

# Abschlussbericht

## Entwicklung einer energieeffizienten Induktions- härteanlage für spiralverzahnte Kegelgetriebe- räder

DBU Aktenzeichen: 30127



*Inductoheat Europe GmbH*

Ostweg 5, 73262 Reichenbach

Telefon: +49 (0)7153 504-0

Telefax: +49 (0)7153 504-333

E-Mail: [info@inductoheat.eu](mailto:info@inductoheat.eu)

Internet: [www.inductoheat.eu](http://www.inductoheat.eu)

Abschlussbericht über das von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt geförderte

Entwicklungsprojekt, AZ 30127 – 21/0

von

Frank Andrä, Inductoheat Europe GmbH

Reichenbach, 30.03.2015

Der Bericht ist über die Inductoheat Europe GmbH erhältlich.

**Projektkennblatt**  
der  
**Deutschen Bundesstiftung Umwelt**



Az	<b>30127</b>	Referat	<b>21</b>	Fördersumme	<b>124.500 €</b>
----	--------------	---------	-----------	-------------	------------------

**Antragstitel**      **Entwicklung einer energieeffizienten Induktionshärteanlage für spiralverzahnte Kegeltriebräder**

**Stichworte**      Zahnradhärtung, induktive Erwärmung, numerische elektromagnetisch-thermische Simulation

Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)
<b>18 Monate</b>	<b>13.06.2012</b>	<b>12.12.2014</b>	<b>1</b>

<b>Bewilligungsempfänger</b> Inductoheat Europe GmbH Ostweg 5 73262 Reichenbach	Tel	07153 504-210
	Fax	07153 504-228
	Projektleitung Herr Frank Andrä	
	Bearbeiter Alexander Ulferts	

**Kooperationspartner**

***Zielsetzung und Anlaß des Vorhabens***

Induktive, energieeffiziente Härteverfahren können momentan nur bei geradverzahnten Bauteilen angewendet werden, da der Strom mit derzeit bekannten Ansätzen nicht der Hypoidzahngeometrie folgt. Im Rahmen des Projektes soll deshalb eine Anlagentechnik incl. eines energieeffizienten Induktionshärteverfahrens für spiralverzahnte Kegelgetriebräder entwickelt werden. Hierzu soll nach einer homogenisierten Durchwärmung des gesamten Zahns ein elektromagnetisches Feld wechselseitig entlang des Flankensprungs eingeleitet werden, sodass ein Zustand entsteht wie er beim Härten von geradverzahnten Zahnrädern anzutreffen ist.

***Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden***

Bei den spiralverzahnten Kegelgetriebrädern wird mittels induktiver Oberflächenhärtung eine verschleißfeste Randschicht im Bereich der Spiralverzahnung erzeugt.

Hierzu ist es notwendig, einen Induktor zu entwickeln, der sichert, dass der im Bauteil induzierte Strom der Spiralkontur des Zahnes folgt und somit eine gleichmäßige beidseitige Erwärmung der Zahnflanken sicherstellt. Die Induktorgeometrie wird auf Basis des oben genannten Patententwurfs entwickelt. Die Parameter für die erforderliche Frequenz und Leistung werden anhand des zu härtenden Materialvolumens und der Einhärtetiefe rechnerisch ermittelt. Anhand der Simulationsergebnisse wird das Induktordesign iterativ optimiert, bis der simulierte Wärmefluß im Bauteil auf eine korrekte Härtung schließen lässt.

Basierend auf diesen Daten erfolgt die CNC-gestützte Fertigung der Induktor-, Brausekombination. Mittels des Induktors und einer Härtemaschine mit entsprechender Stromquelle (Mittelfrequenz mit ca. 800KW Leistung) wird der Energieeintrag ins Werkstück so verbessert, dass über die zu härtende Bauteilgeometrie eine nahezu optimale Temperaturverteilung zur Gefügeumwandlung vorliegt.

Hierzu wird es notwendig sein, einen ggf. mehrstufigen Prozess aus Vorwärmen und Härten zu fahren. Das Werkstück rotiert während des Erwärmvorganges mit ca. 100 Umdrehungen/ Min. Der Erfolg dieses iterativen Prozesses muss anhand von metallografischen Untersuchungen (zerstörende Prüfung und Messung) nachgewiesen werden und kann nur als iterativer Prozess am realen Bauteil selbst durchgeführt werden. Es soll eine Härteanlage mit spezieller Stromquelle und Bauteilaufnahme für die durchzuführenden Härteversuche aufgebaut werden. Der Wärmeeintrag und die Wärmeverteilung im Bauteil wird mittels einer Thermobildkamera überwacht. Um eine Vergleichsbasis zu den Ergebnissen beim Einsatzhärten zu schaffen, werden verschiedene Werkstoff- und Beanspruchungstests durchgeführt.

## ***Ergebnisse und Diskussion***

Die festgestellten Problematiken in der Simulation zeigten deutlich die Grenzen der aktuellen Machbarkeit dieser komplexen Fragestellungen. Durch die geometrische Ausgestaltung des Werkstücks und auch des Induktors ist eine Symmetrierung der Anordnung nicht möglich. Somit müssen das gesamte Werkstück wie auch der gesamte Induktor modelliert und berechnet werden.

Aktuell verfügbare, kommerzielle Software ist gegenwärtig nicht in der Lage, das Problem adäquat zu lösen. Erste Recherchen haben eine Software ermittelt, die diese Aufgabe unter günstigen Rahmenbedingungen lösen könnte. Diese Fragestellung könnte durchaus in weiteren Projekten näher evaluiert werden.

Ohne numerische Modellierung und Analyse gestaltet sich auch die Induktorkonzeption als schwierig. Die gezeigten Ergebnisse zeigen zwar eine Tendenz zu einem erfolgreichen Prozess und somit zu einer positiven Grundtendenz des Induktorkonzepts, jedoch ist eine optimale Lösung im Rahmen des Projektes nicht erzielt worden. Durch die Problematiken in der numerischen Simulation blieb jedoch im Rahmen dieses Projektes nur die Möglichkeit, sich der Problemstellung empirisch zu nähern.

## ***Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation***

Da im Rahmen des Projektes noch keine optimale Lösung erzielt werden konnte, werden die aktuellen Ergebnisse nicht veröffentlicht. Dies geschieht ggf. zu einem späteren Zeitpunkt, wenn die Ergebnisse zu einem erfolgreichen Prozess führen.

## ***Fazit***

Die im Projektverlauf festgestellte Notwendigkeit höherer Umrichterleistung führte zum Entschluss, einen größeren Umrichter zu fertigen. Dieses Ziel wird auch nach Abschluss des Projektes weiter verfolgt; weitere Versuchsreihen mit höherer Leistung werden im Nachgang des Projektes folgen.

---

## Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	6
1. Zusammenfassung.....	8
2. Einleitung.....	9
3. Hauptteil.....	11
4. Fazit.....	33
5. Literaturverzeichnis.....	34

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Spiralverzahntes Kegelgetrieberad .....	13
Abbildung 2: Vergleich auf Kostenebene (bei einer Gesamtjahresproduktion von 4,5 Mio Stück bei 3 abgesetzten Härteanlagen).....	14
Abbildung 3: Vergleich der Energiekosten (bei einer Gesamtjahresproduktion von 4,5 Mio Stück bei 3 abgesetzten Härteanlagen).....	14
Abbildung 4: Einsparungen in % pro Bauteil durch Induktionshärten im Vergleich zum thermochemischen Einsatzhärten .....	16
Abbildung 5: Simulation in Cedrat Flux 3D .....	18
Abbildung 6: Simulation in HyperMesh .....	19
Abbildung 7: Simulation in Gmsh .....	20
Abbildung 8: 2D-Modell des Induktors .....	20
Abbildung 9: Querschnitt des Induktors .....	21
Abbildung 10: Bisherige Werkstückkontur inkl. zugehörigem Induktor.....	21
Abbildung 11: Neue Werkstückkontur inkl. zugehörigem Induktor (Neuentwicklung) .....	22
Abbildung 12: Temperatur im Zahngrund .....	24
Abbildung 13: Temperatur in der Zahnspitze .....	24
Abbildung 14: Modellierung des Induktors, feine Netzauflösung in Quaderstruktur an der Oberfläche des elektromagnetisch wirksamen Bereichs .....	25
Abbildung 15: Modellierung des Induktors, gröbere Netzauflösung in Tetraederstruktur unterhalb der Oberfläche und des elektromagnetisch weniger wirksamen Bereichs.....	26
Abbildung 16: Modellierung des Werkstücks strukturiert und unstrukturiert über Tetraederelemente .....	26
Abbildung 17: Vernetzte Anordnungen in Flux 3D.....	28
Abbildung 18: Härtebild des mit 40 kHz durchgeführten Versuchs .....	30
Abbildung 19: Härtebild des mit 84 kHz durchgeführten Versuchs .....	31

Abbildung 20:Härtebild des mit 150 kHz durchgeführten Versuchs ..... 31

---

## 1. Zusammenfassung

### Zusammenfassung des Projektes

Im Rahmen des Projektes wurde das induktive Härten von hypoidverzahnten Rädern untersucht. Dabei wurden numerische FEM-Modelle in 1D und 3D erstellt. Über die 1D-Analyse wurden die grundsätzlich notwendigen Arbeitsfrequenzen des Systems ermittelt. Die 3D Analyse sollte die Wirkungsweise des Induktors und die Stromverteilung der induzierten Ströme im Werkstück aufzeigen und zu einer Induktorkonstruktion führen. Dazu wurde ein komplexes Modell von Induktor und Werkstück in Solid Works erstellt, mit Hilfe des Pakets Hypermesh definiert vernetzt und in Flux 3D im Rahmen einer elektromagnetisch-thermisch gekoppelten Simulation eingebunden.

Schwierigkeiten in der Berechnung der komplexen Anordnung führten jedoch zwangsweise zum Abbruch der Simulation. Auch eine Berücksichtigung des Open Source Paketes GetDP konnte kurzfristig zu keiner Lösung der Problematik innerhalb der Projektlaufzeit beitragen.

Parallel zu der numerischen Simulation wurden Induktoren gefertigt und ein Versuchsstand aufgebaut, um praktische Versuche an der Anlage fahren zu können. Die praktischen Versuche bei 40 kHz, 84 kHz und 150 kHz haben aufgezeigt, dass die verfügbare Leistung von 150 kW für den Anwendungsfall zu gering ist, um ein Durchhärten der Zahngeometrie vollständig zu vermeiden. Jedoch ist eine positive Grundtendenz des Induktorkonzepts deutlich erkennbar; eine numerische Optimierung des Induktorprofils konnte jedoch infolge der Schwierigkeiten in der Berechnung nicht durchgeführt werden.



---

## 2. Einleitung

### Ausgangssituation

#### Kurzfassung des Gesamtvorhabens

Induktive, energieeffiziente Härteverfahren können momentan nur bei gradverzahnten Bauteilen angewendet werden, da der Strom mit derzeit bekannten Ansätzen nicht der Hypoidzahngeometrie folgt.

