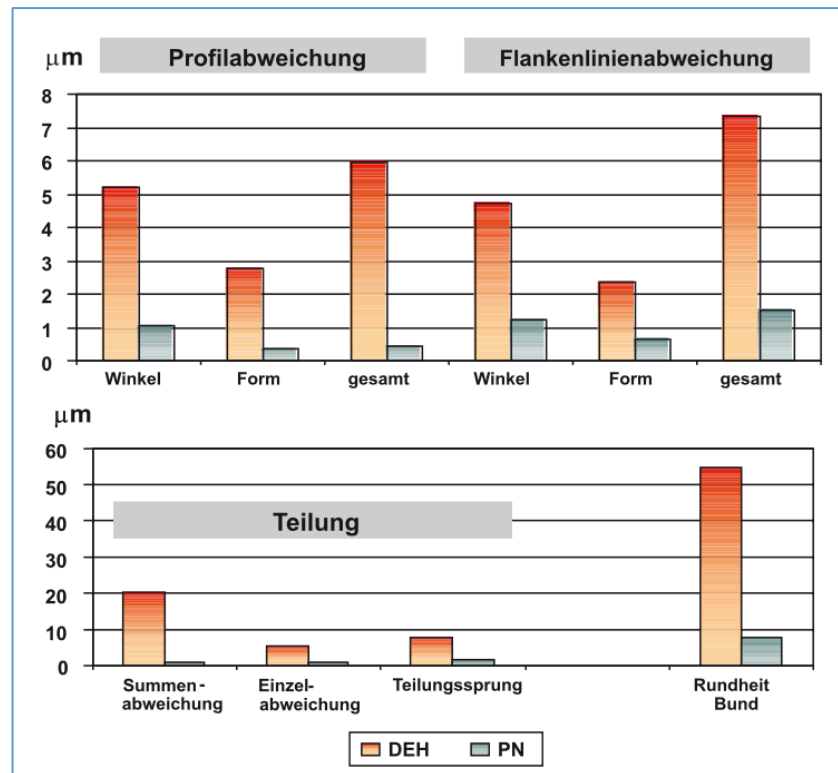


Abbildung 23 Vergleich des Verzugsverhalten: Plasmanitrieren und Dorn-Einsatzhärten

Das plasmanitrierte Hohlrad benötigt keine teure Hartbearbeitung, da die Verzahnungsqualität beibehalten wird. Aus diesem Grund ergibt sich trotz des teureren Nitrierstahles eine Kostenersparnis von 17% gegenüber der einsatzgehärteten Variante.³⁷

Vorteile des Plasmanitrierens:

- Geringe Maßänderung und Oberflächenrauheit des Werkstücks. Dadurch können Bauteile vor dem Plasmanitrieren bereits montagefertig bearbeitet werden, wodurch keine teure Nachbearbeitung notwendig ist.
- Temperaturmessung direkt am Bauteil, somit genauere Steuerung
- Hohe Prozesssicherheit, wodurch auch kritische Serienteile gehärtet werden können.
- Flexibilität des Härtingsprozesses, wodurch auf unterschiedliche Anforderungen der Schicht bzw. Werkstoffe eingegangen werden kann. Dies ist flexibler als beim Gasnitrieren.

³⁷vgl. Gebeshuber et al., 2010, S.224f.

- Optimierung des Schichtaufbaus: Zum Beispiel kann eine dünne Verbindungsschicht mit großer Nitrierhärte Tiefe erzielt werden. Die Verbindungsschicht kann auch porenfrei gestaltet werden.
- Es können enge Toleranzen beim Behandlungsergebnis eingehalten werden.
- Prozesskombinationen aus Nitrieren und Oxidieren ist möglich.
- Bei Sinterteilen entsteht eine hohe Maß- und Formbeständigkeit
- Das Verfahren weist eine hohe Umweltverträglichkeit im Vergleich zu thermochemischen Prozessen auf.
- Nicht zu nitrierende Stellen werden einfach abgedeckt.

Nachteile des Plasmanitrierens:

- Plasma kann in Spalten kleiner als 0,6mm nicht eintreten. Dadurch kann die Charge nicht als Schüttgut behandelt werden.³⁸
- Dünne Bohrungen und Spalten werden teilweise schlecht beglimmt und sind deswegen oft gar nicht oder nur teilweise nitriert.
- Der Bediener der Nitrieranlage muss einen wesentlich höheren Ausbildungsstand haben als beim Gasnitrieren.³⁹

³⁸vgl. Gebeshuber et al., 2010, S.222f.

³⁹vgl. Dipolt, 2015, S.21.

2.3 Vergleich der Härteverfahren

Nitrieren vs. Einsatzhärten

Die thermochemische Behandlung von Stahlbauteilen mit Stickstoff und/oder Kohlenstoff zählt zu den wichtigsten Verfahren zur Steigerung der Randhärte und Verschleißbeständigkeit. Des Weiteren haben thermochemisch behandelte Bauteile sehr gute tribologische Eigenschaften. Diese ergeben sich aus der hohen Oberflächenhärte, einer feinen Oberflächenmikrostruktur und einem zähen Kern. Die Abbildung 24 zeigt den Vergleich verschiedener Wärmebehandlungsverfahren bezogen auf die Grübchentragfähigkeit der Flanke in Abhängigkeit der Oberflächenhärte. Es ist ersichtlich, dass die höchsten Dauerfestigkeitswerte mit der Nitriertechnik und dem Einsatzhärten erzielt werden können.⁴⁰ Laut Fa. Rübig ist die erreichbare Tragfähigkeit von plasmanitrierten Zahnrädern noch höher als beim Einsatzhärten. Diese wurde durch einen gelben Stern in der Abbildung 24 markiert.

⁴⁰vgl. Hoja, Hofmann, 2011, S.1.

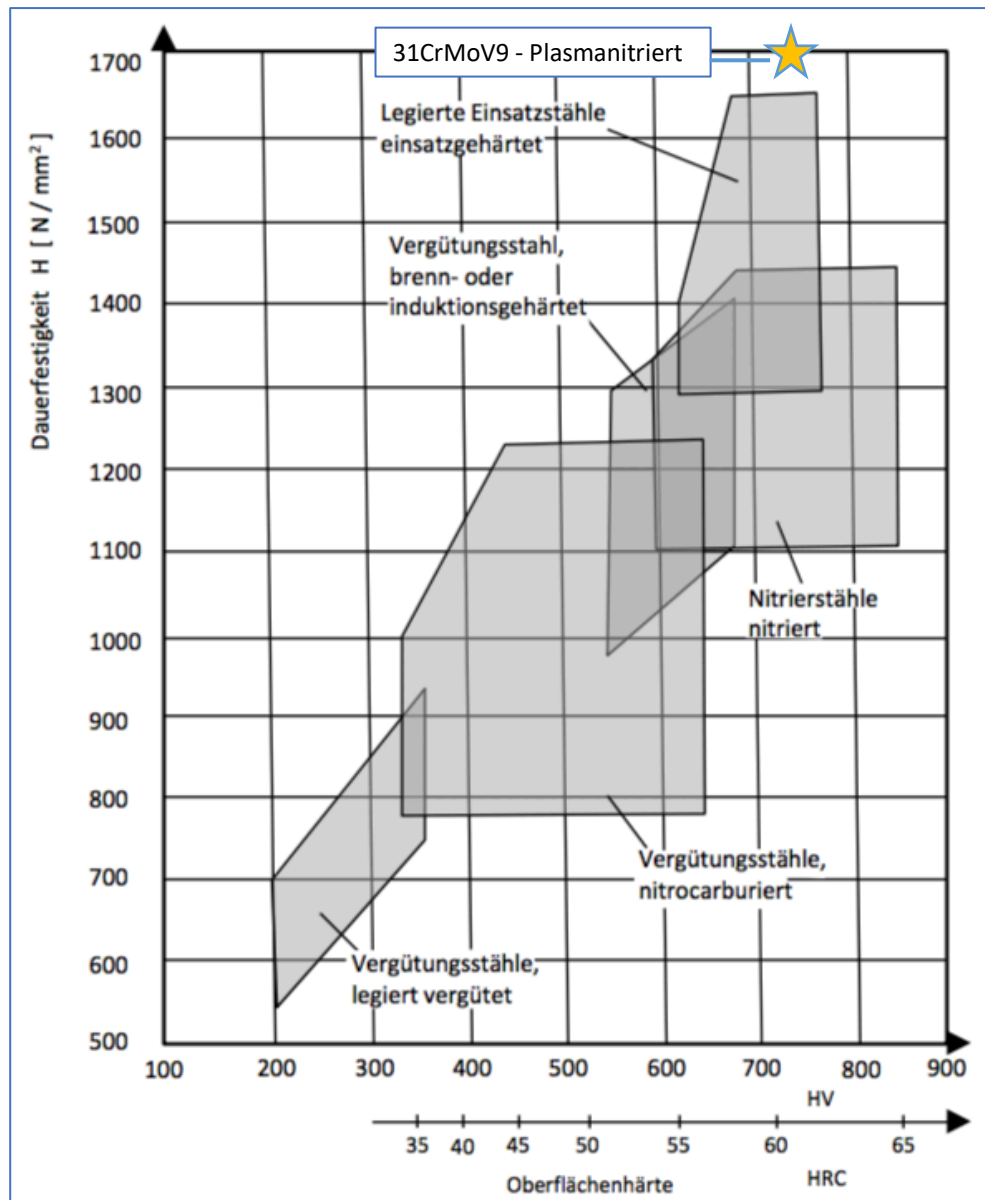


Abbildung 24 Gröbchenfestigkeit verschiedener Wärmebehandlungsverfahren

Die Zahnfußfestigkeit und Zahnflankentragfähigkeit sind bei nitrierten Zahnradern etwas geringer als bei einsatzgehärteten. Hierbei könnte jedoch die Zahnfußfestigkeit durch den Abtrag der Verbindungsschicht noch etwas erhöht werden. Hingegen sind nitrierte Verzahnungen weniger abhängig von der Art des Schmierstoffes. Dies konnte bei Verschleißuntersuchungen zwischen drucknitrierten und aufgekohnten Zahnradern bei Verwendung von verschiedenen Schmiermitteln (Mineral- und Esteröl), gezeigt werden. Nitrierte Verzahnungen bieten außerdem einen besseren Schutz gegen Fressen und Korrosion. Einsatzgehärtete Verzahnungen haben hingegen bessere

Eigenschaften im Bezug auf Abrasion und Reibung. Durch die thermochemische Behandlung können jedoch höhere Oberflächenhärten und eine gleichmäßigere Härteverteilung erzeugt werden. Im Speziellen ist die Oberflächenhärte wesentlich unabhängiger von der Einsatztemperatur. Einsatzgehärtete Stähle weisen einen starken Härteabfall oberhalb von 200°C auf, wobei nitrierte Werkstoffe sehr anlassbeständig sind. Aus diesem Grund eignet sich dieses Härteverfahren sehr gut für Bauteile mit hohen Einsatztemperaturen. Einer der größten Vorteile des Nitrierverfahrens sind die geringen auftretenden Härteverzüge. Dies beruht auf der geringeren Prozesstemperatur und den fehlenden, zweimaligen Gefügeumwandlungen. Die Maßänderungen beim Nitrieren betragen zwischen 10-30 µm, wobei die Längenzunahme beim Einsatzhärten ca. 2% beträgt. Dies bietet in der Zahnradherstellung einen wesentlichen Kostenvorteil, da der Nachbearbeitungsaufwand bei nitrierten Zahnrädern wesentlich geringer ist. Als Nachteil des Nitrierverfahrens können die langen Prozessdauern erwähnt werden. Diese können zwischen mehreren Tagen und Wochen variieren und sind essentiell für das Erreichen einer hohen Nitriertiefe. Beim Nitrieren entsteht auch eine spröde Verbindungsschicht, welche im Betrieb durch Stöße abplatzen könnte und dadurch die Lebensdauer des Bauteils wesentlich reduzieren würde.

Die Tabelle 5 veranschaulicht nochmals die beschriebenen Vor- und Nachteile der beiden Härteverfahren.

	Einsatzhärten	Nitrieren
Zahnfuß- Zahnflankenfestigkeit	+	+
Tribologische Eigenschaften		+
Schmierstoffunempfindlichkeit		+
Fressen		+
Korrosion		+
Abrasion	+	
Reibung	+	
Gleichmäßigkeit der Härteverteilung		+
Härte bei hohen Einsatztemperaturen	-	+
Härteverzug (weniger Nachbearbeitung)	-	+
Prozessdauer		-
Gefahr durch spröde VS		-

Tabelle 5 Einsatzhärten vs. Nitrieren (Vorteile/Nachteile)

Der Vergleich lässt erkennen, dass Nitrieren eine Alternative zum Einsatzhärten darstellt. Bei der Wahl des richtigen Härteverfahrens muss jedoch unbedingt das Beanspruchungsprofil beachtet werden. ⁴¹

⁴¹vgl. Hoja, Hofmann, 2011, S.2ff.

Gasnitrieren vs. Plasmanitrieren

Das Gas- und Plasmanitrieren unterscheiden sich hauptsächlich in der Art der Stickstoff - Einbringung. Diese führt in weiterer Folge zu verschiedenen Verfahrensvor- und nachteilen. Diese werden in der Tabelle 6 anschaulich dargestellt.

Gas Nitrieren (GN)	Plasma Nitrieren (PN)
Stickstoff Einbringung durch chem. Zerfall des NH_3 an der Metall Oberfläche	Stickstoff Einbringung durch physikalisches Aufspalten des N_2 und Beschuss der Bauteiloberfläche (Sputtern)
- keine Nitrierung passivierter metallischer Oberflächen → nur niedrig bis mittellegierte Stähle nitrierbar → Oberflächenzustand, Bauteilreinigung!	- Sputtern kann passivierte Oberflächen „aufbrechen“ und aktivieren → Nitrieren aller Werkstoffe inkl. rostfreier Stähle möglich
Temperaturbereich von 500 – 580°C	Temperaturbereich von 400- 580°C
Variation der Nitrierkennwerte (CLT, NHD) aufwendig	Variation der Nitrierkennwerte (CLT, NHD) einfach möglich
- hohe Chargierdichten möglich (Berührstellen werden nitriert) → dadurch: allseitige Nitrierung möglich → aber: kein mech. Abdecken möglich	- Auflageflächen sind vor dem Nitrieren geschützt → mechanisches Abdecken möglich - hohe Automatisierbarkeit und Reproduzierbarkeit

Tabelle 6 Vergleich Gasnitrieren vs. Plasmanitrieren⁴²

Die Auswahl des richtigen Nitrierprozesses hängt jedoch stark von den Anforderungen des Bauteils im späteren Betrieb ab. Die Abbildung 25 zeigt eine Matrix, die einigen Beanspruchungsarten eine mögliche Kombination aus Werkstoff und Nitrierverfahren angibt. Zum Beispiel wird bei einem abrasiven Verschleiß eine hohe Oberflächenhärte benötigt. Diese wird durch Stähle mit viel Cr, V, Ti erreicht, weil dadurch eine höhere Nitriertiefe möglich ist. Für die bestmögliche Härte können niedriglegierte Stähle gasnitriert und hochlegierte Stähle plasmanitriert werden.

