III. Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung und Problemstellung 1

2 Stand der Wissenschaft und Technik 5

2.1 Temperierte Werkzeuge für Urformverfahren aus dem plastischen oder flüssigen Zustand . . . 5

2.1.1 Grundlagen eingesetzter Werkzeugstähle . . . 5

2.1.2 Spritzgießwerkzeuge und Heißkanalverteiler . . . 8

2.1.3 Druckgießwerkzeuge . . . 11

2.2 Beanspruchung von Spritz- und Druckgießwerkzeugen . . . 12

2.2.1 Thermische Beanspruchung und Temperierdesign . . . 12

2.2.2 Mechanische Beanspruchung, Verschleiß und Korrosion . . . 15

2.3 Vakuumwärmebehandlung von Werkzeugstählen . . . 18

2.3.1 Vakuumofentechnik . . . 18

2.3.2 Spannungsarmglühen . . . 21

2.3.3 Austenitisieren . . . 21

2.3.4 Härten, Vergüten . . . 24

2.3.5 Beschränkte Prozessgrößen und Bauteilverzug . . . 27

2.4 Fertigungsverfahren für Werkzeuge mit integrierten Kanalstrukturen 29

2.4.1 Kombinierte Hartlöt-/Wärmebehandlungsprozesse . . . 31

2.4.1.1 Etablierte Produktionsprozesse . . . 31

2.4.1.2 Forschungs- und Entwicklungsbestrebungen . . . 35

2.4.2 Diffusionsschweißen und TLP-Verfahren . . . 46

2.4.3 Additive Fertigung . . . 48

2.5 Werkstofftechnologische Grundlagen des Hartlötens . . . 50

2.5.1 Benetzungs- und Fließverhalten . . . 50

2.5.2 Erosion und Flüssigmetallversprödung . . . 53

2.5.3 Diffusionsmechanismen und Kirkendall-Effekt . . . 54

2.5.4 Erstarrungskinetik beim Schmelzlöten . . . 59

2.5.5 Defekte in Lötverbindungen . . . 61

2.5.6 Korrosion von Lötverbindungen . . . 65

2.6 Phasencharakteristik bei B- und Si-legierten Ni-Basislotwerkstoffen . 69

3 Anforderungsbezogene Werkstoffauswahl 85

3.1 Kategorisierung von Werkzeugstählen aus löt- und wärmebehandlungstechnischer Sicht . . . 85

3.2 Anforderungskriterien von Spritz- und Druckgießwerkzeugen 86
3.2.1 Mechanisch-technologische Qualitätsmerkmale 88
3.2.2 Prozesstechnologische Qualitätsmerkmale 89
3.3 Selektion und Charakterisierung von Werkzeugstählen und Lotwerkstoffen 90
3.3.1 K_1 – ZTA-kritische Werkzeugstähle 90
3.3.2 K_2 – ZTU-kritische Werkzeugstähle 93
3.3.3 K_3 – Stickstofflegierte Werkzeugstähle 96
3.3.4 K_4 – Hoch beanspruchte Werkzeugstähle im Druckguss 97
3.3.5 Potentiell geeignete und selektierte Lotwerkstoffe 99

4 Forschungshypothesen und Zielsetzung 109

5 Prozesstechnisches und analytisches Vorgehen 115
5.1 Prüfkörpergeometrie und Konditionierung der Fügeflächen 115
5.2 Hochvakuum-Ofenanlagen 116
5.3 Topographische Messungen, Vorbehandlung der Fügeflächen 117
5.4 Design kombinierter Hartlöt-/Wärmebehandlungsprozesse 118
5.5 Ultraschallprüfung 120
5.6 Metallographische Präparation der Prüfkörper 121
5.7 Makrohärteprüfung, Nanoindentation 123
5.8 Korngrößenanalyse 124
5.9 Differenz-Thermoanalyse 124
5.10 FE-Rasterelektronenmikroskopie mit energie- und wellenlängendispersiver Röntgenspektroskopie 125
5.11 Röntgendiffraktion zur Phasen- und Eigenspannungsanalyse 126
5.12 Quasi-statische und statisch-dynamische Festigkeitsprüfung 127
5.13 Kerbschlagbiegeversuche 129
5.14 Elektrochemische Korrosionsprüfung 130