Im Rahmen des Projektes sollte deshalb eine Anlagentechnik incl. eines energieeffizienten Induktionshärteverfahrens für spiralverzahnte Kegelgetrieberäder entwickelt werden. Ziel war es, das energieeffiziente induktive Härteverfahren im Induktionsanlagenbau einzusetzen und die innovative Technologie als Komplettanlage bei Großkunden im Automotivbereich zu platzieren.

Dabei wurde von einem Absatz von 3 Anlagen pro Jahr ausgegangen, was einer Gesamtjahresproduktion von ca. 4,5 Mio. Kegelgetrieberädern (1.5 Mio. Kegelgetrieberäder pro Anlage pro Jahr) entspricht. Im Ergebnis sollte die Energieersparnis im Vergleich zum Einsatzhärten mindestens 60% betragen.

Die Vermarktung der Induktionsanlage sollte über das weltweite Vertriebsnetz von Inductoheat erfolgen. Pro Jahr sollten 3 Anlagen mit einem Verkaufspreis von ca. 700 T€ abgesetzt werden. Auf jeder Anlage sollten jährlich ca. 1,5 Mio. Teile gehärtet werden, was in Summe auf ein großes Marktpotenzial und signifikante Energieeinsparungen schließen lässt.

#### Beschreibung des Antragsstellers

Inductoheat Europe GmbH

Ostweg 5 in D-73262 Reichenbach

Tel.: +49 (0) 7153 504-0

Fax: +49 (0) 7153 504-333

Internet: [www.inductoheat.eu](http://www.inductoheat.eu)

Geschäftsführer: Herr Frank Andrä, E-Mail: [andrae@inductoheat.eu](mailto:andrae@inductoheat.eu)

Jahresumsatz: ca. 10 Mio. €

Mitarbeiterzahl: 65

Inductoheat Europe hat sich seit über 60 Jahren auf das Verfahren der Induktionshärtung von Stählen und Gusswerkstoffen spezialisiert. Im Vergleich zu konventionellen Verfahren kann eine lokal begrenzte Eigenschaftsveränderung schnell, kostengünstig und mit sehr hoher Präzision erzielt werden.

Mit 65 Mitarbeitern in Deutschland bietet Inductoheat Europe seinen Kunden ein abgestimmtes Leistungsportfolio aus einer Hand:

- Innovative Lösungen rund um die induktive Erwärmung
- Zuverlässigkeit in Aussage und Abwicklung
- Redundanz in der Versorgungssicherheit durch eigene Lohnhärtereien
- Weltweiter 24h Service
- Kompetenz und Sicherheit einer weltweiten Konzernorganisation
- Mehr als 60 Jahre Erfahrung

### 3. Hauptteil

#### Beschreibung des Standes der Technik

Der Prozess des induktiven Oberflächenhärtens wird in der Industrie in den meisten Fällen auf empirischer Basis ausgelegt und optimiert. Dieses Vorgehen birgt 2 wesentliche Nachteile. Zum einen ist ein größerer Bedarf an zu härtenden Bauteilen für Testläufe notwendig, dessen Härteverläufe der Randschicht experimentell ermittelt werden. Zum anderen ist es unmöglich, den Verlauf der Temperatur über der Zeit während des Prozesses im Werkstück selbst zu messen und somit Rückschlüsse auf thermische Spannungen im Material zu ziehen. Rissprobleme sind oft die Folge.

Mit Hilfe der numerischen Modellierung elektrothermischer Erwärmungsprozesse sind weitaus tiefere Einblicke in den Prozess möglich, als es externe Messungen über geeignete Sensorik je liefern könnten. Mit Unterstützung numerischer Modelle, oft basierend auf der Methode der finiten Elemente, sind Temperatur- wie auch Spannungsverläufe im Material während des Prozesses mit hoher Präzision möglich. Eine besondere Bedeutung kommt dabei der präzisen Wahl der Materialdaten zu Gute. Nur eine korrekte Implementierung aller Parameter führt zu präzisen Ergebnissen der numerischen Analyse des Prozesses [Wro05].

Üblicherweise beinhalten implementierte Modelle eine temperaturabhängige Berücksichtigung aller Materialdaten. So erfahren die thermische Wärmekapazität wie auch die magnetische Permeabilität sehr hohe Änderungsraten beim Durchfahren des Temperaturbereichs zwischen 20°C und 800°C, was in den Modellen entsprechend umgesetzt wird. Die Härteanordnung besteht im Wesentlichen aus dem zu härtenden Werkstück, dem stromführenden Induktor sowie der Abschreckbrause. Die Form des Induktors resultiert aus der Werkstückgeometrie und dem geforderten Härteprofil. Prinzipiell kann zwischen Innen- und Außenfelderwärmung unterschieden werden. Umschließt der Induktor das Werkstück, befindet sich das Werkstück also beispielsweise im Innern einer Spule, so handelt es sich um eine Innenfelderwärmung. Der Wirkungsgrad der Energieübertragung ist hoch. Befindet sich das Werkstück im Außenfeld, d. h. es wird nicht vom stromführenden Leiter umschlossen, spricht man von einer Außenfelderwärmung. Der Wirkungsgrad der Energieübertragung ist geringer als bei der Innenfelderwärmung.

Das induktive Härten bietet im Vergleich zum Einsatzhärten zahlreiche Vorteile. Beim Einsatzhärten wird das zu härtende Werkstück zu einer Einsatzhärterei transportiert, in der es über mehrere Stunden oder Tage wärmebehandelt wird, bevor es weiter bearbeitet werden kann. Auch bei einer betriebsinternen Einsatzhärtung wird der Fertigungsfluss somit gestört. Das Induktionshärten erlaubt eine wirtschaftliche Integration des Härteprozesses in eine Fertigungslinie. Die Anlagen weisen sehr hohe Leistungsdichten auf, sind kompakt aufgebaut und ermöglichen Wärmebehandlungszeiten von wenigen Zehntel-Sekunden. Der Verzug des Werkstücks ist minimal. Somit können u. U. zeit- und kostenintensive Nachbearbeitungsschritte, wie beispielsweise verzugsbedingtes Schleifen, entfallen.

Im Vergleich zum traditionellen Einsatzhärten weisen induktive Randschichthärteprozesse einen wesentlich geringeren Energiebedarf auf. Ein Hauptvorteil des induktiven Verfahrens liegt in der Reproduzierbarkeit der gewünschten zeitlichen und örtlichen Temperaturverteilung, welches eine Voraussetzung für einen gleichmäßigen Härteverlauf und für konstante Härtewerte ist. Das Verfahren bietet also eine hohe Prozesssicherheit. Die Härteparameter, wie beispielsweise die Frequenz des Induktorstroms und die Erwärmungszeit, lassen sich exakt steuern. Die Geometrie des stromführenden Induktors, mögliche Feldführungselemente, die Frequenz des Induktorstroms sowie die eingebrachte Leistung führen zu einer bestimmten Verteilung des elektromagnetischen (EM) Feldes. Hieraus resultiert die Leistungsumsetzung im Werkstück in Form der Joule'schen Wärme, welche zur Erwärmung des Werkstücks führt. Der erzielte Temperaturverlauf lässt unmittelbar auf den zu erwartenden Härteverlauf und die zur erwartende Einhärtetiefe schließen.

In der Antriebstechnik hat die Induktionshärtung aufgrund der technischen und wirtschaftlichen Vorteile zahlreiche Anwendungen, wie z. B. das Härten von Wellen und Stirnrädern. Umfangreiche Veröffentlichungen über Untersuchungen an Stirnrädern zeigen beispielsweise, dass die Wahl des jeweiligen Härteverfahrens (Ganzflächen- oder Vorschubhärten bzw. Einzelzahn-, Zahnlücken- oder Allzahnhärten) sowie die Einstellung der Härteparameter einen großen Einfluss auf die erzielten Wärmebehandlungsergebnisse haben. Für jede Form und Größe des zu härtenden Werkstücks gibt es andere Härtebedingungen, die zu einem optimalen Härteergebnis führen.

#### Problematik bei spiralverzahnten Kegelgetrieberädern

Aktuell werden spiralverzahnte Kegelgetrieberäder in großen Mengen vorrangig im Automotivebereich be- und verarbeitet. Das gesamte Bauteil wird durch thermochemisches Einsatzhärten vergütet. Aufgekühlt wird dabei mit Pulver, Salz, Gas und Plasma. Für das Einsatzhärten stehen dem Wärmebehandler unterschiedliche Anlagentechniken wie z.B. Kammeröfen, Durchlauföfen, Salzbäder, Niederdruckanlagen etc. zur Verfügung. Hierbei ist ein hoher Energiebedarf erforderlich, da das Bauteil über mehrere Stunden im Ofen bei ca. 880 – 950 °C verbringen muss. Dies führt neben erheblichen Verzügen im Bauteil auch dazu, dass im Gesamtprozess erhebliche Mengen an Wärmeenergie, technischen Gasen (Stickstoff-Methanol-Gemische) und zusätzlich Abschreckleistung durch Härteöle oder synthetische Polymerlösungen und Kühlleistung benötigt werden. Als Werkstoffe kommen dabei Stähle mit Kohlenstoffgehalten unterhalb von 0,25 % in Frage.

Induktive, energieeffizientere Härteverfahren konnten bisher nur bei gradverzahnten Bauteilen angewandt werden, da der Strom mit bekannten Ansätzen nicht der Hypoidzahngeometrie folgt.

#### **Darstellung der grundlegenden Idee**

Ziel des Projektes war die Entwicklung einer Anlagentechnik incl. eines energieeffizienten Induktionshärteverfahrens für spiralverzahnte Kegelgetrieberäder.



Abbildung 1: Spiralverzahntes Kegelgetrieberad

Ziel war es, das energieeffiziente, induktive Härteverfahren im Induktionsanlagenbau für spiralverzahnte Geometrien einzusetzen und die innovative Technologie als Komplettanlage bei Großkunden im Automotivebereich zu platzieren.

Hierzu wurden folgende Zielvorgaben gemacht:

- Energieeinsparung von 60% im Vergleich zum jetzigen Einsatzhärten
- Verbesserung der Materialeffizienz, da günstigere kohlenstoffhaltige Stähle verwendet werden können
- Steigerung der Produktivität durch Verkürzung der Prozesskette und Einsparung von Ressourcen
- Verbesserung der Qualität durch erhöhte Maßhaltigkeit und geringeren Verzug

Das neue, induktive Härteverfahren soll im Induktionsanlagenbau eingesetzt und als Komplettanlage bei Großkunden im Automotivebereich platziert werden. Dabei wird von einem Absatz von 3 Anlagen pro Jahr ausgegangen, was einer Gesamtjahresproduktion von ca. 4,5 Mio. Kegelgetrieberädern (1,5 Mio. Kegelgetrieberäder pro Anlage pro Jahr) entspricht. Im Ergebnis wird die Energieeinsparnis im Vergleich zum Einsatzhärten mindestens 60% betragen. Ferner werden weitere Einsparungseffekte durch Beeinflussung der Gesamtprozesskette, z. B. ein geringeres Schleifaufmaß durch geringeren Härteverzug erwartet. Außerdem können durch die Umstellung von einem thermo-chemischen Härteverfahren (Einsatzhärten) auf ein thermisches Härteverfahren (Induktivhärten) günstigere kohlenstoffhaltige Stähle verwendet werden, was ressourcenschonende Effekte mit sich bringt.