⁴²vgl. Holecek, o.J., S. 69.

Abrasiver Verschleiß - hohe Oberflächenhärte - bei niedrigen mech. Belastungen: dicke Verbindungsschichten - Stähle mit viel Cr, V, Ti (ev. Al) - niedriglegierte Stähle: Gasnitrieren - hochlegierte Stähle: Plasmanitrieren	Korrosion - dicke Verbindungsschicht mit Oxidschicht - Vergütungsstähle, unleg. Stähle: GasOx (Gasnitrieren + Oxidation) - Niro Stähle: Tieftemp.-Plasmanitrieren
Kombinationsmöglichkeiten (Beispiele) - hohe Korrosionsbeständigkeit, hoher abrasiver Verschleißwiderstand, niedrige Punkt-/ Linien-/Flächenbelastung → GasOx (Gasnitrieren + Oxidation) - hohe Punkt-, Linien-/Flächenbelastung, hoher abrasiver Verschleißwiderstand, hohe Dauerfestigkeit → Langzeitnitrieren (Stahl mit hoher Kernhärte)	Flächenpressung - hohe Oberflächenhärte - hohe Kernhärte - hohe Nitrierhärte tiefe - dünne Verbindungsschichten - vergütete Nitrierstähle, Werkzeugstähle: → Langzeitnitrierungen

Abbildung 25 Kombination Nitrierverfahren & Werkstoff⁴³

Das optimale Härteergebnis ist somit eine Kombination aus den Faktoren Werkstoff, Beanspruchung und dem dazu passenden Härteverfahren. Grundsätzlich gilt unabhängig vom Nitrierverfahren, je höher der Gehalt an Sondernitrid- Bildnern (Cr, V, Al) ist, desto:

- höher ist die erreichbare Oberflächenhärte
- niedriger ist die erzielbare Nitriertiefe
- dünner ist die Verbindungsschicht

Bei hohen mechanischen Belastungen sollte die Verbindungsschicht so dünn wie möglich sein, bzw. wenn möglich, gar nicht vorhanden. Eine dünne Verbindungsschicht erhöht auch die Zähigkeit der nitrierten Bauteils. Es sollte auch beachtet werden, dass je höher die mechanischen Belastungen sind, desto höher sollte:

- der Stahl legiert sein
- die Nitriertiefe sein
- die Kernhärte sein

Allerdings steigt mit einer dickeren Verbindungsschicht die Widerstandsfähigkeit gegen abrasiven Verschleiß und Korrosion.⁴⁴

⁴³vgl. Holecek, o.J, S. 72.

⁴⁴vgl. Holecek, o.J, S. 69ff.

3 Konstruktive Änderungen an den Getriebegehäusen

Die konstruktiven Änderungen der beiden Getriebegehäuse sind notwendig, um die Massenzunahme, resultierend aus der höheren Dichte der Aluminiumlegierung, zu reduzieren. Darüber hinaus musste durch gezielte Maßnahmen das Gehäuse versteift werden. Es ist dabei zu beachten, dass bei Eingriffen in die Konstruktion die Anschlussmaße nicht verändert werden dürfen. Es sind auch nur Veränderungen zulässig, welche die Funktionsfähigkeit der Verzahnung nicht beeinträchtigen. Die größten Gewichtseinsparungen wurden durch die Reduktion der Wandstärke, von 6mm auf 3mm, erzielt. Diese wurden sowohl beim IGB als auch beim TGB reduziert. Die konstruktiven Änderungen wurden in den folgenden Abbildung rot eingefärbt. Die Lagerbezeichnungen beziehen sich auf die Abbildung 35 und Abbildung 37.

3.1 Heckrotorgetriebe (TGB)

Die Abbildung 26 zeigt zwei zusätzliche Rippen im äußeren Bereich des Flansches. Mit diesem wird das Heckrotorgetriebe am Helikopter verschraubt. Aus diesem Grund haben hier die Versteifungsmaßnahmen die größte Wirkung, da die Kräfte und Momente abgeleitet werden können. In der ursprünglichen Variante wurde ein Kippen um die Achse der Ausgangswelle analysiert, welches durch die ersichtlichen Rippen nun reduziert wurde. Die seitlichen Rippen sind im Inneren hohl, wodurch eine hohe Stützwirkung mit geringerem Gewicht realisiert wurde. Die mittigen Rippen wurden verschlankt und etwas verlängert. Im Bereich zwischen den beiden Rippen konnte Material eingespart werden.

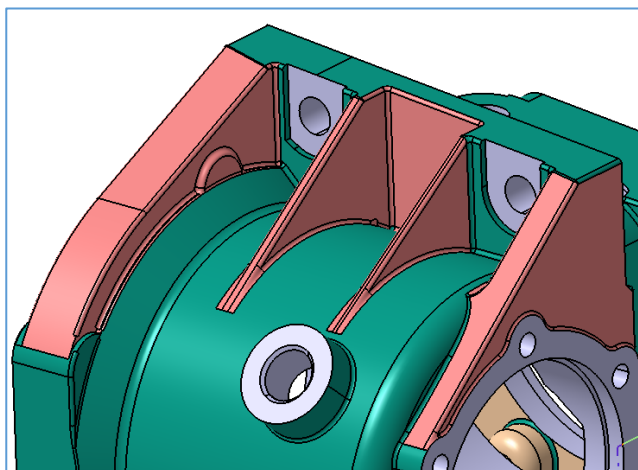


Abbildung 26 TGB Versteifung durch zusätzliche Rippen am Flansch

In der Abbildung 27 ist eine zusätzliche Doppelrippe ersichtlich. Diese verhindert das Kippen um die Achse der Eingangswelle und versteift so das Gehäuse maßgeblich.

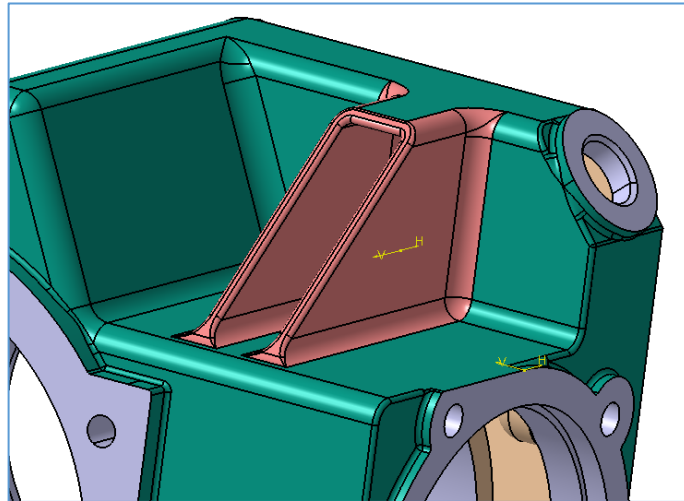


Abbildung 27 TGB: Doppelrippe

Speziell die Lagerstelle C der Ausgangswelle wies sehr große Verschiebungen in axialer Richtung auf. Diese konnten durch versteifende Maßnahmen im Innenraum reduziert werden, welche in der Abbildung 29 ersichtlich sind. Wichtig dabei ist die Öffnung für das Öl zu beachten. Diese gewährleistet das vollständige Abfließen des Öls, bei Öffnung der Ölablassschraube. Die Abbildung 28 zeigt eine kleine Rippe, welche die Stelle mit der größten Verschiebung etwas stützt.

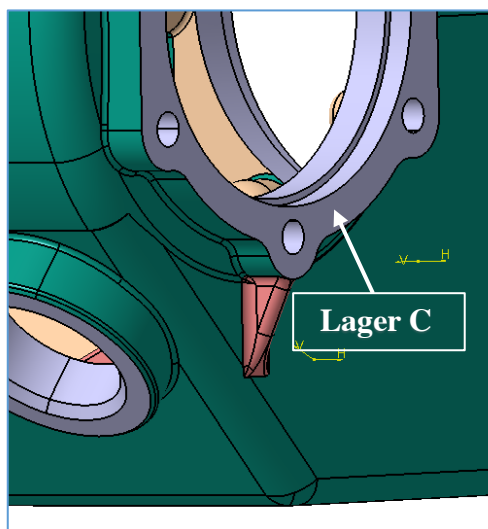


Abbildung 28 TGB: Kleine Rippe bei Ausgangswelle

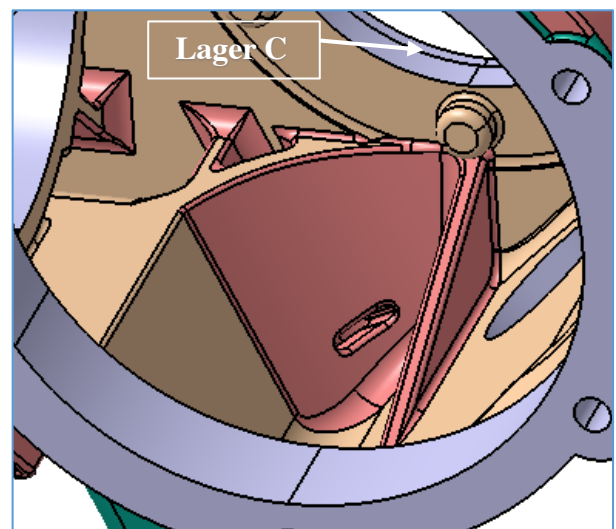


Abbildung 29 TGB: Versteifung der Lagerstelle C - Innenraum

Die Abbildung 30 zeigt den Stützhebel für die Heckrotorverstellung. Dieser hat eine Bohrung für einen Bolzen, welcher als Umlenkpunkt verwendet wird. Da die Getriebe in dieser Bauweise nicht mehr im Einsatz sind und moderne Hubschrauber wie die EC145 (Eurocopter) mit einem Fenestron ausgestattet sind, wurde dieser Stützhebel bei der Konstruktion nicht mehr berücksichtigt. Das Gewicht des Hebels in Aluminium beträgt ca. 110 Gramm.

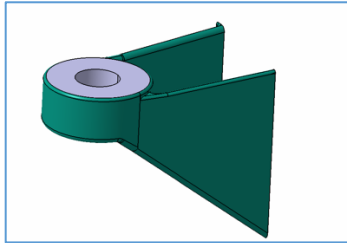


Abbildung 30 Umlenkung für die Heckrotorverstellung

3.2 Zwischenkegelgetriebe (IGB)

Die wichtigsten Versteifungen des IGB sind bei den Verschraubungen mit dem Helikopter realisiert worden. Die größten Verschiebungen sind im Bereich der Eingangswelle wodurch möglichst lange Rippen notwendig waren. Diese sind in der Abbildung 31 rot dargestellt.

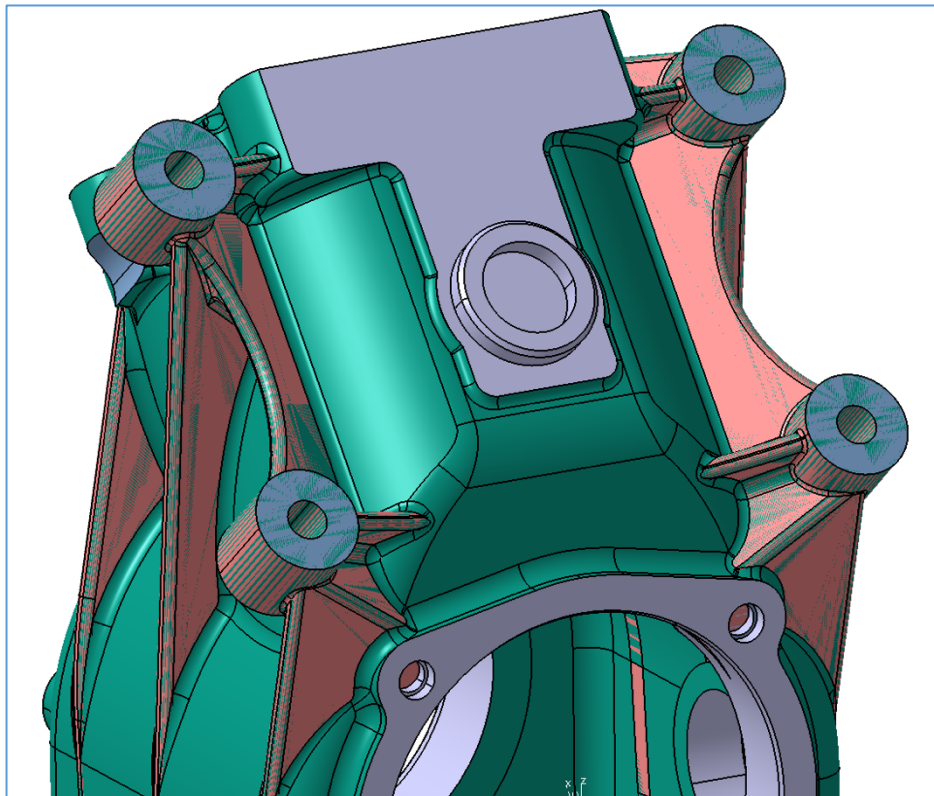


Abbildung 31 IGB: Versteifung lange Rippen

Es wurde eine zusätzliche Versteifung im unteren Bereich des Gehäuses verbaut wodurch seitliche Verschiebungen reduziert werden konnten. Diese ist in Abbildung 32 dargestellt. Die Verstrebung wurde nur einseitig ausgeführt, da dies aufgrund der Bewegung im Betrieb die besten Verbesserungen erzielte.

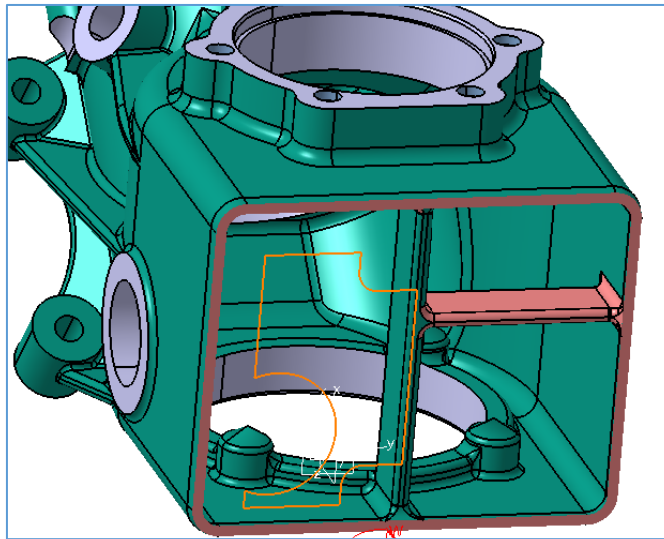


Abbildung 32 IGB Versteifung im Bodenbereich

Darüber hinaus wurden die Lagerstellen J und G/H durch eine Rippe verbunden und damit versteift. Dies ist in Abbildung 33 ersichtlich.

