Qualitätsüberwachung beim Widerstandspunktschweißen mittels mehrparametrischer Analyse

Dipl.-Ing. Miro Uran

Von der Fakultät V
„Verkehrs- und Maschinensysteme“
der Technischen Universität Berlin
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Ingenieurwissenschaften
genehmigte Dissertation

Berlin 2004
D 83

Qualitätsüberwachung beim Widerstandspunktschweißen mittels mehrparametrischer Analyse

von
Dipl.-Ing. Miro Uran
aus Ljubljana, Slowenien

Von der Fakultät V „Verkehrs- und Maschinensysteme“
der Technischen Universität Berlin
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)
genehmigte Dissertation

Promotionsausschuss:
Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. F.-L. Krause
Berichter: Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. L. Dorn
Berichter: Dr.-Ing. G. Weber

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 18.8. 2004

Berlin 2004
D 83

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand infolge meiner Tätigkeit an der Technischen Universität Berlin, als vom DAAD unterstützter Gastwissenschaftler an der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) Berlin und als Forscher am Institut für Schweißtechnik in Ljubljana.

Besonderen Dank möchte ich meinem Betreuer, Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. L. Dorn, Leiter des Fachgebiets Füge- und Beschichtungstechnik an der Technischen Universität Berlin, für seine wertvollen Anregungen und wohlwollende Unterstützung aussprechen.

Weiterhin danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. F.-L. Krause, Leiter des Fachgebiets Industrielle Informationstechnik an der Technischen Universität Berlin, für die Übernahme der Berichterstattung und Herrn Dr.-Ing. G. Weber, Leiter des Laboratoriums V.52 „Pressschweißverbindungen; Mechanisches Fügen“ an der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) Berlin, für die Übernahme der Berichterarbeit.

Allen Mitarbeitern des Laboratoriums V.52 und dem DAAD danke ich für die Möglichkeit, als Gastwissenschaftler mitgewirkt haben zu dürfen. Zur Überprüfung des Programms QP 2.0 verwendete ich mit freundlicher Genehmigung von Herrn Dr.-Ing. H. Preß einen Teil der in diesem Laboratorium durchgeführten Messungen aus den Jahren 1990–1993, an denen ich nicht teilnahm. Ihm und seinen Mitarbeitern gilt mein aufrichtiger Dank. Darüber hinaus möchte ich auch Herrn Prof. Dr.-Ing. H.-J. Krause, Dipl.-Ing. A. Berndt und Dipl.-Ing. P. Häberle sowie meinen Mitarbeitern in Berlin für ihre wertvolle Mithilfe meinen Dank aussprechen**.**

Mein Dank gilt ebenfalls Herrn Prof. Dr.-Ing. P. Štular vom Institut für Schweißtechnik in Ljubljana, der mir die Spezialisierung auf dem Gebiet des Widerstandsschweißens ermöglicht und mich stets als Mentor und Fachmann unterstützt hat.

Mein Dank gilt ebenfalls den Mitarbeitern des Instituts für Schweißtechnik in Ljubljana, an dem ich meine Arbeit abgeschlossen habe, vor allem Herrn Direktor Doz. Dr.-Ing. G. Rihar, Prof. Dr.-Ing. J. Tušek, Ing. A. Bon, A. Brezovnik und A. Klemenc.

Herrn Doz. Dr.-Ing. I. Polajnar von der Fakultät für Maschinenbau der Universität in Ljubljana geht mein besonderer Dank für die detaillierten sowohl inhaltlichen als auch stilistischen Korrekturen.

Mein Dank geht auch an Herrn Dipl.-Germ. Borut Novinec für seine Unterstützung bei der Verfassung der deutschsprachigen Version.

Abschließend danke ich meiner Familie für ihr Verständnis, ihre Unterstützung und Geduld.

Ljubljana, im März 2004 Miro Uran

Miro Uran: Qualitätsüberwachung beim Widerstandspunktschweißen mittels mehrparametrischer Analyse

Zusammenfassung

In der Dissertation wird ein neues Verfahren zur Überwachung der Qualität beim Widerstandspunktschweißen vorgestellt. Die Besonderheit dieses Verfahrens ist die Verbindung verschiedener mathematischer und nummerischer Methoden, deren Grundlage ein selbstlernender Merkmalsraum mit einer dynamischen Anzahl von Dimensionen und Merkmalen am Eingang ist. Als Vorbereitung der Eingabedaten kommen Prinzipien zur Anwendung, die aus dem mathematischen Modellieren physikalischer Prozesse während des Widerstandspunktschweißens bekannt sind. Zu diesem Zweck wurden Messungen des Schweißstroms, der Schweißspannung, der Elektrodenkraft, des Elektrodenhubs und der Elektrodenbeschleunigung während des Schweißens durchgeführt. Ferner wurden diese Kenngrößen nach dem Schweißen einer Wahrscheinlichkeitsanalyse mit dem Schweißpunktdurchmesser unterzogen. Bei der Verknüpfung der Eingänge mit den Zuständen und den Ausgabeparametern wurde vom Prinzip der nichtkorrelierenden Verknüpfung aller Eingänge mit allen Knoten und von einer Feed-back-Optimierung der Parameter Gebrauch gemacht. Das verwendete Selbstlernverfahren entspricht dem Künstlicher Neuronaler Netze. Die Grundlage für die Entscheidung im Merkmalsraum bildet die Korrelationsanalyse mit dem Qualitätsparameter (Schweißpunktdurchmesser).

Ein Computerprogramm wurde ausgearbeitet und vorgestellt, welches das beschriebene Verfahren ausführt.

In der Überprüfungsphase sind für den Fahrzeugbau typische Punktschweißverfahren zur Anwendung gekommen. Das Ergebnis des vorgestellten Verfahrens ist die Kombination der Überwachungsparameter im mehrdimensionalen rechteckigen Raum mit optimierten, scharf definierten Grenzen für jede einzelne Versuchsreihe. Des Weiteren wurde eine Wahrscheinlichkeitsanalyse der einzelnen Parameter und Räume mit dem Qualitätsparameter durchgeführt. Ferner wurde die notwendige Anzahl der Überwachungsparameter analysiert und miteinander verglichen.

Miro Uran: Quality Control in Resistance Spot Welding by means of Multiparametric Analysis

Abstract

A new principle of quality control in resistance spot welding is presented. A peculiarity of the principle is that it combines different mathematical and numerical methods. It is based on a learning state-space including a dynamic number of phases and dimensions at the input. Principles applied to mathematical modelling of the events occurring in the course of resistance spot welding serve as a basis for an advance preparation of the input data. The measurements of input data, i. e. a welding current, a welding voltage, a electrode force, electrode accelerations and paths during welding, and a diameter of the weld spot for a correlation analysis after welding were performed. In combining the inputs with the states and the output parameters the principle of uncorrelated combination of all the inputs with all the knots and that of feed-back optimization of dimensions were employed. The process of self-learning is taken from the methods of artificial neural networks. A basis of decision-making in a network is a correlation analysis with the quality parameter (nugget diameter).

A computer program employing the method described has been elaborated and described.

The testing process employed practical cases typical of the automobile industry. This resulted in a combination of control parameters in a multi-dimensional rectangular space with optimized, strictly determined limits separately for each testing series. Correlation and probability analyses of individual parameters and spaces with the quality parameter were accomplished. An analysis of the required number of control parameters and a comparative analysis of the latter are treated as well.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort ... 2
Zusammenfassung ... 3
Inhaltsverzeichnis ... 5
Liste von Symbolen und Abkürzungen ... 7
1. Einführung und Beschreibung der Zielsetzung ... 10
1.1 Einführung ... 10
1.2 Zielsetzung der Forschungsarbeit ... 11
2. Stand der Forschung zur Qualitätsüberwachung beim Widerstandspunktschweißen ... 12
2.1 Gewährleistung der Qualität von Punktschweißungen ... 12
2.1.1 Auswahl geeigneter Schweißparameter ... 13
2.1.2 Gewährleistung der Reproduzierbarkeit von Schweißbedingungen ... 18
2.1.3 Überwachung der Schweißparameter während des Schweißens ... 18
2.2 Parametrische Analyse beim Widerstandspunktschweißen ... 19
2.2.1 Aktueller Kenntnisstand zur Prozessanalyse beim Widerstandspunktschweißen ... 19
2.2.2 Schweißstrom ... 23
2.2.3 Schweißspannung ... 27
2.2.4 Dynamischer Widerstand ... 31
2.2.5 Elektrodenkraft ... 36
2.2.6 Elektrodenbeschleunigung ... 37
2.2.7 Elektrodenhub ... 37
2.2.8 Qualitätsparameter ... 38
2.2.9 Andere Parameter ... 39
2.3 Mathematische Parameteranalyse ... 39
2.3.1 Mathematisches Modellieren ... 39
2.3.2 Standardmethoden der Statistik ... 42
2.3.3 Analyse mittels Fuzzy-Logik und Fuzzy-Klassifikation ... 43
2.3.4 Analyse mittels Künstlicher Neuronaler Netze ... 45
2.3.5 Mehrparametrische Analyse mittels Optimierung der Eingangsparameter im Zustandsraum ... 48
2.3.6 Kombinierte Methoden ... 50
2.3.7 Echtzeit-Prozessanalyse ... 51
3. Versuchsdurchführung ... 52
3.1 Versuchsplanung ... 52
3.1.1 Auswahl der Versuchsvorrichtung ... 52
3.1.2 Versuchswerkstoff ... 56
3.1.3 Versuchsparameter ... 58
3.2 Messmethoden ... 59
3.3 Durchgeführte Messungen ... 60
3.4 Bestimmung der Qualitätsparameter ... 61
3.5 Auswahl der Analyseparameter ... 68
3.5.1 Aus dem Schweißstrom gewonnene Analyseparameter ... 69

3.5.2 Aus der Schweißspannung gewonnene Analyseparameter 73
3.5.3 Aus der Schweißspannung und dem Schweißstrom gewonnene Analyseparameter 75
3.5.4 Aus dem Elektrodenabstand und der Elektrodenbeschleunigung gewonnene Analyseparameter 77
3.5.5 Aus der Elektrodenkraft gewonnene Analyseparameter 78
3.6 Bestimmung der mathematischen Methode 79
4. Programmteil der Aufgabe 84
4.1 Definitionen und Eigenschaften eines Algorithmus 86
4.1.1 Strukturiertes Planen 86
4.1.2 Top-down-Design 86
4.1.2.1 Erster Programmentwicklungsschritt 87
4.1.2.2 Zweiter Programmentwicklungsschritt 89
4.1.2.3 Dritter Programmentwicklungsschritt 92
4.1.2.4 Vierter Programmentwicklungsschritt 93
4.2 Programmeigenschaften 98
4.2.1 Zuverlässigkeit 98
4.2.2 Effizienz 98
4.2.3 Flexibilität und Portabilität 99
4.2.4 Verständlichkeit 99
4.3 Kodierung 100
4.4 Fehlerbehebung 100
4.5 Überprüfung 101
4.6 Beschreibung des Programms zur Schweißqualitätsprognose 101
5. Analyseergebnisse der gemessenen Parameter und Überprüfung der Methode 103
5.1 Statistische Analyse 103
5.1.1 Schweißprozessanalyse bei nichtkonstantem Schweißstrom 104
5.1.2 Schweißprozessanalyse bei nichtkonstanten Elektrodenbedingungen 108
5.2 Vergleich der Anwendbarkeit verschiedener Parameter 113
5.2.1 Parameteranalyse von Schweißungen bei nichtkonstantem Schweißstrom 115
5.2.2 Parameteranalyse von Schweißungen bei nichtkonstanten Elektrodenbedingungen 119
5.3 Auswahl optimaler Eingangsparameter im Merkmalsraum 130
5.4 Aussichten der Übertragung der Methode in die Praxis 135
6. Zusammenfassung 137
Verzeichnis der Abbildungen und Tabellen 140
Schrifttum 143
Lebenslauf 156

Liste von Symbolen und Abkürzungen

I_s	Schweißstrom	[A]
t_s	Schweißzeit	[ms]
d_p	Schweißpunktdurchmesser	[mm]
a	Elektrodenbeschleunigung	[m/s^2]
x_o	oberer Elektrodenabstand	[mm]
x_u	unterer Elektrodenabstand	[mm]
x	Elektrodenhub	[mm]
F_e	Elektrodenkraft	[N]
U_e	Spannung zwischen den Elektroden	[V]
R_G	Gesamtwiderstand des Schweißstromkreises	[µΩ]
R_i	Teilwiderstand des Schweißstromkreises	[µΩ]
$R1$	Kontaktwiderstand zwischen der Elektrode und dem Oberblech	[µΩ]
$R2$	Stoffwiderstand des Oberblechs	[µΩ]
$R3$	Kontaktwiderstand zwischen den beiden Blechen	[µΩ]
$R4$	Stoffwiderstand des Unterblechs	[µΩ]
$R5$	Kontaktwiderstand zwischen dem Unterblech und der Elektrode	[µΩ]
T_m	Spitzentemperatur	[ºC]
$\hat{I}$	Strom-Höchstwert	[A]
$\bar{I}$	durchschnittlicher Stromwert	[A]
I_{eff}	Effektivstromwert	[A]
$\hat{U}$	Spannungs-Höchstwert	[V]
$\overline{U}$	durchschnittlicher Spannungswert	[V]
U_{eff}	Effektivspannungswert	[V]
R_d	durchschnittlicher Widerstandswert	[µΩ]
R_e	Effektivwiderstandswert	[µΩ]
R_p	Höchstwiderstandswert	[µΩ]
f_t	Scheitelfaktor	[]
f_o	Formfaktor	[]
R_{BT}	temperaturabhängiger Widerstand	[µΩ]
R_k	Kontaktwiderstand bei Ausgangstemperatur	[µΩ]
α	Temperaturkoeffizient	[ºC]
ΔT	Temperaturdifferenz	[ºC]
Q_{ZU}	zugeführte Wärmemenge	[J]
Q_V	Verlustwärmemenge	[J]
Q_{VE}	durch die Elektroden abgeleitete Verlustwärmemenge	[J]
Q_{VB}	durch das Werkstück abgeleitete Verlustwärmemenge	[J]
Q_{VS}	durch Wärme- und Lichtstrahlung entstehende Verlustwärmemenge	[J]
Q_W	Wirkwärmemenge zur Erzeugung der Schweißlinse	[J]
η	Wirkungsgrad zur Erzeugung der Schweißlinse	[%]
m	Masse	[kg]
s	Blechdicke	[mm]
ω	Kreisfrequenz des Stromkreises	[Hz]
α	Zündwinkel	[º]
R_{el}	Ohmscher Widerstand zwischen den Elektroden	[µΩ]
U_{20}	Leerlaufspannung	[V]
t_1	Zeit vom Einschalten des Thyristors an	[ms]
R_M	innerer Widerstand der Maschine	[µΩ]
Ke	Wärmeleitfähigkeit der Elektroden	[W/m.ºK]
K	Wärmeleitfähigkeit des Werkstücks	[W/m.ºK]
d	Kontaktflächendurchmesser zwischen dem Werkstück und der Elektrode	[mm]
T	Temperatur	[ºC]

v	Spannung zwischen den Werkstückoberflächen	[V]
h_t	Gesamtdicke des Werkstücks	[mm]
$f(d/h)$	Korrekturfaktor der Stromdichte	[]
h	Werkstückdicke	[mm]
ψ	Ausgangssignal	[]
ξ	Eingangsparameter	[]
τ	Eingangsgewicht	[]
σ	Aktivierungsfunktion	[]
VP	Schwellenwert	[]
u	Eingangsdaten des Zustandsraums	[]
y	Reaktion des Zustandsraums	[]
X	Zustandsvektor	[]
A, B, C, D	Matrizen des Zustandsraums	[]
$\underline{x}(n)$	Länge des n-ten Zustandsvektors in der diskreten Zeit n	[]
$\underline{u}(n)$	Eingangsvektor	[]
$\underline{y}(n)$	Ausgangsvektor	[]
d	Schweißpunktdurchmesser	[mm]
d_1	Schweißpunktdurchmesser quer zum Prüfstück	[mm]
d_2	Schweißpunktdurchmesser längs zum Prüfstück	[mm]
u_R	induzierte Spannung einer Rogowski-Spule	[V]
u_s	durch elektromagnetische Felder verursachte Störungen	[V]
K_R	Spulenkonstante	[mV/kA]
u_c	Spannung am Kondensator des RC-Glieds	[V]
v_{aus}	Ausgangsspannung	[V]
v_{ein}	Eingangsspannung	[V]
Δt	Zeit zwischen zwei nacheinander gemessenen Prüfstücken	[ms]
N	Anzahl der Prüfstücke	[]
φ	Phasenverschiebung	[°]
φ_s	durch Abtastung bedingte Phasenverschiebung	[°]
φ_i	Phasenverschiebung (gesamt)	[°]
φ_{in}	durch Integration verursachte Phasenverschiebung	[°]
I_{1max}	Höchststromwert bei der 1. Halbwelle	[A]
I_{11}	Höchststromwert bei der 11. Halbwelle	[A]
I_{12}	Höchststromwert bei der 12. Halbwelle	[A]
I_{16}	Höchststromwert bei der 16. Halbwelle	[A]
U_{1max}	Höchstspannungswert bei der 1. Halbwelle	[V]
β_{R46}	Tangentensteigung am Widerstandsmaximum der 4. und 6. Halbwelle	[tgφ]
β_{R57}	Tangentensteigung am Widerstandsmaximum der 5. und 7. Halbwelle	[tgφ]
A_{Rmax}	Fläche zwischen dem höchsten Widerstandswert und dem 2. Teil des Schweißprozesses	[µΩ.ms]
R_0	Widerstand der 1. Halbwelle	[µΩ]
R_{k11}	Widerstand der 11. Halbwelle	[µΩ]
R_{k12}	Widerstand der 12. Halbwelle	[µΩ]
R_{k16}	Widerstand der 16. Halbwelle	[µΩ]
R_{max}	höchster Widerstandswert im 2. Teil des Schweißprozesses	[µΩ]
t_m	Halbwelle mit dem höchsten Widerstandswert im 2. Teil des Schweißprozesses	[hw]
$\overline{R}\ (HW)$	Mittelwert des dynamischen Widerstands bei einer bestimmten Halbwelle	[µΩ]
HW	Halbwelle bei 50 Hz	[10 ms]
R_t	Transformatorwiderstand	[µΩ]
R_S	Sekundärwiderstand	[µΩ]
R_T	Ohmscher Transformatorwiderstand	[µΩ]
R_S	Ohmscher Widerstand der Zuführungskabel	[µΩ]
R_b	Ohmscher Widerstand zwischen den Werkstücken	[µΩ]
X_t	Transformatorinduktivität	[H]
X_S	Impedanz des sekundären Stromkreises	[H]
U_2	Ausgangsspannung des Transformators	[V]

U_b	am Werkstück anliegende Spannung	[V]
A	Fensterfläche	[m^2]
U_1	Primärspannung	[V]
U_L	Spannungsabfall an der Spule	[V]
U_R	Spannungsabfall an der Wirklast	[V]
I_L	Strom durch die Spule	[A]
I_R	Strom durch die Wirklast	[A]
P	Wirkleistung	[W]
Q	Blindleistung	[VA]
S	Scheinleistung	[VA]
P_T	Wirkleistungsverluste im Trafo	[W]
P_S	Wirkleistungsverluste im Sekundärkreis	[W]
P_B	Widerstandserwärmung des Schweißpunktes	[W]
Q_T	Blindleistungsverluste im Trafo	[VA]
Q_S	Blindleistungsverluste im Sekundärkreis	[VA]
Q_k	Blindleistung	[kVA]
S_{Pmax}	Höchstwert der Wirkleistungskomponente	[kW]
S_{Srms}	Effektivwert der Gesamtleistung	[kVA]
X_1	Elektrodenabstand von der 1. bis zur 16. Halbwelle	[mm]
X_2	Elektrodenabstand von der 6. bis zur 16. Halbwelle	[mm]
F_1	Integral der Elektrodenbeschleunigung von der 1. bis zur 16. Halbwelle	[m/s]
F_2	Integral der Elektrodenbeschleunigung von der 6. bis zur 16. Halbwelle	[m/s]
G_i	Gewichtung	[]
K_{dp}	durchschnittliche Wahrscheinlichkeit	[]
$P_1, \ldots, P_n$	Parametergrenzen	[]

BAM	Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung
IIW	International Institute of Welding
EVS	elektrolytisch verzinktes Stahlblech
FVS	feuerverzinktes Stahlblech
UBS	unbeschichtetes Stahlblech
CRS	C-Roboterschweißzange
OFS	ortsfeste Punktschweißmaschine
VST	ortsfeste Punktschweißmaschine VST 40
DKD	Deutscher Kalibrierdienst

1. Einführung und Beschreibung der Zielsetzung

1.1 Einführung

Beim Widerstandspunktschweißen ist man bereits seit Jahren bestrebt, die Überprüfbarkeit der Qualität von Punktschweißungen zu gewährleisten. Ziel dieser Bestrebungen ist die Entwicklung von Prozesskontrollern, die mittels einer Feedback-Schleife den Schweißprozess steuern. Aufgabe dieser Kontroller ist die Bestimmung der optimalen Schweißparameter für jeden Schweißpunkt und deren Überwachung sowie Optimierung während des Schweißprozesses. Nach erfolgtem Schweißen sollen diese Steuerungen für jeden einzelnen Schweißpunkt eine Information über die erfolgten Messungen und die voraussichtliche Schweißpunktqualität angeben und abspeichern.

Die Probleme der Schweißprozessanalyse liegen in der hohen Prozessdynamik. Der Großteil der Punktschweißungen wird in Zeiten zwischen 60 und 200 ms durchgeführt, sodass für die Datenauswertung und die Reaktion der Steuerung nur einige Hundertstelsekunden bleiben. Neben der überaus geringen für die Analyse zu Verfügung stehenden Zeit ist man des Weiteren mit dem Problem des komplexen physikalischen Prozesses der Schweißpunktbildung und der großen Anzahl von Eingangsparametern (über 70) konfrontiert. Aus diesem Grund ist es auch heute noch nicht möglich, den Schweißprozess zur Gänze mathematisch zu modellieren oder ein System zur universellen Überwachung der Schweißqualität auszuarbeiten.

Seit einigen Jahren ist es bereits möglich, gleichzeitig mehrere Prozessparameter zu analysieren. Hierbei kommen Methoden auf Grundlage der Künstlichen Intelligenz, wie z. B. Künstliche Neuronale Netze, die Fuzzy-Logik, Zustandsräume oder deren Kombination, zur Anwendung. Bei diesen Methoden werden Signale aus einer immer größeren Anzahl von Sensoren als Eingangsparameter verwendet. Parameteranalysen ohne vorhergehende Überprüfung der Eingangsparameter mittels verschiedener Blackbox-Verfahren liefern zwar für die Prozessüberwachung geeignete Ergebnisse, die für die Untersuchung der physikalischen Prozesseigenschaften jedoch ungeeignet sind.

1.2 Zielsetzung der Forschungsarbeit

Hauptziel der Dissertation ist die Ausarbeitung eines neuen Verfahrens zur Überwachung der Qualität beim Widerstandspunktschweißen. Die Besonderheit dieses Verfahrens ist die Verbindung verschiedener mathematischer und nummerischer Methoden, deren Grundlage ein selbstlernender Merkmalsraum mit einer dynamischen Anzahl von Dimensionen und Zuständen ist. Die Eingabedaten werden nach Prinzipien bearbeitet, die aus dem mathematischen Modellieren von Widerstandspunkt-schweißprozessen bekannt sind. Zu diesem Zweck wurden Messungen des Schweißstroms, der Schweißspannung, der Presskraft, des Elektrodenhubs und der Elektrodenbeschleunigung während des Schweißens sowie zur Wahrscheinlichkeitsanalyse verschiedener Parameter in Abhängigkeit vom Schweißpunktdurchmesser nach dem Schweißen durchgeführt.