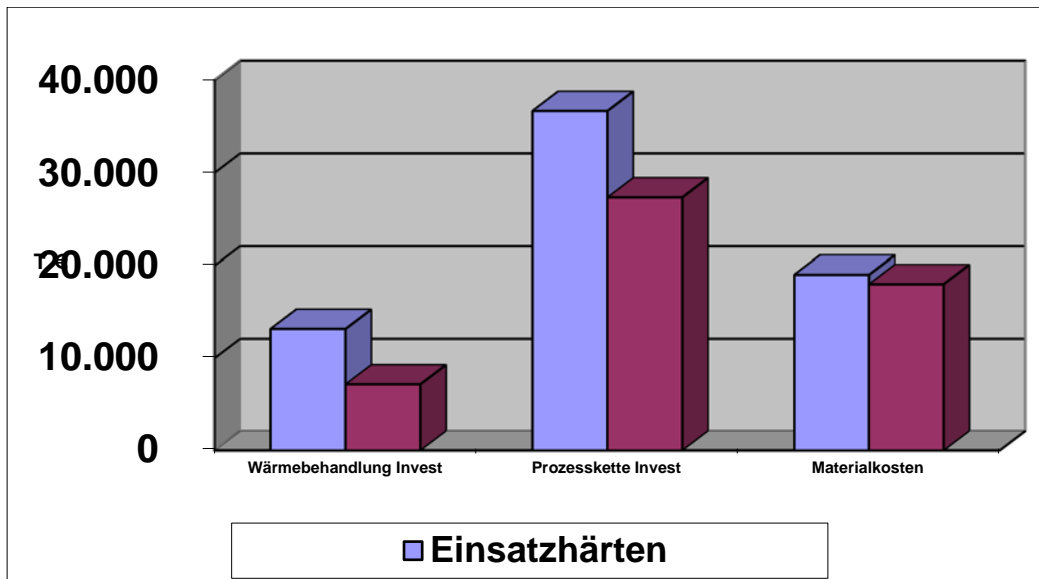


Abbildung 2: Vergleich auf Kostenebene (bei einer Gesamtjahresproduktion von 4,5 Mio Stück bei 3 abgesetzten Härteanlagen)

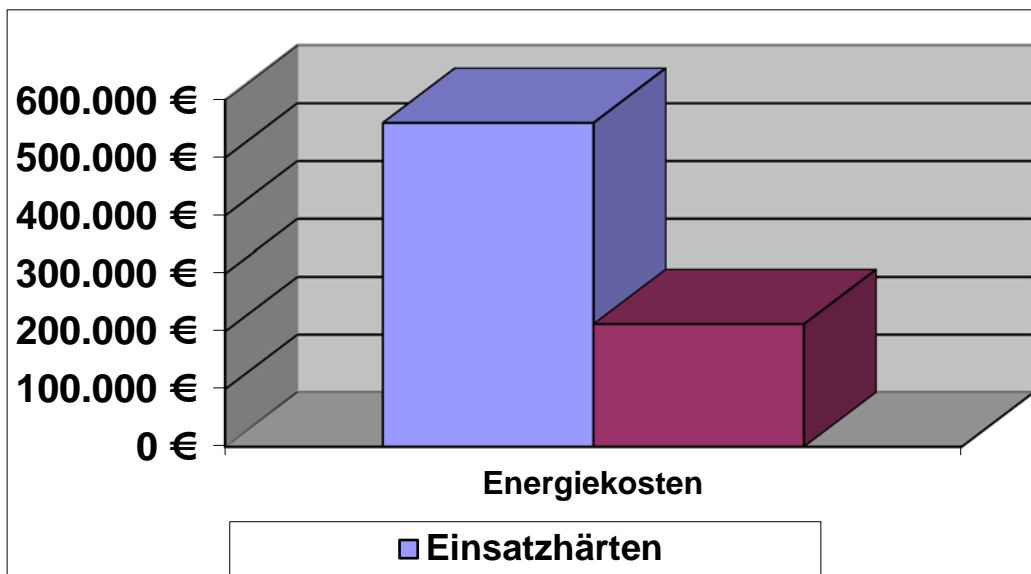


Abbildung 3: Vergleich der Energiekosten (bei einer Gesamtjahresproduktion von 4,5 Mio Stück bei 3 abgesetzten Härteanlagen)

### Eigene Vorarbeiten

Die Induktorgeometrie wird auf Basis eines im Unternehmen erarbeiteten Patententwurfs - Einwindungsinduktor mit 2 Durchmesserabschnitten, die über ein spezielles Verbindungsstück die Spiralkontor der Zahnoberfläche überdecken- entwickelt.

Das Patent wurde 2009 eingereicht, jedoch noch nicht final erteilt (Patent Application US 2009/0020525 A1, Electric Induction Heat Treatment).

---

Zudem wurden unterschiedliche Voruntersuchungen und Machbarkeitsstudien durchgeführt.

### **Lösungsweg**

Bei den spiralverzahnten Kegelgetrieberädern wird mittels induktiver Oberflächenhärtung eine verschleißfeste Randschicht im Bereich der Spiralverzahnung erzeugt.

Hierzu war es notwendig, einen Induktor zu entwickeln, der sichert, dass der im Bauteil induzierte Strom der Spiralkontur des Zahnes folgt und somit eine gleichmäßige, beidseitige Erwärmung der Zahnflanken sicherstellt. Die Induktorgeometrie sollte auf Basis des oben genannten Patententwurfs entwickelt werden. Die Parameter für die erforderliche Frequenz und Leistung sollten anhand des zu härtenden Materialvolumens und der Einhärtetiefe rechnerisch ermittelt werden. Anhand der Simulationsergebnisse sollte das Induktordesign iterativ optimiert werden, bis der simulierte Wärmefluß im Bauteil auf eine korrekte Härtung schließen lässt.

Basierend auf diesen Daten sollte die CNC-gestützte Fertigung der Induktor-, Brausekombination erfolgen. Mittels des Induktors und einer Härtemaschine mit entsprechender Stromquelle (Mittelfrequenz mit ca. 800 Kw Leistung) sollte der Energieeintrag ins Werkstück so verbessert werden, dass über die zu härtende Bauteilgeometrie eine nahezu optimale Temperaturverteilung zur Gefügeumwandlung vorliegt.

Hierzu wird es notwendig sein, einen ggf. mehrstufigen Prozess aus Vorwärmen und Härten zu fahren. Das Werkstück rotiert während des Erwärmvorganges mit ca. 100 Umdrehungen / min. Der Erfolg dieses iterativen Prozesses sollte anhand von metallografischen Untersuchungen (zerstörende Prüfung und Messung) nachgewiesen werden und kann nur als iterativer Prozess am realen Bauteil selbst durchgeführt werden. Hierzu sollte eine Härteanlage mit spezieller Stromquelle und Bauteilaufnahme für die durchzuführenden Härteversuche aufgebaut werden. Der Wärmeeintrag und die Wärmeverteilung im Bauteil sollte mittels einer Thermobildkamera überwacht werden. Um eine Vergleichsbasis zu den Ergebnissen beim Einsatzhärten zu schaffen, sollten verschiedene Werkstoff- und Beanspruchungstests durchgeführt werden.

### **Technische und wirtschaftliche Risiken**

Die technischen Risiken waren trotz Versuchen und vorliegenden Erfahrungswerten aus dem Induktionshärten als hoch anzusiedeln. Ein Induktordesign mit einzigartiger, speziell entwickelter Geometrie, welche den induzierten Strom zwingt, der Spiralkontur der Verzahnung zu folgen, war als wesentliche Voraussetzung für ein korrektes Härteergebnis eine technologisch anspruchsvolle Zielsetzung.

Eine weitere Herausforderung war die Entwicklung des Erwärmzyklus in Abstimmung aus Vorwärm- und Härte-Energieeintrag um eine zufriedenstellende Mikrostruktur des umgewandelten Gefüges zu erhalten. Dazu sollte die Simulation des Erwärmungsprozesses als dynamischer Prozess mit Kopplung der elektromagnetischen und thermischen Einflussfaktoren erfolgen.

## Umweltrelevanz des beantragten Vorhabens

Durch die Entwicklung des neuen Härteverfahrens können beim Härten von spiralverzahnten Kegelgetrieberädern Energie und Kühlmedien eingespart, sowie die Wirtschaftlichkeit der Maschinen verbessert werden. Da es sich beim induktiven Randschichthärten um ein selektives Verfahren handelt, erfolgt die Härtung ausschließlich im Funktionsbereich des Bauteils und innerhalb von ca. 12 Sekunden (Härten + Anlassen), wodurch vergleichsweise nur geringe Energiemengen, bezogen auf die Härtung je Bauteil im Vergleich zu sogenannten konventionellen thermochemischen Härteverfahren aufgewendet werden müssen. Aufgrund der kurzen Härtezeit werden Bauteilverzüge drastisch reduziert und der Prozess kann in den Gesamtbearbeitungsprozess integriert werden, so dass zusätzliche Einsparungseffekte hinsichtlich der Nachbearbeitung Maßschleifen, der Zwischenlagerung und Fertigungspuffer entstehen. Die mit Projektabschluss nachzuweisenden wirtschaftlichen Effekte bewirken eine deutliche Verbesserung der Umweltfreundlichkeit des Verfahrens.