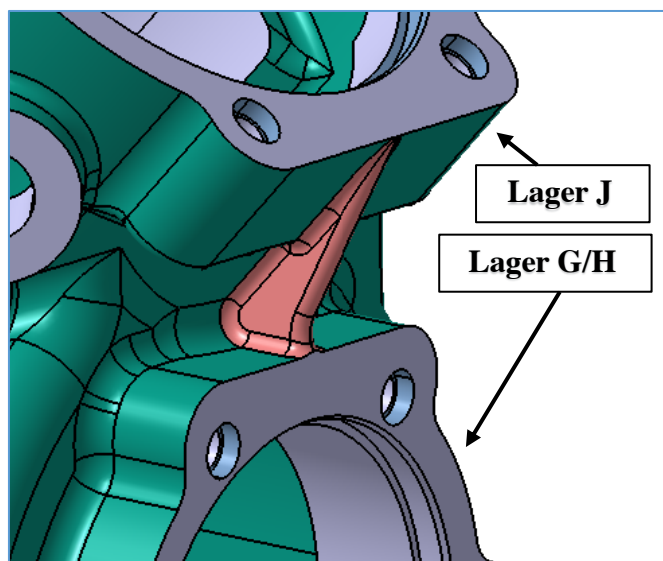


Abbildung 33 IGB Versteifung Lagerstelle J der Ausgangswelle

3.3 Gewicht

In der Luftfahrt ist es außerordentlich wichtig das Gewicht so gering wie möglich zu halten. Jede zusätzliche Masse hat direkte Auswirkungen auf die späteren Betriebskosten. Würde man bei dem ursprünglichen TGB- Gehäuse nur die Werkstoffe ändern, erhält man ein Gewicht von 2kg. Das würde einer Gewichtszunahme von 0,612kg entsprechen. Durch konstruktive Änderung konnte Gewicht eingespart und kritische Stellen versteift werden. Dadurch hat sich die beschriebene Gewichtszunahme auf 0,20kg reduziert. Es ist aber anzumerken, dass dieses versteifte Gehäuse nicht nur gewichtsoptimiert, sondern auch hinsichtlich einer Leistungssteigerung verändert wurde. Die verwendete Aluminium Legierung hat weitere Vorteile, wie beispielsweise die Korrosionsbeständigkeit. Die Tabelle 7 zeigt die Gewichtsanalyse der beiden Gehäuse.

Gewichtsanalyse			
in kg	Mg	Al	Differenz
IGB	1,39	1,59	+0,20kg
TGB	1,39	1,66	+0,27kg

Tabelle 7 Gewichtsanalyse: Mg-Leg. vs. Al-Leg bei IGB und TGB

4 FVA - Berechnung & FEM Analyse

Der Helikopterantriebsstrang, bestehend aus dem IGB und dem TGB, soll im Zuge dieser Arbeit auf die Möglichkeit einer Leistungssteigerung untersucht werden. Dabei wurde die Verzahnung in der FVA – Workbench modelliert. Diese ist eine herstellerneutrale Softwarelösung für die Modellierung, Parametrisierung und Berechnung von Getriebesystemen. Die FVA ist die Forschungsvereinigung für Antriebstechnik und bildet ein Netzwerk der industriellen Gemeinschaftsforschung führender Unternehmen der Antriebstechnik zusammen mit den besten Forschungsstellen. Diese arbeiten gemeinsam an der Entwicklung von innovativen Berechnungsmethoden. Die FVA-Workbench stellt diese Ergebnisse der vorwettbewerblichen Forschung herstellerneutral und branchenübergreifend zur Verfügung und ermöglicht Unternehmen individuelle Produktentwicklungen auf höchstem Niveau. Die FEM Analyse wird in CATIA V5R21 durchgeführt.

4.1 Berechnungsmethode

Ein wichtiges Ziel in der Getriebeentwicklung ist der Tragfähigkeitsnachweis einer Verzahnung. Hierbei sind möglichst genaue Spannungswerte von großer Bedeutung. Im Speziellen stehen bei den Kegelradverzahnungen verschiedene Verfahren zur Verfügung, wie beispielsweise die Methode nach ISO 10300 bzw. DIN 3991. Hierbei wird bei Methode B und C die zu untersuchende Kegelradverzahnung als Ersatz-Stirnradverzahnung umgerechnet. Der große Vorteil dieser Methoden liegt in ihrer Einfachheit. Speziell in der Auslegungsphase stellt dies große Vorteile dar. Es kann der Einfluss von verschiedenen Parametern auf gewisse Kennzahlen betrachtet werden (z.B. Überdeckungsgrad). Diese Vereinfachung hat aber auch Nachteile. Die unzureichende Genauigkeit kann zu Unterdimensionierung, bzw. Überlastung des Getriebes führen.

Das Programmsystem BECAL des Institut für Maschinenelemente und Maschinenkonstruktion (IMM/IG) der TU Dresden stellt hierbei eine wesentlich bessere Alternative dar. Dieses Programm zur Berechnung der Beanspruchung von Kegelrädern verwendet als Grundlage die Geometrieberechnung durch die

Herstellungssimulation. Dabei wird die Geometrie unter Berücksichtigung des Stirnmesserkopfes und aller kinematischen Zusatzbewegungen bei der Herstellung berechnet.⁴⁵ Des Weiteren bietet BECAL die Möglichkeit, die Umfelddaten zu berücksichtigen und dadurch das Verlagerungsverhalten zu bestimmen. Darüber hinaus können auch die Lagerversätze berücksichtigt werden.⁴⁶

4.2 Berechnungsablauf

Als Berechnungsverfahren wurde BECAL ausgewählt und anschließend die Getriebe des Antriebsstranges in der FVA Workbench abgebildet. Durch den Rechenkern BECAL 5.0 bekommt man die Möglichkeit die Umfelddaten miteinzubeziehen. Die Berechnung erfolgt über einen iterativen Prozess. Dieser besteht aus dem Programm CATIA V5R21 (Dassault Systems) und der FVA Workbench. In der Abbildung 34 ist der iterative Berechnungsprozess mit seinen wesentlichen Schritten abgebildet. Als Startwert für die erste FE-Analyse werden die wirkenden Kräfte von der Verzahnung auf das Gehäuse berechnet. Diese Kräfte werden in der Analyse eingebracht und anschließend die daraus resultierenden Verschiebungen berechnet. Über spezielle Sensoren an den Lagerflächen können die Lagerversätze in den jeweiligen Verschiebungskomponenten abgelesen werden. Diese Versätze können in der FVA-Workbench hinterlegt werden und haben somit einen Einfluss auf das Tragbild der Verzahnung. Als Ergebnis ist bei der erweiterten Verzahnungsberechnung die Grübchensicherheit S_H und die Zahnfußsicherheit S_F relevant.

⁴⁵vgl. Schlecht, Heinlich, 2003, S.1ff.

⁴⁶vgl. Schlecht, Schaefer, Hutschenreiter, 2003, S.1ff.

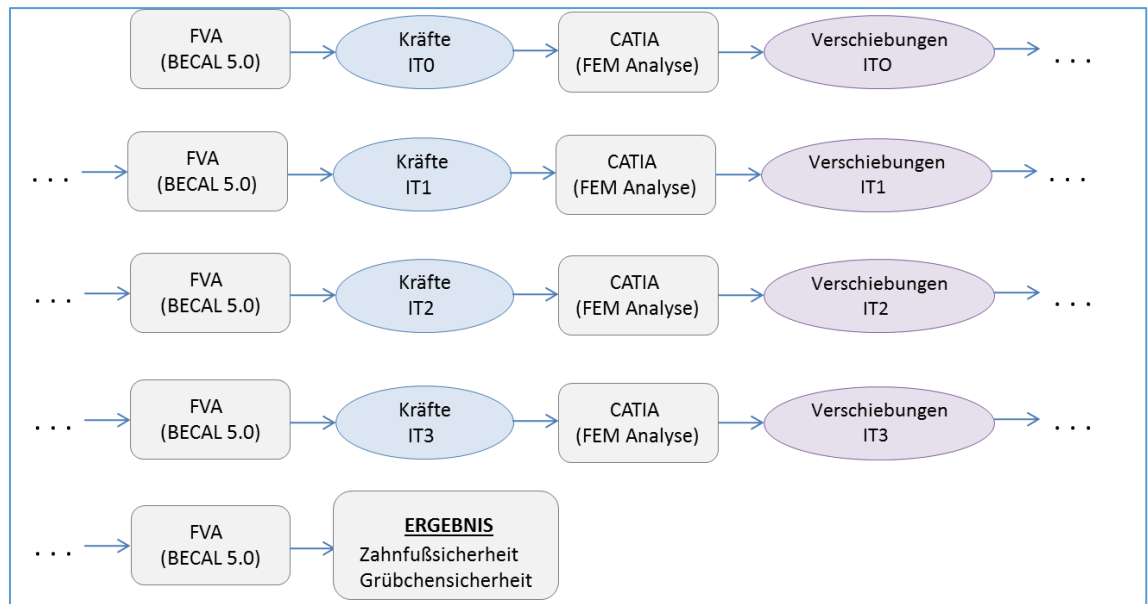


Abbildung 34 Iterative Berechnungsprozess CATIA/FVA Workbench

4.3 Varianten

Ziel ist es festzustellen, ob eine Leistungssteigerung möglich ist. Dafür werden die Veränderungen der relevanten Sicherheiten verglichen und als prozentuelle Abweichung angegeben.

Variante	Ursprung	Optimiert
Leistung	66kW	76kW
Material (Gehäuse)	G-MgZn4SE1Zr1	GF-ALSi7Mg0,6
Material (Verzahnung)	Einsatzgehärtet $\sigma_{Hlim} = 1500 \frac{N}{mm^2}$ $\sigma_{FE} = 950 \frac{N}{mm^2}$	Plasmanitriert (Fa. Rübzig) $\sigma_{Hlim} = 1700 \frac{N}{mm^2}$ $\sigma_{Flim} = 580 \frac{N}{mm^2}$

Es wird eine Leistungssteigerung um 15% geprüft. Dabei wird wie beschrieben der Gehäusewerkstoff und das Material der Verzahnung verändert.

4.4 FEM-Analyse

4.4.1 Vorbereitungen für die FEM Analyse

Dieser Abschnitt beschreibt die notwendigen Vorbereitungen und die darauffolgende FEM-Analyse. Als Grundlage der Analyse dienen die CAD Modelle des Antriebstranges. Im ersten Schritt müssen Kräfte, die auf das Gehäuse wirken virtuell aufgebracht werden. Anschließend wird das Material zugeordnet und die unterschiedlichen Bauteile mit entsprechenden Kontaktbedingungen verknüpft.

4.4.2 Krafteinfluss

Heckrotorgetriebe (TGB)

Die Lager der beiden Getriebe laufen entweder in Lagerbuchsen aus Stahl oder im Lagerdeckel direkt. Um möglichst realitätsnahe Ergebnisse zu erreichen, wurden diese Bauteile in die Analyse miteinbezogen. Die folgende Abbildung 35 zeigt einen Schnitt durch das TGB und deren relevanten Bauteile. Die Eingangswelle ist als Kegelritzelschwerachse ausgeführt und wird mit zwei Kegelrollenlagern A und B gelagert. Diese Lagerung wird als angestellte Lagerung in O-Anordnung bezeichnet, da die Drucklinien der Kegelrollen sich O-förmig und damit außerhalb der Lagermitte schneiden. Diese Anordnung wird gerne für Kegelritzelschwerachsen verwendet, da sich durch die beschriebene Verschiebung des Kraftangriffspunktes die Stützwirkung erhöht. Die Ausgangswelle ist in der Abbildung 35 als horizontale Welle zu erkennen, die durch drei Lager gelagert ist. Das Lager D ist ein Rillenkugellager, welches die Funktion des Festlagers übernimmt und somit die axialen Kräfte aufnimmt. Das Lager C ist ein Zylinderrollenlager, welches nur Radialkräfte aufnehmen kann. Die gegenüberliegende Seite wird durch ein Zylinderrollenlager ohne Innenring gelagert, wodurch der Wälzkörper direkt an der Welle abrollt. Dieses Lager kann große Radialkräfte aufnehmen, jedoch keine Axialkräfte.

