

# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>I</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>VII</b>
<b>Verzeichnis der Formelzeichen</b>	<b>XIII</b>
Große lateinische Buchstaben	XIII
Kleine lateinische Buchstaben	XV
Große griechische Buchstaben	XIX
Kleine griechische Buchstaben	XX
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Schweißverzug und Schweißeigenspannungen	1
1.2 Gegenmaßnahmen	3
1.3 Weiterführendes Fazit und Kapitelüberleitung	4
<b>2 Inhalte und Aufbau der Arbeit</b>	<b>5</b>
2.1 Ziel und Nutzen	5
2.2 Vorgehensweise	6
2.3 Betrachtungsrahmen	7
2.4 Weiterführendes Fazit und Kapitelüberleitung	10
<b>3 Schweißverzug und Schweißeigenspannungen</b>	<b>11</b>
3.1 Grundlagen	11
3.2 Entstehung und Entwicklung	11
3.3 Schweißverzug	13
3.3.1 Arten	13
3.3.2 Winkelverzug	14
3.3.3 Unklare Ursachen	16
3.4 Schweißeigenspannungen	18
3.4.1 Definition	18
3.4.2 Arten und deren Entstehung	19

3.4.3	Auswirkungen auf die Bauteilqualität	22
3.5	Wechselbeziehungen und Abhängigkeiten	23
3.5.1	Involvierte Größen und deren Zusammenhang	23
3.5.2	Einfluss des Einspanngrades	25
3.6	Weiterführendes Fazit und Kapitelüberleitung	31
<b>4</b>	<b>Reduktionsverfahren</b>	<b>33</b>
4.1	Allgemeines	33
4.2	Einteilung	33
4.3	Wirkprinzipien	35
4.4	Mechanische Verfahren	36
4.4.1	Allgemeines und Überblick	36
4.4.2	Verdichtungsstrahlen	36
4.4.3	Globales Strecken durch Zugvorspannen	39
4.4.4	Lokales Strecken durch Walzen	43
4.5	Thermische Verfahren	48
4.5.1	Allgemeines	48
4.5.2	Globales Strecken durch stationäre Wärmequellen und -senken	48
4.5.3	Lokales Strecken durch instationäre Wärmequellen und -senken	50
4.6	Weiterführendes Fazit und Kapitelüberleitung	56
<b>5</b>	<b>Handlungsbedarf</b>	<b>57</b>
5.1	Allgemeines	57
5.2	Defizite existierender Reduktionverfahren	57
5.2.1	Allgemeines	57
5.2.2	Mechanische Verfahren	58
5.2.3	Thermische Verfahren	61
5.3	Handlungsbedarf aufzeigendes Fazit und Kapitelüberleitung	62
<b>6</b>	<b>Methodik und Vorgehensweise</b>	<b>65</b>
6.1	Allgemeines und Überblick	65

---

6.2	Lokale Verzugskompensation	66
6.3	Temperaturfeldabhängige Eigenspannungsreduktion	69
6.4	Automatisierte Ermittlung optimaler Parameterwerte	71
6.4.1	Allgemeines und Überblick	71
6.4.2	Definition von Kompensationskriterien	75
6.4.3	Lokale Strukturanzapfung durch querschnittsweise Betrachtung	75
6.5	Weiterführendes Fazit und Kapitelüberleitung	77
<b>7</b>	<b>Erarbeitung der Kompensationskriterien</b>	<b>79</b>
7.1	Allgemeines und Überblick	79
7.2	Beschreibung kontinuumsmechanischer Zusammenhänge	80
7.2.1	Allgemeines	80
7.2.2	Lokale Verzerrungen und globale Biegung	81
7.3	Definition der Kompensationskriterien	90
7.4	Weiterführendes Fazit und Kapitelüberleitung	91
<b>8</b>	<b>Mechanismen zur Eigenspannungsreduktion</b>	<b>93</b>
8.1	Überblick	93
8.2	Reduktion transversaler Eigenspannungen	94
8.2.1	Modellvorstellung	94
8.2.2	Analyse der Einflussfaktoren	96
8.2.3	Synthese der Erkenntnisse	107
8.3	Reduktion longitudinaler Eigenspannungen	113
8.4	Kombination der Reduktionsmechanismen	114
8.5	Weiterführendes Fazit und Kapitelüberleitung	114
<b>9</b>	<b>Methode zur Verzugskompensation</b>	<b>117</b>
9.1	Allgemeines und Überblick	117
9.2	Einspannung und Lagerung der Fügeteile	117
9.3	Fokussierung der plastischen Bauteilreaktionen	118
9.4	Einleitung der Kompensationslast	122