Das zweite Kapitel der Dissertation beschreibt die physikalischen Grundlagen des Widerstandspunktschweißens, vor allem jene, die für die in der Dissertation durchgeführten praktischen Versuche von Bedeutung sind oder welche die Ergebnisse der durchgeführten Messungen erklären.

In Kapitel 3 werden die Versuchplanung und -durchführung, die mathematischen Analysen beim Widerstandsschweißverfahren sowie die Merkmalsraum-Theorie beschrieben. Weiterhin werden in diesem Kapitel die verwendeten statistischen Methoden erklärt.

Des Weiteren wurde ein Programm ausgearbeitet, das auf Grundlage des Merkmals-raums und der Entscheidungsbaum-Theorie selbstständig ein Korrelationsmodell zwischen der Schweißpunktqualität und der optimalen Kombination der Kontrollparameter bestimmt. Bei der Verknüpfung der Eingänge mit den Zuständen und den Ausgabeparametern wurde vom Prinzip der nichtkorrelierenden Verknüpfung aller Eingänge mit allen Knoten und von einer Feed-back-Optimierung der Dimensionen Gebrauch gemacht. Das verwendete Selbstlernverfahren entspricht dem Künstlicher Neuronaler Netze. Die Grundlage für die Entscheidung im Netz bildet die Wahrscheinlichkeitsanalyse mit dem Qualitätsparameter.

Während der Modellierung des beschriebenen Systems ist die statistische Analyse einer ausreichenden Anzahl von Beispielen für das Selbstlernen des Systems unumgänglich. Infolge dessen wurden in Kapitel 5 alle 20 Kontrollparameter einer vergleichenden Bewertung unterzogen.

Abschließend wurde der Gebrauchswert der gewonnenen Ergebnisse einer Bewertung unterzogen sowie ein Simulator ausgearbeitet und beschrieben, mit dessen Hilfe die gewonnenen mathematischen Modelle an neuen Punktschweißungen überprüft werden können.

2. Stand der Forschung zur Qualitätsüberwachung beim Widerstandspunktschweißen

In diesem Kapitel werden die allgemeinen Bedingungen vorgestellt, die bei der Versuchsdurchführung berücksichtigt wurden – sowohl bezüglich der Einstellung der Schweißparameter als auch bezüglich der Gewährleistung der Reproduzierbarkeit und der Überwachung der Schweißbedingungen während des Schweißprozesses. Des Weiteren werden auch die Anforderungen und Möglichkeiten bei der Durchführung der Parameteranalyse bearbeitet und die entsprechenden Trends auf diesem Gebiet beschrieben.

2.1 Gewährleistung der Qualität von Punktschweißungen

Beim Schweißen verschiedener Metalle wird der Schweißzone ständig Energie zugeführt, die den Werkstoff zum Schmelzen bringt. Die Energiezufuhr kann hierbei auf verschiedene Arten erfolgen, und zwar durch eine Flamme, durch mechanische Energie, Licht, mittels chemischer Verfahren oder durch elektrische Energie. Letztere wird dem Werkstück mittels eines Elektronenstrahls, eines Lichtbogens oder durch einen unmittelbar durch den Werkstoff fließenden elektrischen Strom – wie beim Widerstandsschweißen – zugeführt.

Bei der Auswahl des adäquaten Schweißverfahrens werden in der Regel nachstehende Kriterien berücksichtigt [1-1]:

- die Schweißeignung des Werkstoffes und die verlangten mechanischen Eigenschaften der Schweißverbindung,
- die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens,
- die Zugänglichkeit der Ausrüstung,
- Möglichkeiten der Automatisierung,
- das benötigte Personal und
- Einflüsse auf die Umwelt.

Das Widerstandsschweißen kommt in verschiedenen Wirtschaftszweigen zur Anwendung – vom Baugewerbe, über die Herstellung von Haushaltsgeräten, der Fahrzeug- und Flugzeugindustrie bis zur elektrotechnischen Industrie. Auf Grund seiner großen Verbreitung in verschiedenen Wirtschaftszweigen hat dieses Schweißverfahren einen hohen Automatisierungs- und Robotisierungsgrad erreicht, weshalb die Überprüfung der Schweißqualität immer mehr auf automatischem Wege erfolgt.

In Bezug auf den Ort und die Art der zugeführten Energie unterscheidet man weitgehendst zwischen nachfolgenden Varianten des Widerstandsschweißens [1-2]:
- dem Widerstandspunktschweißen,
- dem Buckelschweißen,
- dem Rollennahtschweißen,
- dem Pressstumpfschweißen und
- dem Abbrennstumpfschweißen.

Bei allen zuvor angeführten Varianten wird eine gleich bleibende Schweißqualität erreicht durch:
- die Auswahl geeigneter Schweißparameter,
- die Gewährleistung möglichst konstanter Schweißparameter,
- die Überwachung und Erfassung der Schweißparameter während des Schweißens sowie
- eine ständige Qualitätskontrolle.

2.1.1 Auswahl geeigneter Schweißparameter

Die Einflüsse der einzelnen Prozessparameter sind bereits vor Beginn der Analyse zu bestimmen. Denn während des Schweißprozesses können sich nichtüberwachte Schweißparameter als unbekannte Störgrößen stochastisch mit anderen Parametern verbinden und somit zu einer Verfälschung des Endmodells führen.

Die Prozessparameter werden in der Regel in elektrische und mechanische Einflussgrößen unterteilt, wohingegen in dieser Dissertation die Prozessparameter in aktive und passive Parameter unterteilt worden sind. Bei den aktiven Parametern handelt es sich um direkte, mittels der Steuerung einstellbare Parameter, die während des Prozesses auch gemessen und abgespeichert werden. Die passiven Parameter werden indes indirekt durch die Auswahl der Werkstoffe, der Elektroden, durch die Art der Kühlung, die Geometrie, die ausgewählten Schweißmaschinen, etc. bestimmt.

Folglich zählen zu den aktiven Parametern:
- die Schweißstromstärke und -form,
- die Schweißspannung,
- der Schweißelektrodenzustand und
- die Elektrodenkraft.

Die übrigen Schweißparameter sollen bei allen Messungen einer Versuchsreihe möglichst konstant bleiben und werden infolge dessen als passive Parameter bezeichnet.

Für jede einzelne Schweißung können mehrere verschiedene geeignete Schweißparameterkombinationen ausgewählt werden, wobei alle oben angeführten Schweißparameter zu berücksichtigen sind. Diese Kombinationen können in einem mehrdimensionalen Raum beschrieben werden, dessen Achsen durch einzelne Parameter definiert werden. Zahlreiche Autoren führen als Approximation einen Raum mit drei Achsen an – den Schweißstrom, die Schweißzeit und die Elektrodenkraft, wobei bei einer genaueren Analyse auch ein Raum mit mehreren zehn Parametern möglich wäre.

Für die häufigsten Schweißarbeiten stehen Tabellen mit empfohlenen Schweißparametern zur Verfügung, die auf empirischen Erfahrungswerten basieren. Im Fall atypischer Bauteile, Schweißmaschinen oder anderer bedeutender Parameter sind daher diese Parameter selbst zu bestimmen. Diese sind darauf derart zu optimieren, dass bei einer zufrieden stellenden Schweißpunktqualität möglichst große Abweichungen der Eingangsparameter zulässig sind.

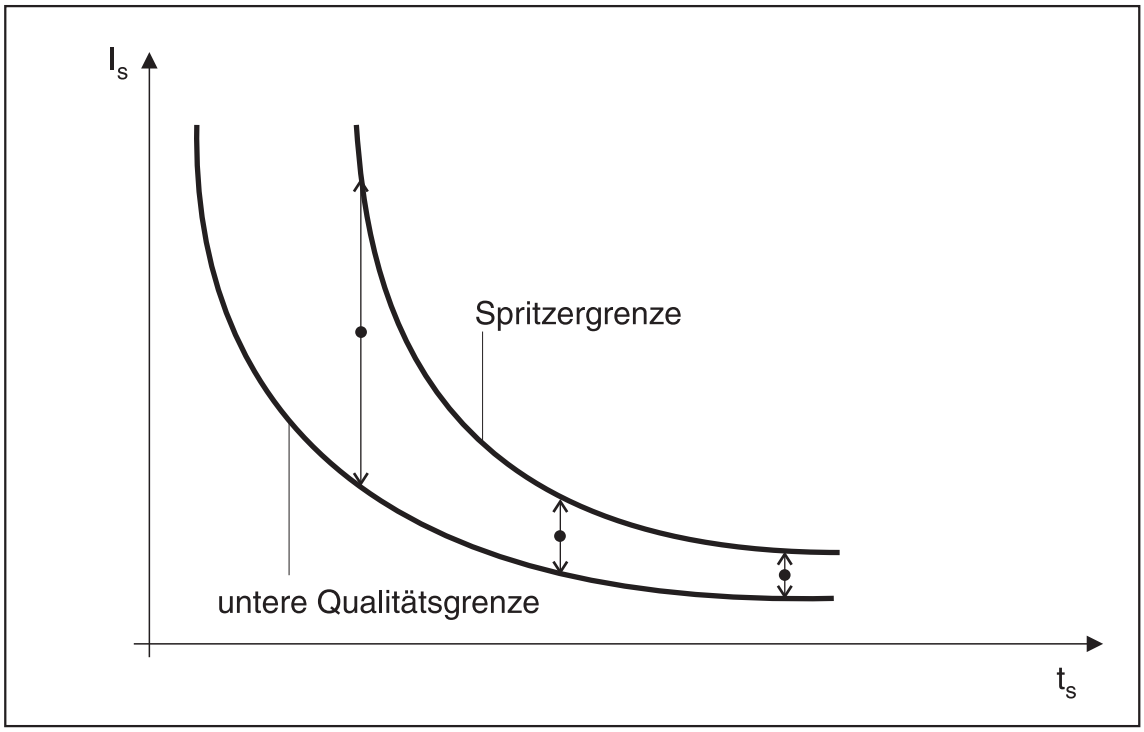

Bild 2.1: Zulässige Schweißstromabweichungen.

Die Schweißeignung der ausgewählten Parameterkombination kann am einfachsten derart festgestellt werden, dass jeweils nur ein Parameter verändert wird. Auf Grund des großen Einflusses und der überaus einfachen Einstellbarkeit handelt es sich hierbei in der Regel um den Strom. Hierauf folgt das Schweißen einer Punktfolge von einem den Mindestqualitätsanforderungen erfüllenden Punkt, bei dem die Untergrenze des Stroms bestimmt wird, bis zur dessen Obergrenze infolge Spritzerbildung oder unzulässiger

Deformation des Werkstoffes. Auf Grund der Differenz zwischen den so ermittelten Grenzwerten (siehe Bild 2.1) ist es möglich, die Verlässlichkeit des Verfahrens zu bestimmen.

Bei kurzen Schweißzeiten ist zu berücksichtigen, dass eine Änderung der Schweißzeit einen großen Einfluss auf die Qualität der Punktschweißung ausüben kann, während bei längeren Schweißzeiten dieser Einfluss wesentlich geringer ist (siehe Bild 2.2).

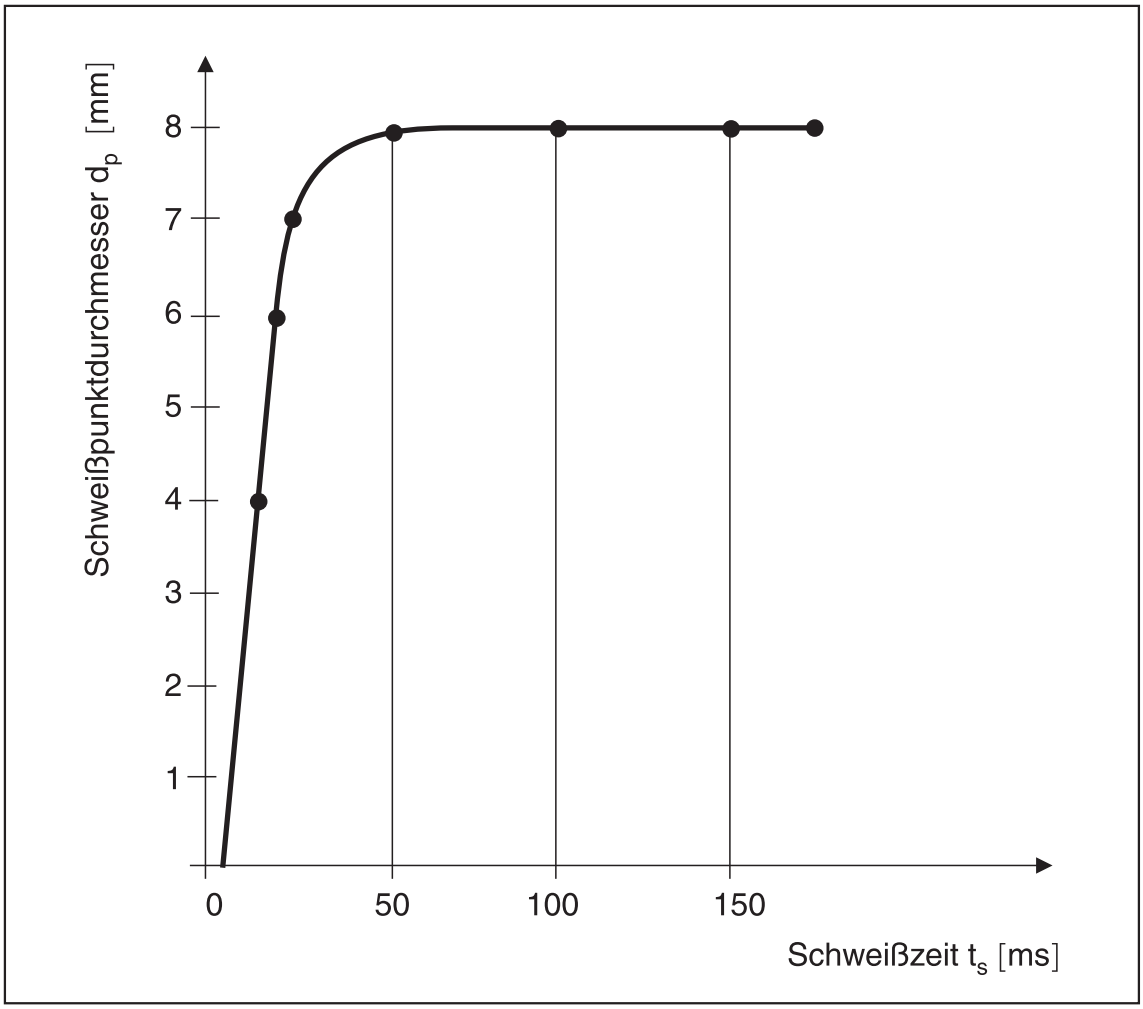

Bild 2.2: Abhängigkeit des Schweißpunktdurchmessers von der Schweißzeit beim Schweißen eines niedriglegierten Stahlblechs mit einer Dicke von 1,0 mm bei einer Schweißstromstärke von 7800 A nach [1-3].

Bei allen in dieser Dissertation durchgeführten Versuchen betrug die Schweißzeit genau 16 Halbwellen. Nach dem in Bild 2.2 abgebildeten Diagramm liegt der gesamte Schweißzyklus auf dem Kennlinienabschnitt mit einem hohen Steigungswinkel. Für diesen Abschnitt gilt, dass eine Kraftänderung von ±10,0 % eine Veränderung des Schweißpunktdurchmessers von weniger als 2,5 % zur Folge hat.

Einer der bedeutendsten Parameter, die beim Schweißen überwacht werden, ist die Veränderung des Elektrodenzustands. Mit der Inbetriebnahme behält die Elektrode in

Abhängigkeit vom Werkstoff und anderer Bedingungen für ca. zehn Punktschweißungen ihre ursprüngliche Form bei. Dies bedeutet, dass vor Versuchsbeginn ungefähr zehn Punktschweißungen durchzuführen sind, damit sich die Elektroden an die Planparallelität der Anlage anpassen können und sich die an den Elektrodenspitzen entstandene Oxidschicht lösen kann. Darauf beginnen an den Elektroden in Abhängigkeit von der Art und dem Oberflächenzustand des Werkstoffes, der Art der Kühlung, den mechanischen Eigenschaften der Schweißmaschine und den Schweißparametern Verschleißerscheinungen aufzutreten. In der Praxis sind folgende drei Methoden zur Kompensation der Elektrodenabnutzung gängig:

- die mechanische Bearbeitung der Elektroden nach einer bestimmten Anzahl von Schweißpunkten,
- das Auswechseln abgenutzter Elektroden nach einer bestimmten Zeit und
- die Erhöhung des Schweißstroms bei gleichzeitiger Vergrößerung der Kontaktoberfläche.

Bei der Elektrodenkraft handelt es sich um einen Schweißparameter, der einen direkten Einfluss auf die Größe des Kontaktwiderstands und gleichzeitig auf die Schweißlinsenbildung ausübt. Die Elektrodenkraft wird pneumatisch, hydraulisch, mechanisch oder elektromechanisch erzeugt. Für das Zusammenpressen der Werkstücke ist eine angemessene Elektrodenkraft sowie eine angemessene Vorhalte- und Nachhaltezeit zu wählen.

Bild 2.3 beschreibt nach [1-1] die Abhängigkeit des Schweißpunktdurchmessers von der Kraftzunahme bei gleich bleibendem Strom bei einem niedriglegierten Stahl von einer Dicke von 1,0 mm + 1,0 mm.

Nach [1-4] hat eine Elektrodenkraftabweichung von +50,0 % bis zu -40,0 % bei unbeschichteten Stahlblechen eine Veränderung des Schweißpunktdurchmessers von 10,0 % und bei beschichteten Stahlblechen von 20,0 % zur Folge. Im Vergleich zu den zulässigen Abweichungen des Schweißstroms von +15,0 % bis -15,0 % und der Versorgungsspannung von +5,0 % bis -10,0 % kann somit der Schluss gezogen werden, dass für die Elektrodenkraft relativ große Abweichungen zulässig sind. Die aus [1-3] entnommene Kennlinie in Bild 2.3 stellt die lineare Abhängigkeit des Schweißpunktdurchmessers von der Elektrodenkraft für eine Stahlblechdicke von 1,0 mm bei einem konstanten Zündwinkel dar. Der Schweißpunktdurchmesser nimmt mit der Zunahme der Elektrodenkraft ab. Bei der Elektrodenkraft handelt es sich um eine dynamische Größe, die in Abhängigkeit vom Zylinderdruck, den mechanischen Eigenschaften der gesamten Anlage, den elektrischen, mechanischen und geometrischen Eigenschaften des Werkstücks und der Elektroden sowie der Schweißstromdichte steht.

Neben den oben angeführten Schweißparametern existiert eine große Anzahl von anderen Schweißparametern, die weder mittels einer Regelungsvorrichtung eingestellt noch in der Regel während des Prozesses gemessen werden können. Die Einflüsse der mechanischen Eigenschaften von Schweißvorrichtungen [1-5], [1-6] und [1-7], des Kühlmechanismus [1-8] und anderer Komponenten wurden bereits von verschiedenen Autoren verglichen und statistisch bearbeitet. An dieser Stelle sollen einige dieser

Parameter beschrieben werden, die während der Versuchen den größten Einfluss ausgeübt haben:

- die Werkstoffeigenschaften – die chemische Zusammensetzung und deren Reproduzierbarkeit sowie die Schweißeignung des Werkstoffes,
- der Werkstoffoberflächenzustand und die Art der Werkstoffbeschichtung (falls vorhanden),
- die Dicke der aufgetragenen Beschichtung und deren chemische Zusammensetzung,
- die Werkstückform,
- die Blechdicke und ihre Reproduzierbarkeit, die Vorbereitung des Werkstoffes, seine Zugänglichkeit und Konstruktion sowie die Punktfolge (Randabstand, Überlappungslänge und Punktabstand),
- die Primärspannung,
- die Temperatur der Kühlflüssigkeit,
- die Menge des magnetischen Materials (des Werkstücks) an der Ausladung,
- die Schweißmaschineneigenschaften: Steifheit und geometrische Reproduzierbarkeit, mechanische Schwankungen während des Schweißens sowie Reproduzierbarkeit der elektrischen und mechanischen Parameter [1-9] sowie
- die Elektroden: Form, Stoff, Aufsetzverhalten und Kühlung.

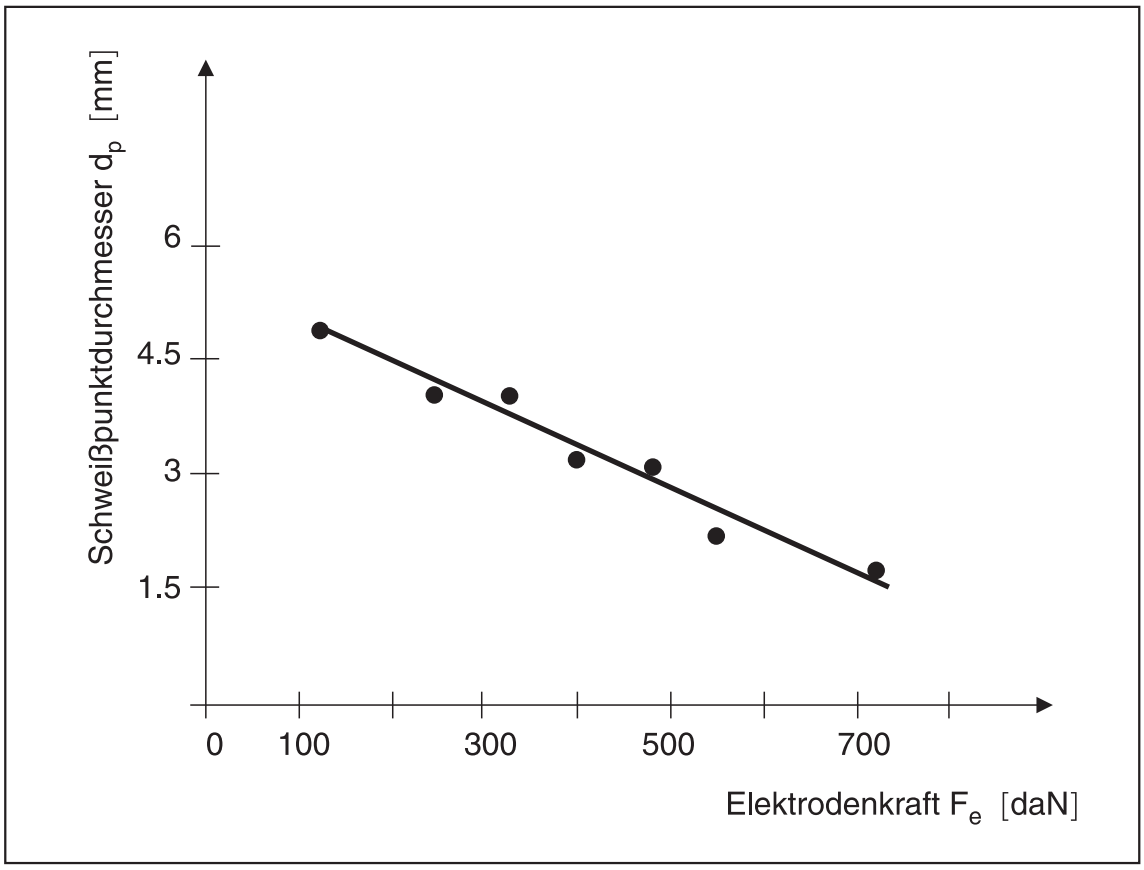

Bild 2.3: Abhängigkeit des Schweißpunktdurchmessers von der Elektrodenkraft.

Erreicht man mit der Einstellung des Schweißstroms, der Elektrodenkraft, der Schweißzeit und des Elektrodenzustands keine zufrieden stellende Schweißqualität, sind einer oder mehrere der oben angeführten passiven Schweißparameter zu verändern. Der Strom, die Kraft und die Schweißzeit sind hierauf erneut zu optimieren.