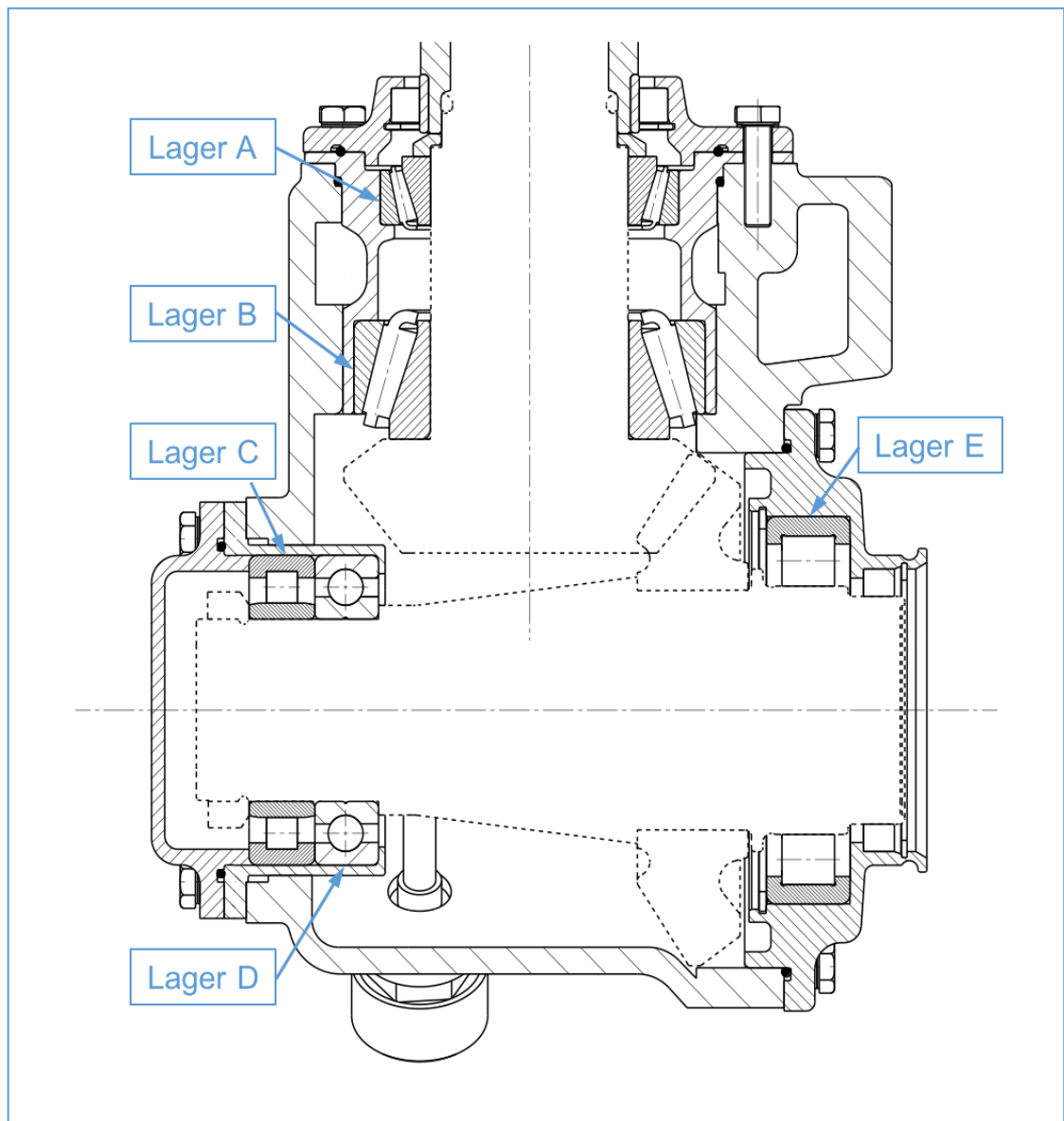


Abbildung 35 Lagerbezeichnungen TGB

Die beschriebenen Lagerungen nehmen die aus der Verzahnung resultierenden Belastungen auf und geben diese an die Lagerbuchsen und somit an das Gehäuse ab. In der Abbildung 36 sind die wirkenden Kräfte mit blauen Pfeilen dargestellt. Die Kräfte sind jeweils an dem u-v-w Koordinatensystem vor der jeweiligen Welle ausgerichtet. Weiters sind die Flächen der Krafteinleitung dargestellt. Die gelb strichlierten Linien zeigen die Flächen welche die radialen Kräfte aufnehmen. Die roten Linien markieren die Bereiche auf welche die axialen Kräfte wirken.

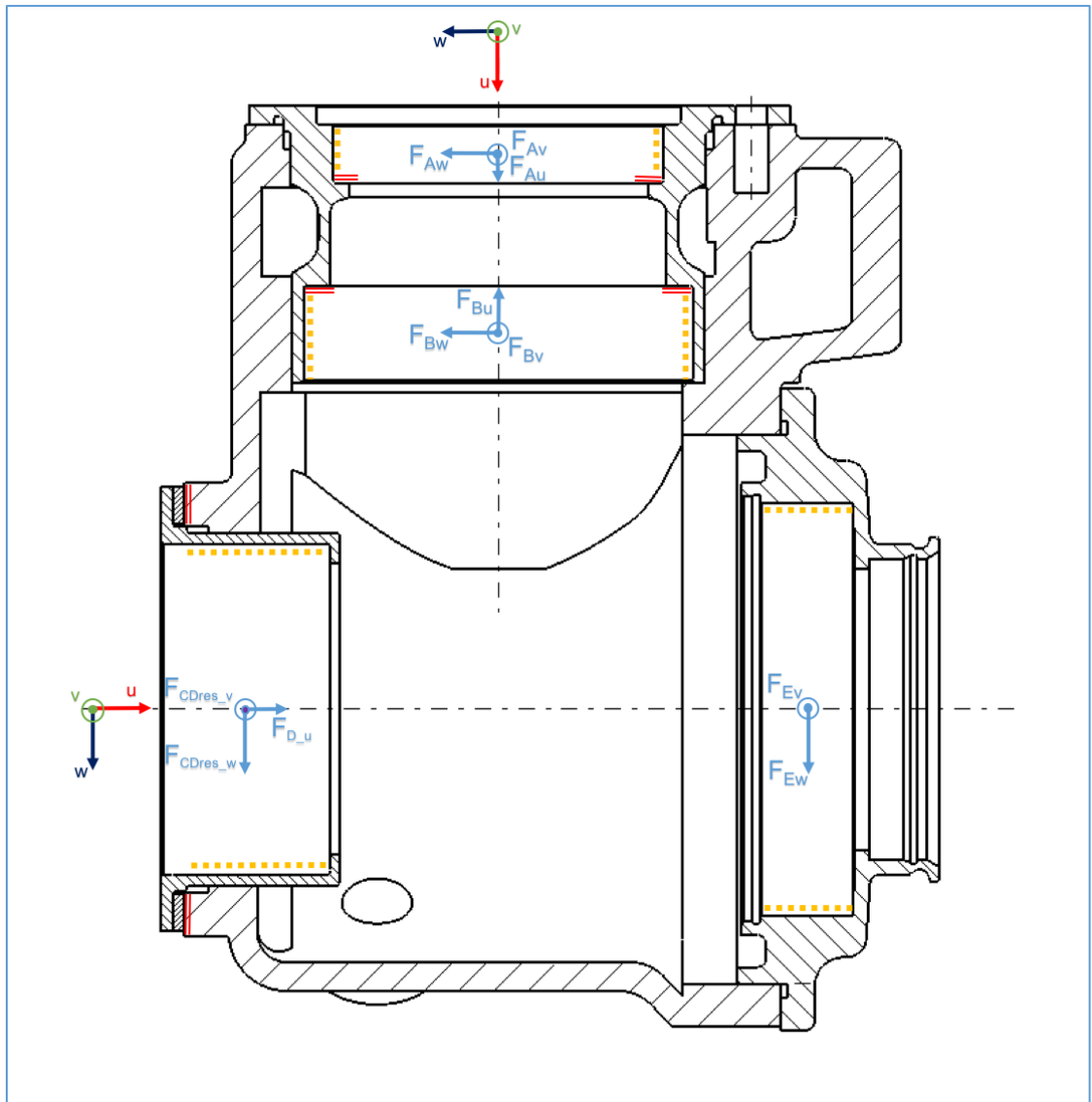


Abbildung 36 Belastungen am TGB Gehäuse

Zwischenkegelgetriebe (IGB)

Die Abbildung 37 zeigt die wichtigsten Bauteile und Lagerstellen des Zwischenkegelgetriebes (IGB). Die Achse der Eingangswelle ist als horizontale, strichlierte Linie eingezeichnet. Das Lager G nimmt die axialen Kräfte und die Lager H und F die radialen Kräfte auf. Die Ausgangswelle ist durch die beiden Kegelrollenlager I und J gelagert. Wie bei der Eingangswelle des TGB, handelt es sich hierbei um eine O-Anordnung.

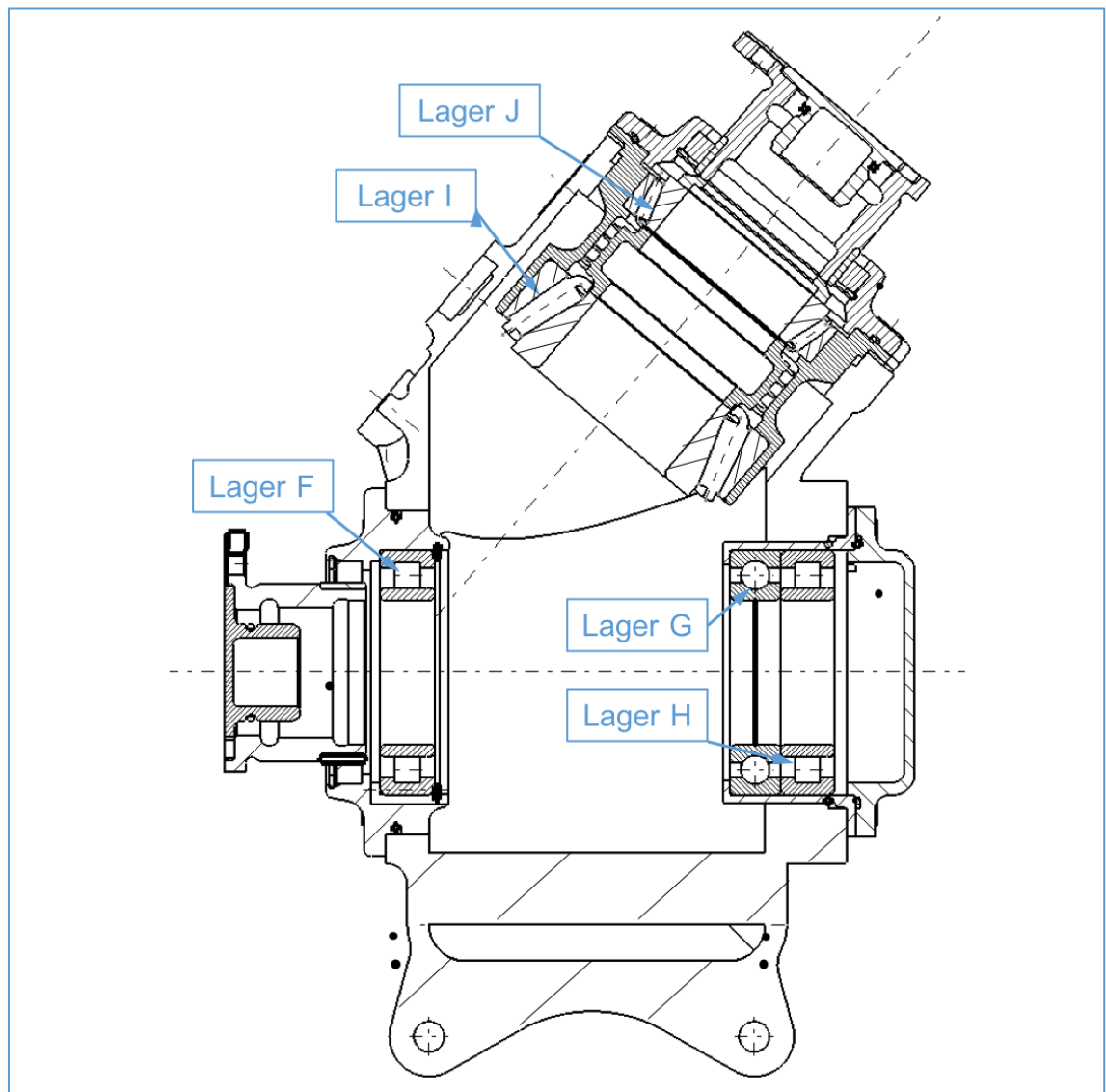


Abbildung 37 Lagerbezeichnungen IGB

Die Abbildung 38 veranschaulicht die Bereiche des IGB Gehäuses welche die axialen und radialen Lagerkräfte aufnehmen. Wie bereits beschrieben symbolisieren die gelb strichlierten Linien die Bereiche der radialen Kräfte und die roten Linien die der axialen Kräfte.

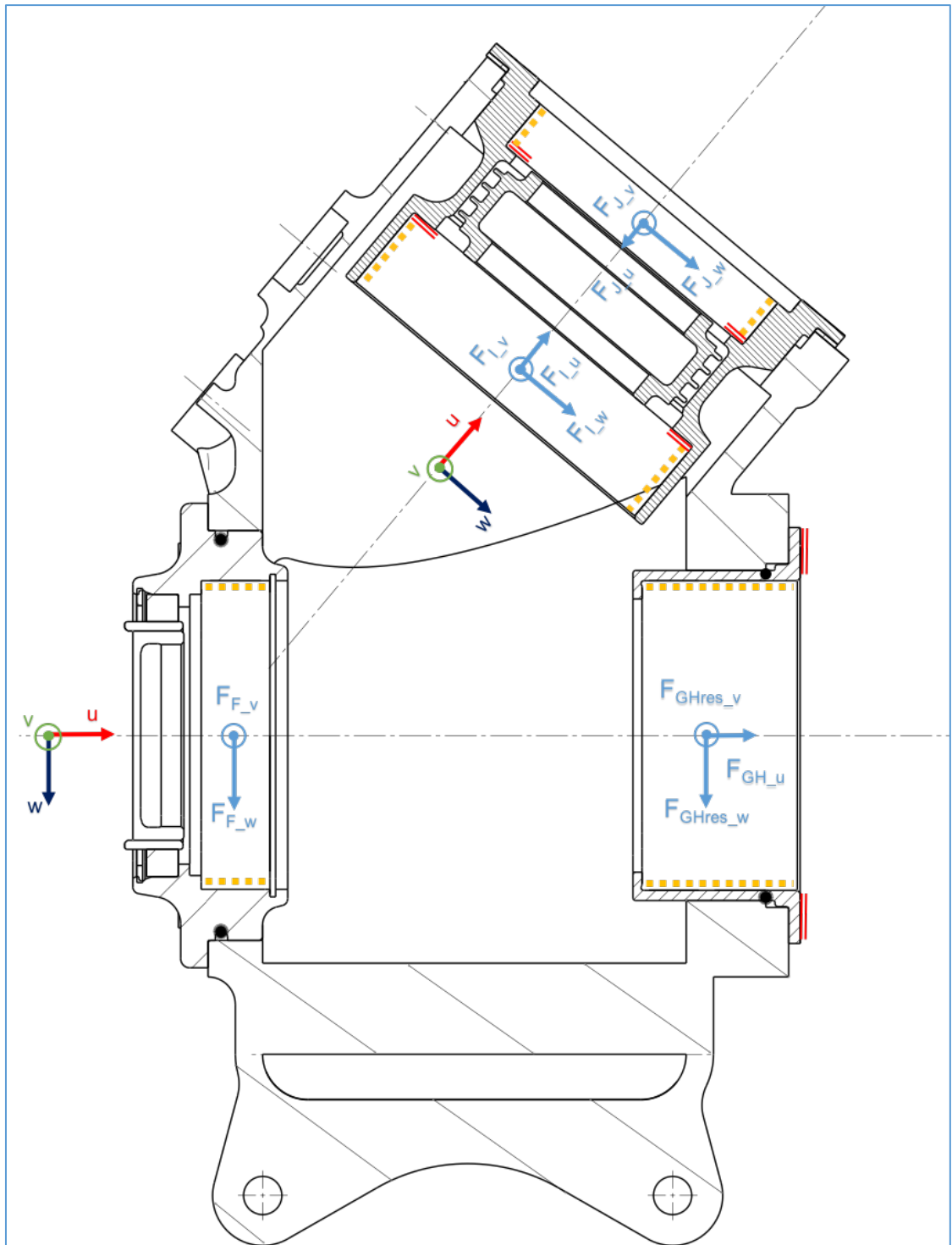


Abbildung 38 Belastungen am IGB Gehäuse

4.4.3 Randbedingungen

Wie bereits im vorangegangenen Abschnitt beschrieben sind die Lager in Lagerhülsen, beziehungsweise in den Gehäusedeckel montiert. Diese Bauteile übertragen die wirkenden Belastungen, in Abhängigkeit ihrer Geometrie, an das

Getriebegehäuse. Um diese Übertragung realitätsnah zu modellieren, werden an den Berührflächen zwischen den Lagerhülsen und dem Gehäuse spezielle Analyseverbindungen erzeugt. Diese Verbindungen werden paarweise selektiert und anschließend mit der richtigen Kontaktbedingung belegt. In Folge dessen können diese Flächen nicht ineinander eindringen, jedoch ist Abheben möglich.