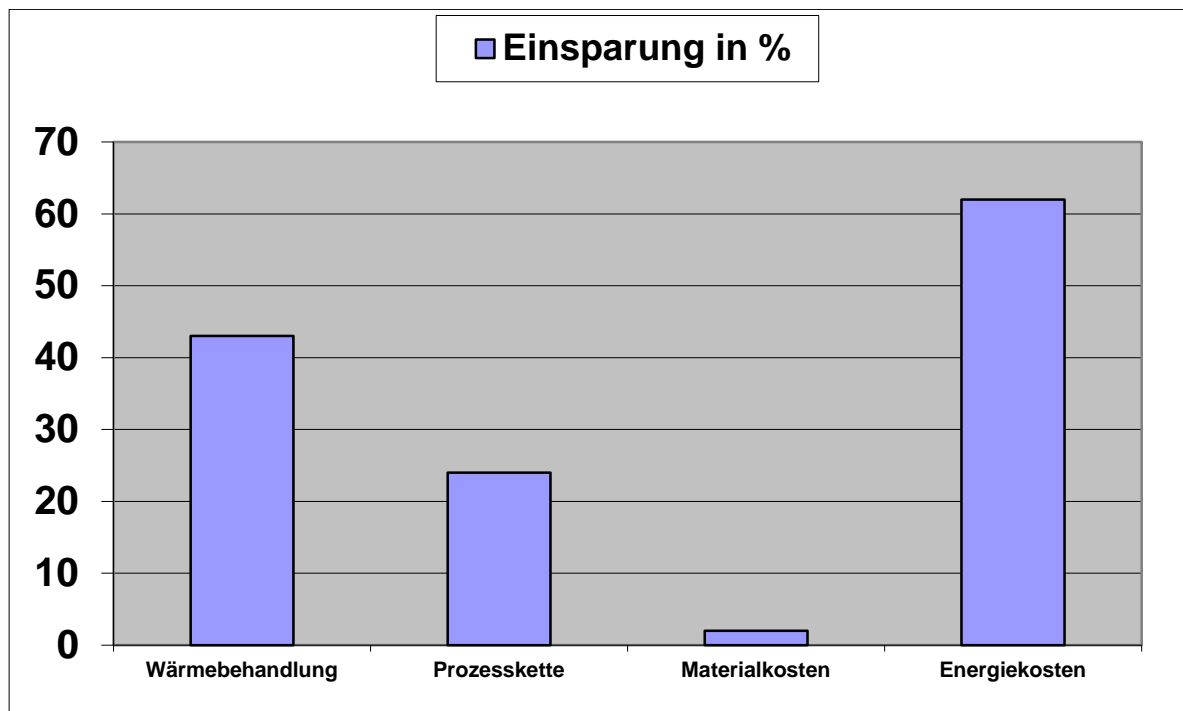


Abbildung 4: Einsparungen in % pro Bauteil durch Induktionshärten im Vergleich zum thermochemischen Einsatzhärten

## Modellcharakter des vorgesehenen Lösungsweges

Durch die Entwicklung des energieeffizienten Härteprozesses und der damit verbundenen neuen Induktionsanlage, die erstmalig das Induktionshärten von spiralverzahnten Geometrien ermöglicht, entstehen Multiplikationseffekte im Bereich der Zielgruppenbranche (Automobilhersteller, Automobilzulieferer) und zusätzlich bei branchenrelevanten Aufträgen im Bereich der Lohnhärtereier.



Werden die Projektziele erreicht, wird der Automotivebranche eine Anlage zur Verfügung gestellt, durch die beim Härten der Bauteile Kegelzahnräder 60 % Energieeinsparungen realisiert werden. Somit sind Energieeinsparungseffekte in der gesamten Branche möglich.

### **Zielgruppe der Ergebnisse des beantragten Vorhabens sowie Ergebnisverbreitung und Fortführung über das Projektende hinaus**

Wie bereits angedeutet lag die Zielgruppe in erster Linie im Bereich der Automobilhersteller bzw. -zulieferer.

Durch den Know-how-Aufbau aus der Entwicklung auf der einen Seite, der praktischen Anwendung im Produktionsprozess auf der anderen Seite wird die Induktionshärteanlage auch in anderen Industrieanwendungen ihren Einsatz finden. Besonders für den Einsatz im Bereich der Klebstoffaushärtung und Oberflächenbeschichtung zeichnet sich schon jetzt ein breites Einsatzspektrum ab.

Die wirtschaftlichen Vorteile bieten sehr gute Chancen für eine zeitnahe weltweite Marktverbreitung und führen zu deutlichen umweltrelevanten Effekten durch die Beeinflussung der Gesamtprozesskette. Der innovative Charakter des Projektes ist national und international gegeben.

Das neue Härteverfahren mit der dazugehörigen Anlagentechnik wird nach erfolgreichem Projektabschluss auf der Firmenhomepage beworben, auf unterschiedlichen Messen und in Fachzeitschriften vorgestellt. Die Markteinführung erfolgt über den Vertrieb von Inductoheat. Es liegen bereits Anfragen von international agierenden Automobilherstellern vor, die die neue Induktionshärteanlage einsetzen möchten.

### **Aufbau eines numerischen Modells, Abbildung der Geometrie**

Im ersten Schritt soll die Versuchsanordnung in ein numerisches dreidimensionales Modell überführt werden. Abgebildet werden sollen der Induktor und das Werkstück. Der Induktor wird im Modell über eine Stromvorgabe gespeist. Die Umrichterstruktur ist nicht Bestandteil der Modellierung. Aufgebaut wird ein elektromagnetisch-thermisch gekoppeltes System von Differentialgleichungen, das mit Hilfe der Methode der Finiten Elemente und mit Hilfe der Boundary Element Methode gelöst wird. Materialparameter sind immer auch eine Funktion der Temperatur. Somit ist die gekoppelte Berechnung zwingend erforderlich, da das variierende Temperaturfeld im Werkstück sehr starken Einfluss auf das elektromagnetische Feld besitzt. Die Modellierung startet mit der Umsetzung des ersten geometrischen Induktor Konzeptes. In den folgenden Parameterstudien wird die Geometrie des Induktors adaptiv angepasst.

### **Software**

Für die Modellierung der Anordnung wurden verschiedene Softwarepakete eingesetzt, die im Folgenden kurz beschrieben werden.

## INDUCTOTHERM ADVANCE

ADVANCE ist eine 1D FEM-Umgebung, um einfache Frequenz- und Modellanalysen vornehmen zu können. Gerechnet wird elektromagnetisch-thermisch gekoppelt. Damit lassen sich neben dem elektromagnetischen Feld das Temperaturfeld sowie die Verteilung der Wärmequellen ermitteln.

## Cedrat Flux 3D

Die Software Flux (2D und 3D) ist eine mehrdimensionale FEM-Umgebung, mit der sich elektromagnetisch-thermisch gekoppelte Systeme analysieren lassen. Für den vorliegenden Fall der Induktionserwärmung bietet sich hier die Möglichkeit, den induktiven Aufheizprozess elektromagnetisch zu berechnen, die induzierten Wärmequellen auszuwerten und anschließend das sich ergebende Temperaturfeld im Werkstück zu berechnen. Dabei werden die temperaturabhängigen Materialparameter lokal iterativ dem aktuellen Zustand des Materials angepasst.

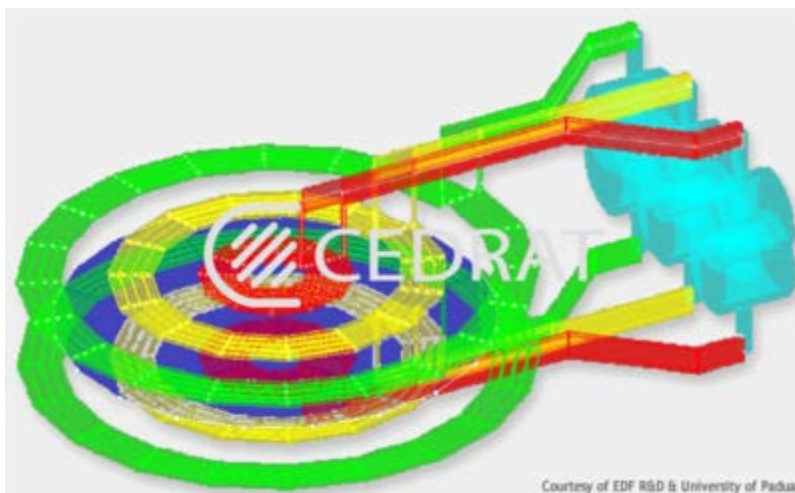


Abbildung 5: Simulation in Cedrat Flux 3D

## Altair Hypermesh / Hyperworks

Altair HyperMesh ist ein leistungsfähiger Preprozessor für alle führenden Finite-Elemente Solver, welcher dem Ingenieur eine äußerst interaktive, grafische Umgebung für die virtuelle Produktsimulation bietet.

Durch die Verfügbarkeit von Direktschnittstellen zu allen führenden, kommerziellen CAD und CAE Systemen bietet HyperMesh eine bewährte und beständige Analyseplattform für das gesamte Unternehmen.

Da in HyperMesh ein besonderer Wert auf die Produktivität seiner Anwender gelegt wird, ist es die bevorzugte Umgebung für:

- Bearbeitung von Volumengeometrien
- Schalenvernetzung
- Morphing
- Definition und Aufbau umfangreicher Modelle
- Bearbeitung von Flächengeometrien
- Volumenvernetzung
- Automatische Erzeugung von Mittelflächen
- BatchMeshing

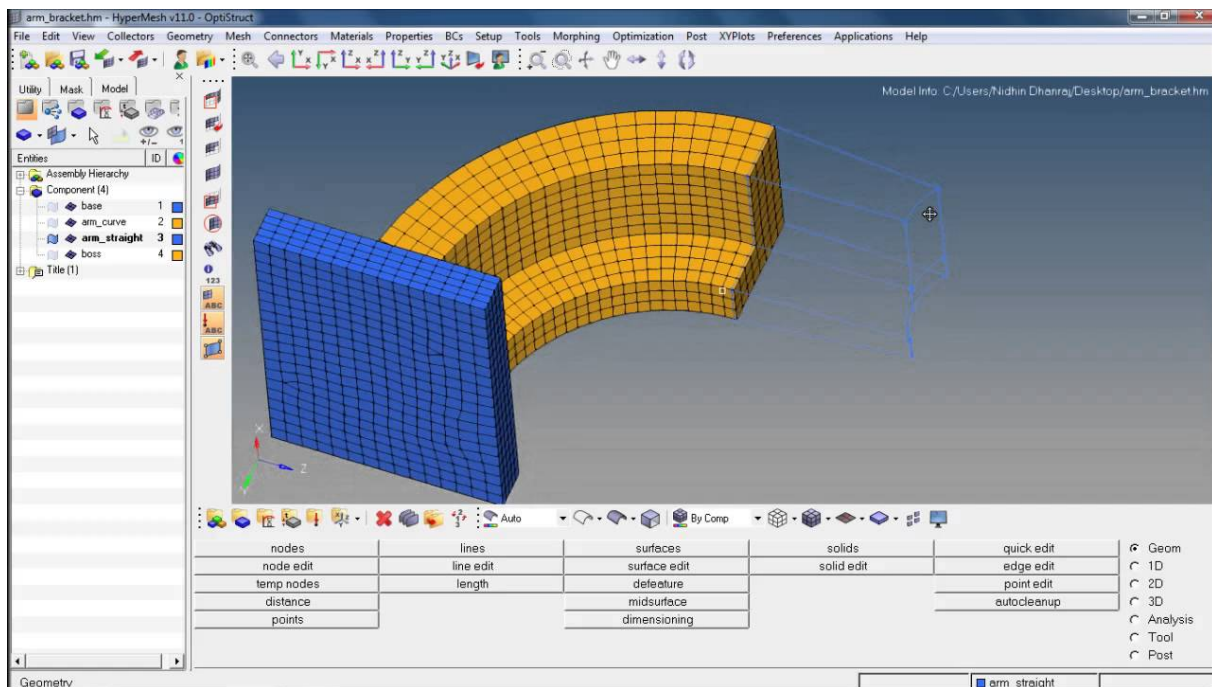


Abbildung 6: Simulation in HyperMesh

## GetDP / Gmsh

GetDP ist ein an der Universität Liège entwickelter Open Source Multiphysics FEM Solver, welcher in 1D/2D und 3D physikalische Aufgabenstellungen (elektromagnetisch, thermisch, mechanisch, etc.) mit Hilfe numerischer Methoden analysieren und lösen kann. Betrieben und gesteuert wird die Umgebung über ASCII-Dateien; eine GUI-Umgebung existiert nicht. Gmsh ist eine Umgebung, um 2D und 3D Geometrien zu vernetzen.