2.1.2 Gewährleistung der Reproduzierbarkeit von Schweißbedingungen

Parameter wie Spannung, Strom, Elektrodenkraft und Schweißzeit können durch Messungen überwacht werden, sodass Schweißfehler in der Regel die Folge von schwerer zu überwachenden Ursachen sind:

- dem Elektrodenzustand – hierbei sind sowohl der Kontaktoberflächendurchmesser als auch der Zustand der Kontaktfläche von Bedeutung. Beim Schweißen beschichteter Werkstoffe, vor allem verzinkter Stahlbleche, kann sich unter bestimmten Bedingungen an den Elektroden Zink ablagern. Beim Abplatzen dieser Ablagerungen kann der Schweißpunktdurchmesser um bis zu 25,0 % zunehmen. Beim Elektrodenwechsel ist auch auf eine gleich bleibend konstante Elektroden-einstellung und eine möglichst gleich bleibende Elektrodenqualität (chemische Zusammensetzung und den damit verbundenen physikalischen Eigenschaften, thermische Bearbeitung und Geometrie) zu achten,
- dem Werkstück – in der Regel sind die Abmessungen des Werkstücks und seine Dicke nicht konstant, und beim Schweißen beschichteter Stahlbleche variiert die Dicke und chemische Zusammensetzung der Beschichtung,
- der Temperatur – hierbei ist vor allem die Temperatur der Umgebung, des gesamten Stromkreises, der dem pneumatischen System zugeführten Luft und der Elektroden von Bedeutung. Des Weiteren ist zu gewährleisten, dass die Temperatur der Flüssigkeit für die Elektrodenkühlung möglichst niedrig und konstant ist, sowie
- der Positionierung des Werkstücks.

2.1.3 Überwachung der Schweißparameter während des Schweißens

Während des Schweißens können folgende Parameter überwacht werden:

- der Strom an der Primärseite des Schweißtransformators,
- der Schweißstrom,
- die Schweißleistung [1-10],
- die Anschlussspannung,
- die Schweißspannung,
- der dynamische Widerstand des Schweißstromkreises – der Widerstand wird allgemein als Quotient aus Schweißspannung und Schweißstrom bei bestimmten Kennlinienpunkten oder -abschnitten mit darauf folgender Kompensation dargestellt,
- die Wechselstromleistung an der primären und sekundären Stromkreisseite,
- die Schweißstromzeit,
- die Elektrodenkraft,

- der Elektrodenhub – der bei der Prozessanalyse als Indikator für das Schweißlinsenwachstum eingesetzt werden kann,
- die Elektrodenbeschleunigung – die alternativ zur Elektrodenkraft oder zum Elektrodenhub gemessen werden kann. Die Beschleunigung, der Hub und die Kraft können durch Ableiten dieser Größen nach der Zeit berechnet werden,
- die Temperatur – Temperaturmessungen dienen als Indikator für den Maschinenzustand (jede Schweißmaschine verfügt gegen Überhitzung zumindest über zwei Thermostate) oder in Laboratorien als thermodynamische Größe für die Prozessüberwachung,
- der Schall – bei der Schallanalyse des Widerstandspunktschweißens werden vorerst Erfolge unter Laborbedingungen erzielt. Durch die Schallanalyse können Spritzer und somit ungeeignete elektrische Schweißparameter oder eine zu geringe Elektrodenkraft erfasst werden [1-11], sowie
- der Ultraschall – Ultraschallverfahren werden zur Kontrolle nach dem Schweißen und für Feedback-Steuerungen entwickelt.

Eine detailliertere Beschreibung der Methoden zur Messung einiger Prozessparameter erfolgt in Kapitel 2.2.

2.2 Parametrische Analyse beim Widerstandspunktschweißen

2.2.1 Aktueller Kenntnisstand zur Prozessanalyse beim Widerstandspunktschweißen

In Abhängigkeit von der ausgewählten Zielsetzung der Prozessanalyse kommen verschiedene Messverfahren und Sensoren zur Anwendung. So sind in der Produktion der Preis, eine einfache Anwendung, ein großer Einsatzbereich und lange Standzeiten der Messinstrumente von großer Bedeutung. Der Einsatz von Sensoren ist beim Schweißprozess problematisch. Neben starken magnetischen und elektrischen Feldern können die Sensoren auch durch nachsetzende Werkstoffe, Spritzer oder das Personal beschädigt werden. Darüber hinaus ist die Umgebung ständigen Belastungen durch Rauch, Öl, Wasser, Metalldämpfe, Hitze, ... ausgesetzt.

In Bild 2.4 ist die Befestigung der in der Dissertation verwendeten Sensoren an einer Widerstandspunktschweißmaschine dargestellt.

Bei Schweißarbeiten unter Laborbedingungen ist es möglich, die Mehrzahl der angeführten Störgrößen zu verringern. Dabei sind solche Prüfstücke auszuwählen, durch welche die Sensoren während des Versuches nicht beschädigt werden. Des Weiteren sind die Sensoren an der für sie vorteilhaftesten Stelle anzubringen, und der Arbeitstakt ist so auszuwählen, dass er langsame und empfindliche Sensoren zulässt. Ferner können auch Messmethoden zur Anwendung kommen, die eine weitere mathematische Bearbeitung ermöglichen. Bei der Laborarbeit ist ferner eine Ausstattung auszuwählen, die nicht unbedingt für alle Widerstandsschweißverfahren geeignet zu sein hat und in Hinblick auf die Schweißbedingungen nicht unempfindlich ist.

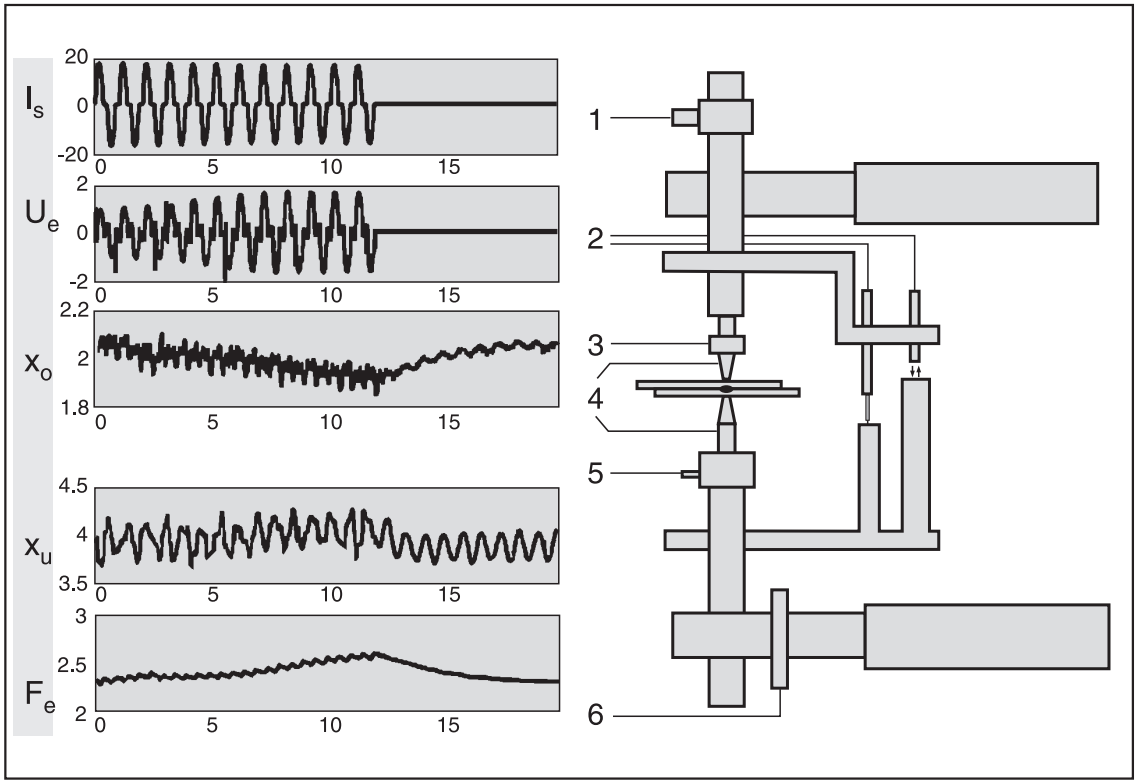

Bild 2.4: An einer Widerstandspunktschweißmaschine angebrachte Sensoren [1-34], wobei: 1) die Beschleunigung des oberen Elektrodenhalters, 2) den Elektrodenabstand, 3) die Beschleunigung der oberen Elektrode, 4) die Spannung (Direktmessung), 5) die Presskraft und 6) den Schweißstrom misst.

Mit Hilfe industrieller Mikrocomputer ist es möglich, komplexe Messungen in Echtzeit durchzuführen, von denen an dieser Stelle einige vorgestellt werden sollen:

1. Die Steuerung des Schweißprozesses auf Grundlage der Analyse des dynamischen Widerstands [1-12] – die Steuerung Weltouch CY-220B der Unitek Miyachi Corporation berechnet in Echtzeit den dynamischen Widerstand. Auf Grundlage des Widerstandskennlinienverlaufs bewertet diese den Prozesszustand mittels durch die Fuzzy-Logik evaluierten 27 Regeln. Nach der letzten durchgeführten Berechnung wird nach Bedarf der Schweißstrom für den nächsten Schweißpunkt verändert, sodass die Spritzerbildung auf ein Minimum reduziert wird. Die Funktionsweise dieser Steuerung ist in Bild 2.5 dargestellt.

2. Ein anderes japanisches Unternehmen [1-13] hat eine auf einem ähnlichen Prinzip arbeitende Steuerung entwickelt. Diese hebt auf Grundlage der berechneten Elektrodenform, der Werkstoffkenndaten (die vor dem Schweißprozess in den Kontroller einzugeben sind) sowie auf Grundlage von Messungen des Schweißstroms und der Spannung die Schweißparameter automatisch an. Während der Berechnung wird die dem Schweißpunkt zugeführte Energie überwacht und somit die Größe der Schweißlinse prognostiziert.

3. Der japanische Fahrzeughersteller Toyota [1-14] und [1-15] macht beim Schweißen mit Inverterschweißstromquellen von einem ähnlichen wie in Punkt 1 beschriebenen System Gebrauch. Dieses System unterscheidet sich darin, dass die Messungen an der Primärseite des Transformators durchgeführt werden, was auf Grund der äußerst harten Kopplung der beiden Transformatorseiten nur bei Invertern möglich ist. Die Schweißparameter werden durch die Steuerung derart eingestellt, dass die Schweißungen knapp unterhalb der Spritzerbildung durchgeführt werden.

4. Eine ähnliche, noch im Entwicklungsstadium befindliche Methode beschreibt K. Matsuyama in seinen Arbeiten [1-16] und [1-17]. Diese unterscheidet sich von den beiden zuvor angeführten Methoden bezüglich der Prognose der Schweißlinsengröße, die auf Grundlage von Messungen der Sekundärspannung, des Sekundärstroms und der Schweißkraft erfolgt.

5. Einen völlig anderen Weg hat die deutsche Bosch Rexroth AG eingeschlagen, deren Steuerung über einen Ultraschallsender und -empfänger verfügt, durch die der Schmelzgrad des Werkstoffes ermittelt wird. Der Sender sendet in bestimmten Intervallen ein akustisches Signal aus. Auf Grundlage der Signalform am Empfänger wird die Schweißpunktqualität prognostiziert, und nach Bedarf wird bereits während des Schweißprozesses der Strom reguliert.

6. Das System IGEL [1-18] der deutschen Matuschek Messtechnik GmbH überwacht nicht nur die Anlagen und deren Wartungszustand, sondern auch die Elektrodenabnutzung, Abweichungen der Elektrodenkraft, die Spritzerbildung sowie den Grad der Nebenschlüsse und speichert die gemessenen Schweißparameter ab. Während des Schweißens misst das System den Schweißstrom, die Kräfte, die Elektrodenbeschleunigung und die an den Elektroden anliegende Spannung.

7. Im Fahrzeugbau wird fast ausnahmslos die Erfassung der Produktionsbedingungen für alle sicherheitsrelevante Elemente verlangt. Aus diesem Grund kommen zahlreiche Dokumentationssysteme zur Speicherung von Schweißprozessen zur Anwendung. Die gemessenen und gespeicherten Daten stehen häufig in keiner Korrelation zur Schweißqualität, geben aber dafür die Schweißart und die Reproduzierbarkeit der Bedingungen wieder. In den Dokumentationssystemen werden Daten über die Herstellungszeit des Schweißpunktes, die Umgebungsbedingungen, den Wartungszustand der Maschinen, den Schweißpunkt, Unterbrechungen des Maschinenbetriebs, den Schweißstrom, die Spannung und die Elektrodenkraft gespeichert [1-15], [1-19] und [1-20].

R. Bothfeld stellt in [1-21] das Regelverfahren IQR vor, durch das auf Grundlage von Strom- und Spannungsmessungen Schweißmaschinen mit Inverterstromquellen gesteuert werden. Hierbei wird der Schweißprozess in verschiedene Segmente geteilt, in denen unterschiedliche Gesetzmäßigkeiten herrschen, und die gemessenen Daten werden für jede einzelne Schweißung online bearbeitet. Des Weiteren erkennt die Steuerung eine zu geringe Energiezufuhr und Spritzerbildungen. Auf Grundlage von

Berechnungen verändert die Steuerung die Schweißparameter und optimiert diese in Abhängigkeit von der Reaktion des

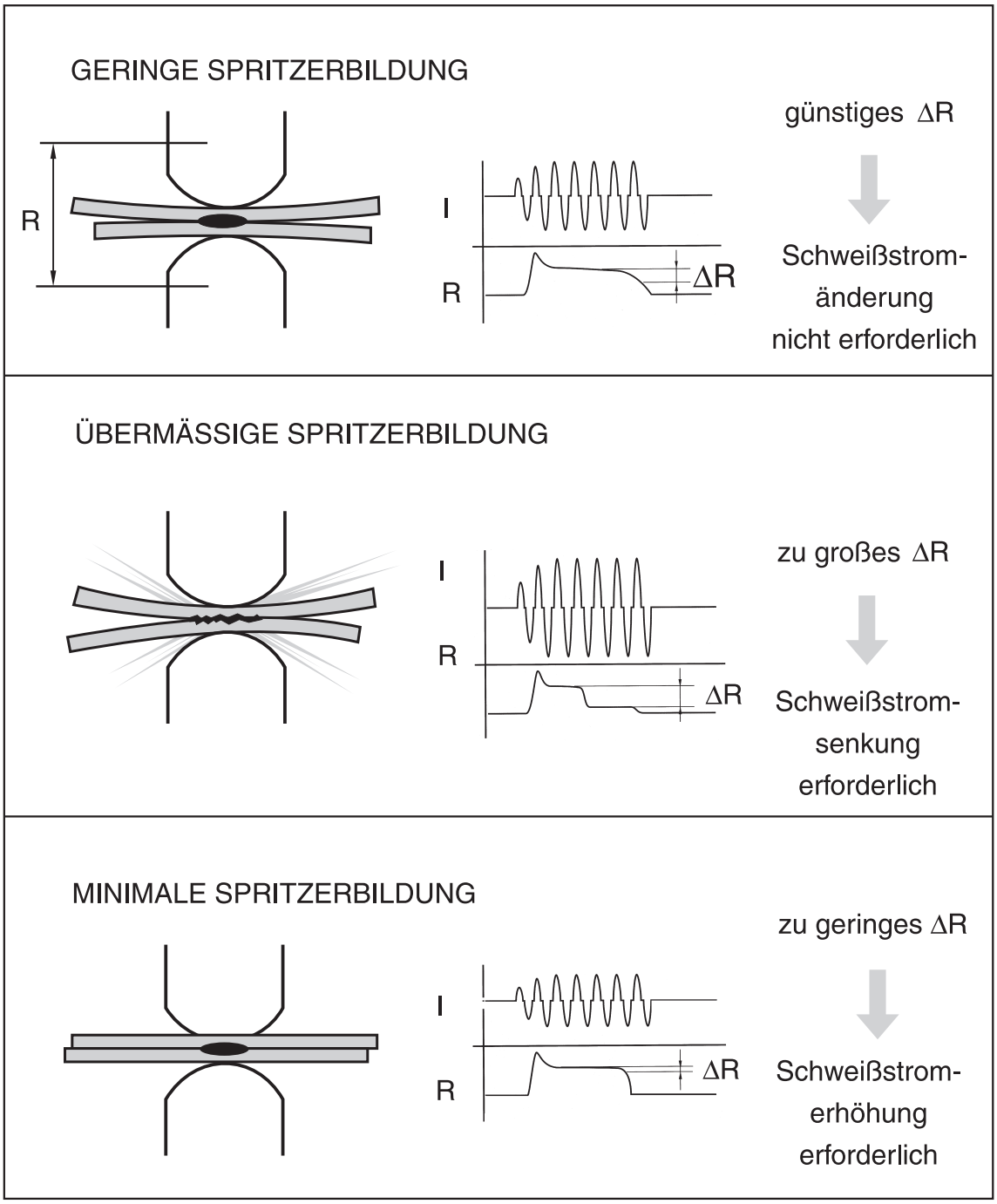

Bild 2.5: Funktionsweise der Schweißprozesssteuerung Weltouch CY-220B der Unitek Miyachi Corporation (Japan), die auf Grundlage der Änderung des Schweißwiderstands arbeitet [1-12].

Prozesses bereits während der Schweißpunktbildung. Aus diesem Grund ist auch eine exakte Einstellung der Schweißparameter nicht erforderlich; ferner sind auch weniger

Einstellungen notwendig. Dieses System kommt vor allem in der industriellen Produktion (Industrieroboter) und bei der Herstellung von Prototypen zur Anwendung.

Nach Durchsicht der einschlägigen Literatur [1-22] bis [1-34] in Hinblick auf die Verwendung von Sensoren bei der Schweißprozessanalyse kann festgestellt werden, dass es in den letzten 20 Jahren zu keinen nennenswerten Neuerungen gekommen ist. Fortschritte wurden vor allem bei der Geschwindigkeit und der zu verarbeitenden Datenmenge gemacht. Innovationen wurden vor allem bei der digitalen Datenverarbeitung erzielt, wie z. B. Digitalfilter, Integratoren oder Verstärker.

2.2.2 Schweißstrom

Der Schweißstrom fließt durch alle Widerstände der Sekundärstromkreisseite. Der Gesamtwiderstand R_G ist die Summe aller Teilwiderstände am Werkstück R_i:

$$R_G = \sum_{i=1}^{n} R_i \,. \tag{1}$$

Zur Beschreibung der Widerstände des in Bild 2.6 dargestellten Stromkreises sind zu den fünf Teilwiderständen (R_1 bis R_5 nach [1-35]) der Widerstand des Sekundärkreises des Transformators, der Elektroden- und Elektrodenhalterwiderstand sowie die Widerstände der Verbindungen zwischen dem Transformator und den Elektroden einschließlich der nachstehenden Kontaktwiderstände zu addieren:

- der Kontaktwiderstand zwischen dem Transformator und der Stromschiene,
- der Kontaktwiderstand zwischen dem flexiblen Stromband und der Stromschiene,
- der Kontaktwiderstand zwischen der Stromschiene und dem oberen Elektrodenhalter,
- der Kontaktwiderstand zwischen dem oberen Elektrodenhalter und der oberen Elektrode sowie
- die entsprechenden Kontaktwiderstände der Verbindungen auf der Unterseite.

Aus metallurgischer Sicht [1-36] handelt es sich beim Widerstandspunktschweißen um einen Prozess, für den der Begriff des „quasi-stationären Zustands“ nicht angewandt werden kann. Die Temperaturverteilung basiert auf einer raschen lokalen Erwärmung und einer darauf folgenden unverzüglichen Abkühlung. Die in Bild 2.7 abgebildete Temperaturkennlinie weist große Temperaturunterschiede auf geringem Raum auf, und zwar vom Schmelzpunkt in der Verbindungszone der beiden Werkstoffe über niedrigere Temperaturen bis zu einem erneuten Temperaturanstieg in der Elektrodenkontaktstelle mit dem Werkstoff. Mit Beendigung der Energiezufuhr verteilt sich die Wärme rasch gleichmäßig über den gesamten Werkstoff.

Der Schweißstrom wird als ein durch eine Punktschweißung fließender Strom definiert, der in der Regel mit einer Rogowski-Spule gemessen wird. Zu den Vorteilen dieser Spule zählen die einfache Befestigung, die Standzeit und die völlige galvanische Trennung des Messinstruments vom Messort. Für die Analyse der Stromform ist sie auf

Grund der am Spulenausgang anliegenden induzierten Spannung, die linear zur Stromableitung verläuft, jedoch nur in Verbindung mit verschiedenen Integratoren geeignet.

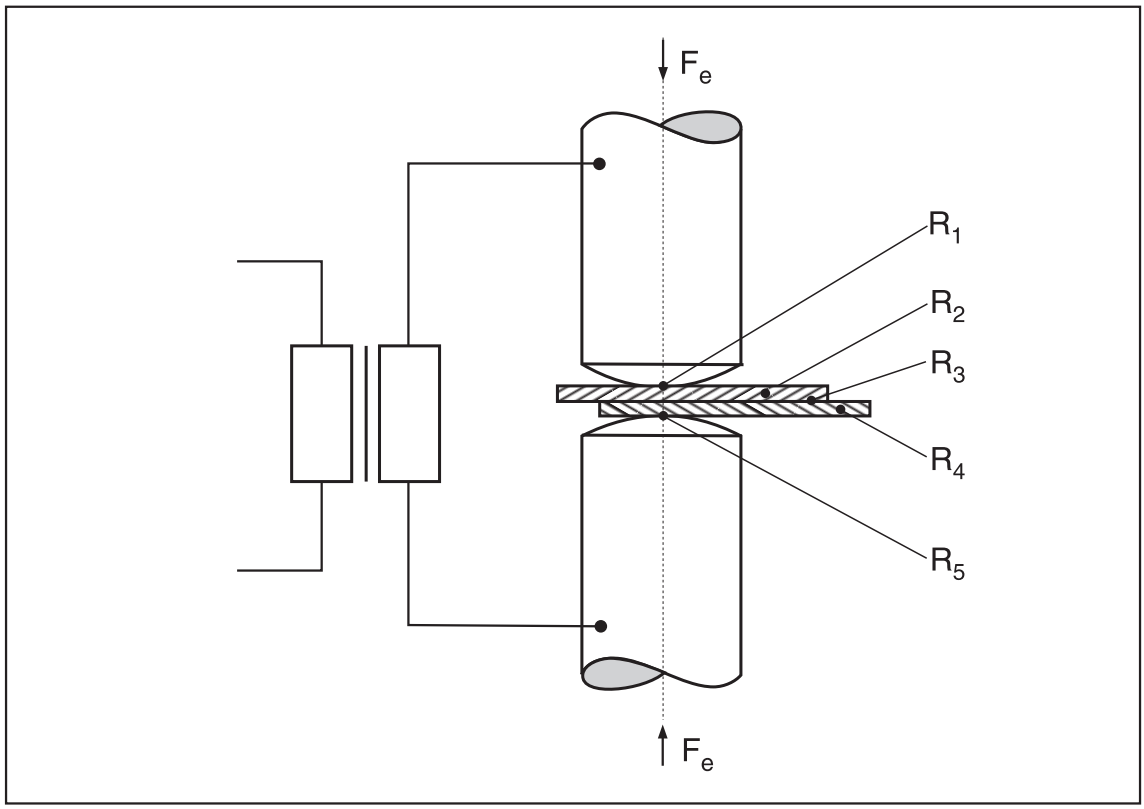

Bild 2.6: Widerstände beim Widerstandspunktschweißen nach [1-35], wobei: R_1 den Kontaktwiderstand zwischen der Elektrode und dem Oberblech, R_2 den Stoffwiderstand des Oberblechs, R_3 den Kontaktwiderstand zwischen den beiden Blechen, R_4 den Stoffwiderstand des Unterblechs, R_5 den Kontaktwiderstand zwischen dem Unterblech und der Elektrode und F_e die Elektrodenkraft darstellt.