Die zweite verwendete Verbindung ist die fixierte Verbindung. Diese wurde zum Modellieren für die Befestigung des Gehäuses im Helikopter verwendet. Hierbei werden die selektierten Flächen fix miteinander verbunden und entsprechen einer fixen Einspannung.

Heckrotorgetriebe (TGB)

Die Abbildung 39 zeigt das Heckrotorgetriebe und die Stelle der „Fixierten Verbindung“ als Randbedingung. In diesem Bereich wird das Getriebegehäuse mit dem Helikopter verschraubt und kann somit auftretende Kräfte und Momente aufnehmen.

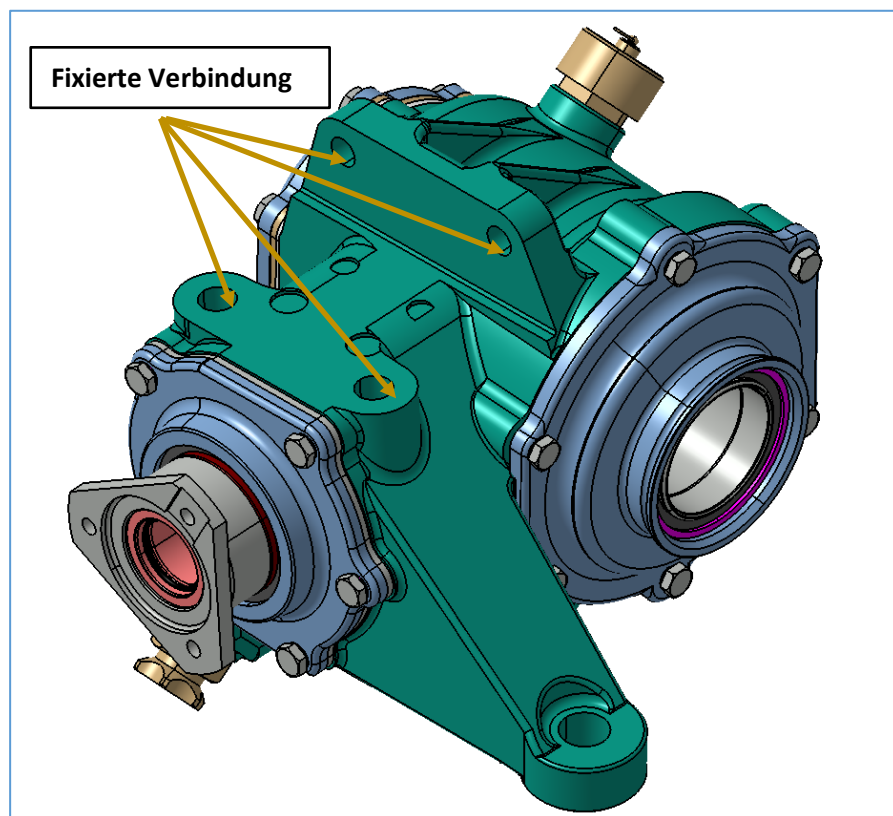


Abbildung 39 Heckrotorgetriebe (TGB) - Randbedingungen

Zwischenkegelgetriebe (IGB)

In Abbildung 40 sind das Zwischenkegelgetriebe und die zugehörigen Randbedingungen ersichtlich. Dabei zeigen die gelben Pfeile die Verschraubung mit dem Helikopter als „Fixierte Verbindung“ an. Der rote Pfeil zeigt den Bereich des Flächenloslagers an. Der Ring kann sich axial durch die Mittelpunktachse verschieben.

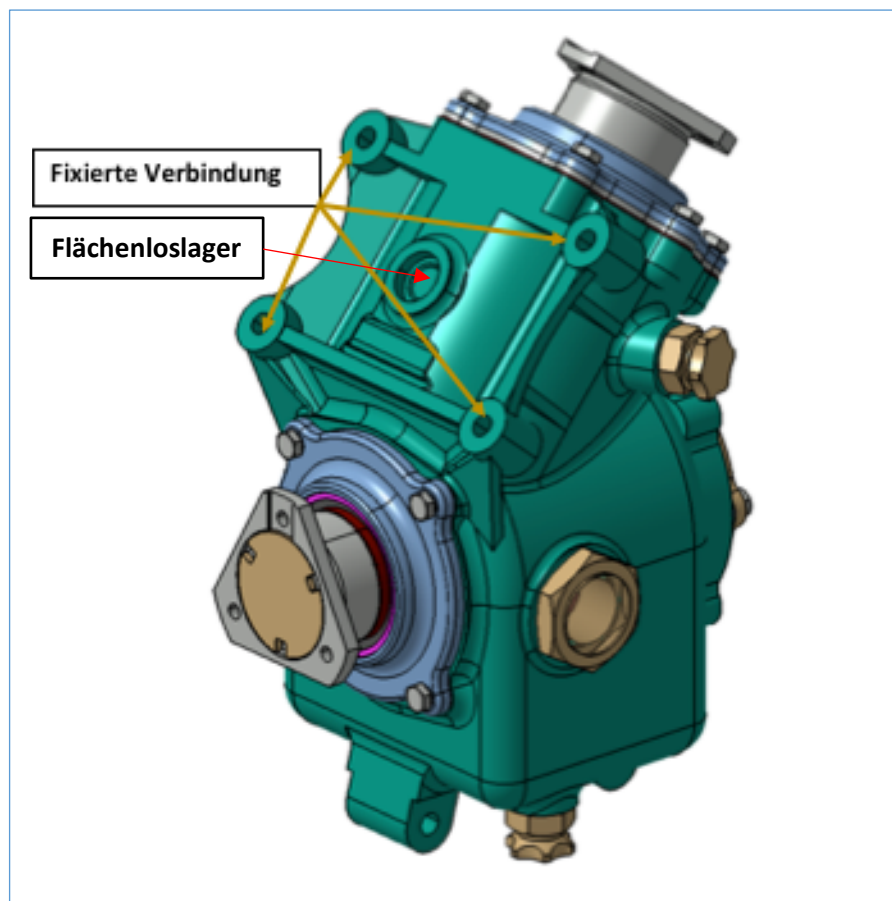


Abbildung 40 Zwischenkegelgetriebe (IGB) - Randbedingungen

4.4.4 Werkstoffzuordnung

Für die FEM- Analyse müssen einige wichtige Werkstoffkenndaten eingegeben werden. Diese können dem Werkstoff-Leistungsblatt der entsprechenden Legierung entnommen werden. Die Tabelle 8 stellt die wichtigsten Eigenschaften der beiden Werkstoffe da.

Physikalische Größe, Kürzel & Einheit			Magnesiumguss- legierung WL 3.6104 G-MgZn4SE1Zr1		Aluminiumguss- legierung WL 3.2384 GF-AlSi7Mg0,6			
Wanddicke	s	mm	≤ 18		≤ 3	3 < s ≤ 6		
1) Im Gussstück an beliebiger Stelle 2) An besonders beanspruchten und in der Prüfanweisung anzugebende Stellen			1)	2)	1)	2)	1)	2)
0,2%-Dehngrenze	R _{p 0,2}	$\frac{N}{mm^2}$	130	140	230	220	250	240
Zugfestigkeit	R _m	$\frac{N}{mm^2}$	180	190	290	280	310	300
Bruchdehnung	A ₅	%	2	2,5	3		5	4
Härte		HB	65		80			
Dichte	ρ	$\frac{g}{cm^3}$	1,84		2,68			
Schmelzbereich		°C	510 bis 640		550 bis 610			
Elastizitätsmodul bei 20°C	E	$\frac{kN}{mm^2}$	44,8		71,5			
Wärmeleitfähigkeit bei 20°C	λ	$\frac{W}{Km}$	109		150			

Tabelle 8 Vergleich der technischen Daten der Gusslegierung nach WL-3.6104 (Mg-Leg.)⁴⁷ und WL 3.2384 (Al-Leg.)⁴⁸

Da diese Arbeit die Zulässigkeit der auftretenden Spannungen, Verschiebungen und Massen untersucht sind die Materialeigenschaften Dichte, Elastizitätsmodul und Querkontraktionszahl von besonderer Bedeutung und können der nachfolgenden Tabelle 9 für die Magnesiumlegierung und Aluminiumlegierung entnommen werden:

	Mg-Legierung	Al-Legierung
Dichte:	ρ = 1,84 g/cm ³	ρ = 2,68 g/cm ³
Elastizitätsmodul:	E = 44.800 MPa	E = 71.500 MPa
Querkontraktionszahl:	ν = 0,35	ν = 0,35

Tabelle 9 Werkstoffeigenschaften für FEM-Analyse

⁴⁷ vgl. o.V. Magnesium-Gußlegierung, WL 3.6104, 1987, S.1, Teil 3.

⁴⁸ vgl. o.V. Aluminium-Gußlegierung, WL 3.2384, 1987, S.1, Teil 3.

4.4.5 Vernetzungseinstellungen

Für die Finite Elemente Analyse muss das Bauteil in viele kleine Elemente unterteilt werden. Diese sind am Ende durch Knoten verbunden und bilden somit ein Netz. In jedem Knotenpunkt kann eine Kraft oder eine Verschiebung angreifen. Die Vernetzung des Bauteils wird vom verwendeten Programm CATIA automatisch generiert. Wichtige Bereiche können durch eine lokale Netzverfeinerung genauer aufgelöst werden. Des Weiteren kann der Elementtyp der 3D Tetraederelemente verändert werden. Hierbei stehen lineare und parabolische Elemente zur Auswahl. Bei linearen Elementen sind die Knoten ausschließlich an den Kantenenden und sie verfügen über lineare Ansatzfunktionen. Die parabolischen Elemente besitzen einen zusätzlichen Knoten in der Kantenmitte und quadratische Ansatzfunktionen.⁴⁹ Die Abbildung 41 zeigt die möglichen Näherungen einer Verformung mit den beiden unterschiedlichen Ansatzfunktionen. Es ist ersichtlich, dass die quadratischen Funktionen eine bessere Näherung erreichen als die linearen Funktionen.

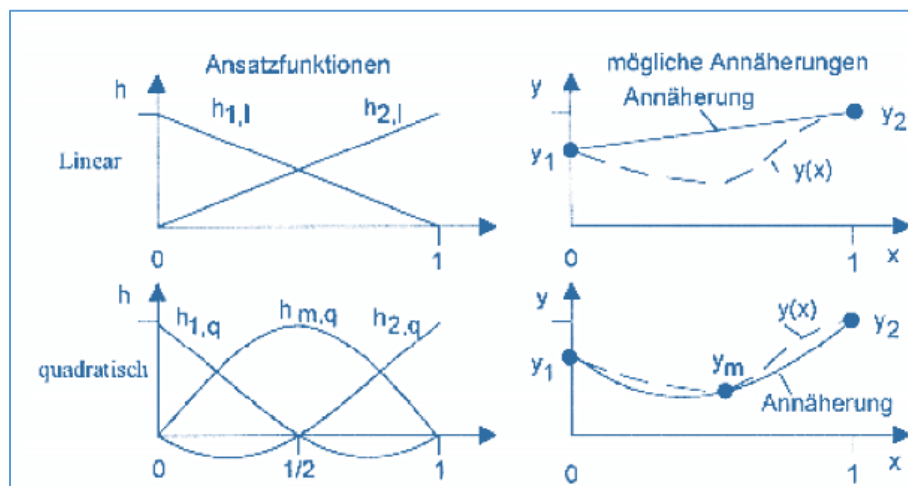


Abbildung 41 Elementauswahl: Lineare (oben) vs. quadratische Ansatzfunktion (unten)

Da bei der FEM Berechnung die Spannungen durch die Ableitungen der Verformungen berechnet werden, erzielen die parabolischen Elemente eine wesentlich bessere Näherung bei der Spannungsanalyse.⁵⁰

In dieser Arbeit wurden die iterativen Berechnungsschritte mit einem feinen Netz aus linearen 3D Tetraederelementen durchgeführt. Dadurch ist der

⁴⁹ vgl. Grafinger, 2015, S. 2ff

⁵⁰ vgl. Schumann, o.J., S. 2f

<http://www.math.uni-leipzig.de/~schumann/calc/fem> (Gelesen am: 13. April 2018).

Berechnungsaufwand wesentlich geringer. Die Auswertung der Spannungsanalyse wurde im letzten iterativen Schritt mit parabolischen Elementen durchgeführt.

Heckrotorgetriebe (TGB)

Die Abbildung 42 zeigt die Vernetzung des Heckrotorgetriebes. Die Elementgröße beträgt bei allen Bauteilen 3mm. Die grünen Referenzelemente symbolisieren die verwendete Elementgröße des zugehörigen Bauteils.

