

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	IV
Tabellenverzeichnis.....	IX
Formelzeichen und Abkürzungen.....	XI
Abstract.....	XXI
1. Einleitung.....	1
2. Aufgabenstellung und Zielsetzung.....	4
3. Stand der Technik.....	8
3.1 Widerstandspunktschweißen (RP).....	8
3.2 Elektrodenkappen.....	12
3.2.1 Elektrodenkappenverschleiß.....	13
3.3 Schweißanlagen.....	15
3.3.1 Stromformen.....	15
3.3.2 Schweißstromsteuerung.....	16
3.4 Stähle im Karosseriebau.....	18
3.4.1 Tiefziehstahl.....	19
3.4.2 Höher- und hochfeste Stähle.....	20
3.4.2.1 Thermo-mechanisch maßgeschneiderte Bauteile.....	22
3.4.3 Bruchverhalten.....	23
3.4.4 Eigenschaften der Schweißverbindung.....	24
3.4.5 Schweißbarkeit von Karosseriestählen in der Automobilindustrie.....	25
3.4.6 Poren, Lunker und Lunkerrisse.....	26
3.4.7 Funktionale Beschichtungen von Stählen.....	27
3.5 Prozessstörungen.....	28
3.6 Qualitätssicherung beim Widerstandspunktschweißen (RP).....	31
3.6.1 Anforderungen an die Punktschweißqualität.....	31
3.6.2 Prüfverfahren zur Bestimmung der Punktschweißqualität.....	33
3.6.2.1 Zerstörende Prüfung (Werkstattprüfung).....	33
3.6.2.2 Laborprüfverfahren.....	34
3.6.3 Zerstörungsfreie Prüfung.....	36
3.6.3.1 Ultraschall-Prüftechniken.....	38
3.6.4 Funktionen des Impuls-Echo-Verfahrens.....	39
3.6.5 Funktion des Durchschallungsverfahrens.....	40
3.7 Prüfbarkeit von Werkstoffen mit Ultraschall	41
3.7.1 Frequenz und Wellenart.....	42
3.7.2 Ultraschallerzeugung.....	42
3.7.3 Ausbreitung von Schallwellen.....	43
3.7.4 Polykristalline Stoffe.....	44
3.7.5 Schallwellen in isotropen Festkörpern.....	44
3.7.6 Reflexion und Brechung.....	45

II

3.7.7 Absorption von Ultraschall bei der Durchschallung.....	49
3.7.7.1 Messung der Ausbreitungseigenschaften von Ultraschall.....	50
3.8 Expertensysteme.....	52
3.8.1 Evolutionäre Algorithmen.....	52
3.8.2 Fuzzy-Logik.....	53
3.9 Grundlagen neuronaler Netze (nN).....	55
3.9.1 Neuron.....	57
3.9.2 Netzwerktopologien.....	59
3.9.3 Lernverfahren.....	61
3.9.4 Datenvorverarbeitung für neuronale Netze.....	66
3.9.4.1 Aufteilung der Datensätze.....	66
3.9.4.2 Auswahl und Skalierung der Variablen.....	66
3.9.5 Neuronale Backpropagation-Netzwerke (BPN).....	68
3.9.6 Verwendung unvollständiger oder fehlerhafter Datensätze.....	71
3.9.7 Erstellung eines Netzwerkprototypen.....	73
3.10 Neuro-Fuzzy.....	74
4. Versuchsvorbereitung, Versuchseinrichtungen und Versuchswerkstoffe.....	80
4.1 Versuchsvorbereitung.....	80
4.2 Versuchsschweißeinrichtungen.....	80
4.2.1 Strom- und Kraftskalierung.....	82
4.2.2 Ultraschall Signal und Skalierung.....	83
4.3 Versuchsmaterialien, Probenvorbereitung, Prüfung, Störgrößen.....	84
4.3.1 Beschichtetes Stahlfeinblech.....	84
4.3.2 Elektrodenkappen.....	86
4.3.3 Probenvorbereitung.....	86
4.4 Zerstörende Prüfungen.....	87
4.4.1 Prüfeinrichtung und Prüfverfahren.....	87
4.4.2 Bewertungen der Schweißqualität.....	87
4.5 Prozess-Störgrößen.....	88
5. Konzeption der automatisierten Datenverarbeitung	90
5.1 Auswahl der Prozesssignale.....	90
5.2 Erfassung und Aufbereitung der Prozessdaten.....	90
5.2.1 Schweißstrom und Elektrodenkraft.....	92
5.2.2 Ultraschall.....	93
5.2.3 Interpretation der Transmissionsverläufe.....	96
5.2.3.1 Charakteristische Kurvenverläufe.....	96
5.2.3.2 Interpretationen der Transmissionsverläufe bei Prozessstörungen.....	96
5.2.4 Datenvorverarbeitung.....	99
5.3 Gekoppelte Darstellung der Prozesssignale.....	102
5.4 Datenpräsentation für das neuronale Netz.....	107
5.5 Ermittlung und Optimierung der Netztopologie.....	107

5.5.1 Hybrides Modell beim RP.....	109
5.5.2 Kombinationslogik und Nachtraining.....	111
5.5.3 Normierungszeitpunkte.....	114
5.5.3.1 Schweißparameterverlauf.....	114
5.5.3.2 Transmissionsverlauf.....	114
5.6 Auswahl der geeigneten Netzart.....	115
5.7 Ermittlung der Eignung neuronaler Netze bei der Qualitätssicherung von beschichteten Stahlblechen unter fertigungsgerechten Bedingungen.....	117
5.7.1 Zwischenergebnis.....	121
6. Neuronale Netze beim RP in der Automobilindustrie	123
6.1 Grundlegende Einsatzmöglichkeiten.....	123
6.2 Mögliche Einsatzgebiete beim RP in der Automobilindustrie.....	125
6.2.1 Parameteroptimierung.....	125
6.2.2 Kombination von Technologien.....	126
6.2.3 Hybride Systeme.....	127
6.3. Hybrides Modell beim RP.....	131
6.4 Erstellung eines Netzwerkprototypen.....	133
6.5 Netzwerktraining.....	134
6.6 Vergleich der Leistungsfähigkeit	139
6.7 Stabilitätsuntersuchung.....	142
6.7.1 Lineare Verstimmung und linearer Offset.....	143
6.7.2 Ausfall eines Eingangsneurons.....	144
6.8 Vergleichbarkeit und Standardisierung von nN.....	145
6.9 Implementierung.....	146
6.9.1 Kenngrößen der Prozessführung.....	147
6.9.2 Stationäre Abweichung der Vorhersage.....	147
6.9.3 Gleichmäßigkeit der Vorhersage.....	148
6.10 Abschlussbetrachtung.....	149
6.10 Online-Modellierung.....	151
6.11 RP verzinkter Bleche mit neuronalen Netzen in der Automobilindustrie.....	153
6.11.1 Zusammenfassung der Ergebnisse.....	154
6.11.2 Diskussion der Ergebnisse.....	155
7. Zusammenfassung.....	158
8. Ausblick.....	161
Literaturverzeichnis.....	165
Appendices.....	187