Seltener wird bei Strommessungen die Hall-Sonde verwendet. Bei niedrigen Strömen ist es der Einfachheit halber möglich, auf der Sekundärseite auch Messshunts einzusetzen.

Messshunts oder Hall-Sonden kommen in der letzten Zeit vermehrt bei Schweißmaschinen mit Inverterschweißstromquellen auf der Primärseite des Transformators zur Anwendung.

Als Parameter für die Qualitätsüberwachung wird überwiegend der Effektivstromwert des gesamten Schweißimpulses oder nur zur Endphase des Schweißprozesses verwendet.

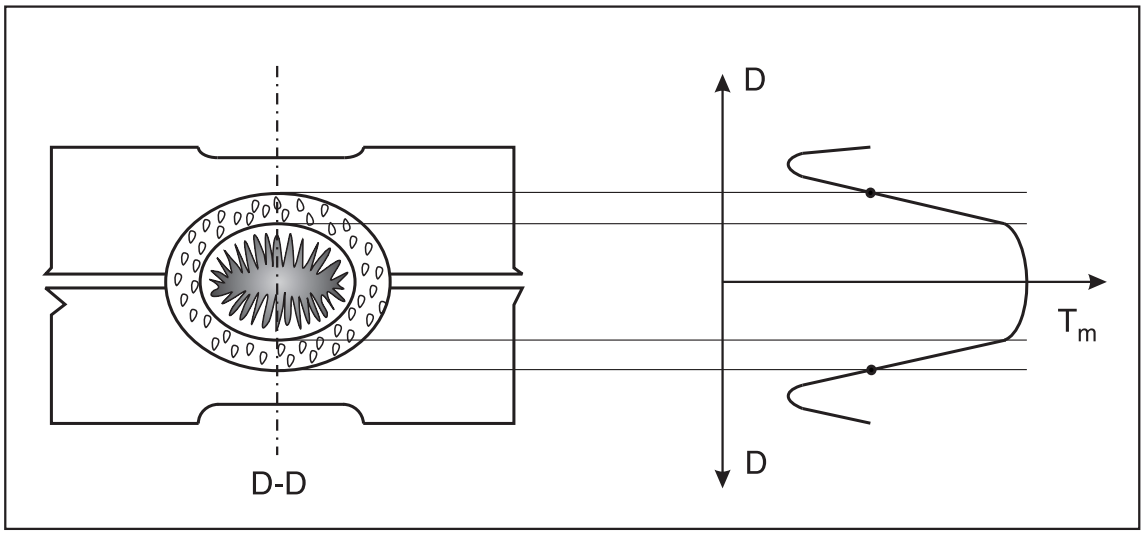

Bild 2.7: Verteilung der Spitzentemperaturen T_m beim Widerstandspunktschweißen [1-36].

Die im Schweißstrom auftretenden Störungen üben einen besonders großen Einfluss auf die Qualität der Punktschweißung aus, sodass während der Messungen zumindest folgende Einflussgrößen zu überprüfen und zu dokumentieren sind:

- Die Reproduzierbarkeit der Anschlussspannung – hierbei ist eine während der gesamten Messung konstante Spannung am vorteilhaftesten, die mit einem entsprechenden Probenehmer (Trenntrafo mit einer A/D-Karte) ununterbrochen zu überwachen ist. Bei Versuchen in Räumen mit einer größeren Anzahl von großen Stromverbrauchern ist eine Überwachung und eine vorangehende Analyse der gegenseitigen Wechselwirkungen der Anlagen notwendig. Im Fall erheblicher Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Verbrauchern ist eine gleichzeitige Inbetriebnahme mehrerer Verbraucher zu verhindern. In der Regel verpflichten sich Stromlieferanten, eine konstante Spannung von ±5,0 % zu gewährleisten, was lineare Stromschwankungen gleicher Größenordnung zur Folge hat. Des Weiteren sind Spannungsschwankungen zu berücksichtigen, die durch die Inbetrieb- oder Außerbetriebnahme von in der Umgebung liegenden großen Stromabnehmern verursacht werden.

- Spannungsabfälle – sie sind ein weiterer möglicher Faktor auf der Primärseite infolge nicht ausreichend dimensionierter Anschlussleitungen und Verbindungen bzw. unzureichender Verbindungen, was unter Laborbedingungen häufig auftritt. Besonders unvorteilhaft ist eine Abnahme der Anschlussspannung und die damit verbundenen im System kontinuierlich auftretenden Nichtlinearitäten, wobei diese Erscheinung im Laufe des Betriebs durch Erwärmung weiterhin zunimmt. Vor Beginn der Messungen ist daher das System einer Belastungsprobe zu unterziehen, bei der die Anschlussspannung und Temperaturen an den Verbindungen zu überprüfen sind.

- Die Transformatorerwärmung – der von der Transformatorerwärmung ausgehende Einfluss ähnelt dem von nicht ausreichend dimensionierten Anschlussleitungen. Diesem Einfluss kann durch die Auswahl einer angemessenen Schweißmaschine mit entsprechender Kühlung entgegengewirkt werden. Vor Messbeginn ist diese Einflussgröße zu überprüfen und gegebenenfalls zu beseitigen.

- Der Betrieb der Thyristorsteuerung – hierbei sind sowohl die Computersteuerung als auch der Thyristorblock einer Überprüfung zu unterziehen. Für die Analyse der Widerstände ist eine Maschine mit einem in beide Richtungen symmetrisch arbeitenden Thyristorblock vorteilhaft, da der Verlauf des dynamischen Widerstands sonst eine Sägezahnform annimmt. Bei Schweißparametern mit einem großen Zündwinkel (über 85,0 %) ist es dringend erforderlich, die Betriebsstabilität einer Prüfung zu unterziehen. Bei Zündwinkeln von über 85,0 % besteht die Möglichkeit einer Sättigung des Thyristors, wobei die Zündwinkel weder konstant bleiben noch den Soll-Werten entsprechen. Bei einem Zündwinkel von 90,0 % erreicht die Anlage bereits 99,0 % ihrer Leistung, weshalb ein solcher Betriebsmodus auch auf Grund der Transformatorbelastung zu vermeiden ist. Bei Versuchen mit derartigen Zündwinkeln sind die Kennlinien der gemessenen Schweißstromwerte unter besonderer Berücksichtigung der Zündwinkelkonstanz einer genauen Analyse zu unterziehen. In Hinblick auf die Betriebsstabilität der Thyristorsteuerung können auch niedrige Zündwinkel von unter 20,0 % kritisch sein, die jedoch nur selten benutzt werden. Ebenso ist es notwendig, die Konstanz der Schweißzeit und das Vorhandensein aller ausgewählten Halbwellen zu überprüfen.

- Frequenzschwankungen der Anschlussspannung – die Anschlussspannung von 50 Hz ist in Europa äußerst stabil, und die Schwankungen sind bei einem Normalbetrieb des Stromnetzes äußerst gering. Störungen treten lediglich bei der Synchronisierung einzelner am Stromnetz angeschlossener Elektrizitätswerke auf.

- Sekundärverbindungen – die auffälligsten Spannungsschwankungen können an Roboterschweißzangen mit separatem Transformator auf Grund des Spannungsabfalls auf den sekundären Litzenkabeln beobachtet werden. Bei diesen Schweißzangen sind sowohl ihre geometrische Anordnung als auch die Temperatur der Kühlflüssigkeit von Bedeutung. So können bei langen Sekundärverbindungen hohe Energieverluste auftreten. Bei Messungen in der Renault-Niederlassung Revoz in Novo mesto wurde bei einem Anstieg der Kühltemperatur des Schweißstromkreises um 29,0 °K ein Verlust der dem Werkstück zugeführten Energie von 10,0 % gemessen. Die Form der Litzenkabel und die Temperatur aller Elemente des Sekundärkreises sind während der Messungen in größtmöglichem Maß konstant zu halten. Bei Überhitzung sind die Ruhezeiten zwischen den Schweißungen zu verlängern. Mittels eines Thermometers oder einer Infrarotkamera können unzulängliche Kontakte auf der Sekundärseite festgestellt werden. Diese sind zu beseitigen, oder es ist zu gewährleisten, dass bestimmte Grenzwerte nicht überschritten werden.

- Induktive Einflüsse – das Einbringen verschiedener ferromagnetischer Werkstoffe in die Umgebung des Sekundärstromkreises verursacht Veränderungen im sekundären Elektromagnetfeld, was vor allem bei Schweißmaschinen mit großen Fensterflächen zu beobachten ist.

- Nebenschlüsse – beim Widerstandspunktschweißen ist es häufig der Fall, dass der Strom abseits des Schweißpunktes durch das Werkstück oder durch die Schweißvorrichtung fließt. In diesem Fall fließt der Strom durch die Berührungspunkte mit der Einspannvorrichtung oder durch den Kontakt des Werkstücks mit dem Sekundärkreis. Der Entstehung von Nebenschlüssen kann durch einen Versuch entgegengewirkt werden, bei dem durch einen zwischen den Elektroden eingespannten Isolator ein hoher Strom gelassen wird. Fließt kein Strom, ist mit derartigen Stromabflüssen nicht zu rechnen. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, dass der Strom durch einen bereits geschweißten Schweißpunkt fließt. Um diesen Strom möglichst gering zu halten, existieren Tabellen mit empfohlenen Punktabständen, bei deren Berücksichtigung die Qualitätsminderung von Schweißpunkten infolge Nebenschlüsse auf max. 10,0 % reduziert werden kann.

- Mechanische Größen – zum indirekten Einfluss auf die Stärke und Form des Schweißstroms siehe Kapitel 2.1.1.

2.2.3 Schweißspannung

Bei der Schweißspannung handelt es sich um eine direkt messbare Größe. Etwaige Probleme ergeben sich in Bezug auf die Auswahl des Messpunktes möglichst nah am Werkstück. Aus diesem Grund ist die Befestigung der Anschlüsse direkt an den Elektroden am vorteilhaftesten. Auf Grund der in der Regel hohen Ohmschen Eingänge bei modernen Messvorrichtungen ist den Messkabeln große Aufmerksamkeit zu schenken. Diese sollten zur Vermeidung elektromagnetischer Störungen verdrillt und abgeschirmt sein (S/UTP-Kabel).

Als Parameter zur Qualitätskontrolle kommt der Effektiv- oder Mittelwert der Spannung über die gesamte Schweißdauer oder über ein bestimmtes Intervall zur Anwendung.

Bei der Analyse der Spannungsform ist einer ausreichend dimensionierten Versorgungsquelle und somit einer konstanten Primärspannung besondere Aufmerksamkeit zu schenken. Die Versorgungsquelle darf unter keinen Umständen Spannungsabfälle auf der Sekundärseite sowie durch induktive Komponente verursachte Störungen verursachen.

Bei der Messung der Spannung ist zu berücksichtigen, dass ungeachtet des Messorts die gemessene Kennlinie die Summe der Reaktionen im gesamten System von der Stromquelle bis zum Schweißpunkt darstellt.

Nach C. Goos [1-37], der sich auf die Untersuchungen von W. L. Roberts stützt, haben weder die Spannungsform noch ihre Größe eine klare physikalische Bedeutung. Denn

die Signale verfügen ungeachtet der Tatsache, dass sie unmittelbar an der Elektrodenspitze gemessen werden, über eine überaus große induktive Komponente, die vor einer weiteren mathematischen Bearbeitung auszusondern ist. Die induktive Komponente wird durch eine Kompensationsspule gemessen, die, so wie der Messort für die Spannung, möglichst nah der Elektrodenspitze liegen sollte. Die induktive Komponente ist darauf vom gemessenen Signal zu subtrahieren. In Bild 2.8 werden das gemessene Spannungssignal (a), die gemessene induktive Komponente (b), die skalierten Verhältnisse der beiden Messungen und die zum Ende subtrahierte induktive Komponente (c–e) dargestellt, deren Ergebnis die kompensierte Ohmsche Spannung (f) ist.

Auf Grund der relativ umständlichen Kalibrierung und Befestigung der Kompensationsspule kommt diese Methode in der Regel nur bei der Grundlagenforschung zur Anwendung. In der Praxis geht man indes von einer induktiven Komponente in Form einer relativen Konstanten aus, sodass bei Messungen der zugeführten Energie der effektive Spannungswert entsprechend herabgesetzt wird.

In der letzten Zeit gewinnen auf allen Gebieten der physikalischen Analyse immer mehr Kennlinien aus der Kombination zweier Messgrößen in Abhängigkeit von einer dritten an Bedeutung. So werden beim Schweißen zum Beispiel Strom-Spannungs-*(U(t)/I(t))* oder Spannungs-Strom- und Zeit-Strom-Kennlinien *(U(i)/t(i))* verwendet.

In Bild 2.9 ist der Strom-Spannungs-Kennlinienverlauf über fünf Halbwellen beim Widerstandspunktschweißen mit Wechselstrom nach [1-38] abgebildet. Jede Kennlinie wird durch vier Punkte definiert, die aus verschiedenen Schweißparametern gewonnen wurden. G. Weber und Mitarbeiter verfolgen auch in anderen Arbeiten durch die Beobachtung derartiger Kennlinien den Verlauf des Schweißprozesses [1-39], [1-40], [1-28] und [1-41], den Einfluss verschiedener Werkstückwerkstoffe [1-42] und die Elektrodenalterung [1-38] oder verwenden diese Kennlinien bei theoretischen Forschungen von Schweißverfahren [1-43].

In Bild 2.10 sind die dynamischen Strom-Spannungs-Charakteristiken beim Widerstandspunktschweißen (siehe Kapitel 5) von elektrolytisch verzinktem Stahlblech an einer ortsfesten Schweißmaschine mit Wechselstrom bei einer Schweißdauer von 16 Halbwellen abgebildet. Bei reproduzierbaren und stabilen Schweißprozessen kann festgestellt werden, dass sich die Zyklogramme einzelner Halbwellen ähneln.

C. Lewis und N. T. Williams haben sich in [1-44] für eine besonders übersichtliche Darstellung des Strom-Spannungs-Verhaltens in Form von 3D-Zyklogrammen entschieden. Hierbei haben beide während der Elektrodenalterung merkliche Veränderungen am Kennlinienverlauf des Widerstands festgestellt. Im Bild 2.11 ist ein Zyklogramm für das Schweißen eines feuerverzinkten Bleches über die gesamte Dauer von 16 Halbwellen von Schweißbeginn an abgebildet.

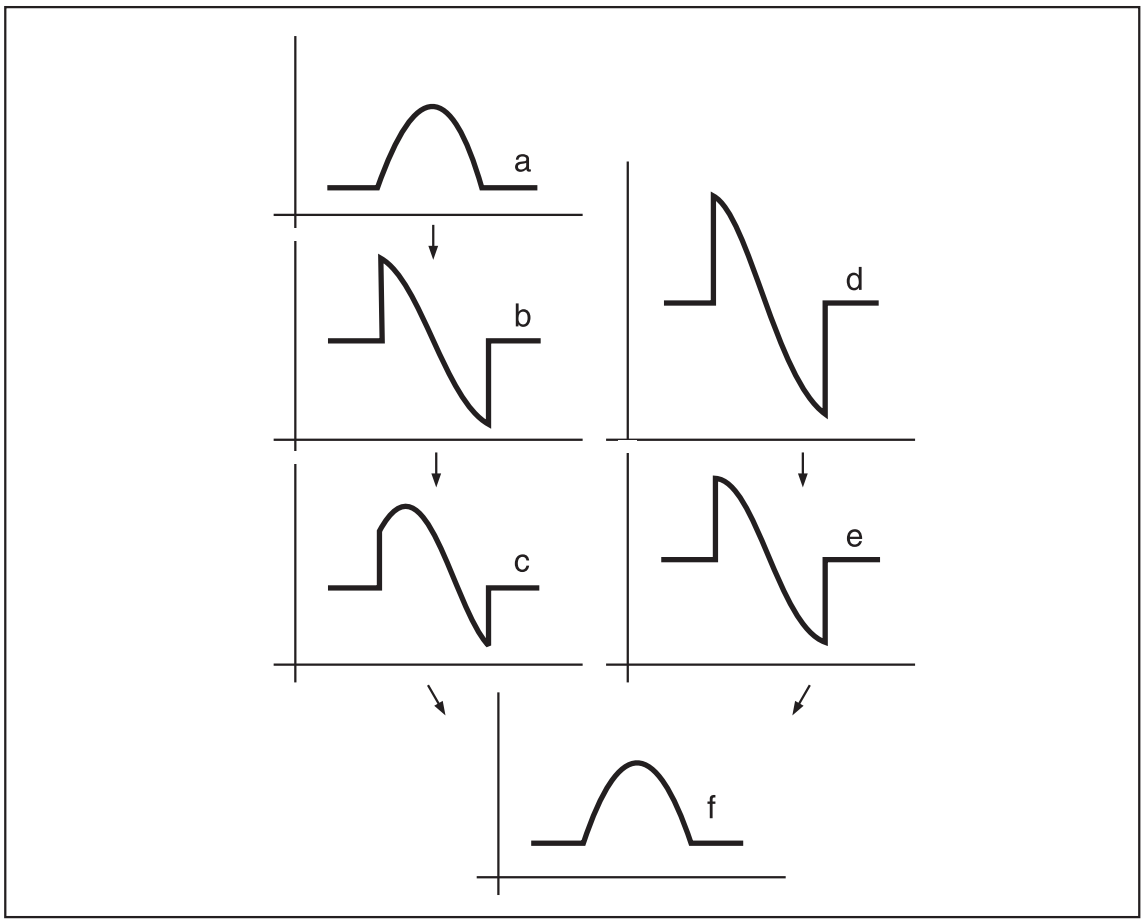

Bild 2.8: Kompensation der induktiven Komponente aus Messungen der Sekundärspannung [1-37], wobei: a) das reale Signal, b) die induktive Komponente, c) das gemessene Signal, d) das an der Kompensationsspule gemessene Signal, e) das an der Kompensationsspule gemessene skalierte Signal und f) die kompensierte Schweißspannung darstellt.

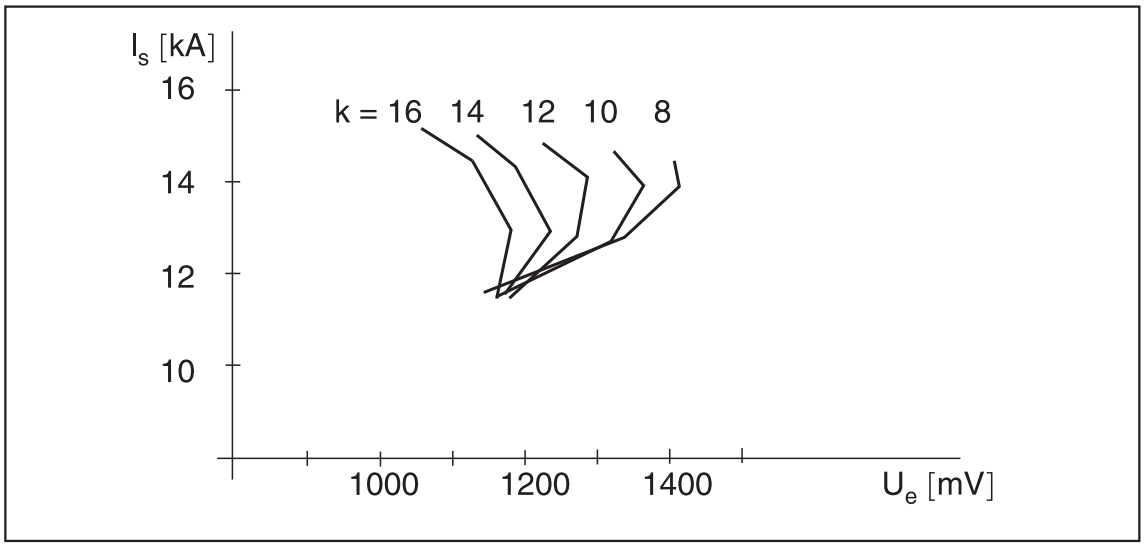

Bild 2.9: Strom-Spannungs-Kennlinien über fünf Halbwellen nach [1-38].

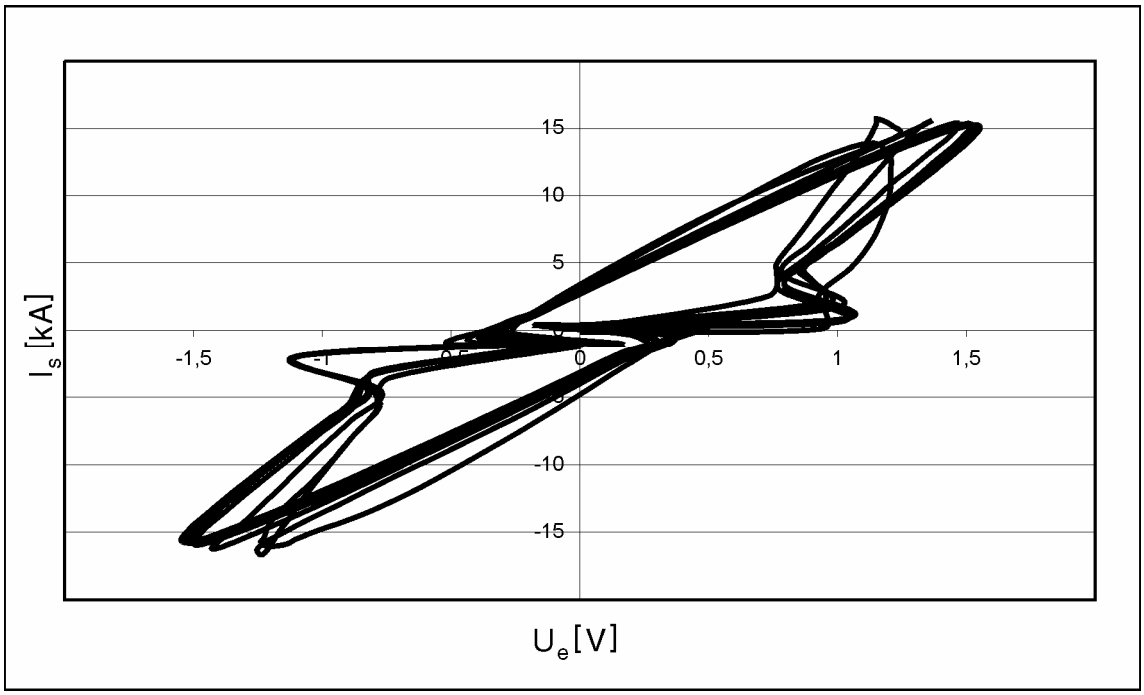

Bild 2.10: Dynamische Strom-Spannungs-Charakteristiken beim Widerstandspunktschweißen von elektrolytisch verzinktem Stahlblech.