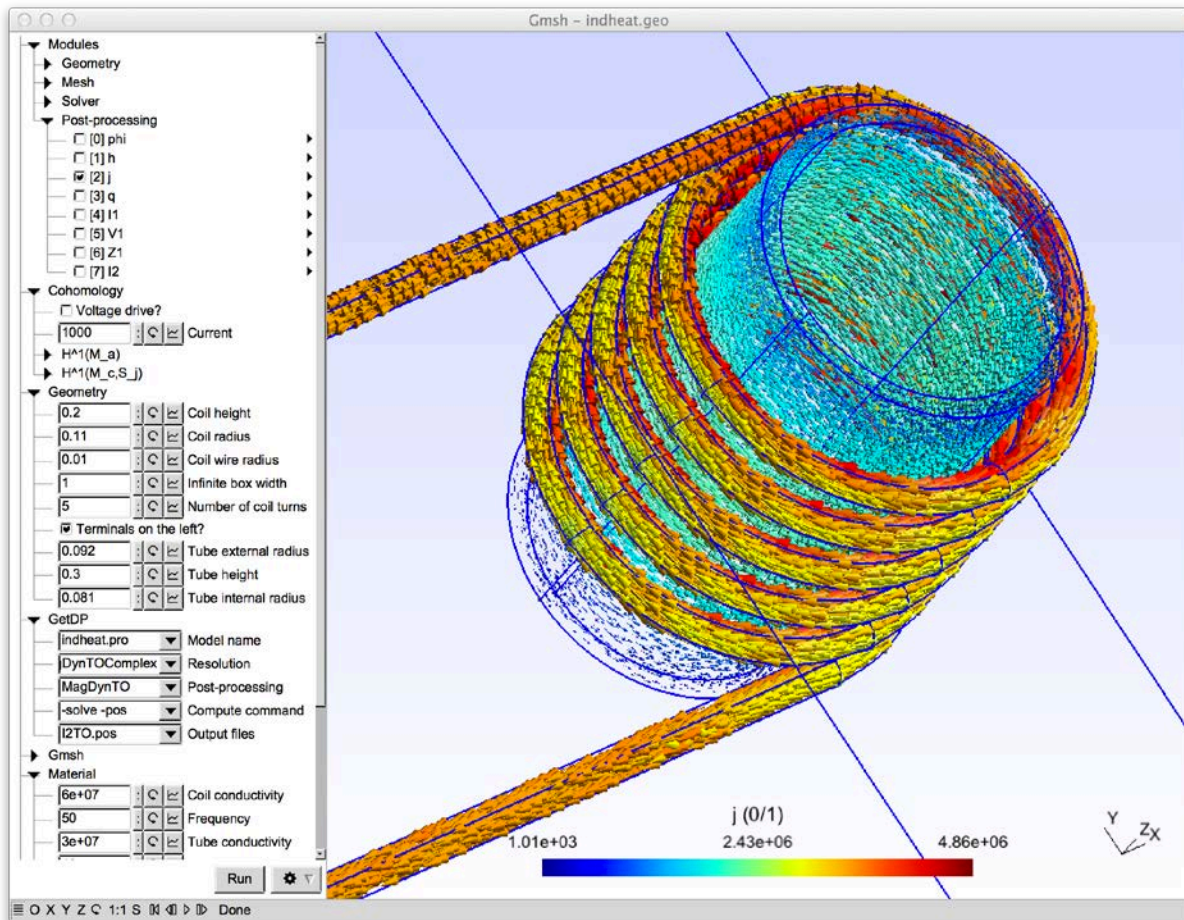


Abbildung 7: Simulation in Gmsh

## Induktorgeometrie

Ausgehend vom zuvor definierten Induktorkonzept wurde ein 2D-Modell des Induktors entwickelt. Dieses Modell dient der Fertigung eines ersten Versuchsinduktors.

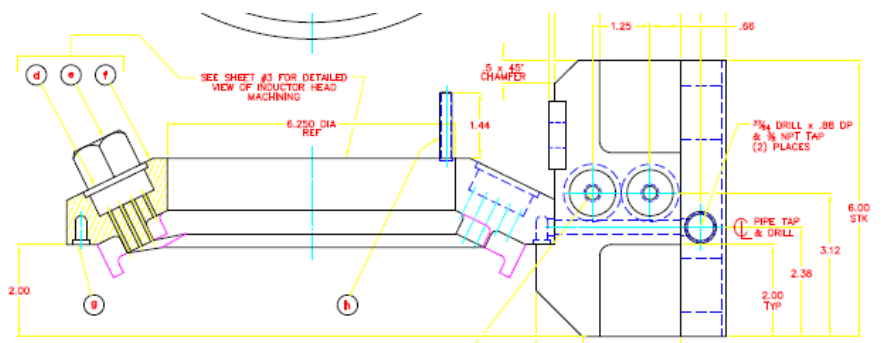


Abbildung 8: 2D-Modell des Induktors

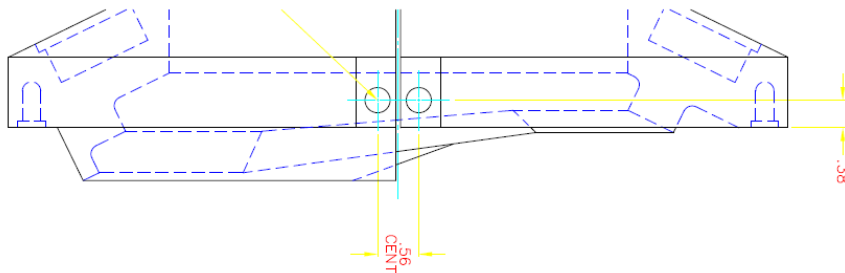


Abbildung 9: Querschnitt des Induktors

### Änderung des Werkstücks

Im Verlauf des Projektes wurde die Versorgung mit Zahnrädern durch den Projektpartner eingestellt. Somit musste die Versuchsreihe an den ursprünglichen Bauteilen abgebrochen werden.

Daraufhin wurde ein Alternativlieferant für ähnliche Bauteile gefunden und beauftragt, Inductoheat mit ungehärteten Werkstücken aus dem Material C45 zu versorgen. Die Werkstücke weichen im Durchmesser und in der Zahngeometrie stärker ab als dieses durch leichte Anpassungen des bestehenden Induktors ausgeglichen werden könnte. Somit war eine vollständige Neuentwicklung des Induktors notwendig. Die damit entstandene Verzögerung im Projekt wurde in den Zwischenberichten thematisiert.



Abbildung 10: Bisherige Werkstückkontur inkl. zugehörigem Induktor



Abbildung 11: Neue Werkstückkontur inkl. zugehörigem Induktor (Neuentwicklung)

Bedingt durch den kleineren Außendurchmesser des Werkstücks konnte der Induktor vereinfacht werden; die Abschreckbrause wurde gegenüber dem ersten Konzept nicht direkt in den Induktor integriert, sondern wurde im Abstand von 5 mm unterhalb des Induktors angeordnet.

### Simulation der Anordnung

Zu Beginn des Projektes wurde eine Software ausgewählt, die auf der Methode der Randelemente (BEM) basiert. Hintergrund war die erwartete deutliche Einsparung der Rechenzeit.

Im Laufe der Umsetzung hat sich jedoch gezeigt, dass eine Konvergenz der Ergebnisse nicht gegeben ist und als Resultat keine belastbaren Ergebnisse zur Verfügung stehen, die eine Optimierung des Prozesses ermöglichen. Anschließende Diskussionen mit Dr. Valery Rudnev, Inductoheat U.S., haben die Problematik bestätigt.

Kernpunkt ist die Schwierigkeit, die induktive Erwärmung von ferromagnetischen Materialien realitätskonform in der gewählten Software abzubilden.

Folgende Gründe führten zuvor zur Auswahl der BEM-Methode:

Die Randelementmethode lässt sich auf vielen Gebieten anwenden, zum Beispiel in der Strömungsmechanik, Akustik, Wärmetransport, Elektromagnetismus, Festkörpermechanik, Bruchmechanik, Plastizität usw. Die REM hat sich etwa parallel mit der Finite-Elemente-Methode (FEM) entwickelt. Bei den meisten Fragestellungen ist jedoch die FEM weiter verbreitet, weil sie weniger Restriktionen bezüglich der Eigenschaften des zu beschreibenden Gebietes aufweist (im Falle der Elastizitätstheorie von Kontinua sind das zum Beispiel kleine Verformungen / Verzerrungen und linear-elastisches Verhalten).

Weil sie für das Beispiel der elastischen Kontinua auf den Green'schen Einflussfunktionen basiert, stellt sie gegenüber der FE-Methode eine verbesserte Lösung dar. Die Randelementmethode kann wiederum sehr effizient und elegant mit der Methode der finiten Elemente gekoppelt (REM-FEM-Kopplung) werden.

Die Randelementmethode wird weniger oft im Bereich Numerische Strömungsmechanik (CFD) verwendet, sondern eher für elektrische Feldprobleme (Elektrostatik), thermische

---

Feldprobleme (stationäre und transiente Wärmeleitung), sowie mechanische Feldprobleme (Elastomechanik) und Akustik im Frequenz- und Zeitbereich.

Bei der Randelementmethode wird, im Gegensatz zur Finite-Elemente-Methode, nur der Rand bzw. die Oberfläche eines Gebietes oder einer Struktur diskretisiert betrachtet, nicht jedoch deren Fläche bzw. Volumen. Die unbekannt Zustandsgrößen befinden sich nur auf dem Rand. Mit Hilfe von Sprungrelationen werden die partiellen Differentialgleichungen zu Integralgleichungen umgewandelt, die Eigenschaften des gesamten Gebietes abbilden. Diese Integralgleichungen werden dann mit einer Technik, die der FEM ähnelt, diskretisiert und numerisch gelöst.

Bei der REM ist die Anzahl der diskreten Stützstellen (Knoten) und damit der Freiheitsgrade (FHG) wesentlich niedriger als bei der FEM und auch bei der Finite-Differenzen-Methode (FDM). Man erhält allerdings ein vollbesetztes, unsymmetrisches lineares Gleichungssystem, was die Wahl des Lösungsalgorithmus einschränkt oder erschwert und den Vorteil der geringeren Anzahl der FHG (teilweise) kompensiert. Die REM wird vorteilhaft in Fällen eingesetzt, bei denen die FEM zu hohem numerischen Aufwand führt: beispielsweise bei Halbraum-Kontaktproblemen, bei denen sich der Halbraum bis ins Unendliche erstreckt, oder der Lösung von Differentialgleichungen auf Außengebieten.

