

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>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</b>	<b>Motivation und Ziel</b>	<b>39</b>
<b>4</b>	<b>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</b>	<b>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>Inverse 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>