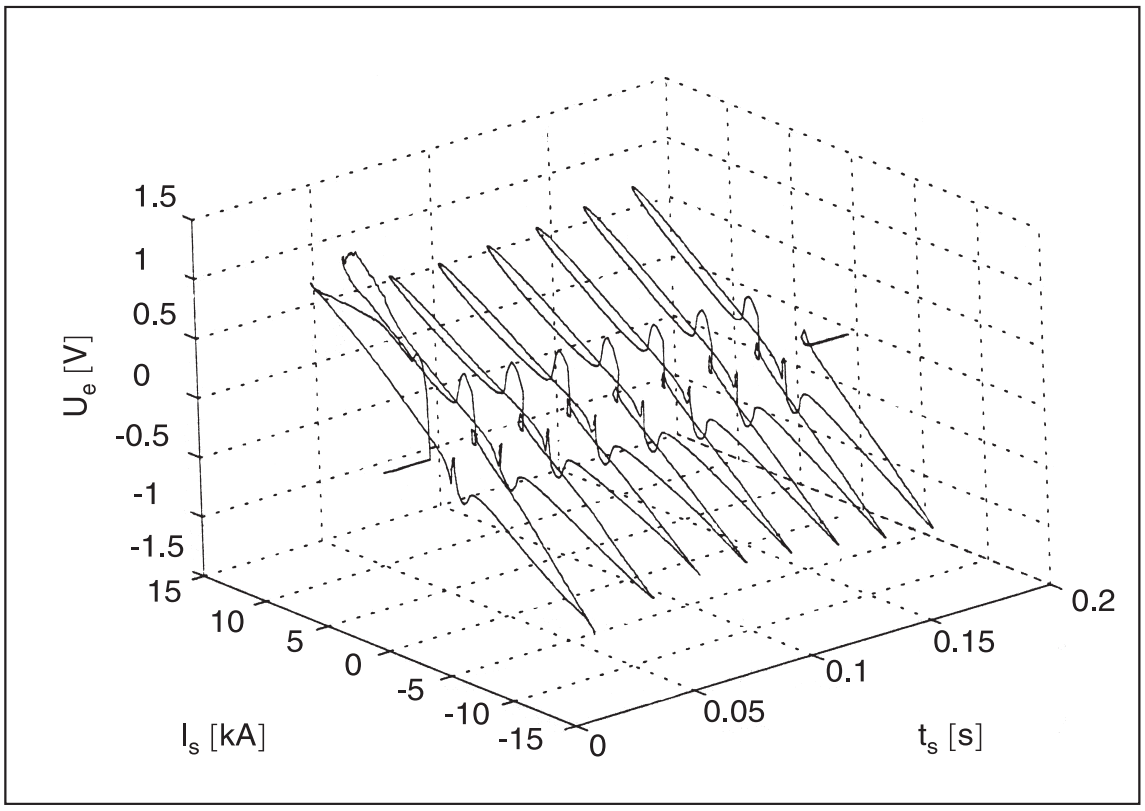

Bild 2.11: 3D-Strom-Spannungs-Zyklogramm des dynamischen Strom-Spannungs-Verhaltens für feuerverzinktes Blech mit einer Dicke von 0,7 mm.

2.2.4 Dynamischer Widerstand

Beim dynamischen Widerstand handelt es sich um eine Größe, die von der Zeit, dem Strom, der Spannung, der Kraft, … abhängig ist, und wie folgt berechnet wird:

$$R(t,i,u,F,...) = u(t)/i(t). \quad (2)$$

Zur Bestimmung der Kennlinie des dynamischen Widerstands *R(t)* ist es erforderlich, die Konstanz aller anderen Einflussgrößen zu gewährleisten. Bei der Berechnung dieser Kenngröße kann es an Stellen, an denen der Stromwert gegen Null tendiert, zu Problemen kommen, da die Widerstandswerte ins Unendliche anwachsen. Aus diesem Grund wird der dynamische Widerstand in der Regel als:

1. Mittelwert-Quotient einer bestimmten Halbwelle oder Zeitspanne nach folgender Gleichung:

$$R_d(HW) = \overline{U}(HW)/\overline{I}(HW), \quad (3)$$

2. als Quotient von Effektivwerten einer bestimmten Halbwelle oder Zeitspanne als:

$$R_e(HW) = U_{eff}(HW)/I_{eff}(HW) \text{ oder} \quad (4)$$

3. als Quotient von Höchstwerten einer bestimmten Halbwelle in Form von:

$$R_p(HW) = \hat{U}(HW)/\hat{I}(HW) \quad (5)$$

berechnet.

Bei der Prozessanalyse einer Punktschweißung kann festgestellt werden, dass der Schweißpunkt nur über einen Wirkwiderstand verfügt. Wäre es möglich, bei der Messung alle induktiven Komponenten und Messfehler zu eliminieren, müssten der Strom und die Spannung nach der nachstehenden Gleichung über dieselbe Signalform verfügen:

$$i(t) = u(t)/R. \quad (6)$$

Diese Gleichung gilt ausschließlich für einen konstanten Widerstand *R*. Da sich während des Widerstandspunktschweißens der Widerstand aber ändert, kann nur bei äußerst kurzen Intervallen von einem konstanten Widerstand ausgegangen werden.

Nach den für jede einzelne Zeitspanne gesondert ermittelten Strom- und Spannungswerten verläuft die Kennlinie des dynamischen Widerstands stückweise stetig bzw. geglättet. Infolge der Asymmetrie des Thyristorblocks oder des Integrators besteht die Möglichkeit, dass das gemessene Signal eine Sägezahnform hat, die ebenso ausgeglichen werden kann.

In Bild 2.12 ist eine typische Kennlinie des dynamischen Widerstands bei niedriglegierten Stählen abgebildet.

Der Widerstand kann wie folgt stückweise modelliert werden:

1. Im ersten Abschnitt (A) ist der Widerstand stark fallend und insbesondere vom Oberflächenzustand der Werkstücke und den Elektroden abhängig. Dieser Abschnitt ist auf eine kurze Zeit, einen Abschnitt der ersten Halbwelle, beschränkt.

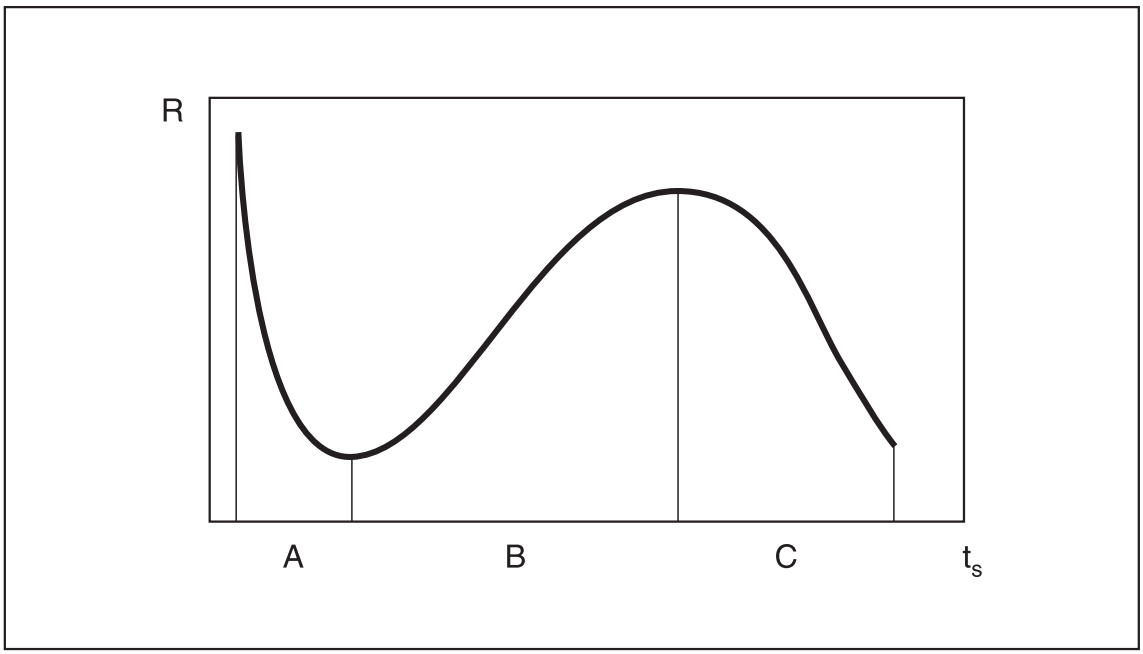

Bild 2.12: Schematische Darstellung der Kennlinie des dynamischen Widerstands bei niedriglegierten Stählen wobei: R) den Gesamtwiderstand (Stoff- + Kontaktwiderstand), A) den Schweißprozessbeginn, B) die Erwärmungsphase und C) die Schlussphase der Stromzufuhr darstellt.

2. Darauf nimmt der Widerstand im zweiten Kennliniensegment (B) auf Grund der Temperaturerhöhung in der Kontaktstelle zu. Hierbei wächst der Widerstand auf dem kurzen Zeitabschnitt folgender Gleichung nach linear an:

$$R_{BT} = R_K(1+\alpha.\Delta T)\,, \qquad (7)$$

wobei:

R_{BT} den temperaturabhängigen Widerstand in Phase B,

R_K den Widerstand bei niedrigeren Temperaturen,

α den Temperaturkoeffizienten und

ΔT die Temperaturdifferenz darstellt.

Hierbei ist zu berücksichtigen, dass mit dem Zeitpunkt, in dem der Werkstoff zu schmelzen beginnt, die oben angeführte Gleichung nicht mehr gilt. Der

Kennlinienverlauf ist von da an von den Bedingungen an den einzelnen Kontaktstellen, dem Volumen und der Temperatur des geschmolzenen Werkstoffes abhängig.

3. In der Schlussphase (C) ist der Widerstand erneut auf Grund der Stromwegverkürzung infolge des Elektrodeneindrucks in das Werkstück, dem besseren Kontakt in der unmittelbaren Schweißpunktumgebung und der Reaktion des Schweißtransformators im Sinken begriffen.
4. Zwischen den Abschnitten A und B hat die Kennlinie einen konkaven Verlauf.
5. Zwischen den Abschnitten B und C verläuft die Kennlinie konvex.

Bei nichtrostenden Stählen, Aluminium und Buntmetallen ergibt sich ein anderer Kennlinienverlauf.

Bei der Wahl, welcher der angeführten Widerstände für die Analyse hinzugezogen werden soll, ist vor allem die Länge des zu untersuchenden Intervalls Ausschlag gebend. So ist der Widerstand $\hat{R}(HW)$ ausschließlich auf Halbwellen beschränkt, was für die vier zuvor angeführten Widerstände nicht zutrifft.

Aus den Gleichungen (3) bis (5) ist ersichtlich, dass die Ergebnisse der für eine bestimmte Zeitspanne mit linearem Widerstandsverlauf berechneten Widerstände gleich sind:

$$R_d = R_e = R_p \,. \tag{8}$$

Denn es gilt:

$$I_{eff} = \frac{\hat{I}}{f_t} = f_o \overline{|I|}\,, \tag{9}$$

wobei der Scheitelfaktor als:

$$f_t = \frac{\hat{I}}{I_{eff}} = \frac{\hat{I}}{\sqrt{\dfrac{\int_{t_1}^{t_1+\Delta t} i^2(t)\,dt}{\Delta t}}} \qquad \text{und} \tag{10}$$

der Formfaktor als:

$$f_o = \frac{I_{eff}}{\overline{|I|}} = \frac{\sqrt{\dfrac{\int_{t_1}^{t_1+\Delta t} i^2(t)\,dt}{\Delta t}}}{\dfrac{\int_{t_1}^{t_1+\Delta t} |i(t)|\,dt}{\Delta t}} \tag{11}$$

definiert werden.

Beide Faktoren sind bei konstantem Widerstand sowohl für den Strom durch die Wirklast als auch dessen Spannung gleich, weshalb diese in den Gleichungen (8) bis (11) ungeachtet der Form gekürzt werden können.

Die Grundlage ist die Spannung, die einen Strom durch einen nichtlinearen Widerstand verursacht, wobei sich die Stromform und infolge dessen die in den Gleichungen (10) und (11) beschriebenen Faktoren verändern. Für jede einzelne Halbwelle wird der konstante Wert des durchschnittlichen dynamischen Widerstands bestimmt, sodass für jeden einzelnen Kennlinienabschnitt aus Bild 2.12 Folgendes gilt:

1. Im ersten Kennlinienabschnitt ist der absolute Stromwert zu Beginn der Halbwelle niedriger, während er im zweiten Abschnitt höher ist, als er es bei einem konstanten Widerstand *R* wäre. Es gilt:

   $$R_d \approx R_e \approx R_p \,. \tag{12}$$

2. Im zweiten Abschnitt, in dem der Widerstand auf Grund der Werkstofferwärmung zunimmt, gilt: Die absoluten Stromwerte sind in der ersten Halbwellenhälfte größer und in der zweiten Hälfte kleiner, als sie es bei einem konstanten Widerstand wären. Die Stromfaktoren über eine ganze Halbwelle ähneln denen für die Spannung.

3. Im dritten Abschnitt verfügt die Kennlinie über die gleichen Eigenschaften wie im ersten Abschnitt mit dem Unterschied, dass die Eigenschaften auf Grund der kleineren Gradienten weniger ausgeprägt sind.

4. Beim Übergang aus den ersten in den zweiten Kennlinienabschnitt hat der Widerstand eine konkave Form, was einen größeren Scheitel- und Formfaktor zur Folge hat. Hieraus ergibt sich:

   $$R_e \geq R_p \geq R_d \,. \tag{13}$$

5. Beim Übergang vom zweiten in den dritten Kennlinienabschnitt ist der Widerstand konvexförmig, was einen geringeren Scheitel- und Formfaktor zur Folge hat, sodass in diesem Fall gilt:

   $$R_e \leq R_p \leq R_d \,. \tag{14}$$

Vor jeder Analyse ist die Signalform der realen Strom- und Spannungswerte einer Überprüfung zu unterziehen. Sind die Signale verschoben (während der Messungen sind nicht die in Kapitel 2.2.2 beschriebenen Erscheinungen beseitigt worden), können diese auf der Zeitachse mittels eines entsprechenden Programms kompensiert werden. Das Spannungssignal darf beim Durchgang durch Null keine Übergangserscheinungen sowie beim Ein- oder Ausschalten der Thyristorsteuerung keine Spitzen aufweisen. Dies würde von einer unzureichenden Kompensation der induktiven Komponente zeugen.

Ferner darf sich der Stromwert nicht linear von der Abszisse entfernen (Sättigung oder unzureichender Integrator). Alle zuvor angeführten Feststellungen wurden bei der Ausarbeitung des digitalen Filterprogramms berücksichtigt, mit dem die in Kapitel 4 beschriebene Signalbearbeitung durchgeführt wurde.

Praktische Vergleiche verschiedener Widerstandsberechnungen können [1-40] und [1-41] entnommen werden, während in der Vornorm ISO/WD 17656 die grundlegenden Anleitungen für die Durchführung von Messungen angeführt sind.

Mit Hilfe des charakteristischen Kennlinienverlaufs des dynamischen Widerstands ist es möglich, den Schweißprozess zu überwachen. Im Kennlinienabschnitt zu Beginn des Schweißprozesses besteht nur eine unzureichende Korrelation mit der Schweißqualität. Mit der Zunahme des Widerstandes im darauf folgenden Abschnitt werden erste Charakteristiken einer Kennlinie erkennbar, die eine angemessene Korrelation mit der Qualität zulassen könnten. Aus diesem Grund werden zur Überwachung des Schweißprozesses in der Regel Werte aus dem letzten Viertel des Kennlinienverlaufs des dynamischen Widerstands gewählt.

Die Verwendung von Kennlinien des dynamischen Widerstands zur Steuerung von Schweißprozessen verursacht in der Praxis Probleme. Diese treten durch Einflüsse infolge der Elektrodenabnutzung, der Versorgungsspannung und der Änderung der mechanischen und elektrischen Anlageneigenschaften auf. Weitere Probleme sind auf die Tatsache zurückzuführen, dass bei der Messung des dynamischen Widerstands große Abweichungen auftreten können, da sich die Fehler aus den Strom- und Spannungsmessungen addieren. Darüber hinaus ist zu berücksichtigen, dass vom Wirkwiderstand Wärmeenergie freigesetzt wird, die nicht zur Gänze zum Umschmelzen des Werkstoffes im Schweißpunkt verwendet wird.

Bei der Korrelation zwischen dem Schweißpunktwiderstand, der der Verbindungszone zugeführten Energie und der Schweißpunktqualität ist die Verteilung der Wärmeenergie zu berücksichtigen. Die in der Schweißzone entstehende Wärmeenergie kann nach [1-45] wie folgt beschrieben werden:

$$Q_{ZU} = c \int_{t=0}^{t=t_s} I_S{}^2(t) R_G(t) dt, \tag{15}$$

$$Q_v = Q_{VE} + Q_{VB} + Q_{VS}, \tag{16}$$

$$Q_W = Q_{ZU} - Q_V \text{ und} \tag{17}$$

$$\eta = (Q_W/Q_{ZU})\ 100\%, \tag{18}$$

wobei:
Q_{ZU} die zugeführte Wärmemenge,
$I_S(t)$ den Schweißstrom,
$R_G(t)$ den Gesamtwiderstand am Werkstück,
t_S die Schweißzeit,

Q_V die Verlustwärmemenge,
Q_{VE} die durch die Elektroden abgeleitete Verlustwärmemenge,
Q_{VB} die durch das Werkstück abgeleitete Verlustwärmemenge,
Q_{VS} die durch Wärme- und Lichtstrahlung entstehende Verlustwärmemenge,
Q_W die Wirkwärmemenge zur Erzeugung der Schweißlinse und
η den thermischen Wirkungsgrad darstellt.

Die Verteilung der einzelnen Wärmenergieanteile ist in Bild 2.13 dargestellt.

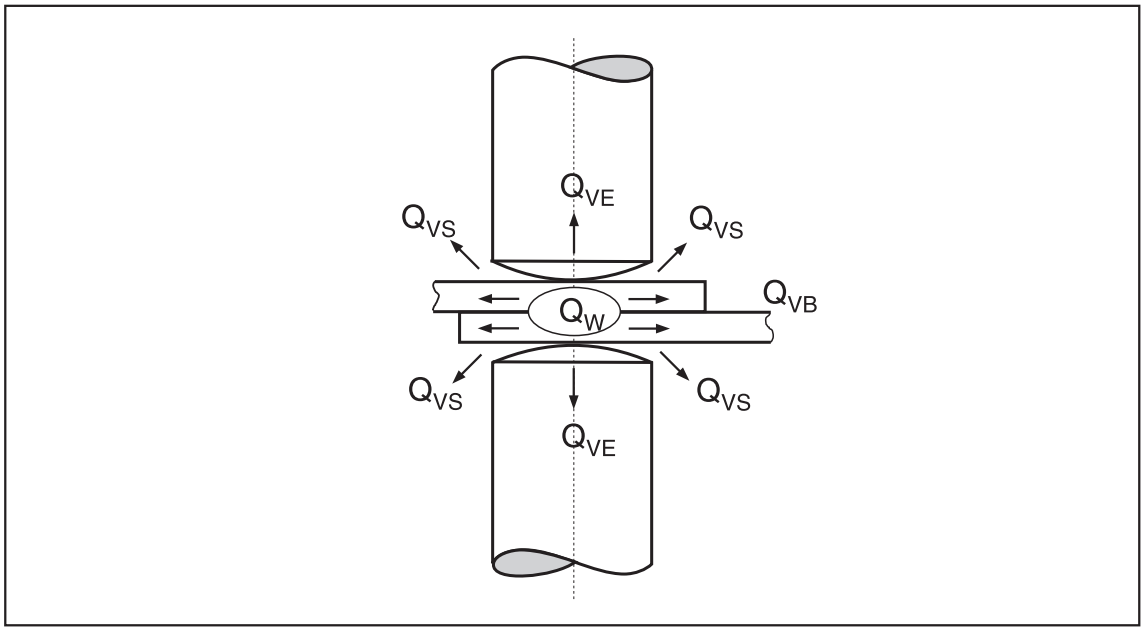

Bild 2.13: Wärmebilanz an einer Verbindungszone beim Widerstandspunktschweißen nach [1-45].

Der durch die Gleichung (18) beschriebene thermische Wirkungsrad bezieht sich ausschließlich auf die dem Werkstoff zugeführte Energie. Darüber hinaus sind die bei der Maschine auftretenden Wärmeverluste und die induktiven Verluste des ganzen Schweißsystem zu berücksichtigen.

2.2.5 Elektrodenkraft

Die Elektrodenkraft wird beim Schweißen als konstante Größe eingestellt, die aber infolge der Prozessdynamik Änderungen unterworfen ist. Die Elektrodenkraft ist folgender Gleichung nach mit der Elektrodenbeschleunigung und dem Elektrodenhub verbunden:

$$F(t) = m.a(t) = m.\dot{v}(t) = m.\ddot{x}(t)\,. \qquad (19)$$

Bei der Messung der Elektrodenkraft wird der Elektrodenhub als Resultante der Elektrodenkraft und der Reaktion der Punktschweißung in der Zeit der Temperaturveränderungen gemessen. Bei den hierbei auftretenden Nebenerscheinungen

handelt es sich um Störgrößen, die bei den Messungen infolge der Ausdehnung der Elektroden, der Elektrodenhalter und des Sensorgehäuses für die Kraftmessung sowie anderer Unregelmäßigkeiten, wie elektromagnetische Störungen und Temperaturveränderungen, auftreten [1-46] und [1-47]. Zur Kraftmessung kommen überwiegend piezoelektrische und auf Dehnungsmessstreifen basierende Messtechniken zur Anwendung, wobei in Bezug auf die praktische Anwendung von Sensoren vor allem ihre Befestigung an den Elektrodenhaltern problematisch ist.

Zur Überwachung der Reproduzierbarkeit der Schweißprozessbedingungen besteht des Weiteren die Möglichkeit, die Elektrodenkraft indirekt über den pneumatischen Zylinderdruck oder über den Elektromotorstrom zu messen.

2.2.6 Elektrodenbeschleunigung

Die Elektrodenbeschleunigung wird mittels piezoelektrischer und optischer Sensoren sowie durch kapazitive Wegaufnehmer, seismische Aufnehmer und Dehnungsmessstreifen gemessen. Diese beanspruchen auf Grund ihrer Abmessungen nur wenig Raum und können vor den Schweißeinflüssen einfach geschützt sowie problemlos befestigt werden. Als Messergebnisse liefern diese Sensoren infolge elektromagnetischer Störungen und sich summierender Temperatur bedingter Ausdehnungen in den Punktschweißungen, Elektroden, Elektrodenhaltern und im System zur Gewährleistung der Elektrodenkraft jedoch nur schwer übersichtliche dynamische Kennlinien.

Die bei verschiedenen Schweißarbeiten durch Sensoren ermittelten Kennlinien unterscheiden sich wesentlich voneinander und sind von der Stromform sowie den mechanischen Eigenschaften und der Erwärmung der verwendeten Schweißmaschinen abhängig. Aus diesem Grund kommen zur Bestimmung der charakteristischen Eigenschaften und zur Beschreibung der Kennlinien verschiedene mathematische Methoden zur Anwendung.

2.2.7 Elektrodenhub

Zur Messung des Elektrodenhubs werden kapazitive und induktive Wegaufnehmer, Dehnungsmessstreifen sowie optische und optoelektronische Sensoren verwendet. In Bezug auf ihre Anwendung stellt die Befestigung das größte Hindernis dar, da genaue Messungen direkt an den Elektroden durch die Umgebungsbedingungen und durch Werkstücke erschwert werden. Bewegungsmessungen an den Elektrodenhaltern sind indes auf Grund der großen Ausdehnungen, denen die Anlage unterworfen ist, für die Prozessüberwachung weniger gut geeignet. Denn die Ausdehnung der Elektroden und der Halter kann unter bestimmten Bedingungen die der Punktschweißung um ein Vielfaches übersteigen. Auf Grund der leichteren Befestigungsmöglichkeiten an Schweißmaschinen kommen in der letzten Zeit auch optoelektronische Laser-Sensoren zur Anwendung. Diese können leichter geschützt werden und werden durch die Werkstücke weniger beeinträchtigt.

Die Messung des Elektrodenhubs ermöglicht im Gegensatz zur Messung der Beschleunigung oder der Elektrodenkraft eine direktere Überwachung der Schweißpunktentstehung, da die physikalische Auswertung der ermittelten Kennlinien anschaulicher ist. Die gewonnenen Messwerte werden in der Regel vor der mathematischen Bearbeitung gefiltert, um einen ausgeglichenen Kennlinienverlauf zu gewährleisten. Diesen Kennlinien können die relativen Veränderungen des Elektrodenhubs in bestimmten zeitlichen Intervallen entnommen werden.