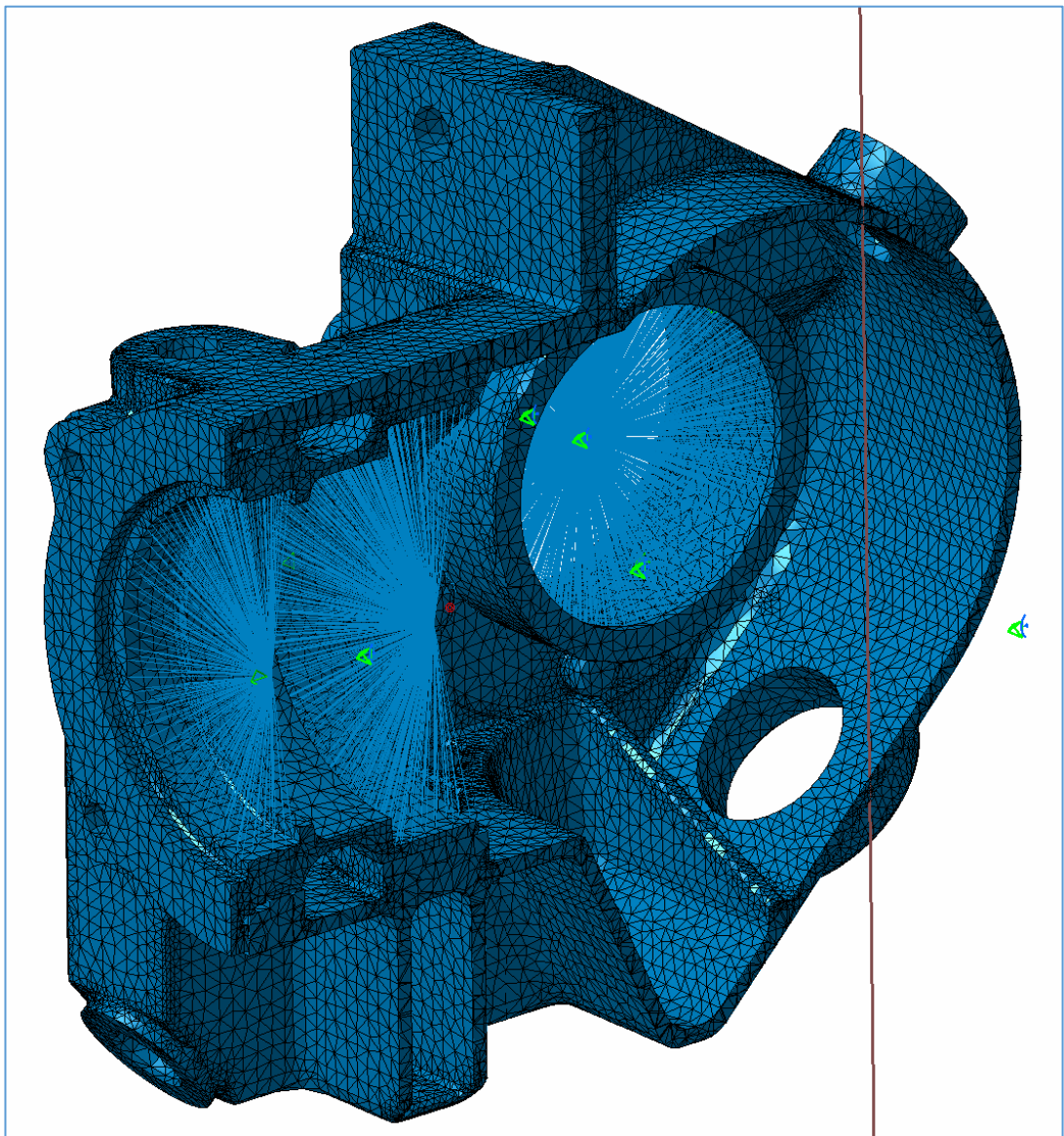


Abbildung 42 TGB Netzdarstellung

Zwischenkegelgetriebe (IGB)

Die Abbildung 43 zeigt das vernetzte Zwischenkegelgetriebe. Durch die grünen Referenzelemente ist ersichtlich, dass das Gehäuse gröber vernetzt ist als die anderen Bauteile. Die Elementgröße des Gehäuses beträgt 5mm, wobei die Netze aller Kontaktflächen, mit Hilfe der lokalen Netzverfeinerung, mit 3mm großen Elementen versehen wurden. Die Elementgröße der Lagerbuchsen und des Lagerdeckels beträgt ebenfalls 3mm.

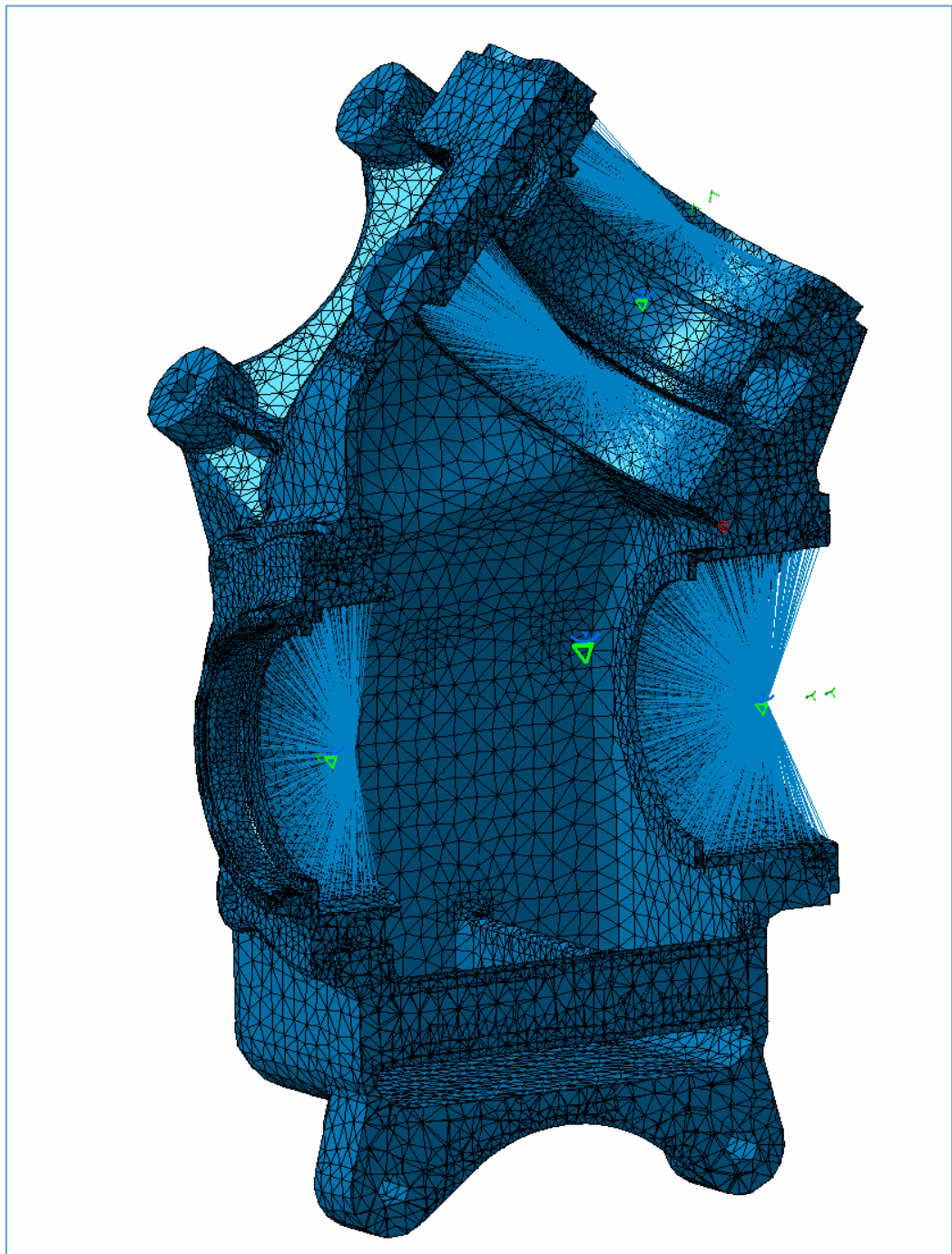


Abbildung 43 IGB Netzdarstellung

4.4.6 Spannungsanalyse

Die auftretenden Spannungen dürfen die 0,2% Dehngrenze des Werkstoffes nicht überschreiten. Entsprechend den Werten aus Tabelle 8 ist diese Grenze für die Magnesiumlegierung bei 130MPa. Die 0,2% Dehngrenze der Aluminiumlegierung, liegt bei 230MPa, da die 3mm Wandstärke nicht unterschritten wird.

Magnesiumlegierung

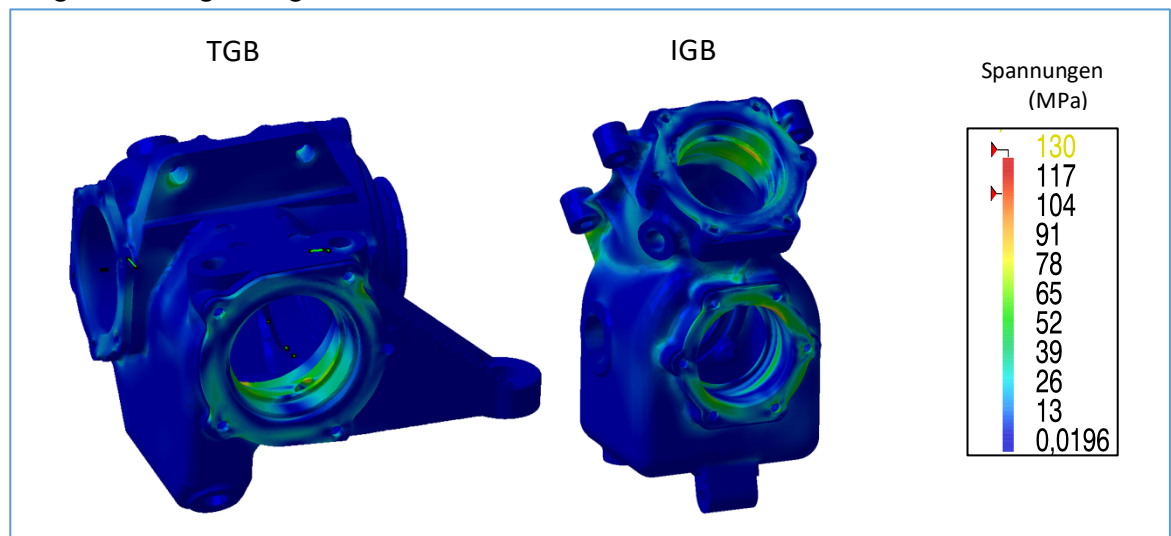


Abbildung 44 Spannungsanalyse - Magnesiumlegierung (IGB & TGB)

Aluminiumlegierung

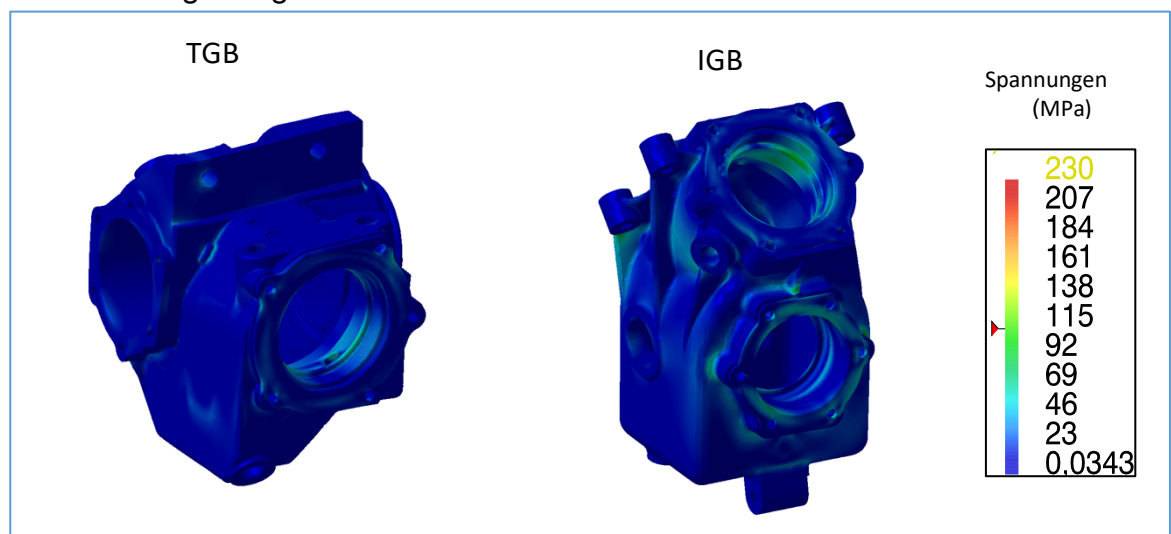


Abbildung 45 Spannungsanalyse - Aluminiumlegierung (IGB & TGB)

Die Abbildung 44 zeigt die Spannungsanalysen der Getriebegehäuse in der ursprünglichen Magnesiumvariante. Die maximal auftretende Spannung beim TGB beträgt 125 MPa und beim IGB 136 MPa. Diese Spannungswerte sind jedoch an der Stahlhülse und damit unkritisch. Die Spannungen am Gehäuse liegen bei Beiden bei ca. 80 MPa und sind somit unkritisch. Die Abbildung 45 zeigt die Gehäusevariante aus Aluminium. Hierbei wird bei IGB und TGB die 0,2% Dehngrenze von Aluminium nicht überstiegen. Die maximale Spannung liegt beim TGB bei 60 MPa und beim IGB bei 130 MPa. Dadurch sind die auftretenden Spannung unter 230 MPa und unkritisch.

4.4.7 Ermittlungen der Verschiebungen im letzten iterativen Schritt

Im Zuge der Leistungssteigerung von 15% erhöhen sich auch die wirkenden Kräfte auf die Getriebegehäuse. Die konstruktiven Änderungen haben eine versteifende Wirkung und sollen diese zusätzlichen Kräfte besser aufnehmen und verteilen. Die Verschiebungen erhält man durch die FEM Analyse im Programm CATIA. Durch spezielle Sensoren können die Lagerversätze in die jeweilige Koordinatenrichtung ausgelesen werden. Diese sind von großer Bedeutung, da ausschließlich dieser Versatz des Lagers eine Auswirkung auf das Tragbild der Verzahnung hat.

Verschiebungen TGB

In der Abbildung 46 und Abbildung 47 ist ersichtlich, dass die globalen Verschiebungen trotz der höheren Kräfte, durch die konstruktiven Änderungen und den Werkstoffwechsel, sogar verkleinert werden konnten.