Die Erkenntnis der Nichtverwendbarkeit der gewählten Software führte zum Entschluss, eine 3D-FEM Software für die weitere numerische Betrachtung einzusetzen.

## 1D

Zur Evaluation der korrekten Härtefrequenz wurde eine 1D-Analyse durchgeführt, um Temperaturverlauf und Feldstärkeverteilung einschätzen zu können. Dabei wurde bei konstantem Spulendurchmesser der Durchmesser des Werkstücks auf jeweils den Durchmesser der Zahnspitze und des Zahngrunds angepasst und die Anordnung elektromagnetisch-thermisch gekoppelt berechnet.

Es zeigte sich im Rahmen der 1D-Analysen, dass ein Vorwärmprozess mit niedriger Frequenz auf eine Temperatur von 500°C und eine anschließende Hochleistungsheizphase der Dauer von 1s bei einer Frequenz von 160 kHz den Zahngrund und die Zahnspitze gleichermaßen auf Härtetemperatur bringt.

Dieses Vorgehen bildet die äußere Basis für den induktiven Härteprozess des schrägverzahnten Tellerrades.

Alle weiteren Optimierungen betreffen direkt die Induktorgeometrie und es ist notwendig, diese in 3D auszuwerten.

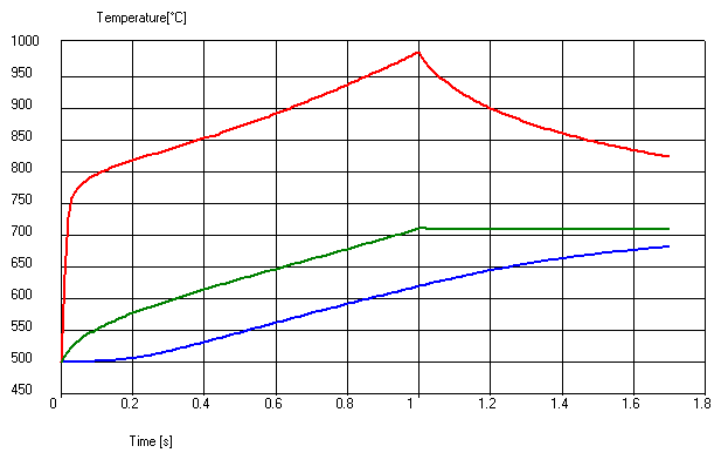


Abbildung 12: Temperatur im Zahngrund

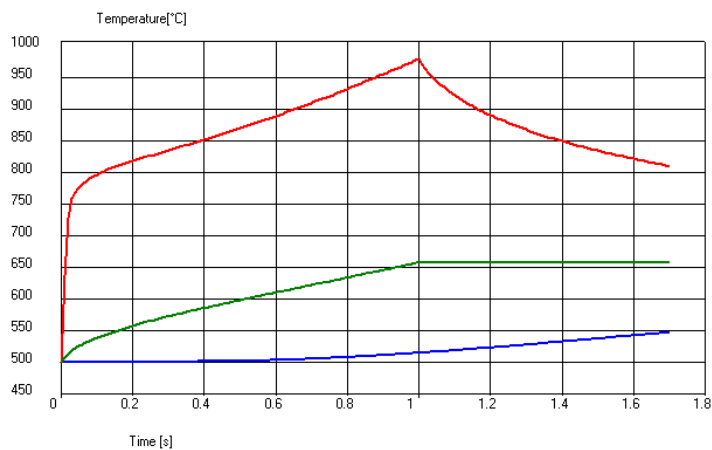


Abbildung 13: Temperatur in der Zahnspitze

### 3D

#### Aufbau des Modells

Das Modell des Induktors sowie das Modell des Werkstücks wurden in 3D mit Hilfe der Software Solid Works erstellt. Vorab wurden die Import-Möglichkeiten im Softwarepaket Flux 3D geprüft. Um die Qualität des späteren Netzes der Induktor- und Werkstückmodelle zu erhöhen, wurde beschlossen, die Vernetzung durch ein externes Vernetzungsprogramm, HyperMesh, vorzunehmen. Die elektromagnetische Berechnung erfordert die Existenz von mindestens vier übereinander angeordneten Elementen / Knoten innerhalb der elektromagnetischen Eindringtiefe. Somit sind innerhalb von 0.05 mm 4 Knoten übereinander anzuordnen. Das führt automatisch zu einer sehr kleinen Elementgröße. Ließe man die Anordnung (Induktor, Luft, Werkstück) über einen vollautomatischen Vernetzungsalgorithmus vernetzen, ergäbe sich hier eine sehr große Anzahl an Elementen,



die über die verfügbare Rechenleistung des Equipments nicht zu behandeln wäre. Somit besteht hier die Notwendigkeit, auf 2 verschiedene Algorithmen zurückzugreifen:

1. Strukturierte, feine Vernetzung im Bereich der elektromagnetischen Eindringtiefe am Werkstück und am Induktor
2. Automatische Vernetzung geringer Auflösung in den übrigen Gebieten des Modells

Weiterhin erstreckt sich der Bereich hoher Netzdichte auf 4-5 Zähne. Zur Analyse herangezogen werden dann lediglich die 2 innenliegenden Zähne des Bereichs.

Durch das Einfügen eines Volumens mit inverser Zahnkontur und das Setzen spezieller tangentialer thermischer Randbedingungen in diesem Bereich lässt sich eine Modellierung der Rotation des Werkstücks während der Heizphase umgehen. Die tangentiale thermische Leitfähigkeit des Volumens wird dabei auf einen hohen Wert gesetzt, gleichzeitig wird die spezifische Wärmekapazität auf einen geringen Wert gesetzt. Durch diesen Mechanismus verteilen sich die durch den Induktor induzierten Wärmequellen gleichmäßig tangential im Werkstück und auf eine Modellierung der Rotation kann verzichtet werden. Eine Abschätzung des tatsächlich auftretenden Fehlers steht noch aus.

Über diese Aufteilung lässt sich ein großer Teil überflüssiger Elemente einsparen und führt so direkt zu einer deutlichen Reduzierung der Rechenzeit.

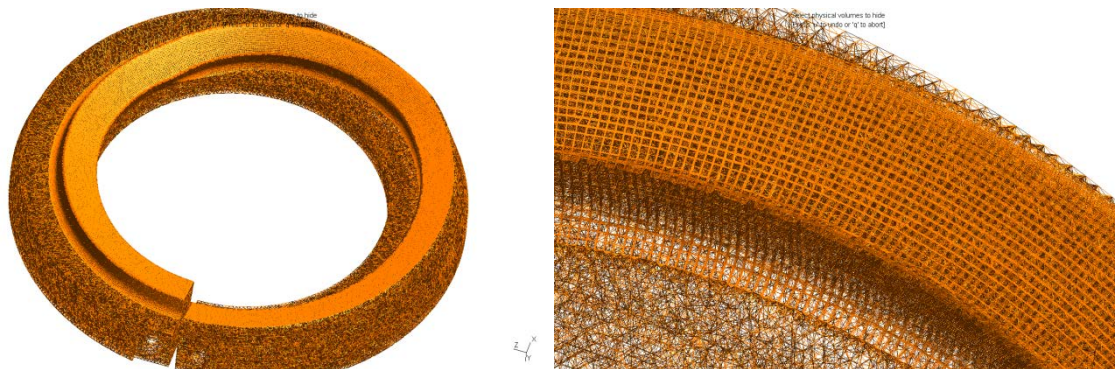


Abbildung 14: Modellierung des Induktors, feine Netzauflösung in Quaderstruktur an der Oberfläche des elektromagnetisch wirksamen Bereichs

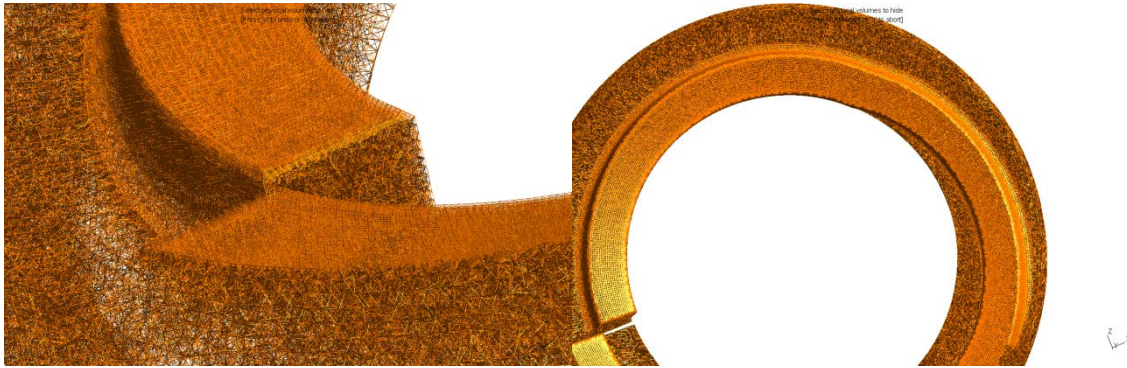


Abbildung 15: Modellierung des Induktors, gröbere Netzaufösung in Tetraederstruktur unterhalb der Oberfläche und des elektromagnetisch weniger wirksamen Bereichs

Insgesamt beträgt die Anzahl der Elemente im Induktor rund 1.4 Mio.

### Modellierung des Werkstücks

Das Werkstück wurde an 5 Zähnen im Oberflächenbereich strukturiert und mit sehr hoher Auflösung so vernetzt, dass innerhalb der elektromagnetischen Eindringtiefe mindestens 4 Elemente übereinander angeordnet sind. Um elektromagnetische und thermische Randeﬀekte auszuschließen, werden nur die inneren 3 Zähne elektromagnetisch und thermisch analysiert. Das strukturierte Netz folgt daher der Oberfläche, so dass Zahnspitze, Zahnﬂanke und Zahngrund gleichermaßen vernetzt sind.