2.2.8 Qualitätsparameter

Die Qualitätsparameter sind stets der Art und dem Zweck der Punktschweißungen untergeordnet.

Nach dem Schweißen können verschiedene quantitative und qualitative Parameter der Schweißqualität in Abhängigkeit von den Konstruktionsanforderungen an den Schweißpunkt einer Überprüfung unterzogen werden. Nach [1-4] sind die bedeutendsten Qualitätsmerkmale: die Geometrie, das mechanisch-technologische Verhalten, die Bruchbeurteilung, Gefügeeigenschaften, Korrosionseigenschaften, elektrische Eigenschaften, Dichtheit, Anlauffarben sowie die Größe, Anzahl und Lage der Fehler.

Bei Laboruntersuchungen werden überwiegend Parameter verwendet, die aus zerstörenden Prüfverfahren gewonnen wurden. Die verbreitetsten Prüfverfahren sind:

- der Abrollversuch,
- der Meißelversuch,
- der Scherzugversuch,
- der Torsionsversuch,
- dynamische Versuche,
- der Kopfzugversuch,
- verschiedene zerstörende Prüfverfahren zur Feststellung der absorbierten Energie oder des Verhaltens des Prüfstücks während des Versuchs in Abhängigkeit von der Zeit sowie
- metallographische Prüfverfahren.

Die Auswahl des im Labor verwendeten zerstörenden Prüfverfahrens ist von der Laborausstattung, den Anforderungen der Forschungsaufgabe, der Anzahl der Prüfstücke und der verlangten Messgenauigkeit abhängig.

Im Rahmen dieser Dissertation wurde für Messungen der Schweißpunktqualität der Abrollversuch verwendet, der in Kapitel 3.4 eingehender beschrieben wird.

In Hinblick auf den Begriff der Schweißpunktqualität kann gesagt werden, dass eine generelle Definition dieses Begriffes nicht möglich ist, da die Qualität von der Zweckbestimmung des Schweißpunktes abhängig ist. Aus quantitativer Sicht betrachtet, handelt es sich bei der Schweißpunktqualität um einen Wert, der für eine gemessene Größe in Abhängigkeit von den Werkstückanforderungen festgelegt wird.

Betrachtet man die Schweißpunktqualität vom Aspekt des Ausknöpfbruchdurchmessers, kann dessen Ober- und Untergrenze festgelegt werden. Die Obergrenze wird in der Regel nur in den Fällen festgelegt, bei denen eine zu hohe Energiezufuhr in den Schweißpunkt und infolge dessen eine übermäßige Elektrodenabnutzung verhindert werden soll. Bei niedriglegierten Stählen wird die Untergrenze überwiegend durch nachstehende Gleichung festgelegt:

$$d_p = 5\sqrt{s}\ , \tag{20}$$

wobei:

s die Blechdicke darstellt.

2.2.9 Andere Parameter

Bei der Prozessanalyse sind auch andere Parameter zu überwachen, die als korrigierende Maßnahmen zu den oben angeführten Parametern oder als Indikator für etwaige Abweichungen im Schweißverfahren zur Anwendung kommen können.

Während des Schweißens sind zumindest folgende Parameter zu überwachen:

- der Elektrodenzustand,
- die Werkstoffeigenschaften des Werkstücks (Art, Qualität und Dicke der Werkstoffe, Qualität und Dicke der Beschichtung, Oberflächenzustand, geometrische Eigenschaften des Werkstücks, ...),
- die Arbeitstemperatur an verschiedenen Stellen (Elektroden, Halter und Transformator),
- Bedingungen die Transformatorversorgung betreffend,
- Bedingungen zur Gewährleistung der benötigten Elektrodenkraft und
- die allgemein verlangten Schweißbedingungen.

2.3 Mathematische Parameteranalyse

Zur Untersuchung des Widerstandspunktschweißverfahrens stehen verschiedene mathematische und statistische Methoden zur Verfügung:

- mathematisches Modellieren [1-48],
- Standardmethoden der Statistik,
- Analysen mittels Fuzzy-Logik und Fuzzy-Klassifikation,
- Analysen mittels Künstlicher Neuronaler Netze,
- Analysen im Merkmalsraum und
- kombinierte Methoden.

2.3.1 Mathematisches Modellieren

Bei einem mathematischen Prozessmodell handelt es sich um eine in analytischer oder mathematischer Form niedergeschriebenen Annäherung an den physikalischen Prozess,

wobei mathematische Modelle ausschließlich über bewertbare Elemente verfügen. In Hinblick auf die Komplexität des Prozesses kann das Modell analytisch oder nummerisch ausgedrückt werden [1-49]. Probleme treten dann auf, wenn eine Variable mit mehreren Faktoren gleichzeitig verbunden ist. In diesem Fall spricht man von einer multiplen Korrelation bzw. multiplen Regression.

Verschiedene Autoren haben bislang nur Annäherungen an den Widerstandspunktschweißprozess ausgearbeitet. V. A. Sudnik und Mitarbeiter [1-50] haben ein Computerprogramm entwickelt, das als Modell eine mathematische Approximation an die zwischen den Elektroden anliegende Spannung verwendet:

$$U_e = \frac{\sqrt{2}U_{20}R_{el}}{\sqrt{(L\omega)^2 + (R_M + R_{el})^2}}\left[\sin L\omega - \sin(\alpha - \varphi)\right] \times \exp\left[-\left(t_1 - \frac{\alpha}{\omega}\right)\frac{R_M + R_{el}}{L}\right], \qquad (21)$$

wobei:

U_{20} die Leerlaufspannung,

R_{el} den zwischen den Elektroden anliegenden Widerstand,

R_M den inneren Widerstand der Maschine,

ω die Kreisfrequenz des Stromkreises,

t_1 die Zeit vom Einschalten des Thyristors an,

L die Induktivität des Schweißstromkreises und

α den Zündwinkel darstellt.

K. Matsuyama beschreibt in [1-15], [1-51] und [1-52] den Schweißprozesszustand mittels der einem bestimmten Teil des Werkstücks zugeführten Wärmeenergie, die wie folgt beschrieben wird:

$$Q_{zu} = \int_0^t \left(v \cdot I_s \cdot f(d/h) + 2K_e \frac{\partial T}{\partial z} d^2\pi/4 + dh_t\pi.K\frac{\partial T}{\partial r}\right)dt\,, \qquad (22)$$

wobei:

Q_{zu} die Energiezufuhr in das Integrationsvolumen,
t die Energiezufuhrzeit in die Punktschweißung,
v die Spannung zwischen den Werkstückoberflächen,
I_s den Schweißstrom,
K_e die Wärmeleitfähigkeit der Elektroden,
K die Wärmeleitfähigkeit des Werkstücks,
d den Kontaktoberflächendurchmesser zwischen dem Werkstück und der Elektrode,
T die Temperatur,
h_t die Gesamtdicke des Werkstücks,
$f(d/h)$ den Korrekturfaktor der Stromdichte und
h die Dicke des Werkstücks darstellt.

Siehe dazu Bild 2.14.

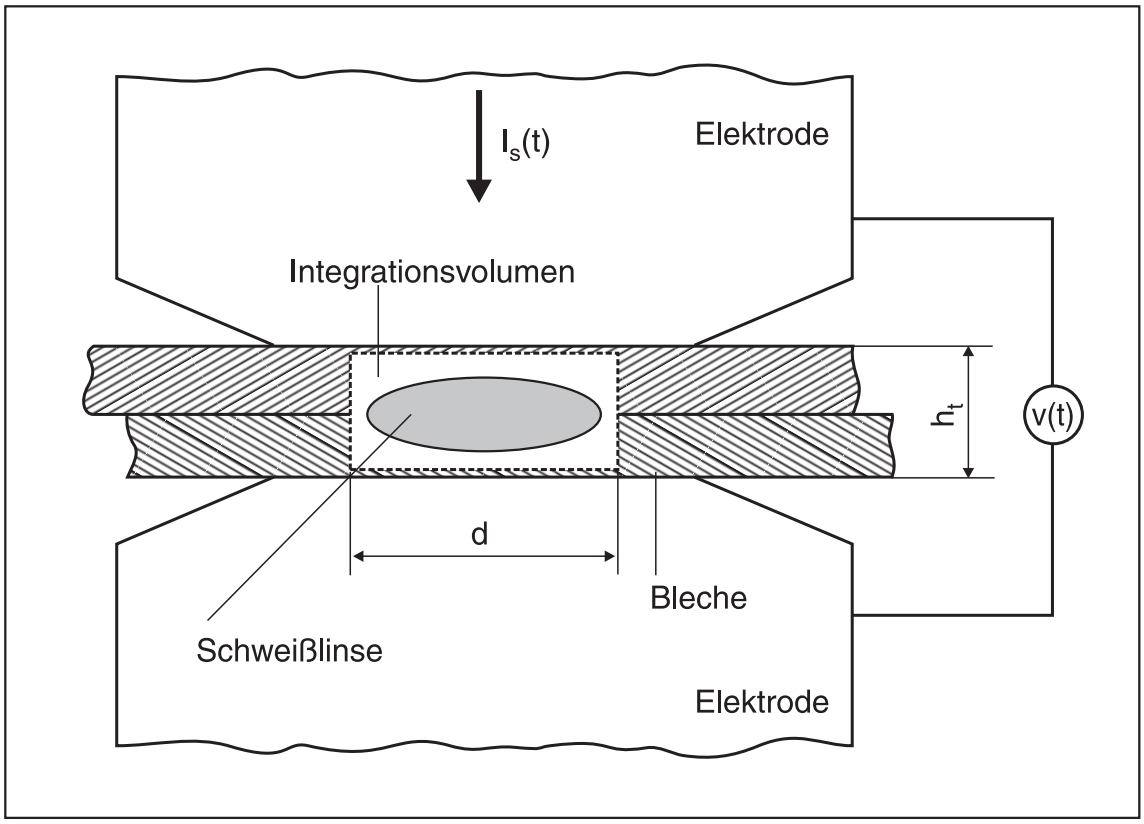

Bild 2.14: Schematische Darstellung des Energiezufuhrmodells nach [1-51].

Da es sich beim Strom, der Spannung und der Temperatur um Zeit abhängige Funktionen handelt, kann ausschließlich die während des Schweißens zugeführte Wärmeenergie bewertet werden. Aus den Messungen des Schweißpunktdurchmessers und des effektiven Stromwerts wird mittels nummerischer Modelle die dem Schweißpunkt zugeführte Wärme unter verschiedenen Schweißbedingungen prognostiziert. Des Weiteren wurde auf Grundlage dieses Modells für die Wärmezufuhr auch eine nummerische Simulation für die Schweißlinsenentstehung ausgearbeitet.

X. Chen und Mitarbeiter [1-53] haben ein Leistungsmodell für das Widerstandspunktschweißen ausgearbeitet, bei dem mittels eines nummerischen Modells aus der Schweißzeit, der Schweißspannung und der Elektrodenkraft die dem Schweißpunkt zugeführte Energie berechnet wird.

C. Lewis beschreibt in [1-44] ein Modell zur Berechnung des dynamischen Widerstands, das auf der Messung induktiver Komponenten des Sekundärstroms und der Sekundärspannung der Schweißmaschine basiert.

K. Matsuyama und andere japanische Wissenschaftler [1-54], [1-55] und [1-56] machen in der letzten Zeit vor allem von groben Approximationen mathematischer Modelle

Gebrauch, die darauf mittels Prozessdiskretisierung nach der Zeit berechnet werden. Bei bestimmten Zeitpunkten des Schweißprozesses erhält man ein relativ einfaches nummerisches Modell, das für eine schnelle und praktische Überwachung des Schweißprozesses in Echtzeit geeignet zu sein scheint.

Mit der nummerischen Simulation des Widerstandspunktschweißens beschäftigen sich darüber hinaus auch: R. Schwab [1-57], K. Kußmaul und Koautoren [1-58], A. De und Koautoren [1-59], M. J. Greitmann [1-60] und [1-61], W. Zhang [1-62] u. a.

In Hinblick auf die durchgesehene Literatur auf dem Gebiet der mathematischen Modellierung kann folgende Schlussfolgerung gezogen werden: Trotz der Vernachlässigung eines Großteils der bedeutendsten Parameter oder bei deren Approximation durch Konstanten ist es nicht möglich, weder für irgendeinen bedeutenderen Schweißparameter noch für eine bestimmte Schweißform ein übersichtliches mathematisches Modell zu entwerfen. Auf Grund der überaus großen Anzahl von zueinander in Korrelation stehenden Eingangsparametern erscheint die mathematische Modellierung eines allgemein gültigen Beispiels für eine Punktschweißung unter Berücksichtigung aller möglichen Abweichungen in Bezug auf die Schweißbedingungen, die verwendeten Werkstoffe und die Bauart der Schweißmaschine ausgeschlossen.

2.3.2 Standardmethoden der Statistik

Die Statistik entwickelt auf Grundlage von Wahrscheinlichkeitsrechnungen Methoden zur Untersuchung von zufällig auftretenden Ereignissen. Sie kommt in der Physik zur Anwendung, wenn es nicht möglich ist, bestimmte Einheiten funktionell eindeutig zu modellieren.
Bei komplexen physikalischen Prozessen, wie dem Widerstandspunktschweißen, erscheinen die Ergebnisse zufällig und deren Verteilung ohne nachvollziehbaren Zusammenhang, wenn diese als einzelne Einheiten betrachtet werden. Bei der Betrachtung der Ergebnisse als Massenerscheinung zeigen sich indes Merkmale, denen statistische Eigenschaften zugeordnet werden können.

Beim Widerstandspunktschweißen können folgende Parameter als statistisch zu behandelnde Funktion fungieren: die Schweißpunktqualität, die dem Schweißpunkt zugeführte Energie, der Widerstand zu einem bestimmten Schweißzeitpunkt u. a. Allen Massenerscheinungen liegt zu Grunde, dass ihre statistischen Merkmale ihrem Wert nach variabel sind. Diesbezüglich unterscheidet man zwischen:

- qualitativen Merkmalen, die verbal beschrieben werden (guter bzw. schlechter Schweißpunkt), und
- quantitativen Merkmalen, die in nummerischen Einheiten gemessen werden.

Bei den quantitativen Merkmalen unterscheidet man weiterhin zwischen stetigen Merkmalen, wie beim Strom, der Spannung und der Kraft, und diskreten Merkmalen, wie bei der Qualität.

Zur Beschreibung der Grundgesamtheit der Einheiten werden die statistischen Parameter bestimmt, die während des Widerstandsschweißens auf Grundlage einer Analyse mehrmals wiederholter Versuche gewonnen werden. Diese statistischen Parameter können als:

- relative Zahlen (Indexe, Koeffizienten und Strukturen),
- Klassengrenzen,
- Streuungsmaß und
- Verteilung der Ereignisse (Histogramme, Polygone, ...) dargestellt werden.

Mittels der errechneten Ergebnisse ist es möglich, die Wahrscheinlichkeitsverteilung einzelner Ereignisse darzustellen. Bei der Wahrscheinlichkeitsfunktion handelt es sich um einen Graphen, bei dem jede Fläche unter seinem jeweiligen Abschnitt ungefähr der durchschnittlichen Wahrscheinlichkeitsdichte entspricht, wonach das beobachtete Ereignis auf diesem Abschnitt erscheinen wird. Bei diskreten Häufigkeitsverteilungen wird von der hypergeometrischen, binomischen, Poisson-Verteilung und von anderen Verteilungen Gebrauch gemacht, die sich ihrer Form und somit ihrem Anwendungsgebiet nach unterscheiden. Bei stetigen Funktionen werden in der Regel die Gaußsche, Weibullsche, Studentsche, Exponential- und Chi-Quadrat-Verteilung sowie andere Verteilungen verwendet. Vor der Entscheidung die Auswahl der Methode betreffend ist eine möglichst große Anzahl von Versuchen durchzuführen. Darauf werden aus der Ergebnisverteilung der beobachteten Ereignisse die Merkmale, wie Symmetrie, Streuung, Punktlage u. a., bestimmt, worauf die statistische Methode zu wählen ist, die dem beobachteten Beispiel am nächsten liegt.

Bei der mathematischen Modellierung von Widerstandspunktschweißprozessen sind des Weiteren diverse statistische Methoden zur Korrelationsbestimmung zwischen den berechneten Graphen und den gemessenen Ergebnissen aus den Experimenten unverzichtlich. Diese dienen der Bewertung der Qualität der berechneten mathematischen Modelle.

Beim Widerstandspunktschweißen kommen statistische Methoden sowohl bei der Optimierung der eingestellten Schweißparameter [1-64] und [1-65] als auch bei der Vorbereitung der Eingangsdaten sowie als Unterstützung der anderen im diesem Kapitel beschriebenen Methoden zur Anwendung.

2.3.3 Analyse mittels Fuzzy-Logik und Fuzzy-Klassifikation

Die Theorie der unscharfen Mengen ist zeitgleich mit der Entwicklung integrierter Schaltkreise aufgekommen, an deren Signaleingängen sich statt Komparatoren (die logische Antworten –1, 0, und +1 liefern) Fuzzy-Eingänge befinden. Die Fuzzy-Logik benutzt u. a. als Kriterium zur Beschreibung von Einheiten kontinuierliche Übergänge. Zur Projektierung von Regelungstechniken mittels Fuzzy-Prozessoren ist eine große Anzahl verschiedenster Programmwerkzeuge entwickelt worden. Des Weiteren ist es für die Anwendung integrierter Schaltkreise in Form von Fuzzyprozessoren nicht erforderlich, ihre schwer verständliche Arbeitsweise zu verstehen.

Die Anwendung von Fuzzy-Steuerungen ist vor allem in Fällen vorteilhaft, wenn die Reaktion des Systems eine eindeutige und relativ komplexe Funktion mit vorhersehbarem Verlauf darstellt, die mathematisch modelliert oder zumindest graphisch stetig dargestellt werden kann.

Die Definition der Zugehörigkeitsfunktion erfolgt bei der Fuzzy-Logik mittels unscharfer stetiger Übergänge. Zugehörigkeitsfunktionen können die Form eines Trapezes [1-66], eines Dreiecks, von Exponential- oder Gaußscher Funktionen oder anderer exakt beschriebener und mathematisch formulierter mengentheoretischer Zusammenhänge annehmen.

Beim Widerstandspunktschweißen ist es möglich, die Fuzzy-Logik zur Schweißparameteroptimierung einzusetzen [1-67], wobei bei der Schweißprozess-überwachung die Fuzzy-Logik infolge der komplexen Problematik in der Regel in Verbindung mit statistischen Methoden zur Anwendung kommt. Die auf der mehrdimensionalen vergleichenden Klassenzugehörigkeit basierende Fuzzy-Klassifizierung wurde von G. Weber und Koautoren eingeführt. Diese Fuzzy-Klassifizierung wird zur Überwachung der Schweißprozessstabilität [1-68], der Elektrodenabnutzung [1-69] oder der Schweißpunktqualität [1-42] verwendet. Die Grundlagen aller in den angeführten Werken beschriebenen Verfahren sind Untersuchungen zur Korrelation von elektrischen und/oder mechanischen Kenngrößen des Punktschweißprozesses mit der Qualität von Punktschweißverbindungen. Aus den Prozessparametern werden bestimmte Merkmale berechnet, die aus dem Kennlinienverlauf oder aus den statistischen Eigenschaften von Auto- und Kreuzkorrelationen gewonnen werden. Die Merkmale werden als Histogramme oder als Referenzmuster in Diagrammen der relativen Häufigkeit in Abhängigkeit von den Histogrammklassen dargestellt. Des Weiteren besteht die Möglichkeit, die Musterbewertung mittels einer Fuzzy-Pattern-Klassifikation durchzuführen. Bei dieser Methode kann das Prinzip des überwachten Lernens (Lernen mit Lehrer) angewandt werden, bei dem nur ein bestimmter Schweißparameter, z. B. der Elektroden-verschleißgrad, einer Veränderung unterzogen wird. Auf Grundlage von Referenzmustern, der Definition von Qualitätsklassen und der Zuordnung von variablen Parametern in Klassen kann aus einer größeren Anzahl von Histogrammen die Fuzzy-Zugehörigkeitsfunktion berechnet werden. Moderne derartige Systeme sind im Stande, während des Produktionsprozesses selbstständig zu lernen und auf dieser Grundlage später den Schweißprozess online zu überwachen.

Wie bei allen anderen Analyseverfahren kommt dem Messverfahren und der Auswahl der Eingangsparameter eine überaus große Bedeutung zu. So stellt G. Weber in [1-69] fest, dass für die Überwachung der Elektrodenabnutzung die auf Grundlage der Spannung, des dynamischen Widerstands und des Elektrodenhubs gewonnenen Merkmale am vorteilhaftesten sind. X. Chen und Koautoren stellen in [1-70] eine auf Fuzzy-Logik basierende Schweißprozesssteuerung vor.

A. Straube stellt in [1-71] als Methode der Fuzzy-Klassifizierung die sog. Fuzzy-Musteranalyse vor, die während des Schweißprozesses Informationen über die Schweißqualität liefert. Dieses Verfahren basiert auf Messungen des Schweißstroms und der Spannung. Aus den Messdaten berechnet das Programm für jeden einzelnen

Schweißpunkt die charakteristischen Werte des Prüfstücks, die als Kennlinie oder in einer Bewertungsmatrix abgebildet werden. Darüber hinaus wird jede Schweißung einer Bewertung unterzogen, und die Ergebnisse können in Form eines adaptierten Protokolls dokumentiert werden. Das beschriebene System kommt erfolgreich im Kraftfahrzeugbau zur Anwendung.

2.3.4 Analyse mittels Künstlicher Neuronaler Netze

Beim Neuron handelt es sich um die bedeutendste Zelle des Nervensystems lebender Organismen [1-72]. Das Neuron nimmt über seine Dendriten verschiedene Signale auf, die es unter bestimmten Bedingungen über seine Synapsen weiterleitet.

Für das Künstliche Neuron (siehe Bild 2.15) ist charakteristisch, dass es mehrere Eingangssignale mit entsprechenden Gewichten aufnimmt und diese mittels einer diskreten Summierung der gewichteten Eingangssignale, die Schwellenwert genannt wird, folgender Gleichung nach berechnet:

$$\psi = \sigma(f) = \sigma\left(\sum_j \tau_j \cdot \xi_j - VP\right), \tag{23}$$

wobei:

ψ das Ausgangssignal,
ξ_j bei $j = 1$ bis n die Anzahl der Eingangsparameter darstellt, bei denen es sich um reale, binäre oder bipolare Zahlen (in der Regel von –1 bis +1) handelt,
τ_j das Eingangsgewicht,
VP den Schwellenwert und
σ die Aktivierungsfunktion darstellt.

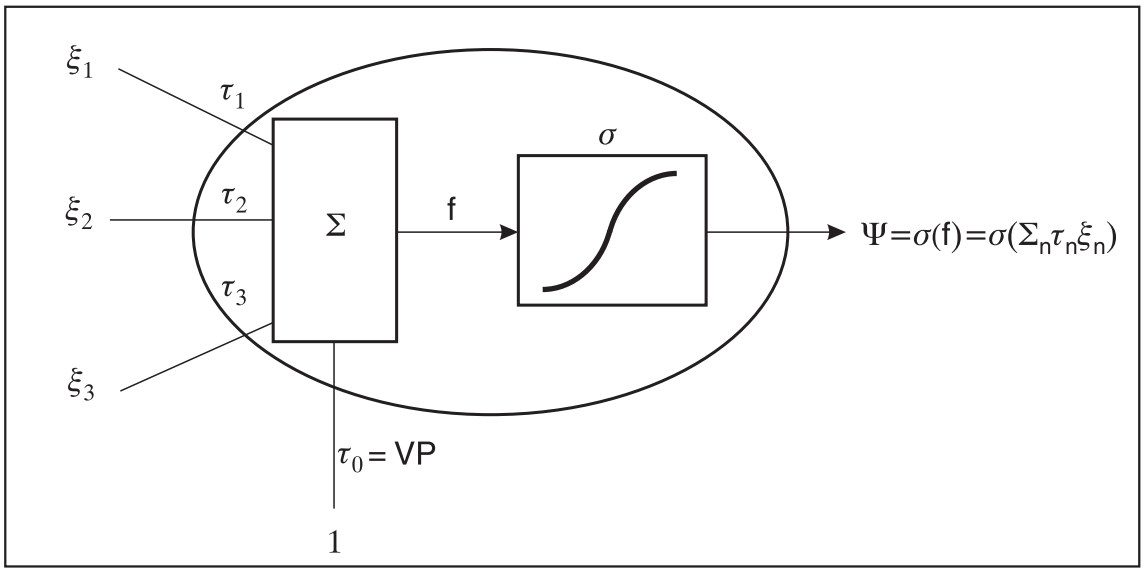

Bild 2.15: Aufbau eines Künstlichen Neurons.