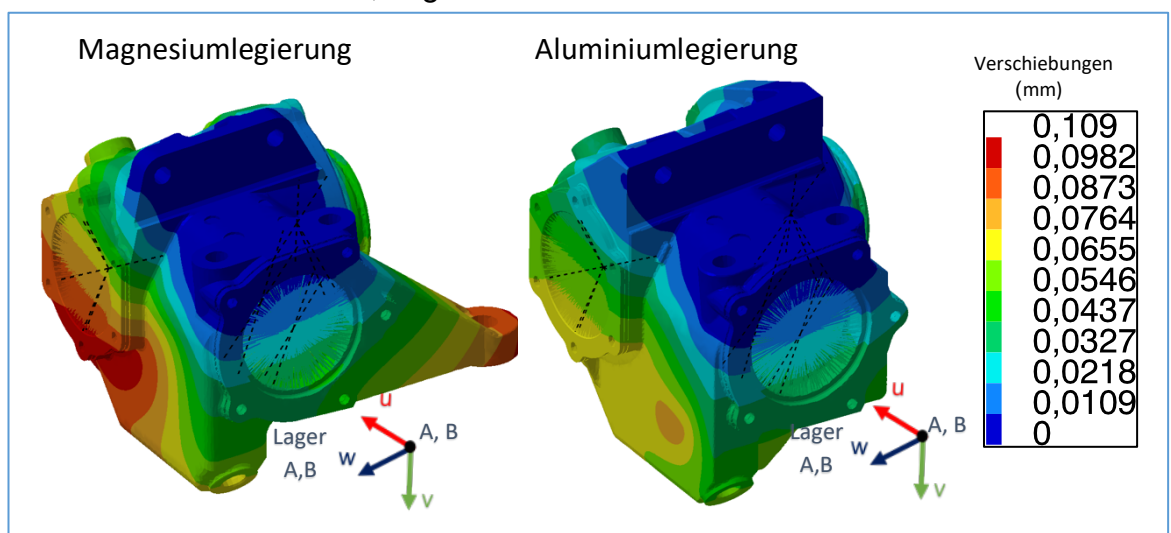


Abbildung 46 Vergleich: Verschiebungen Heckrotorgehäuse (TGB) – Ansicht 1

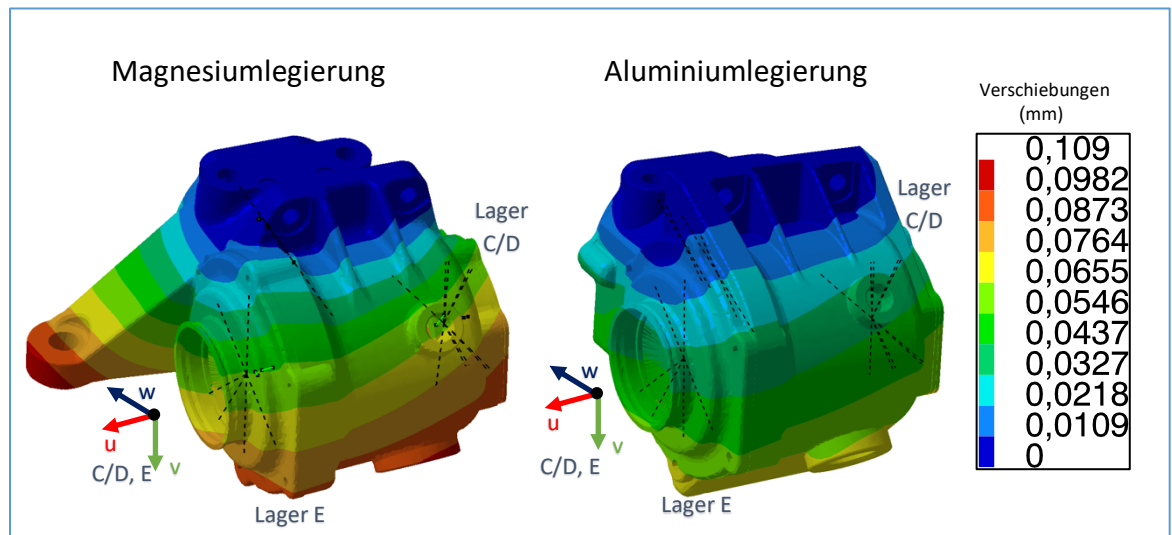


Abbildung 47 Vergleich: Verschiebungen Heckrotorgehäuse (TGB) -Ansicht 2

Die Koordinatensysteme sind in den Abbildungen dargestellt. Die Koordinatenachse u ist stets in achsialer Richtung. Die Komponenten v und w sind immer die radialen Richtungen. Die Tabelle 10 zeigt die Lagerversätze der beiden Varianten. Es ist ersichtlich, dass die Verschiebungen an den Lagerstellen reduziert werden konnten. Speziell an der Ausgangswelle bei den Lagerstellen C/D und E konnten die Verschiebungen erheblich verringert werden.

Magnesiumlegierung			Aluminiumlegierung		
In μm	v	w	in μm	v	w
Lager A	6,78	21,76	Lager A	5,00	19,21
Lager B	10,78	38,35	Lager B	9,11	31,65
Lager C/D	-29,97	-9,22	Lager C/D	-16,83	-1,99
Lager E	-4,46	23,72	Lager E	-0,49	12,64

Tabelle 10 Vergleich der Lagerversätze nach der letzten Iteration - TGB

Verschiebungen IGB

Die Abbildung 48 und Abbildung 49 zeigen die Verschiebungen des Zwischenkegelgetriebegehäuses in beiden Varianten. Die Verschiebungen der Aluminiumlegierung sind geringer als die ursprüngliche Variante. Das Gehäuse verformt sich speziell im unteren Bereich sehr stark. Dies konnte durch geeignete Versteifungen etwas reduziert werden. Die Ausgangswelle ist aufgrund der Einbausituation nur wenig von Verschiebungen betroffen, obwohl dort die Kräfte am höchsten sind. Im Speziellen ist das Lager I am stärksten belastet.

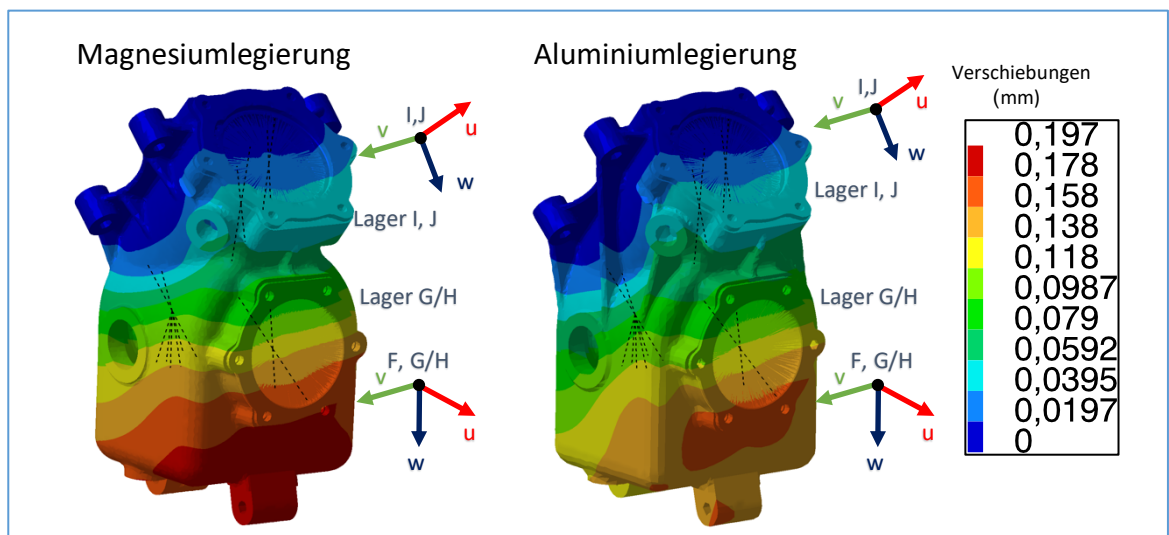


Abbildung 48 Vergleich: Verschiebungen Zwischenkegelgetriebegehäuse (IGB) -Ansicht 1

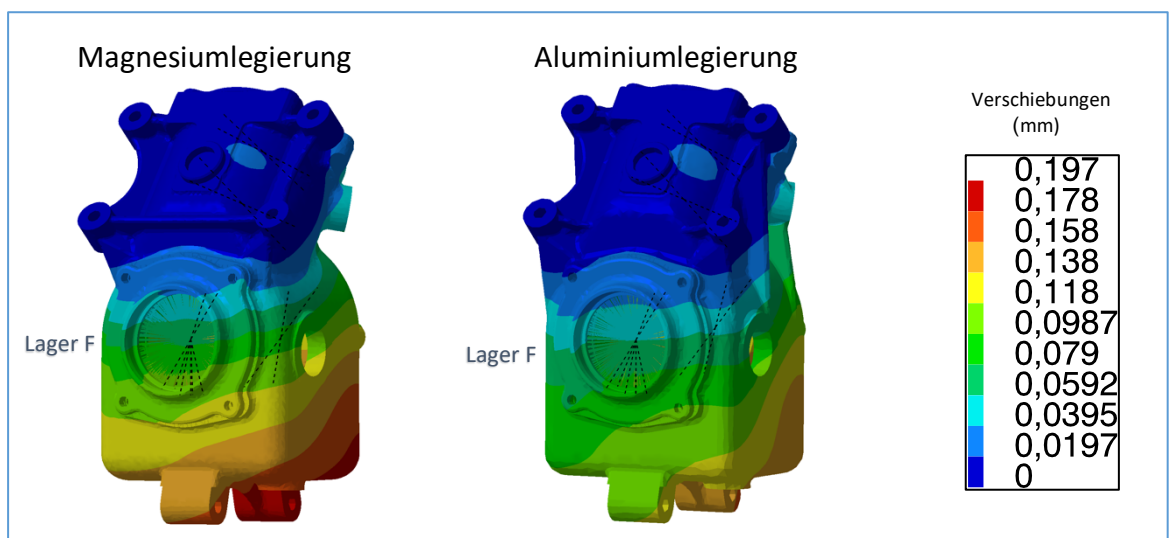


Abbildung 49 Vergleich: Verschiebungen Zwischenkegelgetriebegehäuse (IGB) -Ansicht 2

Die Tabelle 11 zeigt die lokalen Lagerversätze des IGB Getriebegehäuses. Die größten Verschiebung sind an der Lagerstelle G/H, wobei diese durch konstruktive Optimierungen um ca. 10% reduziert wurden.

Magnesiumlegierung			Aluminiumlegierung		
in μm	v	w	n μm	v	w
Lager F	-64,47	+5,84	Lager F	-46,44	+3,88
Lager G/H	-121,1	-11,53	Lager G/H	-110,18	-9,82
Lager I	-16,47	-11,27	Lager I	-18,7	-10,08
Lager J	-23,25	-4,73	Lager J	-26,78	-4,11

Tabelle 11 Vergleich der Lagerversätze nach der letzten Iteration – IGB

Verschiebungsdifferenz

Die Verschiebungsdifferenz zeigt die prozentuelle Änderung des jeweiligen Lagerversatzes an und ist in der Tabelle 12 ersichtlich. Dies ein gutes Maß, für die Effektivität der konstruktiven Maßnahmen. Es ist zu erkennen, dass alle Lagerversätze des gesamten Antriebsstranges reduziert werden konnten, obwohl die Leistung von 66kW auf 76kW gesteigert wurde. Im Speziellen konnten Bereiche mit starken Verschiebungen wie Lager C/D und Lager G/H, gut reduziert werden.

TGB			IGB		
in %	v	w	n %	v	w
Lager A	-1,78	-2,55	Lager F	-18,03	-1,96
Lager B	-1,67	-6,70	Lager G/H	-10,92	-1,71
Lager C/D	-13,14	-7,23	Lager I	-2,23	-1,19
Lager E	-3,97	-11,08	Lager J	-3,53	-0,62

Tabelle 12 Verschiebungsdifferenzen IGB/TGB nach Leistungssteigerung um 15%

4.5 Verschiebungen aus FEM Analyse in FVA Workbench implementieren

Die berechneten Verschiebungen werden anschließend im Programm FVA Workbench miteinbezogen. Der Rechenkern BECAL 5.0 führt eine erweiterte Tragfähigkeitsberechnung inklusive des Umfeldes durch. Die Lagerversätze werden unter Beachtung der richtigen Koordinatenachse, beim entsprechenden Lager hinterlegt. Die Abbildung 50 zeigt das Eingabefeld für den Lagerversatz F_z . Hierbei muss beachtet werden, dass das Koordinatensystem der FEM Berechnung mit dem der Workbench übereinstimmen muss, ansonsten ist dies über das Vorzeichen zu korrigieren.

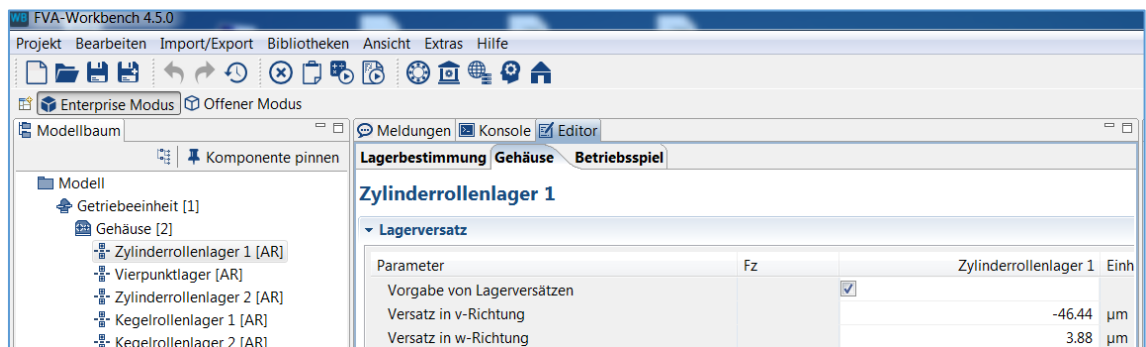


Abbildung 50 Lagerversatzzeigabe FVA Workbench

4.6 Ergebnisse

Das Ergebnis ist der Bericht des BECAL-Tragfähigkeitsnachweises. Dies ist eine Zusammenfassung aller wichtigen Eingabeparameter und den gesuchten Sicherheiten. Im Speziellen wird die Zahnfußsicherheit S_F und die Grübchensicherheit S_H , als Vergleichswert zwischen den beiden Berechnungsvarianten verwendet. Die Sicherheit der leistungsgesteigerten Variante darf nicht geringer sein, als die der ursprünglichen Variante. Aus diesem Grund dürfen die Sicherheitsdifferenzen, welche in der Tabelle 13 angegeben sind, nicht negativ sein.

Sicherheitsdifferenz in %

IGB			TGB		
	Ritzel	Rad		Ritzel	Rad
S_F	+13,36%	+10,64%	S_F	+10,58%	+11,92%
S_H	+7,46%	+7,45%	S_H	+9,53%	+9,53%

Tabelle 13 Differenz: Zahnflanken- und Grübchensicherheit

Es ist gut erkennbar, dass die relevanten Sicherheiten sich nicht reduziert, sondern etwas verbessert haben. Somit ist die Leistungssteigerung von 66kW auf 76kW (15%) in Bezug auf die Verzahnung durchführbar und noch etwas Reserve nach oben.