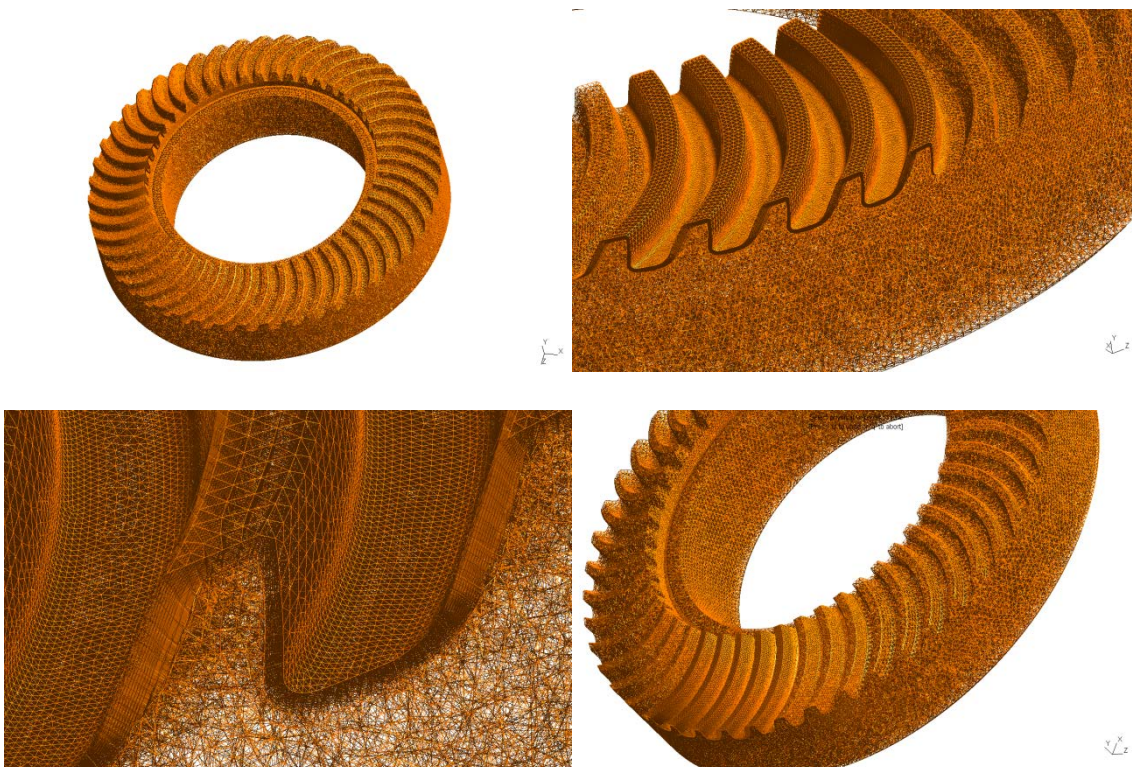


Abbildung 16: Modellierung des Werkstücks strukturiert und unstrukturiert über Tetraederelemente

Insgesamt beträgt die Anzahl der Elemente im Werkstück rund 1.1 Mio. Führt man die Geometrien zusammen und ergänzt die Anordnung um den Faktor Luft, ergibt sich eine Element-Gesamtanzahl von rd. 3 Mio. Elementen. Diese Größenordnung ist über eine 3D-FEM Umgebung noch gut lösbar. Die generierten Netze wurden anschließend im NASTRAN-Format zur Verfügung gestellt.

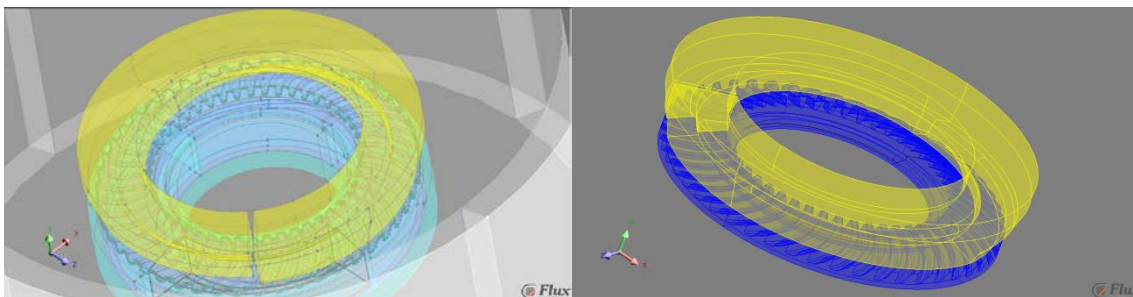
### Probleme beim Import der Netze in Flux 3D

Entgegen den Angaben des Herstellers ließen sich die NASTRAN Netze nicht in der Form in Flux 3D importieren, in der ein Import notwendig gewesen wäre. Die Software Flux 3D konnte die Netze einlesen und hat diese dann intern wieder in einzelne, nicht vernetzte Volumina umgewandelt. Der ganze Vorteil der externen Vernetzung konnte so nicht genutzt werden. Nach intensiven Rücksprachen mit dem Hersteller wurde diese Prozedur durch den Hersteller bestätigt; der Import von NASTRAN Netzen ist zwar möglich, jedoch können diese Netze intern nicht weiter verwendet werden.

An diesem Punkt wurde die Modellierungsstrategie dahingehend geändert, dass lediglich die CAD-Geometrie des Induktors und des Werkstücks als Solid Works File in Flux 3D importiert wurde.

Die Komplexität von Werkstück und Induktor ermöglicht an dieser Stelle jedoch keine strukturierte Vernetzung im elektromagnetisch aktiven Bereich. Somit beträgt die später zu erwartende Gesamtanzahl der Elemente ein Vielfaches verglichen mit der bisher über Hypermesh vernetzten Geometrie.

Um überhaupt Ergebnisse aus der bisherigen Arbeit am numerischen Modell zu generieren, wurde die Elementgröße deutlich vergrößert und der automatische Vernetzungsalgorithmus von Flux 3D genutzt. Die Gesamtanzahl der Elemente konnte über eine Vergrößerung der Elemente auf 5 Mio. reduziert werden. Durch die deutlich gestiegene Anzahl an Elementen und der damit gestiegene Bedarf an RAM musste die Modellierungsaufgabe auf einem leistungsstärkeren Rechner durchgeführt werden; Probleme infolge zu geringen RAMS wurden so gelöst.



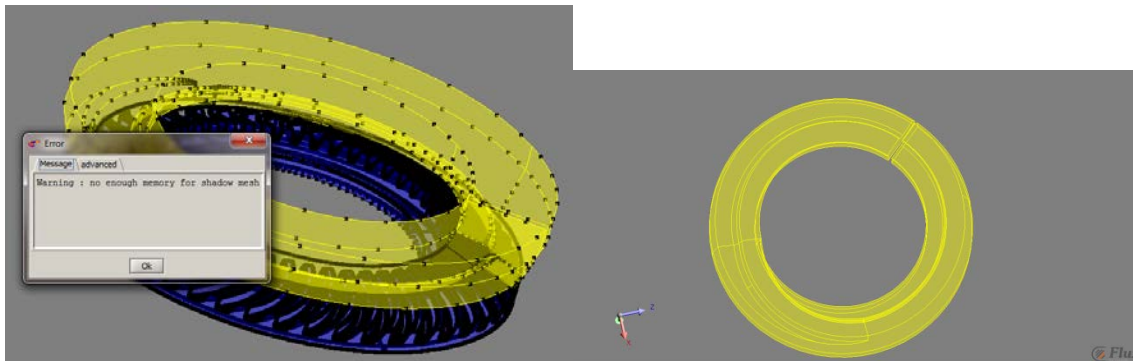


Abbildung 17: Vernetzte Anordnungen in Flux 3D

Die in Flux 3D vernetzte Anordnung wurde dann in ein Flux Modell überführt und mit einer Frequenz von 150 kHz gerechnet. Bereits bei 2/3 des Lösungsvorgangs wurde dieser durch Flux mit einem Speicher-Fehler beendet. Dieser Fehler konnte durch keine der Änderungen im Speichermanagement behoben werden. Schlussendlich wurde das gesamte Modell an den Hersteller zu Klärung und zur Fehleranalyse und –lösung übergeben. Eine abschließende Antwort seitens des Herstellers steht immer noch aus.

Abschließend lässt sich schlussfolgern, dass der Ansatz über Flux 3D im Rahmen dieses Projektes gescheitert ist; ein numerisches Ergebnis der induktiven Erwärmung ließ sich nicht generieren.

### **Betrachtung der Softwareumgebung GetDP / Gmsh**

Im Rahmen der Recherchen nach dem Scheitern einer Lösung durch Flux 3D wurde die Funktionalität der Open Source Software GetDP genauer untersucht.

GetDP bietet die Möglichkeit, NASTRAN Netze direkt zu importieren und im Rahmen der FEM-Analyse auch zu verwenden. Zudem wurde über diese Umgebung bereits eine elektromagnetisch-thermische Berechnung zur induktiven Erwärmung von Werkstücken realisiert. Nach Aussagen des Entwicklers lassen sich in dieser Umgebung ebenfalls alle Materialparameter abhängig von der Temperatur angeben und anisotrope Materialparameter wie z.B. tangentielle Wärmeleitfähigkeiten implementieren. Durch die äußerst spärliche Dokumentation dieser Umgebung gestaltet sich eine kurzfristige Umsetzung des Projektes als äußerst schwierig und wurde daher im Rahmen dieses Projektes aus Zeitgründen abgebrochen.

Grundsätzlich scheint die Machbarkeit der hier angestrebten Modellierung nach Aussagen des Entwicklers jedoch möglich.

### **Parameterstudien am Modell**

Auf den Modellen aufbauende numerische Analysen des Induktionshärteprozesses arbeiten den Einfluss der Prozessparameter auf das Härteergebnis heraus. Sensitivitätsanalysen helfen bei der Bewertung der wesentlichen Prozessparameter und –erfordernisse. Mittels Sensitivitätsanalysen wird der Einfluss der Induktionshärteparameter auf das

Härteergebnis untersucht und die Relevanz von diesen bewertet. Die Optimierung der Prozessparameter führt zu vorher definierten Parameterstudien des Prozesses.

Ziel der Parameterstudien ist zum einen die Unterstützung bei der Konstruktion eines geeigneten Induktors und zum anderen die Wahl der richtigen Frequenz und Leistung im Härteprozess. Ein induktives Vorwärmen bei geringerer Frequenz soll ebenfalls untersucht werden. In der numerischen Simulation wird das Temperaturfeld im Werkstück ausgewertet und dient als Basis für die Entwicklung der Induktorgeometrie und der Wahl der Prozessparameter.

Als Folge der Problematiken im Bereich der Simulation konnten die Parameterstudien nur bedingt am 1D-Modell durchgeführt werden. Als wichtigster Parameter ging hier die optimale Härtefrequenz von  $f = 150$  kHz hervor.

## **Praktische Versuche**

### **Anlagentechnik**

Umrichter 1: 5 - 40 kHz, 150 kW max. Ausgangsleistung

Umrichter 2: 50 – 200 kHz, 150 kW max. Ausgangsleistung

Die numerische Simulation ist in der Lage, das Temperaturfeld im Werkstück sichtbar zu machen. Die gefügetechnische Umwandlung des Materials ist jedoch nicht Teil der Simulation und ist folglich am realen Bauteil zu studieren. Die Optimierung des Gesamtprozesses anhand des Temperaturfeldes bildet eine gute Basis, um einen erfolgreichen Härteprozess durchzuführen. Die Umsetzung an der Anlage ist somit als finaler Schritt in der gesamten Prozesskette anzusehen, um die Härteverteilung im Werkstück zu ermitteln.

