

IV Inhaltsverzeichnis

I	Vorwort.....	I
II	Zusammenfassung	III
III	Abstract (English).....	VII
IV	Inhaltsverzeichnis	IX
V	Abbildungsverzeichnis	XIII
VI	Tabellenverzeichnis	XXIII
VII	Zeichen und Abkürzungen.....	XXV
VIII	Formelzeichenverzeichnis	XXIX
1	Einleitung.....	1
2	Stand der Forschung	9
2.1	Grundlagen der Umformung.....	9
2.1.1	Schmieden.....	11
2.1.2	Partielles Schmieden.....	14
2.1.3	Schmieden von Aluminiumlegierungen	21
2.1.4	Ver- und Entfestigungsmechanismen bei Aluminiumlegierungen	23
2.1.5	Untersuchte Schmiedelegerung	27
2.1.6	Grenzen des Schmiedens	32
2.2	Additive Fertigung.....	34
2.2.1	Auftragschweißen	36
2.2.2	Laserpulverauftragschweißen (LPA)	38
2.2.3	Lichtbogenauftragschweißen (WAAM)	46
2.2.4	Schweißimperfektionen von Aluminiumlegierungen	54
2.2.5	Grenzen des Auftragschweißens.....	59
2.3	Hybride Fertigungsverfahren mit additiver Fertigung.....	62

2.4	Zusammenfassung des Stands der Forschung	66
3	Zielstellung	69
4	Versuchsdurchführung	73
4.1	Bauteilgeometrie und Werkstoffe.....	74
4.2	Schmiedeprozess	77
4.3	Additive Fertigungsprozesse	80
4.3.1	Laserpulverauftragschweißen	80
4.3.2	Lichtbogenauftragschweißen	84
4.4	Mechanisch-technologische Prüfverfahren	87
4.4.1	Metallografie.....	89
4.4.2	Porosität	90
4.4.3	Härtemessung.....	90
4.4.4	Zugfestigkeit	91
4.5	Aufbau der Schmiedesimulation	93
4.6	Versuchsdurchführung des partiellen Schmiedens.....	95
4.7	Additive Ergänzung der Vorform.....	96
4.8	Darstellung der Steifigkeitssimulation	98
4.9	Bewertung der Prozesskombination	99
5	Ergebnisse Prozesskombination	101
5.1	Prozesskombination Schmieden + LPA EN AC-44200.....	104
5.1.1	Porosität	106
5.1.2	Metallografie.....	108
5.1.3	Härtemessung.....	111
5.1.4	Festigkeit.....	115
5.1.5	Wärmebehandlungen	117

5.1.6	Fazit Prozesskombination Schmieden + LPA EN AC-44200	118
5.2	Prozesskombination Schmieden + WAAM ER 4047	118
5.2.1	Porosität	120
5.2.2	Metallografie	121
5.2.3	Härtemessung	123
5.2.4	Festigkeit	126
5.2.5	Wärmebehandlungen	127
5.2.6	Fazit Prozesskombination Schmieden + WAAM ER 4047	129
5.3	Prozesskombination Schmieden + WAAM EN AW-6016	130
5.3.1	Porosität	131
5.3.2	Metallografie	132
5.3.3	Härtemessung	133
5.3.4	Festigkeit	135
5.3.5	Wärmebehandlungen	136
5.3.6	Fazit Prozesskombination Schmieden + WAAM EN AW-6016	137
5.4	Ergebnisse der Untersuchungen ER 5087	138
6	Ergebnisse Demonstrationsprozesskette	141
6.1	Einflussfaktoren für das partielle Schmieden	141
6.2	Ergebnisse partielle Schmiedesimulation	142
6.3	Auslegung der Werkzeuge	148
6.4	Partielles Schmieden des Grundkörpers	149
6.5	AM-Auftrag auf den Grundkörper	153
6.6	Steifigkeitssimulation	156
7	Auswertung	159
7.1	Darstellung der Verbesserung	159

7.1.1 Ressourceneffizienz..... 159

7.1.2 Energieeffizienz 161

7.1.3 Wirtschaftlichkeit..... 165

7.2 Ableitung von Richtlinien/Strategien..... 166

7.2.1 Partielles Schmieden..... 167

7.2.2 Additive Fertigung LPA-Verfahren..... 168

7.2.3 Additive Fertigung WAAM-Verfahren 169

7.3 Diskussion der Ergebnisse..... 170

8 Zusammenfassung 179

9 Dissertationsbezogene Veröffentlichungen..... 181

10 Literaturverzeichnis 183