Die Anzahl der Eingangsparameter ist ausschließlich durch die zur Verfügung stehende Hardware und die Prozesszeiten beschränkt. In der Regel ist die Anzahl der Ausgangsparameter geringer als die der Eingangsparameter, was aber nicht zwingend notwendig ist. An den Ausgängen erhält man in der Regel folgende Treppenfunktion:

$$\sigma(f) = \begin{cases} 1, \text{falls}(f) > 0 \\ 0, \text{falls}(f) \leq 0 \end{cases} . \tag{24}$$

Werden am Ausgang analoge Werte benötigt, kommt einer der sog. Sigmuidfunktionen zur Anwendung, bei denen es sich um eine Art ausgedehnte Treppenfunktion handelt. Überwiegend kommen folgende Sigmuidfunktionen zur Anwendung:

$$\sigma(f) = 1/(1+e^{-f}) \text{ oder} \tag{25}$$

$$\sigma(f) = \tanh(f). \tag{26}$$

Mit Hilfe solcher miteinander zu einem Netz verbundener Elemente werden Probleme auf dem Gebiet der Klassenbildung, Musterklassifizierung, (Auto-)Korrelationsanalyse, Transformation und Modellierung gelöst.

Ein Künstliches Neuronales Netz mit einer einfachen Netzarchitektur ist in Bild 2.16 abgebildet. Die Anzahl der verborgenen Schichten zwischen der Eingabe- und Ausgabeschicht ist nicht festgelegt. Ferner besteht in den verborgenen Schichten die Möglichkeit, dass nur bestimmte Neuronen aktiviert und infolge dessen nur bestimmte Signale weitergeleitet werden. Bei den auf PCs applizierten Computersimulationen kommen in der Regel zwischen einer und fünf verborgene Schichten zur Anwendung, da sich die Ergebnisse Künstlicher Neuronaler Netze mit überaus komplexen Topologien denen mit einer einfachen Architektur überwiegend ähneln.

Der Lernvorgang eines Künstlichen Neuronalen Netzes basiert auf dem Prinzip, dass in das Netz bestimmte Parameter, deren Ergebnisse bereits bekannt sind, eingegeben, während des Lernprozesses „bewertet“ und zur Ausgabeschicht weitergeleitet werden. Hierdurch werden die Eigenschaften der einzelnen Schwellenfunktionen und Schichten definiert. Künstliche Neuronale Netze kommen statt der mathematischen Modellierung und statt klassischer statistischer Methoden bei der Modellierung nichtlinearer Prozesse mit einer großen Anzahl von Variablen zur Anwendung. Der Hauptvorteil Künstlicher Neuronaler Netzen liegt in der Möglichkeit zur Bearbeitung komplexer Prozesse, ohne dass dafür umfangreiche mathematische Kenntnisse und das Wissen sowohl um die Funktionsweise derartiger Netze als auch um deren Aufbau erforderlich wären. Mittels Computerprogramme, die die Funktionsweise Künstlicher Neuronaler Netze simulieren, ist es praktisch möglich, ohne Vorkenntnisse über die Grundlagen des neuronalen Modellierens und die im Programm verwendeten Neuronentopologien die Arbeit aufzunehmen. Als nachteilig hat sich indes die Tatsache erwiesen, dass Künstliche Neuronale Netze auch ohne das Wissen um die physikalischen Hintergründe des untersuchten Prozesses „unterrichtet“ werden können. Da Künstliche Neuronale Netze nicht in der Lage sind, sowohl bei den Ein- als auch Ausgängen Eingabefehler selbstständig zu erkennen, führt die Eingabe ungenauer oder falscher Parameter zu

entsprechenden unlogischen oder falschen Ergebnissen. Darüber hinaus gestaltet sich auch die Fehlererkennung nach Beendigung des Lernprozesses in Vergleich zu anderen Methoden als überaus schwierig.

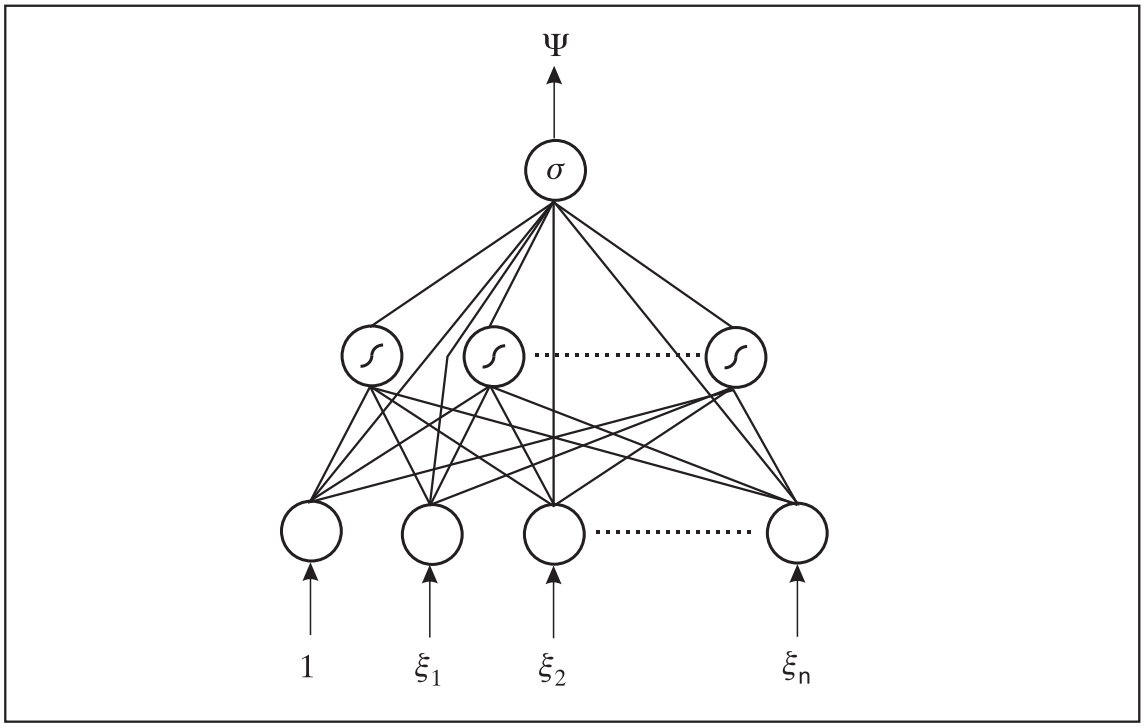

Bild 2.16: Darstellung eines Künstlichen Neuronalen Netzes mit einer verborgenen Schicht [1-72].

Bei der Analyse von Widerstandspunktschweißprozessen werden Künstliche Neuronale Netze zur Bestimmung der Schweißeignung, der Schweißparameter, der Elektrodenstandmenge, des prognostizierten Schweißpunktdurchmessers sowie der prognostizierten und dem Schweißpunkt zugeführten Energie verwendet [1-73] bis [1-77]. Als Eingangssignale werden in der Regel Kraft-, Strom- und Spannungsmessungen sowie im geringeren Maß Messdaten über den Elektrodenhub und die Elektrodenbeschleunigung verwendet.

J. D. Brown beschreibt in [1-78] als Eingangsparameter folgende Größen:

- den zwischen den Elektroden anliegenden Widerstand bei jedem Strommaximum,
- die integrierten Widerstände über verschiedene Halbwellen,
- den Steigungswinkel des Widerstands,
- die Differenz zwischen dem Widerstandsminimum und -maximum,
- den Widerstandsabfall nach erreichtem Maximum,
- die Fläche unter der Kraftkennlinie und
- die Fläche unter der Widerstandskennlinie.

Hierbei weist die Autorin auf die Bedeutung einer vorhergehenden Bearbeitung der Parameter und der aufmerksamen Auswahl der Eingangssignale hin.

2.3.5 Mehrparametrische Analyse mittels Optimierung der Eingangsparameter im Zustandsraum

In den letzten 40 Jahren sind zahlreiche Zustandsraum-Theorien entwickelt worden, die auf verschiedenen Gebieten zur Anwendung kommen. Anfänglich wurde der Zustandsraum durch ein System von Differenzialgleichungen erster Ordnung mathematisch wie folgt definiert:

$$\dot{x} = Ax + Bu \text{ und} \qquad (27)$$
$$y = Cx + Du$$

wobei:

u die Eingangsdaten des Zustandsraums,
y dessen Reaktion,
X den Zustandsvektor und
A, B, C und *D* die Matrizen darstellt.

Hierdurch ist es möglich, lineare [1-79] und [1-80] und nichtlineare [1-81] und [1-83] Systeme mit mehreren Variablen darzustellen, deren Eingänge über zeitlich variierende Eingangsdaten verfügen.

Bei der ursprünglichen Form des Zustandsraumes stellen sich folgende zwei bedeutende Einschränkungen:

- Zum einem ist es erforderlich, die physikalischen Formeln des behandelten Systems zu kennen. Denn trotz des umfangreichen physikalischen und mathematischen Wissens sind viele praktische Beispiele entweder nicht ausreichend erforscht oder zu komplex, als dass sie derart dargestellt werden könnten.
- Zum anderen ergeben sich weitere Einschränkungen aus der komplizierten Lösung des Systems von Differenzialgleichungen [1-84] und [1-85].

Neuere Zustandsraum-Theorien verbindet mit der ursprünglichen mathematischen Definition ausschließlich das Grundprinzip, das von Wirtschaftswissenschaftler wie folgt definiert wird: Ein bestimmter Zustand des Systems geht auf Veränderungen der Eingangsparameter zurück, während der Zustandsraum durch die Anzahl der Eingangsparameter und die Anzahl der Zustände zwischen dem Ein- und Ausgang sowie deren Verbindungen definiert wird.

Vor der Verbreitung leistungsstarker Computersysteme sind zahlreiche Prinzipien zur Vereinigung und Verbindung von Differenzialgleichungen ausgearbeitet worden [1-86] und [1-87]. An dieser Stelle sollen die Markov-Ketten und die Monte-Carlo-Methode als die bekanntesten Verfahren erwähnt werden. Mit der Verwendung von Computersystemen hat sich die Anwendung der Zustandsraum-Theorie zuerst auf diskrete lineare Systeme ausgeweitet, für welche die Definition des Zustandsraums wie folgt angegeben werden kann:

$$\underline{x}(n+1) = A\underline{x}(n) + B\underline{u}(n) \text{ und} \qquad (28)$$
$$\underline{y}(n) = C\underline{x}(n) + D\underline{u}(n),$$

wobei:

$\underline{x}(n)$ die Länge des n-ten Zustandsvektors in der diskreten Zeit n,
$\underline{u}(n)$ den Eingangsvektor und
$\underline{y}(n)$ den Ausgangsvektor darstellt.

Zwischen dem Ein- und Ausgang befindet sich eine übertragbare Matrix der Abmessungen $N \; X \; N$, durch welche die dynamischen Eigenschaften des Systems bestimmt werden. Durch die aus diesem System hervorgehenden Lösungen ist es möglich, Fälle zu bearbeiten, bei denen die Eigenschaften mehrerer Ausgänge von Interesse sind.

Im letzten Jahrzehnt hat die Zustandsraum-Theorie Einzug in die Elektrotechnik (Schaltkreistheorie), Physik, Wirtschaftslehre, Biologie, Soziologie, Psychologie und in zahlreiche andere Gebiete gehalten [1-88] bis [1-98]. Die Zustandsraum-Theorie hat sich hierbei in folgende Richtungen entwickelt:

- die Transformation stetiger in diskrete Systeme und umgekehrt mit Hilfe von Filtern und den Prinzipien der Glättung und Fuzzyfizierung von Ausgangsfunktionen,
- die Ausarbeitung von Programmwerkzeugen zur Arbeit mit Merkmalsräumen (LISP, Prolog, Smalltalk, POP-11, Mathematica u. a.),
- die Schaltkreistheorie und die Regulierung dynamischer Prozesse [1-99],
- die Prognosetheorie auf Grundlage der Wahrscheinlichkeitsrechnung,
- Statistik und Wahrscheinlichkeitsrechnung,
- Systeme für mehrdimensionales Prognostizieren,
- die Prozessanalyse und
- die Prozesssimulation.

Die die Verbindungen zwischen den Elementen definierenden Funktionen sind ihrer Form nach nicht festgelegt und können somit verschiedene Formen annehmen – von quantitativen, mathematischen bis zu beschreibenden oder bildlichen.

Die Verbindungen zwischen den einzelnen Merkmalen und deren einzelnen Funktionen können während des Lösens des Systems variieren. Die Bestimmung der Verbindungsfunktionen (das Lernen des Zustandsraums) erfolgt vor dem Beginn des Prozesses oder während der Prozessanalyse mittels einer Elementanalyse. Im letzteren Fall kann der Lernvorgang vom Eingang in Richtung Ausgang (feed-forward), vom Ausgang in Richtung Eingang (feed-back) oder in beide Richtungen erfolgen. Ein Beispiel eines in beiden Richtungen lernenden Zustandsraums ist in Bild 2.17 dargestellt. In diesem Fall stellen die einzelnen Punkte die Zustände und die Linien die Verbindungen zwischen den einzelnen Zuständen dar, wobei jede Verbindung über eine bestimmte Funktion verfügt. Die gesamte Abbildung bildet den Zustandsraum ab. Werden die Verbindungsfunktionen automatisch bestimmt, so kann auch von Künstlicher Intelligenz gesprochen werden [1-99].

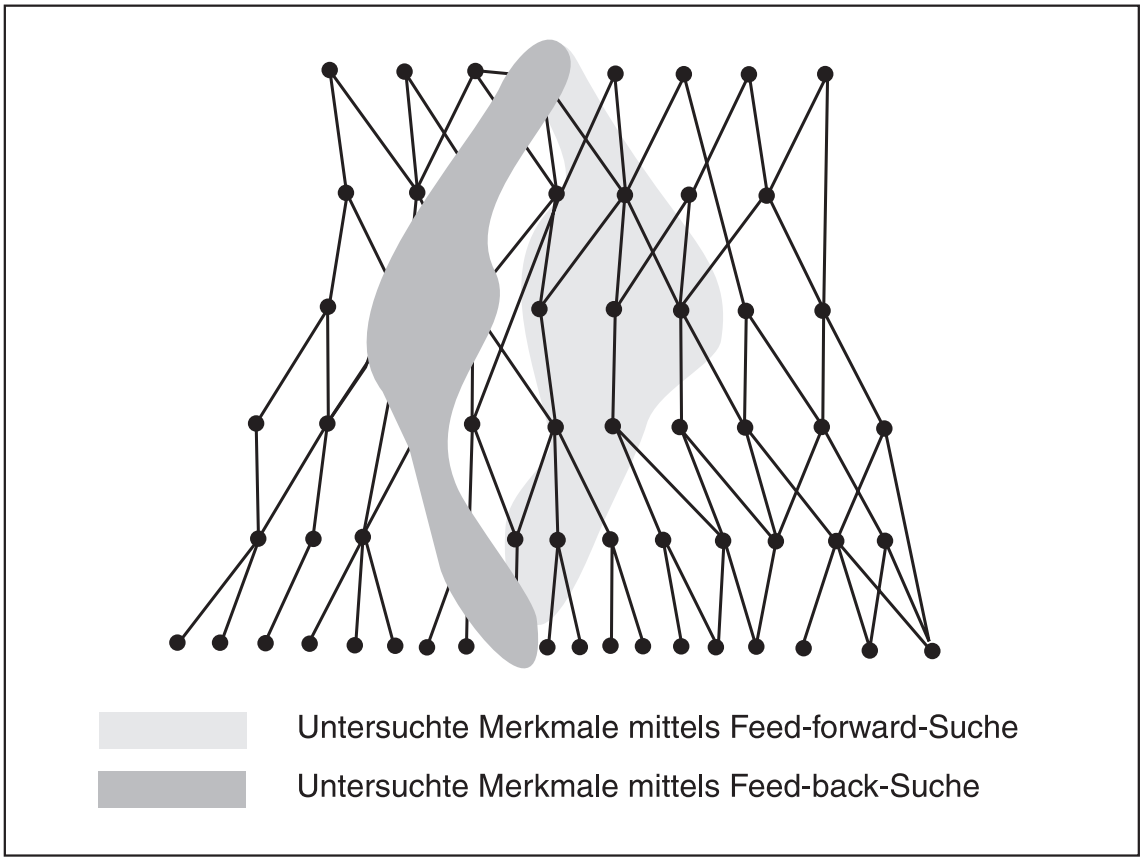

Bild 2.17: Bestimmung der Verbindungsfunktionen in einem Zustandsraum (Lernen) mittels einer Feed-forward- und Feed-back-Suche [1-100].

2.3.6 Kombinierte Methoden

Die Messungen, die zur Erkennung der physikalischen Erscheinungen durchgeführt werden, werden zuerst statistisch bearbeitet, wobei für eine klassische Darstellung eines Zustandsraums mittels Differenzialgleichungen ein mathematisch modellierter Prozess benötigt wird.

Beim Merkmalsraum handelt es sich im Grunde um ein offenes System, sodass für Verbindungsfunktionen sowohl mathematische als auch statistische Funktionen zur Anwendung kommen, wobei die Art der Verbindung nicht verbindlich festgelegt ist. Werden den einzelnen Elementen des Zustandsraums Neuronen eines Künstlichen Neuronalen Netzes und den Verbindungen zwischen diesen einzelnen Elementen die Verbindungsfunktionen Künstlicher Neuronaler Formeln zugeordnet, nimmt der Merkmalsraum theoretisch die Form eines Künstlichen Neuronalen Netzes an.

Zur Bearbeitung der Eingangsdaten oder als Verbindungsfunktionen können auch Funktionen der Fuzzy-Logik verwendet werden. Ferner können auch verschiedene sich überschneidende Lernvorgänge der beschriebenen Methoden zur Anwendung kommen.

Derzeit kommen bei der Analyse von Widerstandspunktschweißprozessen alle oben beschriebenen Verfahren in Verbindung mit mindestens einem Element anderer Verfahren zur Anwendung [1-99].

Das in dieser Dissertation ausgearbeitete Merkmalsraummodel unterzieht die Eingansparameter einer digitalen Bearbeitung, wie sie in Kapitel 2.2 beschrieben ist, während die Analyseparameter auf mathematischem Modellieren (siehe Kapitel 2.3.2) basieren. Der Selbstlernvorgang des Merkmalsraums entspricht dem Künstlicher Neuronaler Netze, während die mehrdimensionale Klassifikation in Grunde der Fuzzy-Klassifikation entspricht.

2.3.7 Echtzeit-Prozessanalyse

Bei der Echtzeitanalyse (siehe auch Kapitel 2.2.1 und 2.3.1 bis 2.3.6) von Widerstandspunktschweißprozessen kommen einfache mathematische und statistische Modelle zur Anwendung, die mittels einer der zuvor beschriebenen Methoden gewonnen werden können. Wenn die Möglichkeit gegeben ist, verläuft die Echtzeitanalyse in Verbindung mit einer Schweißprozesssteuerung als Teil einer Feedback-Steuerung [1-12] bis [1-21]. In der Regel erfolgt die Echtzeitanalyse mittels eines Mikrocontrollers oder, im Ausnahmefall, mittels eines PCs. Beide sind in der Regel vom Steuerungsgerät getrennt und versorgen die Steuerung ausschließlich mit den Soll-Werten.

Es besteht auch die Möglichkeit, den Analysator gleichzeitig als Dokumentationssystem und Schweißsteuerung einzusetzen. Die Form der an die Steuerung weitergeleiteten Ergebnisse ist binär (fortfahren – einstellen, gut – schlecht) oder nummerisch. Die so gespeicherten Kenndaten beziehen sich entweder auf alle Punktschweißungen oder nur auf Punktschweißungen, die bestimmte Qualitätskriterien nicht erfüllen.

3. Versuchsdurchführung

3.1 Versuchsplanung

Es wurden bewusst Schweißverfahren ausgewählt, die in der Praxis zur Anwendung kommen sowie leicht zu überprüfen und verständlich sind. Hierbei wurden verschiedene beschichtete und unbeschichtete Stahlbleche sowie verschiedene Schweißmaschinen verwendet. Ferner wurden bei den Laboruntersuchungen die Schweißströme und der Schweißelektrodenzustand überwacht verändert, und zwecks einer Analyse des vom Elektrodenverschleiß ausgehenden Einflusses wurden über 20.000 Schweißungen durchgeführt. Bei den bei der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) in Berlin und den beim Schweißinstitut in Ljubljana durchgeführten Messungen wurde der Zuverlässigkeit der Messungen, die als Referenzdaten für die nachfolgenden Untersuchungen dienten, besondere Aufmerksamkeit geschenkt. Um die in dieser Dissertation angewendeten Verfahren und Computerprogramme einer möglichst erschöpfenden Überprüfung zu unterziehen, wurden seitens des Verfassers für die statistische Analyse auch Messdaten verwendet, die nicht von ihm ermittelt wurden und bei deren Messungen er nur teilweise mitwirkte.

3.1.1 Auswahl der Versuchsvorrichtung

Man unterscheidet zwischen zahlreichen Varianten von Widerstandsschweißmaschinen, die alle aus zwei miteinander verbundenen Komponenten bestehen: aus einer Komponente, durch die dem Schweißpunkt elektrische Energie zugeführt wird, sowie einer Komponente für das Zusammenpressen (oder auch für das Einspannen sowie Auf- und Nachsetzen) des Werkstoffes.

Bei Schweißmaschinen unterscheidet man zwischen ortsfesten Standmaschinen und beweglichen Schweißzangen, die in der Regel schlechtere mechanische Eigenschaften

haben. Einige Schweißmaschinen verfügen über eine große Fensterfläche des Sekundärkreises, weshalb es bei diesen erforderlich war, der Impedanz des Sekundärkreises (siehe Bild 2.8) große Aufmerksamkeit zu schenken. Diese ist abhängig von:

- den dynamischen Transformatoreigenschaften,
- der Ausladung,
- dem Elektrodenhalterabstand,
- dem elektrischen Widerstand des sekundären Stromkreises,
- der Innenimpedanz des Transformators (die höher als bei ortsfesten Maschinen ist) und
- den ferromagnetischen Stoffen an bzw. in der Schweißmaschinenausladung.

