

Inhaltsverzeichnis

Vorwort der Herausgeber	III
Inhaltsverzeichnis.....	IV
Symbole und Abkürzungen.....	VIII
1 Einleitung und Motivation.....	1
2 Kenntnisstand und Grundlagen.....	4
2.1 Einsatzhärten.....	4
2.1.1 Einsatzgehärtete Gefüge	7
2.1.2 Karbonitrieren.....	12
2.1.3 Niederdruck-Aufkohlung und Hochdruck-Gasabschreckung	13
2.2 Eigenspannungen.....	14
2.3 Festigkeit einsatzgehärteter Bauteile	24
2.3.1 Strength-Differential Effekt.....	26
2.3.2 Mechanisch induzierte Restaustenitumwandlung.....	29
2.3.3 Bauschingereffekt.....	31
2.4 Verzug.....	31
2.5 Richten	32
2.5.1 Biegeoperationen homogener Zustände.....	33
2.5.2 Biegeoperationen inhomogener Zustände.....	40
3 Werkstoffe und Proben.....	47
3.1 Einsatzgehärtete Biegeproben	47
3.1.1 Probengeometrien.....	47
3.1.2 Werkstoff	47
3.1.3 Ausgangszustand	48
3.1.4 Wärmebehandlung.....	49
3.2 Durchgekohlte Biegeproben.....	50
3.2.1 Probengeometrie	50
3.2.2 Ausgangszustand	51
3.2.3 Wärmebehandlung.....	51
3.3 Antriebswelle	52
3.3.1 Geometrie	52

3.3.2	Ausgangszustand	53
3.3.3	Wärmebehandlung.....	53
4	Versuchseinrichtungen und Versuchsdurchführungen	54
4.1	Mikroskopische Untersuchungen	54
4.2	Funkenspektroskopie	54
4.3	Härtemessung.....	54
4.4	Vier-Punkt Biegeversuche einsatzgehärteter Proben	55
4.5	Vier-Punkt-Biegeversuche durchgekohlter Proben.....	56
4.6	Richtvorgang Antriebswelle	57
4.7	Röntgenografische Spannungsermittlung.....	57
4.7.1	Einsatzgehärtete Biegeproben	58
4.7.2	Durchgekohlte Biegeproben	59
4.7.3	Antriebswelle	60
4.7.4	Auswertung der Rohdaten	60
4.8	Röntgenografische Restaustenitbestimmung	60
4.8.1	Einsatzgehärtete Biegeproben und Antriebswelle.....	60
4.8.2	Durchgekohlte Biegeproben	61
4.8.3	Auswertung der Rohdaten	61
4.9	Elektrolytisches Abtragen.....	62
4.10	Messpunktanordnung und Korrektur der gemessenen Eigenspannungen ...	62
4.11	Finite-Elemente-Simulation der Biegeverformung einsatzgehärteter Biegeproben.....	63
5	Untersuchungsergebnisse	66
5.1	Zustand nach Wärmebehandlung	66
5.1.1	Einsatzgehärtete Biegeproben	66
5.1.1.1	Niedrige Form.....	66
5.1.1.2	Hohe Form	69
5.1.2	Durchgekohlte Biegeproben	71
5.1.3	Antriebswelle	73
5.2	Biegeversuche	76
5.2.1	Einsatzgehärtete Biegeproben	76
5.2.1.1	Niedrige Form	76
5.2.1.2	Hohe Form	82
5.2.2	Drei-Punkt-Biegung Antriebswelle.....	85

5.3	Eigenspannungszustand und Restaustenitverteilung in der Randschicht.....	86
5.3.1	Einsatzgehärtete Biegeproben	86
5.3.1.1	Niedrige Form.....	88
5.3.1.2	Hohe Form	96
5.3.2	Antriebswelle.....	100
5.3.2.1	Vergleich vor und nach Biegung entlang des Umfangs	100
5.3.2.2	Tiefenverteilung an ausgewählter Kerbe	104
5.4	In situ Untersuchungen der durchgekohten Proben unter Biegebelastung....	107
5.5	Finite-Elemente-Simulation der Biegebelastung	112
5.5.1	Homogenes Material	112
5.5.2	Inhomogenes Material	115
5.5.3	Inhomogenes Material, initiale Eigenspannungen	116
5.5.4	Inhomogenes Material, initiale Eigenspannungen, Randschichtschädigung	118
6	Diskussion	119
6.1	Verformungsverhalten einsatzgehärteter Zustände bei Biegebeanspruchung	119
6.2	Randschichtzustand einsatzgehärteter Biegeproben nach Biegebeanspruchung 125	
6.2.1	Einsatzgehärtete Biegeproben niedriger Form.....	125
6.2.1.1	Restaustenit.....	125
6.2.1.2	Integralbreiten.....	127
6.2.1.3	Eigenspannungen.....	129
6.2.2	Einsatzgehärtete Biegeprobe hohe Form	146
6.3	Entwicklung der randnahen Eigenspannungen der Antriebswelle nach dem Richten.....	149
7	Zusammenfassung	152
7.1	Biegeoperationen an einsatzgehärteten Modellbauteilen.....	152
7.2	Einfluss einer Richtsimulation auf randnahe Eigenspannungen und Restaustenitverteilungen	153
7.2.1	Niedrige Biegeproben.....	153
7.2.2	Hohe Biegeproben	155
7.2.3	In situ Messungen während der Richtsimulation durchgekohter Proben.....	155
7.2.4	Zustand der Antriebswelle nach dem Richten	155

8	Ausblick.....	157
9	Literatur	158
	Abbildungsverzeichnis	167
	Tabellenverzeichnis	177