6 Evaluation System A: Ni 620/Werkzeugstahl 133
6.1 Basisstudie zur Identifikation problematischer Systembereiche 133
6.1.1 Referenzzustände der wärmebehandelten Werkzeugstähle . . 133
6.1.2 Einfluss einer reduzierten Prozesstemperatur auf die Werkzeugstahl- und die Fügeverbundeigenschaften 135
6.1.2.1 Mikrostruktur der Fügeverbunde 136

6.1.2.2 Elastizitätsmodul und Mikrohärte 139
6.1.2.3 Fügeverbundfestigkeit und fraktographische Analyse 141
6.1.3 Zwischenfazit 144
6.2 Mikrostrukturelle Transformationen im Erwärmungs-/Haltesegment . 145
6.2.1 Werkzeugstahl 1.2343 145
6.2.2 Lotwerkstoff Ni 620 145
6.2.3 Zwischenfazit 148
6.3 Grenzflächenbasierte Mikrostrukturentwicklung 149
6.3.1 Analyse der Oberflächentopographien 149
6.3.2 Inkrementell geführte Analyse des Vakuumlötprozesses 152
6.3.2.1 Experimentelles Konzept und technologische Umsetzung 152
6.3.2.2 Ultraschallanalyse der Prüfkörper 154
6.3.2.3 Elektronenmikroskopische Analyse der Prüfkörper . 157
6.3.3 Metallurgisches Verständnismodell 172
6.3.4 Zwischenfazit 173
6.4 Ableitung und Validierung angepasster T, t-Profile 174
6.4.1 Differenz-Thermoanalyse am skalierten System 174
6.4.2 Mikrostruktur des Werkzeugstahles und der Fügeverbunde . . 176
6.4.3 Fügeverbundfestigkeit und fraktographische Analyse 177
6.4.4 Zwischenfazit 181
6.5 Fazit 182

7 Ergebnistransfer auf hoch beanspruchte Werkzeugstähle im Druckguss 183
7.1 Technologische Umsetzung für den Werkzeugstahl 1.2351 und das System Ni 620/1.2351 183
7.2 Einfluss der Haltezeit auf die Eigenschaften des Werkzeugstahles . . 184
7.3 Mikrostruktur der Fügeverbunde 185
7.4 Quasi-statische und statisch-dynamische Festigkeit der Fügeverbunde mit fraktographischer Analyse 186
7.5 Warmzähigkeit 189
7.6 Erweiterung des metallurgischen Verständnismodells 190
7.7 Fazit 192

8 Evaluation System B: Cu-X/Werkzeugstahl 195
8.1 Einfluss der Kühlgeschwindigkeit auf die Mikrostruktur und die Festigkeit der Werkzeugstähle . . . 195
8.2 Parameterstudie zum Einfluss des T, t-Profils auf das System CuGe10Ni0,25/1.2083 . . . 196
8.2.1 Experimentelles Konzept und technologische Umsetzung . . . 197
8.2.2 Mikrostruktur der Fügeverbunde . . . 198
8.2.3 Elastizitätsmodul und Mikrohärte . . . 205
8.2.4 Fügeverbundfestigkeit und fraktographische Analyse . . . 206
8.2.5 Zwischenfazit . . . 208
8.3 Erkenntnistransfer auf Fügeverbunde mit den Lotwerkstoffen CuGe12Ni0,25 und CuAu35 . . . 209
8.3.1 Experimentelles Konzept und technologische Umsetzung . . . 209
8.3.2 Mikrostruktur der Fügeverbunde . . . 210
8.3.3 Fügeverbundfestigkeit und fraktographische Analyse . . . 213
8.3.4 Potentiodynamische Analyse in wässrigen Medien . . . 216
8.3.4.1 Korrosionsverhalten in 3,0 %-iger NaCl-Lösung . . . 216
8.3.4.2 Korrosionsverhalten in 3,0 %-iger Na_2SO_4-Lösung . . . 218
8.3.5 Zwischenfazit . . . 220
8.4 Fazit . . . 221

9 Ergebnistransfer auf stickstofflegierte Werkzeugstähle 223
9.1 Technologische Umsetzung für das System CuGe12Ni0,25/M333 ISO-PLAST . . . 223
9.2 Mikrostruktur der Fügeverbunde . . . 223
9.3 Fügeverbundfestigkeit und fraktographische Analyse . . . 225
9.4 Fazit . . . 226

10 Diskussion zur Evaluation der Systeme A&B 227

11 Zusammenfassende Bewertung, Schlussfolgerung und Ausblick 233

Literaturverzeichnis 245

Anhang 281

Publikationsliste 291