In der Entwicklung führt der erste Ansatz in den wenigsten Fällen direkt zum Ziel. Oft sind Prozessanpassungen und Optimierungen notwendig. Das führt in den meisten Fällen im Bereich des induktiven Härtens zu Anpassungen am Induktor. Nach erfolgreichem Abschluss der Entwicklung des Prozesses wird ein Vergleich gezogen zwischen numerischen und praktischen Ergebnissen. Dabei werden alle Ergebnisse auf Basis des finalen Härteergebnisses beurteilt und Differenzen herausgearbeitet.

Basierend auf den Ergebnissen der numerischen Simulation wird die erste Version des Induktors entwickelt und gefertigt. Die Konstruktion erfolgt dabei mit Hilfe einer 3-D CAD Umgebung. Aus Gründen der Reproduzierbarkeit der Ergebnisse wird der Induktor nach erfolgter Konstruktion auf einem CNC Bearbeitungszentrum gefräst und anschließend im Induktorbau vollständig montiert. Das Induktordesign umfasst bereits eine integrierte Brause, um eine homogene Abschreckwirkung am Bauteil zu ermöglichen.

Nach erfolgreicher Fertigung des Induktors wird ein Versuchsstand aufgebaut, um praktische Tests am realen Bauteil durchzuführen. Notwendig für den Aufbau ist eine zuverlässige,

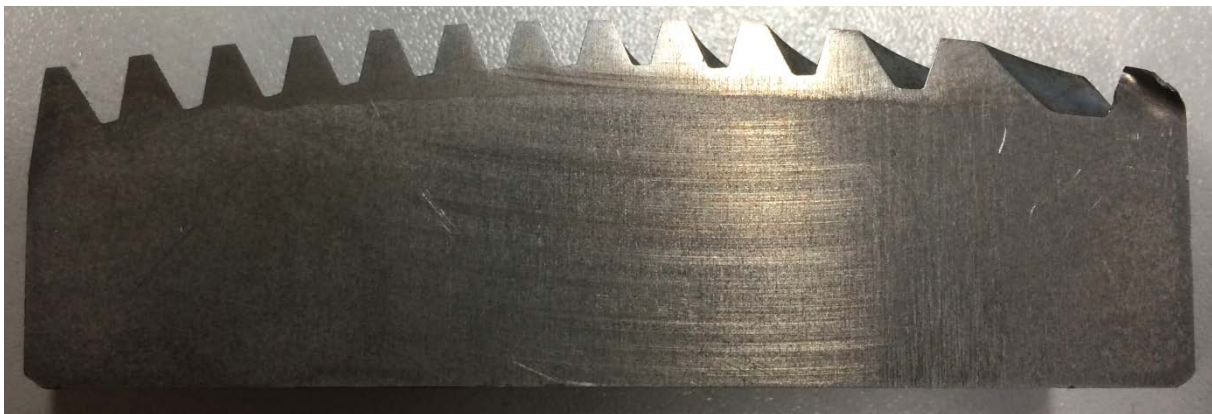
rotierende Aufnahme des Werkstücks, welches in diesem Arbeitsschritt zu konstruieren und zu fertigen ist.

Mangels verfügbaren Ergebnissen aus der 3D-Simulation wurde die Induktorentwicklung direkt auf empirischer Basis und erfahrungsorientiert durchgeführt.

Die praktischen Versuche an den Härteanlagen wurden bei 3 verschiedenen Frequenzen durchgeführt: 40 kHz, 84 kHz und 150 kHz. Dabei hat sich an den Anlagen selbst gezeigt, dass die Anlagen an der Leistungsgrenze betrieben wurden und ein konturnahes Härtebild bei keiner der Testfrequenzen erreicht werden konnte.

### **Versuche mit 40 kHz**

Die Versuche mit 40 kHz haben eine gute Erwärmung im Zahngrund aufgezeigt. Die Erwärmung auf Austenitisierungstemperatur erfolgte jedoch bedingt durch die Leistungsbegrenzung 8 s. Innerhalb dieser Zeit sind die Zähne infolge der Temperaturleitfähigkeit des Materials durchgehärtet.



*Abbildung 18: Härtebild des mit 40 kHz durchgeführten Versuchs*

### **Versuche mit 84 kHz**

Eine ähnliche Situation ist zu beobachten bei einer Erwärmung mit 84 kHz.

Hier wurde mit einem Vorheiz-Zyklus gearbeitet um das gesamte Material auf eine Temperatur von 500 °C vorzuwärmen. Das Temperaturdelta bis zur Austenitisierung reduziert sich somit deutlich.

Über diesen Effekt konnte die Heizzeit des Härtezyklus von 8s auf 3.5 s reduziert werden.

Jedoch zeigen sich auch hier deutliche Anzeichen einer Durchhärtung; eine Erhöhung der Leistung war nicht möglich, die Anlage wurde bereits bei 150 kW betrieben. Auch eine Frequenz von 84 kHz setzt die Wärmequellen mehr in den Grund und der unteren Zahnflanken so dass sich eine konturgetreue Härtung bei dieser Frequenz als schwierig erweist.



Abbildung 19: Härtebild des mit 84 kHz durchgeführten Versuchs

### Versuche mit 150 kHz

Die Änderung der Frequenz auf 150 kHz zeigt eine Verbesserung des Erwärm- und Härtebildes. Auch hier wurde mit einem Vorheiz-Zyklus gearbeitet um das gesamte Material auf eine Temperatur von 500 °C vorzuwärmen. Die Heizzeit des Härtezyklus konnte so auf 2s reduziert werden.

Deutlich zu sehen ist eine wellenartige Verteilung der Härte am Zahngrund. Bedingt durch die Limitierung der Leistung erfolgt auch hier nahezu ein Durchhärten der Zähne. Zudem ist zu beobachten, dass der Induktor am inneren Durchmesser besser wirkt, als am äußeren Durchmesser. An dieser Stelle wäre ein weiterer Optimierungsschritt der Induktorkontur notwendig, um die Wärmequellenverteilung im Werkstück weiter zu homogenisieren.

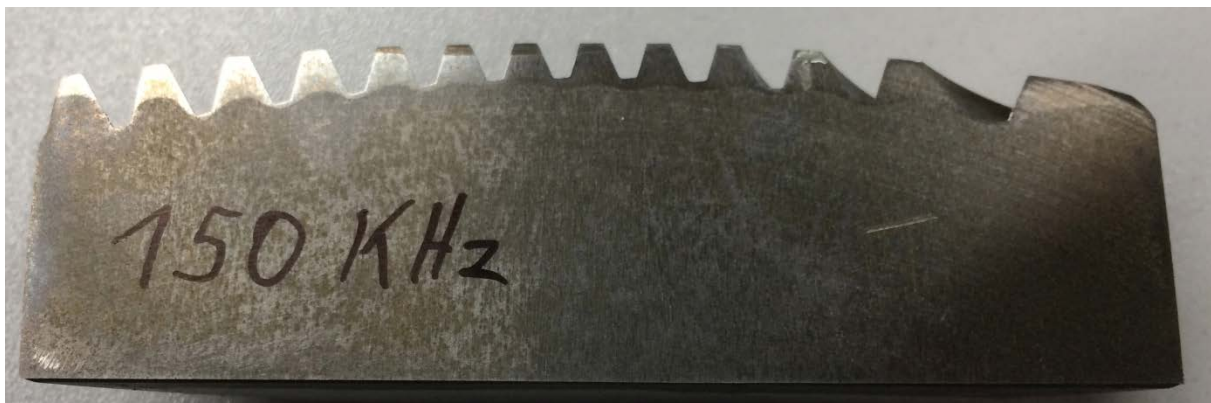


Abbildung 20: Härtebild des mit 150 kHz durchgeführten Versuchs

Nach erfolgter Härtung des Werkstücks werden Segmente aus dem Material herausgetrennt und präpariert, um Mikrohärtanalysen durchführen zu können und die Einhaltung der geforderten Härtevorgaben zu kontrollieren. Die Mikrohärtanalyse bildet das wichtigste Tool zur Aufdeckung von Schwachstellen im Härteprozess und ist ein wichtiger Ideengeber zu Optimierung des Induktors.

Die Werte der Oberflächen- und Kernhärte liegen alle im gewünschten Zielbereich.

### **Fertigung eines 480 kW-Umrichters**

Im Rahmen des Projektes wurde die Konstruktion und Fertigung eines 480 kW-Umrichters begonnen, um die Heizzeit im Härtezyklus auf unter 1 s zu reduzieren und somit ein Durchhärten der Zähne zu vermeiden. Durch Verzögerungen im Fertigungsablauf konnte die Fertigung des Umrichters im Rahmen des Projektes nicht mehr fertiggestellt werden.



---

## 4. Fazit

Die festgestellten Problematiken in der Simulation zeigen deutlich die Grenzen der aktuellen Machbarkeit dieser komplexen Fragestellungen. Durch die geometrische Ausgestaltung des Werkstücks und auch des Induktors ist eine Symmetrierung der Anordnung nicht möglich. Somit müssen das gesamte Werkstück wie auch der gesamte Induktor modelliert und berechnet werden.

Aktuell verfügbare, kommerzielle Software ist gegenwärtig nicht in der Lage, das Problem adäquat zu lösen. Erste Recherchen haben eine Software ermittelt, die diese Aufgabe unter günstigen Rahmenbedingungen lösen könnte. Diese Fragestellung könnte durchaus in weiteren Projekten näher evaluiert werden.

Ohne numerische Modellierung und Analyse gestaltet sich auch die Induktoroptimierung als schwierig. Die gezeigten Ergebnisse zeigen zwar eine Tendenz zu einem erfolgreichen Prozess und somit zu einer positiven Grundtendenz des Induktorkonzepts, jedoch ist eine optimale Lösung im Rahmen des Projektes nicht erzielt worden. Durch die Problematiken in der numerischen Simulation blieb jedoch im Rahmen dieses Projekts nur die Möglichkeit, sich der Problemstellung empirisch zu nähern.

Die im Projektverlauf festgestellte Notwendigkeit höherer Umrichterleistung führte zum Entschluss, einen größeren Umrichter zu fertigen. Dieses Ziel wird auch nach Abschluss des Projektes weiter verfolgt; weitere Versuchsreihen mit höherer Leistung werden im Nachgang des Projektes folgen.

---

## 5. Literaturverzeichnis

- Numerische Simulation des Erwärmungsprozesses für das induktive Randschichtärten komplexer Geometrien, Cuvillier, E; Auflage: 1 (März 2005)
- C. Geuzaine and J.-F. Remacle. Gmsh: a three-dimensional finite element mesh generator with built-in pre- and post-processing facilities. *Int. J. Numer. Meth. Eng.*, 79(11):1309-1331, 2009.
- C. Geuzaine. GetDP: a general finite-element solver for the de Rham complex. In *PAMM Volume 7 Issue 1. Special Issue: Sixth International Congress on Industrial Applied Mathematics (ICIAM07) and GAMM Annual Meeting, Zürich 2007*, volume 7, pages 1010603-1010604. Wiley, 2008.
- Handbook of Induction Heating, Taylor and Francis, Valery Rudnev, Don Loveless