5 Conclusio

Die Getriebehersteller sind in den letzten Jahren mit steigenden Anforderungen und einem hohen Kostendruck konfrontiert. Dies ist die treibende Kraft für die Entwicklung von neuen Verfahren und Optimierung des Produktionsprozesses. Das Einsatzhärten von Verzahnungen ist ein altbewährtes Härteverfahren, welches gerne von Ingenieuren in der Getriebetechnik verwendet wird. Es gibt in den Auslegungsnormen wie der DIN 3990, alle notwendigen Werkstoffdaten und Festigkeitswerte. Dadurch kann auf einfache Weise, eine Verzahnung sicher ausgelegt werden. Doch ein Ingenieur sollte nicht nur auf die einfachste Auslegungsmethode vertrauen, sondern auch die gesamten Projektkosten betrachten. Dazu zählen unter anderem die Produktionskosten. Diese sind beim Einsatzhärten, aufgrund der Hartnachbearbeitung sehr hoch. Die Firma Rübig erwähnt allerdings auch, dass die Unternehmen das Einsatzhärten bevorzugen, weil sie bereits sehr hohe Investitionen in Nachbearbeitungsmaschinen getätigt haben. Somit liegt es oft nicht nur an dem Ingenieur, welcher die Auslegung der Verzahnung durchführt.

Die durch die Firma Rübig in Auftrag gegebenen Tragfähigkeitsuntersuchungen von plasmanitrierten Verzahnungen, am Forschungszentrum für Zahnräder und Getriebebau (FZG) in München, ergaben hervorragende Ergebnisse. Die relevanten Dauerfestigkeitskennwerte am Zahnfuß und an der Flanke, lagen über denen von einsatzgehärteten Verzahnungen. Diese Ergebnisse sind die Grundlage für die zu überprüfende Leistungssteigerung.

Die ursprünglichen Getriebegehäuse waren aus der Magnesiumlegierung (G-MgZn4SE1Zr1) gefertigt. Diese wurde durch die Aluminiumlegierung (GF-ALSi7Mg0,6) ersetzt. Dadurch konnten einige positive Eigenschaften, wie beispielsweise die Korrosionsbeständigkeit, realisiert werden. Des Weiteren ist die Aluminiumlegierung wesentlich steifer gegenüber Verschiebungen. Dadurch können zusätzliche Kräfte, welche durch die Leistungssteigerung auftreten, aufgenommen werden. Da die Dichte der Aluminiumlegierung wesentlich höher ist, musste die Konstruktion hinsichtlich des Gewichts optimiert werden. Das ursprüngliche Heckrotorgetriebe aus der Magnesiumlegierung hat ein Gewicht von 1,39kg. Tauscht man nur den Werkstoff ohne weitere konstruktive Änderung, so steigt das Gewicht auf 2kg. Die konstruktiven Änderungen sind im Kapitel 3

genauer beschrieben und enthalten beispielsweise die Verringerung der Wandstärke von 6mm auf 3mm. Darüber hinaus konnten durch gezielte Versteifungen die auftretenden Verschiebungen an den Lagerstellen reduziert werden. Durch die gewichtsoptimierenden Maßnahmen konnte das Gewicht des TGB in Aluminium auf 1,66 kg reduziert werden.

Abschließend wurden die Vorteile des Aluminiumgehäuses und die hohe Tragfähigkeit von plasmanitrierten Verzahnungen (PLASNIT ® Fa. Rübig) in einem Helikopterantriebstrang kombiniert. Durch eine Kombination aus einer Verzahnungssoftware (FVA Workbench – BECAL) und der Finiten Elementen Analyse konnte ein iterativer Prozess erstellt werden. Dieser bildet den Zahneingriff im realen Betrieb sehr gut ab. Der Vergleich der resultierenden Sicherheiten zeigt, dass eine Leistungssteigerung von 66kW auf 76kW möglich ist. Im Abschnitt 4.6 wurden die Sicherheitsdifferenzen angegeben, wobei zu erkennen ist, dass bei beiden Gehäusen die Verzahnungssicherheit sogar leicht zunimmt. Schlussendlich wurde mit den beschriebenen Mitteln gezeigt, dass eine Leistungssteigerung von 15% möglich ist.

6 Verzeichnisse

6.1 Literaturverzeichnis

Bargel, Hans-Jürgen; Günter Schulze (Hrsg.): Werkstoffkunde. Springer-Verlag, 2008.

Dipolt, Chrsitian: Korrosionsbeständigkeit von nitrierten und beschichteten Oberflächen von un- und niedriglegierten Stählen, Leoben, Montanuniversität Leoben, Diss., 2015

D. I. N., Norm (1993). EN 10052: 1994-01; Begriffe der Wärmebehandlung von Eisenwerkstoffen; Deutsche Fassung EN 10052: 1993.

Firma Rübig: Initiative SIR, Firmenunterlagen.

Gebeshuber, Andres; Müller, Thomas; Irretier, Olaf; Strobl, Volker: Neue Erkenntnisse und Anwendungen der Puls-Plasma-Nitriertechnik im Bereich Getriebe- und Antriebstechnik, EWI- Elektrowärme International, Vol. 68, Heft 3, 2010, Seite 221-226.

Grafinger, Manfred: Vorlesungsunterlagen: Finite Elemente mit CATIA V5: GPS – Generative Part Structural Analysis, TU Wien, Virtuelle Produktentwicklung, 2015, S. 2-7.

Hoja, Stefanie; Hofmann, Franz: Tiefnitrieren: Studie Tiefnitrieren von Zahnrädern, Forschungsvorhaben Nr. 615 I, Heft 961, Abschlussbericht, IWT Bremen, FVA Werkstoffe, 2011.

Holecek, Reinhard: Grundlegende Wärmebehandlungsverfahren von Stahl, Nitrieren und Nitrocarburieren, in: Rübig-Seminar, Modul 1.

Jan Klingelberg: Kegelräder, Grundlagen, Anwendungen, Springer-Verlag, Heidelberg, 2008.

Liedtke, Dieter; Baudis, Ulrich; Boßlet, Joachim; Huchel, Uwe; Klümper-Westkamp, Heinrich; Lerche, Wolfgang; Spies, Heinz-Joachim; Wärmebehandlung von Eisenwerkstoff II, Nitrieren und Nitrocarburieren, 6.Auflage, Expertverlag, Ludwigsburg, 2014.

Tobie, Thomas; Bretl, Nick; Schnurer, Stefan: Nitrieren II, Ergänzungsvorhaben Produktsicherheit nitrierter Zahnräder, Forschungsvorhaben Nr. 386 II, Heft 1025, Abschlussbericht, FZG TU München, 2012.

Tobie, Thomas; König, Johannes: Optimierung Flankentragfähigkeit II: Tragfähigkeit gestrahlter und gleitgeschliffener Zahnflanken unter besonderer Berücksichtigung des Randzonen- und des Schmierfilmzustands, Forschungsvorhaben Nr.521 II, Heft 1245, Abschlussbericht, FVA Frankfurt, 2017.

Schlecht, Berthold; Henlich, T: BECAL/Tragfähigkeitsnachweis: Vervollständigte Beanspruchungsanalyse mit Schnittstelle zum Tragfähigkeitsnachweis, FVA Forschungsreport, TU Dresden, AK Kegelräder, 2003.

Schlecht, Berthold; Schaefer, Steffen; Hutschenreiter, Birgit: BECAL/Umfeld: Effiziente und nutzerfreundliche Modellierung des Umfeldes der Kegelradverzahnung in BECAL, Forschungsvorhaben Nr. 223 VI+VII, Heft 938, Abschlussbericht, FVA TU Dresden, 2010.

Schumann, Rainer: Hauptseminar- Finite Elemente: Die Finite Elemente Methode, Universität Leipzig, o.J.

Tobie, Thomas; Schwienbacher ,S.: Wirtschaftliches Einsatzhärten von Großzahnradern, Forschungsvorhaben Nr. 373 Abschlussbericht, Technische Universität München, FVA-Werkstoffe, 2001-2002.

Tobie, Thomas; Bretl, Nick; Schnurer, Stefan: Nitrieren II, Ergänzungsvorhaben Produktsicherheit nitrierter Zahnräder, Forschungsvorhaben Nr. 386 II, Heft 1025, Abschlussbericht, FZG TU München, 2012.

Tobie, Thomas; König, Johannes: Optimierung Flankentragfähigkeit II: Tragfähigkeit gestrahlter und gleitgeschliffener Zahnflanken unter besonderer Berücksichtigung des Randzonen- und des Schmierfilmzustands, Forschungsvorhaben Nr.521 II, Heft 1245, Abschlussbericht, FVA Frankfurt, 2017.

Weißbach, Wolfgang; Michael, Dahms; Christoph Jaroschek: Werkstoffkunde, Strukturen, Eigenschaften, Prüfung, 19.Auflage, Wiesbaden, Springer-Vieweg, 2015.

6.2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Grafische Darstellung der möglichen Zeit-Temperatur-Folgen beim Einsatzhärten	11
Abbildung 2 Qualitativer Vergleich der Härtungsverfahren Direkt-/Einfachhärtung	11
Abbildung 3 Kernhärte unterschiedlicher Einsatzstähle für unterschiedliche Bezugsdurchmesser.....	12
Abbildung 4 Variationsparameter beim Kugelstrahlen und Definition der Intensität	13
Abbildung 5 Modelle zur Beeinflussung der oberflächennahen Randschicht durch Kugelstrahlen	15
Abbildung 6 Restaustenitgehalt in Abhängigkeit der Strahlbehandlung	16
Abbildung 7 Steigerung der Grübchentragfähigkeit einsatzgehärteter Verzahnungen durch Kugelstrahlen	17
Abbildung 8 Schematische Darstellung des Vibrations-Gleitschleifens.....	17
Abbildung 9 Zweilagiger Aufbau einer Nitrierschicht.....	20
Abbildung 10 Schichtaufbau beim Nitrieren (inkl. Oxidschicht) und deren Eigenschaften	20
Abbildung 11 Härte-Tiefenverlauf nitrierter Werkstoffe	21
Abbildung 12 Einfluss der Legierungselemente auf Randhärte, Nitriertiefe und Härtegradient	21
Abbildung 13 Grenzflächenreaktionen beim Gasnitrieren	23
Abbildung 14 Zustandsschaubild Eisen-Stickstoff & Phasenerklärung.....	24
Abbildung 15 Eisennitridphasen nach Lehrer- Bestimmung der Prozessparameter....	25
Abbildung 16 Stromdichte Potentialkurve einer Glimmentladung.....	28
Abbildung 17 Darstellung des Pulsens der Spannung beim Plasmanitrieren	28
Abbildung 18 Schnitt durch eine Plasmanitrieranlage.....	29
Abbildung 19 Plasmanitrieren- Diffusion von N in Gefüge	30
Abbildung 20 Auswirkung des Prozessdrucks auf Beglimmung.....	31
Abbildung 21 Prozessschritte beim Plasmanitrieren	32
Abbildung 22 Biegesteifigkeit: Vergleich Fa. Rübigen und Literatur.....	33
Abbildung 23 Vergleich des Verzugsverhalten: Plasmanitrieren und Dorn-Einsatzhärten	35
Abbildung 24 Grübchenfestigkeit verschiedener Wärmebehandlungsverfahren	38
Abbildung 25 Kombination Nitrierverfahren & Werkstoff	42
Abbildung 26 TGB Versteifung durch zusätzliche Rippen am Flansch.....	43
Abbildung 27 TGB: Doppelrippe	44
Abbildung 29 TGB: Versteifung der Lagerstelle C - Innenraum	44
Abbildung 28 TGB: Kleine Rippe bei Ausgangswelle.....	44

Abbildung 30 Umlenkung für die Heckrotorverstellung	45
Abbildung 31 IGB: Versteifung lange Rippen.....	45
Abbildung 32 IGB Versteifung im Bodenbereich	46
Abbildung 33 IGB Versteifung Lagerstelle J der Ausgangswelle.....	46
Abbildung 34 Iterative Berechnungsprozess CATIA/FVA Workbench.....	50
Abbildung 35 Lagerbezeichnungen TGB	52
Abbildung 36 Belastungen am TGB Gehäuse	53
Abbildung 37 Lagerbezeichnungen IGB	54
Abbildung 38 Belastungen am IGB Gehäuse	55
Abbildung 39 Heckrotorgetriebe (TGB) - Randbedingungen.....	56
Abbildung 40 Zwischenkegelgetriebe (IGB) - Randbedingungen.....	57
Abbildung 41 Elementauswahl: Lineare (oben) vs. quadratische Ansatzfunktion(unten)	59
Abbildung 42 TGB Netzdarstellung	60
Abbildung 43 IGB Netzdarstellung.....	61
Abbildung 44 Spannungsanalyse - Magnesiumlegierung (IGB & TGB)	62
Abbildung 45 Spannungsanalyse - Aluminiumlegierung (IGB & TGB)	62
Abbildung 46 Vergleich: Verschiebungen Heckrotorgehäuse (TGB) – Ansicht 1	63
Abbildung 47 Vergleich: Verschiebungen Heckrotorgehäuse (TGB) -Ansicht 2	64
Abbildung 48 Vergleich: Verschiebungen Zwischenkegelgetriebegehäuse (IGB) -Ansicht 1	65
Abbildung 49 Vergleich: Verschiebungen Zwischenkegelgetriebegehäuse (IGB)-Ansicht 2.....	65
Abbildung 50 Lagerversatzeingabe FVA Workbench.....	67

6.3 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Beanspruchungsgerechte Eigenschaften der Randschicht von Zahnrädern .	7
Tabelle 2: Härteverfahren für Verzahnungsteile	8
Tabelle 3 Empfohlene Werkstoffe und Nitriertiefen für Getriebeteile.....	22
Tabelle 4 Gaszusammensetzung und Auswirkung auf VS-Typ.....	31
Tabelle 5 Einsatzhärten vs. Nitrieren (Vorteile/Nachteile).....	40
Tabelle 6 Vergleich Gasnitrieren vs. Plasmanitrieren	41
Tabelle 7 Gewichtsanalyse: Mg-Leg. vs. Al-Leg bei IGB und TGB	47
Tabelle 8 Vergleich der technischen Daten der Gusslegierung nach WL-3.6104 (Mg-Leg.) und WL 3.2384 (Al-Leg).....	58
Tabelle 9 Werkstoffeigenschaften für FEM-Analyse	58
Tabelle 10 Vergleich der Lagerversätze nach der letzten Iteration - TGB	64
Tabelle 11 Vergleich der Lagerversätze nach der letzten Iteration - IGB	66
Tabelle 12 Verschiebungsdifferenzen IGB/TGB nach Leistungssteigerung um 15% ..	66
Tabelle 13 Differenz: Zahnflanken- und Grübchensicherheit	68

6.4 Abkürzungsverzeichnis

Mn	Mangan
Al	Aluminium
Cr	Chrom
DS	Diffussionsschicht
FVA	Forschungsvereinigung für Antriebstechnik
Mg	Magnesium
Mo	Molybdän
OS	Oxidschicht
S _F	Zahnfußsicherheit
S _H	Grübchensicherheit
Ti	Titan
VS	Verbindungsschicht
Z _R	Rauheitsfaktor