9.5 Erzeugung und Positionierung der Kompensationslast	123
9.5.1 Andrückrollenbasiertes System	123
9.5.2 Alternative Systeme	125
9.6 Ermittlung der Lastmagnitude	125
9.6.1 Allgemeines	125
9.6.2 Kriterium zur Steuerung der Last	125
9.7 Weiterführendes Fazit und Kapitelüberleitung	129
<b>10 Methode zur Auslegung des Reduktionsprozesses</b>	<b>131</b>
10.1 Allgemeines und Überblick	131
10.2 Aufbau des Simulationsmodells	132
10.2.1 Einspannung	132
10.2.2 Andrückrolle	133
10.3 Aufbau des Kompensationsalgorithmus	133
10.3.1 Überblick	133
10.3.2 Zusammenhang der Module	135
10.3.3 Identifikationsmodul	138
10.3.4 Freistellungsmodul	140
10.3.5 Lastmodul	142
10.3.6 Vorgabe der Zeitschrittweite	143
10.3.7 Selektion der Ergebnisdaten	144
10.4 Integration von Struktursimulation, Kompensationsalgorithmus und Realsystem	145
10.5 Weiterführendes Fazit und Kapitelüberleitung	145
<b>11 Validierung der Methodik am Anwendungsbeispiel</b>	<b>147</b>
11.1 Allgemeines und Überblick	147
11.2 Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung	148
11.2.1 Allgemeines	148
11.2.2 Bauteilgeometrie und -werkstoff	148
11.2.3 Versuchsanordnung	149

---

11.2.4 Schweißwärmequelle	154
11.2.5 Winkelverzugsmessung	156
11.2.6 Festlegung der Versuchsparameter	156
<b>11.3 Modellierung und Simulation</b>	<b>158</b>
11.3.1 Allgemeines	158
11.3.2 FE-Netz	158
11.3.3 Randbedingungen	159
11.3.4 Werkstoff	160
11.3.5 Simulationsparameter	162
11.3.6 Kalibrierung	164
11.3.7 Modellvalidierung	164
<b>11.4 Validierung und Bewertung der Methode</b>	<b>168</b>
11.4.1 Allgemeines	168
11.4.2 Bestimmung des Kompensationszeitpunktes	168
11.4.3 Bestimmung der Kompensationslast	176
<b>11.5 Fazit</b>	<b>178</b>
<b>12 Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>179</b>
12.1 Zusammenfassung	179
12.2 Ausblick	181
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>183</b>
<b>Anhang</b>	<b>197</b>
A1 Begriffe und deren Bedeutungen	197
A2 Bedeutung der in Flussdiagrammen verwendeten Symbole	198
A3 Verwendeter Aufbau für die Validierungsversuche	199
A4 Verwendete Systemtechnik für die Validierungsversuche	199
A5 Verwendete Hardware und Software für die Simulationen	200
A6 Ermittlung des Spaltmaßes zur Einstellung der erforderlichen Einstspannkraft	200
A7 Ermittlung der Steifigkeit des Werkstückträgersystems	202

A8	Schriftliche Mitteilung von Dr.-Ing. Till Jochen Reinke	203
A9	Gegenüberstellung von gemessenen und berechneten Schweißeigenspannungen und transienten Verformungen	203
A10	Entwicklung der longitudinalen Eigenspannungshöchstwerte in Abhängigkeit der Bauteilabkühlung	206