

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung und Zielsetzung	1
2. Grundlagen zur Prozessweiterentwicklung	5
2.1. Das Kontaktelement Elektrodenkappe	6
2.1.1. Elektrodenkontaktfläche	9
2.1.2. Elektrodenwerkstoffe	10
2.1.3. Elektrodenherstellung	11
2.2. Bewerten der Verbindungsqualität	14
2.3. Verbindungsbewertung durch zerstörende Prüfung	16
2.4. Verbindungsbewertung durch zerstörungsfreie Prüfung	18
2.4.1. Merkblätter	20
2.4.2. Fachliteratur	21
2.5. Messwertgewinnung beim Widerstandspunktschweißen	26
2.5.1. Messen nichtelektrischer Größen	27
2.5.2. Messen elektrischer Größen	29
2.5.3. Umgang mit elektromagnetischen Einflüssen	31
2.5.4. Abschätzung von Messunsicherheiten	32
3. Stand der Wissenschaft zu Elektrodenverschleiß und Verschleißverständnis	35
3.1. Verschleißerscheinungen	36
3.1.1. Verschleißerscheinungen zwischen Cu(Cr)Zr-Elektroden und verzinkten Stählen	36
3.1.2. Verschleißerscheinungen zwischen dispersionsgehärteten Elektroden und verzinkten Stählen	38
3.1.3. Verschleißerscheinungen zwischen CuCr1Zr und 22MnB5+AS sowie zwischen W- bzw. Mo-Elektroden und verzinkten Stählen	38
3.2. Verschleißmechanismen	39
3.2.1. (Warm-)Verformung	40
3.2.2. Entfestigung	40
3.2.3. Diffusion	40
3.2.4. Abreißen der Grenzflächen	41

3.2.5. Thermisch induzierte mechanische Spannungen	41
3.3. Verschleißgrößen	41
3.3.1. Elektrodenkappen	42
3.3.2. Kühlung	43
3.3.3. Bleche	45
3.3.4. Kraft	47
3.3.5. Elektrischer Strom	48
3.3.6. Taktzeit	50
3.3.7. Auswahl von Prozessgrößen und Prozessparametern	52
3.4. Schlussfolgerungen aus dem Elektrodenkappenverschleiß	52
3.4.1. Prozessbedingungen	53
3.4.2. Elektroden	54
3.4.3. Kontaktbedingungen	56
3.4.4. Verständnis des Elektrodenverschleißes	56
4. Experimente zum Bewerten der Verbindungsqualität bei Standmengenversuchen	59
4.1. Randbedingungen bei Standmengenversuchen	59
4.2. Einsatz von Kenngrößen aus zerstörenden Prüfungen	61
4.3. Einsatz von Kenngrößen aus zerstörungsfreien Prüfungen	65
4.3.1. Magnetfeldprüfung	66
4.3.2. Elektrische Leitfähigkeitsprüfung	69
4.3.3. Thermographische Prüfung	70
4.3.4. Durchstrahlungsprüfung	72
4.3.5. Ultraschallprüfung	74
4.4. Festlegung auf eine charakteristische Größe aus Standmengenversuchen für Data-Mining-Analysen	80
5. Versuchsaufbau, -planung und -durchführung der Standmengen-Experimente	85
5.1. Versuchsaufbau	85
5.2. Versuchsplanung	87
5.2.1. Werkstoffauswahl - Bleche und Elektroden	87
5.2.2. Prozessparameterauswahl und Versuchsmatrix	90
5.3. Versuchsdurchführung	91
5.3.1. Wachstumskurven	92
5.3.2. Standmengen- und Stufenversuche	93
5.3.3. Verschleißdokumentation	94
5.3.4. Metallographische Analyse	99

6. Verschleiß und Standmenge von Standard-CuCr1Zr-Elektroden	105
6.1. Wachstumskurven und Versuchsmatrix	106
6.2. Standmengen	109
6.3. Verschleißdokumentation	113
6.3.1. Kontaktflächen-Geometrie	113
6.3.2. Kontaktflächen-Härte	118
6.3.3. Kontaktflächen-Legierung	119
6.4. Ergebnisdiskussion	123
7. Verschleißverringern durch modifizierte CuCr1Zr-Elektroden	127
7.1. Wachstumskurven und Versuchsmatrix	128
7.2. Standmengen	130
7.3. Verschleißdokumentation	133
7.4. Ergebnisdiskussion	138
8. Verschleißverringern durch dispersionsgehärtete Cu-Elektroden	141
8.1. Wachstumskurven und Versuchsmatrix	142
8.2. Standmengen	143
8.3. Verschleißdokumentation	146
8.3.1. Kontaktflächen-Geometrie	146
8.3.2. Kontaktflächen-Härte	148
8.3.3. Kontaktflächen-Legierung	148
8.4. Ergebnisdiskussion	151
9. Methodik zur Optimierung bzw. optimalen Auswahl von Elektrodenkappenwerkstoffen	153
10. Standmengenausnutzung und Elektrodenverschleißerkennung mittels Data-Mining	159
10.1. Definition Data-Mining und Auswahl eines geeigneten Teilgebietes	160
10.2. Verwandte Arbeiten	160
10.3. Aufbau und Durchführung des Data-Mining	162
10.3.1. Datenbasis	162
10.3.2. Datenauswahl und -bereinigung	163
10.3.3. Datenreduktion	165
10.3.4. Modellbildung und Auswahl relevanter Modelle	167
10.4. Ergebnisse des Data-Mining	168
10.5. Ergebnisdiskussion und Ausblick auf die Praxis	171
11. Zusammenfassung und Ausblick	173
Literatur	179

A. Anhang – Grundlagen	207
B. Anhang – Bewerten der Verbindungsqualität	215
C. Anhang – Versuchsaufbau, -planung und -durchführung	223
D. Anhang – Verschleiß und Standmenge von Standard-CuCr1Zr-Elektroden	227
E. Anhang – Verschleißverringierung durch modifizierte CuCr1Zr-Elektroden	231
F. Anhang – Verschleißverringierung durch dispersionsgehärtete Cu-Elektroden	233
G. Anhang – Data-Mining	235