

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2 Grundlagen des induktiven Randschichthärtens</b>	<b>5</b>
2.1 Ablauf und Prinzip des Prozesses . . . . .	5
2.2 Materialwissenschaftliche Aspekte . . . . .	7
2.2.1 Eisen-Kohlenstoff-Verbindungen . . . . .	7
2.2.2 Austenitbildung bei der Erwärmung . . . . .	10
2.2.3 Gefügeumwandlung während des Abschreckens . . . . .	13
2.2.4 Härte und deren Messung . . . . .	16
2.2.5 Eigenspannungen und Verzüge . . . . .	17
2.2.6 Abschrecken und verwendete Medien . . . . .	19
2.2.7 Werkstoffe und Ausgangsgefüge . . . . .	21
2.3 Frequenzumrichter für das Induktionshärten . . . . .	22
2.4 Anwendungsbeispiele des Prozesses . . . . .	26
2.4.1 Verzahnungsgeometrien und Zahnräder . . . . .	26
2.4.2 Lagerringe . . . . .	31
2.4.3 Kurbelwellen . . . . .	32
2.4.4 Zahnstangen . . . . .	34
2.5 Vergleich mit anderen Verfahren . . . . .	35
<b>3 Motivation und Ziel</b>	<b>39</b>
<b>4 Theoretische Grundlagen</b>	<b>43</b>
4.1 Elektromagnetisches Feld . . . . .	43
4.1.1 Grundgleichungen des elektromagnetischen Feldes . . . . .	43
4.1.2 Berechnung von elektromagnetischen Feldern . . . . .	45
4.1.3 Der Skin-Effekt . . . . .	46
4.2 Das Temperaturfeld . . . . .	51
4.3 Elektromagnetische Effekte bei der induktiven Erwärmung . . . . .	53
<b>5 Modellierung</b>	<b>56</b>
5.1 Kopplung der Felder . . . . .	56
5.2 Die Finite-Elemente-Methode . . . . .	56

---

5.3	Numerische Berechnung des induktiven Härteprozesses	57
5.3.1	Induktiver Erwärmungsvorgang	57
5.3.1.1	Anpassen der Permeabilitätszahl	60
5.3.1.2	Simultane Zweifrequenz	61
5.3.2	Abschreckung	61
5.3.3	Gefügeentwicklung	63
5.4	Genetische Algorithmen zur Optimierung	65
5.5	Werkstoffparameter	66
5.5.1	Elektromagnetische Berechnung	66
5.5.2	Ermitteln einer effektiven Permeabilitätszahl durch zeitliche Mittelung	69
5.5.3	Thermische Berechnung	70
<b>6</b>	<b>Untersuchung von Berechnungsverfahren des Erwärmungsprozesses</b>	<b>71</b>
6.1	Betrachtungen für den unendlichen Halbraum	71
6.1.1	Berechnungen für Materialparameter bei Raumtemperatur	72
6.1.2	Berechnungen für Erwärmungsprozesse	80
6.2	Betrachtungen anhand des zweidimensionalen Modells eines Linienleiters	82
<b>7</b>	<b>Magnetische Sättigungseffekte bei simultaner Zweifrequenz am Beispiel eines Zylinders</b>	<b>90</b>
7.1	Numerische Nachbildung der magnetischen Sättigung bei simultaner Zweifrequenz	90
7.2	Parameteruntersuchung mit dem numerischen Modell	97
<b>8</b>	<b>Anwendung der Methodik auf ein Geradstirnrad</b>	<b>101</b>
8.1	Durchführung von Härteversuchen am Geradstirnrad	101
8.2	Numerische Berechnung der induktiven Erwärmung	104
8.3	Berechnung des Gefügezustandes	112
<b>9</b>	<b>Inverser Auslegung induktiver Härteprozesse am Beispiel einer Hohlwelle</b>	<b>117</b>
9.1	Manuelle Induktorauslegung	118
9.2	Härteversuche an Hohlwellen	121
9.2.1	Versuchsdurchführung	121
9.2.2	Ergebnisse und Verifikation	122
9.3	Konzept der inversen Prozessauslegung	126
9.4	Ergebnisse der inversen Prozessauslegung	128
9.5	Zusätzliche Betrachtungen zur magnetischen Feldverteilung	133
<b>10</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>137</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>		<b>142</b>