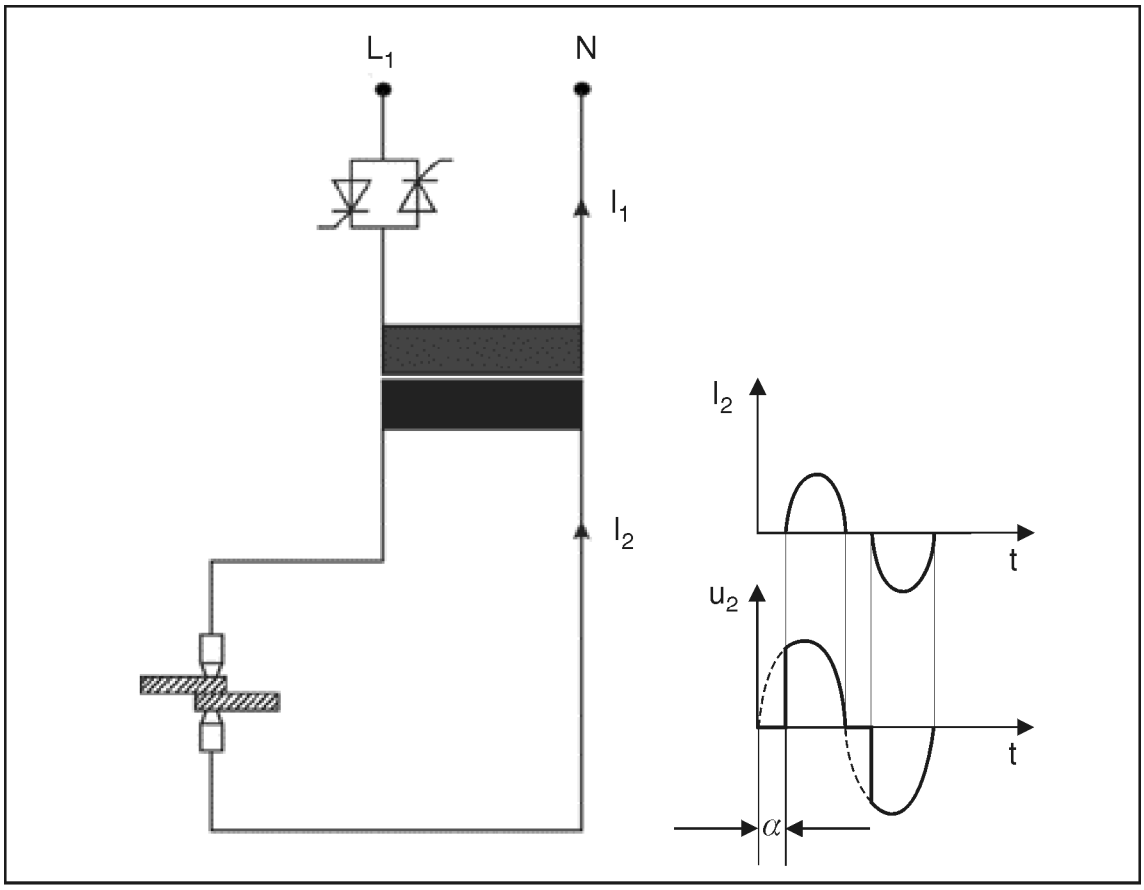

Bild 3.1: Schematische Darstellung einer Einphasen-Wechselstrom-Widerstandsschweißmaschine.

Zur Versuchsdurchführung wurden drei Punktschweißmaschinen ausgewählt, die für die Verwendung im Kraftfahrzeugbau typisch sind, und zwar:

- eine C-Roboterschweißzange vom Typ BID-PSZ 200.113 (VH 60) mit integriertem Transformator des französischen Herstellers Le Bronze Industriel, wie sie in Bild 3.3 abgebildet ist (nachfolgend CRS genannt),

- eine ortsfeste Punktschweißmaschine vom Typ VST 40 des slowenischen Herstellers Varstroj d.o.o. (nachfolgend VST genannt) und
- eine ortsfeste Punktschweißmaschine vom Typ Dalex PMS 14-4, Dalex-Werke GmbH & Co. KG (nachfolgend OFS genannt), wie sie in Bild 3.4 dargestellt ist.

Alle verwendeten Punktschweißmaschinen verfügen über einen ausreichenden Schweißstrom und eine ausreichende Elektrodenkraft zum Schweißen von Blechen bis zu einer Dicke von 1,0 mm. Die technischen Eigenschaften der Schweißmaschinen können der Tabelle 3.1 entnommen werden.

Bei den verwendeten Schweißmaschinen handelt es sich um Einphasen-Wechselstrom-Maschinen, deren Funktionsprinzip in Bild 3.1. dargestellt ist und bei denen die Schweißstromstärke durch den Zündwinkel α am primären Thyristorblock eingestellt wird. Bei dieser Phasenschnittsteuerung ist zu berücksichtigen, dass die zugeführte Wärmemenge in Abhängigkeit von der Skaleneinteilung in Prozent (0–100 %) oder in Grad (0–90º) nicht linear ist. Unter Berücksichtigung der Gleichung (9) und (10) erhält man folgende Funktion:

$$Q_{zu} = const\ (x - sin(2x)/2), \tag{29}$$

die in Bild 3.2 dargestellt wird.

Tabelle 3.1: Technischen Eigenschaften der Schweißmaschinen CRS, VST und OFS.

	CRS	**VST**	**OFS**
Nennleistung bei 50 % ED [kVA]	60	40	100
Sekundär-Leerlaufspannung [V]	7,1	4,7	5,3
Höchstkurzschlussstrom [kA]	21,3	32	40
Höchstschweißstrom [kA]	19,4	28	34
Ausladung [mm]	640	450	480
Armabstand [mm]	410	180–360	190–550
Maximaler Arbeitshub [mm]	80	80	300
Elektrodenkraft [N]	347–5600	470–7030	850–1200
Anschlussleistung [kVA]	89,3	82	162
Anschlussspannung [V]	1 x 380	1 x 380	1 x 380
Anschlussfrequenz [Hz]	50	50	50
Mindestkühlwasserkreislauf bei 20 ºC [l/min]	6	4	6

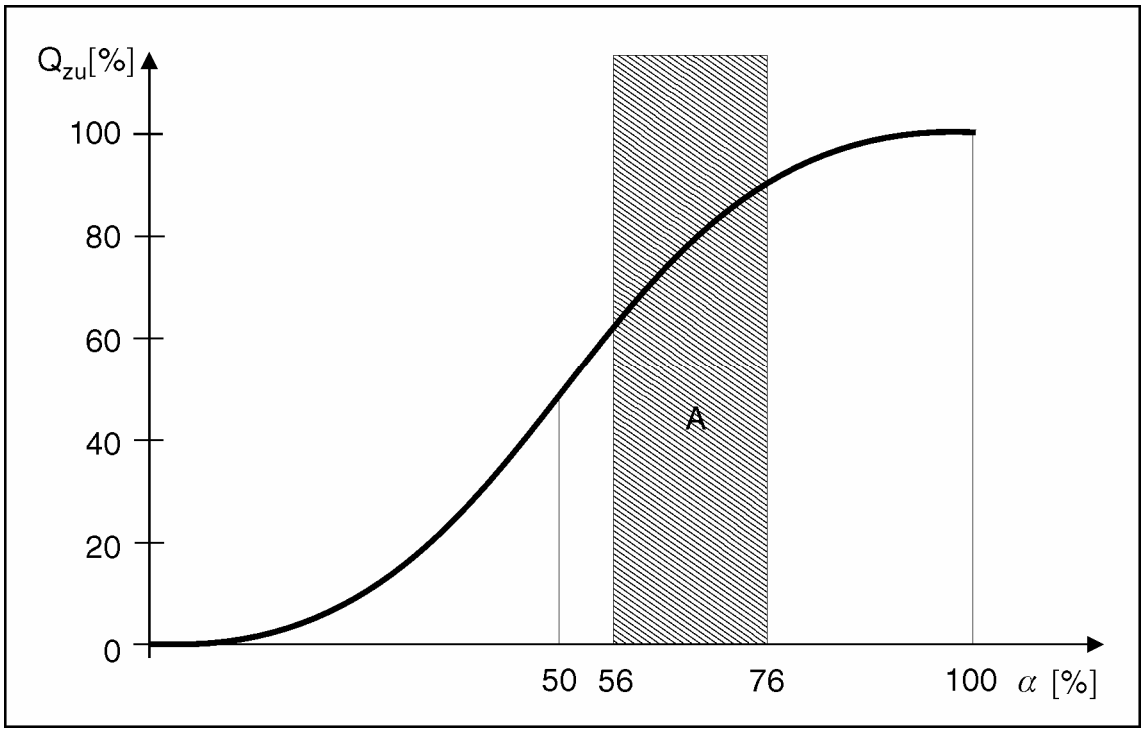

Bild 3.2: Nichtlineare Abhängigkeit der zugeführten Wärmemenge Q_{zu} vom Zündwinkel α bei gleich bleibendem Widerstand R. Der Abschnitt A stellt die Zündwinkel dar, mit denen im Rahmen dieser Dissertation die Schweißungen durchgeführt wurden.

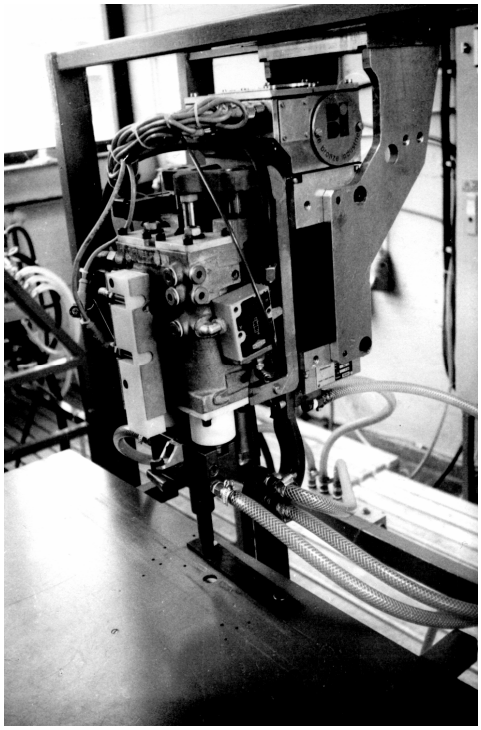

Bild 3.3: C-Roboterschweißzange vom Typ PSZ 200.113 (VH 60), Le Bronze Industriel.

Bei den durchgeführten Untersuchungen wurde der Schweißstrom nicht mittels einer Feedback-Steuerung eingestellt, da zur Erforschung elementarer Vorgänge während des Schweißens diese Methode weniger gut geeignet ist. Denn die Feedback-Steuerung verursacht Schwankungen in den Stromformen, Spannungen und dynamischen Widerständen sowie auch in den Kräften, Wegen oder Elektrodenbeschleunigungen.

3.1.2 Versuchswerkstoff

Bei den Versuchen wurden folgende Bleche verwendet:

- unbeschichtetes dekapiertes Stahlblech DC04AO nach DIN EN 10130, Dicke s = 0,8 mm (nachfolgend UBS genannt),
- feuerverzinktes Stahlblech DX53D+Z75/75 nach DIN EN 10142, Dicke s = 0,8 mm (nachfolgend FVS genannt) und
- elektrolytisch verzinktes Stahlblech DC53D+Z75/75 nach DIN EN 10152, Dicke s = 0,71 (nachfolgend EVS genannt).

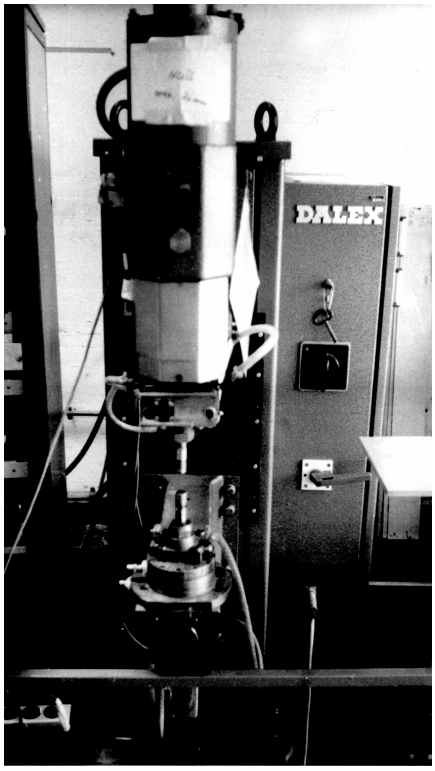

Bild 3.4: Ortsfeste Punktschweißmaschine vom Typ Dalex PMS 14-4, Dalex-Werke GmbH & Co. KG mit einem isolierten Positionierungstisch (rechts) zum Aufsetzen der Prüfstücke rechtwinklig zu den Schweißelektroden. Unter der unteren Elektrode befindet sich eine von der Bundesanstalt für Material-forschung und -prüfung ausgearbeitete Sonde zur Messung der dynamischen Elektrodenkraft während des Schweißens.

Die chemische Zusammensetzung der verwendeten Versuchswerkstoffe kann der Tabelle 3.2 entnommen werden.

Tabelle 3.2: Chemische Zusammensetzung der Versuchswerkstoffe UBS, FVS und EVS.

	Element	**C**	**Mn**	**Si**	**P**	**S**	**Al**	**N**
UBS	Massenanteil [%]	0,085	0,38	0,009	0,015	0,017	0,137	0,004
FVS	Massenanteil [%]	0,035	0,22	0,010	0,012	0,018	0,044	0,006
EVS	Massenanteil [%]	0,044	0,53	0,011	0,018	0,028	0,022	0,005

Die angeführten Stoffe verfügen über die in Tabelle 3.3 angeführten physikalischen Eigenschaften.

Tabelle 3.3: Physikalische Eigenschaften der Werkstoffe UBS, FVS und EVS.

	Streckgrenze R_e [N/mm^2]	Zugfestigkeit R_m [N/mm^2]	Bruchdehnung A_{80} [% min.]
UBS	210	310	38
FVS	230	320	30
EVS	240	310	34

Der Oberflächenzustand der angeführten Werkstoffe ist in Tabelle 3.4 angegeben.

Tabelle 3.4: Oberflächenzustand der Versuchswerkstoffe UBS, FVS und EVS beim Schweißen.

	kalt-nach-gewalzt	geölt	Nennzinkauflage Gewicht [g/m^2]	Nennzinkauflage Dicke [µm]	Reinigungs-mittel
UBS	nein	ja	0/0	0/0	Aceton
FVS	ja	ja	54/54	7,5/7,5	Aceton
EVS	nein	ja	54/54	7,5/7,5	Aceton

Die Stahlbleche wurden für spätere zerstörende Prüfverfahren in 30,0 mm breite Streifen geschnitten. Um die Entstehung von Nebenschlüssen zu verhindern, wurde ein Mindestschweißpunktabstand von 30,0 mm gewählt, was auch den Empfehlungen in [3-1] entspricht.

3.1.3 Versuchsparameter

Die Schweißparameter wurden nach den in Tabelle 3.5 angeführten Vorgaben der Stahlblechhersteller eingestellt.

Die Auswahl der Elektroden erfolgte nach den Empfehlungen des Blechherstellers, und zwar die Typen G16 DIN ISO 5184 und B16 DIN ISO 5184 aus einer geschmiedeten CuCrZr-Legierung mit einem Außendurchmesser d_1 = 16,0 mm und einem Elektrodenspitzendurchmesser d_e = 6,0 mm der AEG SVSW Schweißtechnik GmbH [3–1] und [3–2].

Die Elektrodenkräfte wurden kontrolliert verändert, während sie über einen Messabschnitt konstant gehalten wurden.

Zum leichteren Vergleich verschiedener Stahlbleche und einer möglichen Vereinfachung des Programms für die Datenanalyse wurde eine Schweißzeit von acht Perioden gewählt, was auch den Empfehlungen in [3-1] entspricht.

Tabelle 3.5: Versuchsparameter und -bedingungen.

Parameter	**Schweißmaschine CRS**	**Schweißmaschine OFS**
Anschlussspannug [V]	375–397	375–397
Max. Anschlussstrom [A]	200	200
Anschlussfrequenz [Hz]	50	50
Kühlwasserdurchlauf [l/min]	7,0	7,0
Höchstkühlwassertemperatur [ºC]	20,0	20,0
Versuchswerkstoff	UBS, EVS, FVS	UBS, EVS, FVS
Blechdicke [mm]	0,71–0,8	0,71–0,8
Schweißstrom [kA]	7,5–12,0	8,0–12,9
Elektrodenkraft [N]	3500–4500	4300–5200
Schweißspannung [V]	3,5–3,9	3,3–3,6
Elektrodenkappen	G16, B16 (ISO 5821)	G16, B16 (ISO 5821)
Vorhaltezeit [Hw.]	10	10
Schweißzeit [Hw.]	16	16
Nachhaltezeit [Hw.]	10	10
Höchstversuchsgeschwindigkeit [min^{-1}]	6	6

Die Schweißmaschinen und Elektroden wurden mit Wasser mit einer Wassertemperatur von 18,0 ºC bis 20,0 ºC bei einer konstanten Durchflussgeschwindigkeit gekühlt. Dadurch und durch die in Tabelle 3.5 angeführte Versuchsgeschwindigkeit wurden gleich bleibende Wärmebedingungen gewährleistet.

Der Anschluss der verwendeten Schweißanlagen erfolgte an eine angemessene Stromversorgung, die von keinem anderen größeren Stromverbraucher beeinflusst wurde. Die Frequenz und die Phasenverschiebung der Primärspannung waren ausreichend konstant:

- die primäre Phasenverschiebung wurde durch das Programm QP 2.0 während der Parameteranalyse mit den anderen Phasenverschiebungen kompensiert, und
- der Effektivwert der Netzspannung ist während der Messungen angezeigt und überwacht worden.

3.2 Messmethoden

Im Zuge der Messungen kam für die Probeentnahme die für diesen Zweck hergestellte Messvorrichtung RWS 2008 zur Anwendung, an die nachstehende Sensoren angeschlossen waren:

- ein Beschleunigungssensor vom Typ ASEA AB 2037F der ABB AG,
- ein Widerstandsmessmodul (Potentiometerprinzip) für die Abstandsmessung zwischen den Elektroden,
- eine von der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung hergestellte Kraftmessvorrichtung,
- eine Rogowski-Spule mit einem Signalaufbereiter der Harms & Wende GmbH & Co zur Verstärkung und induktiven Kompensation des Messsignals sowie
- bei der Direktmessung der Elektrodenspannung ein Signalaufbereiter der Harms & Wende GmbH & Co zur Verstärkung und induktiven Kompensation des Messsignals.

Die technischen Daten über die durchgeführten Messungen können der Tabelle 3.6 entnommen werden.

Tabelle 3.6: Technische Daten über die durchgeführten Messungen.

	i [kA]	u [V]	F [N]	a [m/s^2]	x [mm]
Frequenzbereich [Hz]	500	5000	1000	1000	1000
Messfehler [%]	2±1 digit	0,2±1 digit	1±1 digit	1±1 digit	0,5±1 digit
Erweiterungsfaktor	2	2	2	2	2
Messunsicherheit [%]	5	5	5	5	5
Abtastrate [kHz]	100	100	100	100	100
Abspeicherrate [Hz]	16400	16400	16400	16400	16400
Sensorgenauigkeit [%]	1	*	0,5	0,5	0,1
Eingangsimpedanz [MΩ]		10			
Auflösung [Bit]	12	12	12	12	12
Max. Auflösung [%]	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Isolationswiderstand [MΩ]	4	0	5	10	10

* *Direktmessung*

Die Befestigung der Sensoren ist identisch mit der des in Bild 2.4 abgebildeten Systems.

Die angegebene Messunsicherheit ergibt sich nach DKD-3 aus der Standard-messunsicherheit durch Multiplikation mit dem Erweiterungsfaktor $k = 2$. Der Wert der Messgröße liegt mit einer Wahrscheinlichkeit von 95 % im zugeordneten Werteintervall.

Den gemessenen Signalen wurden bereits im Computer für das Erfassen und Speichern der Kenndaten folgende drei berechneten Kenngrößen hinzugefügt:
- der dynamische Widerstand,
- die Integralfunktion der Kraft und
- die Integralfunktion der Beschleunigungen der beiden Elektroden.

Die Ausgangssignale wurden in 12-Bit-Ausgangsdateien geschrieben.

3.3 Durchgeführte Messungen

Ziel des ersten Teils der Versuchsreihen war es, die Einflüsse verschiedener Stromstärken bei verschiedenen Maschinen und Werkstoffen zu bestimmen, weshalb die Versuche wie folgt durchgeführt wurden:
- Elektrodeneinfahren (Durchführung von 50 Punktschweißungen),
- die Durchführung von 70 Punktschweißungen, wobei der Schweißstrom von der Klebe- bis zur Spritzerbildung (die Grenzwerte sind vorhergehend festgestellt worden) geändert wurde. Während der Schweißungen wurden die Sekundärspannung, der Sekundärstrom, die Elektrodenbeschleunigung, der Elektrodenhub und die Elektrodenkraft sowie nach erfolgtem Schweißen der Schweißpunktdurchmesser gemessen,
- Gewährleistung einer größtmöglichen Reproduzierbarkeit aller anderen bedeutenden Schweißparameter über den gesamten Versuchsablauf mit darauf folgender 5-facher Wiederholung,
- Austausch der Schweißmaschine und Wiederholung des Versuchsablaufes sowie
- nach Versuchsabschluss die Verwendung eines neuen Werkstoffes und Wiederholung des gesamten Versuchsablaufes.

Das Ergebnis aller durchgeführten Versuche mit zwei verschiedenen Punktschweißmaschinen und drei verschiedenen Stahlblechen sind 6 Versuchsreihen mit je 5 Messungen mit 70 Prüfstücken.

Der zweite Teil der Messungen diente der Untersuchung des Einflusses der Elektrodenabnutzung bei zwei verschiedenen Schweißmaschinen und drei verschiedenen Stahlblechen. Die Versuche wurden wie folgt durchgeführt:
- Elektrodeneinfahren (Durchführung von 50 Punktschweißungen), bei dem sich die Elektroden an die Schweißmaschinen- und Werkstoffgeometrie anpassen und somit eine größere Reproduzierbarkeit gewährleistet wird,

- Einstellung des Schweißstroms auf 200 A unterhalb der Spritzerbildung und die Durchführung von acht Punktschweißungen für mechanische Prüfverfahren,
- Durchführung von 200 Punktschweißungen,
- erneute Durchführung von acht Punktschweißungen für mechanische Prüfverfahren,
- Durchführung von mechanischen Prüfverfahren und die Entnahme von Elektrodenabdrücken,
- Wiederholung der in den Punkten 3 bis 5 beschriebenen Schritte bis zur Klebstellenbildung an allen Schweißpunkten,
- Bestimmung der Spritzerbildungsgrenze und Erhöhung des Schweißstroms auf 200 A unterhalb der Spritzerbildung,
- Gewährleistung einer größtmöglichen Konstanz aller anderen bedeutenden Schweißparameter und Wiederholung der in den Punkten 3 bis 6 beschriebenen Schritte bis zur Unbrauchbarkeit der Elektroden sowie
- Austausch der Schweißmaschine und Wiederholung des gesamten Versuchsablaufes.

Die bei den Versuchen verwendeten Verfahren zur Analyse der Elektrodenabnutzung wurden nach den in [3-3] bis [3-15] angeführten Schweißprozessen und Empfehlungen durchgeführt.

Die Schweiß- und Qualitätsparameter der Schweißpunkte, die einer weiteren Analyse zugeführt wurden, wurden gemessen und auf Festplatte gespeichert. Bei den übrigen Punktschweißungen wurde der Schweißprozess und dessen Reproduzierbarkeit ausschließlich durch Messungen überwacht.

3.4 Bestimmung der Qualitätsparameter

Beim Punktschweißen unbeschichteter Stahlbleche nimmt mit der Elektrodenabnutzung der Durchmesser der Kontaktoberfläche zu. Infolge dessen nimmt die Schweißstromdichte ab, was auf Grund der dem Werkstück zugeführten gleichen Energiemenge einen kleineren Schweißpunkt zur Folge hat. Die Verringerung des Schweißpunktdurchmessers erfolgt hierbei relativ linear. Beim Erreichen der vorgeschriebenen Untergrenze wird die Schweißstromstärke erhöht.

Bei verzinkten Stahlblechen diffundieren die Elemente aus der Beschichtung in den Elektrodenwerkstoff, wodurch die Elektrodenabnutzung vergrößert wird.

Bei den Versuchen an verzinkten Stahlblechen wurde festgestellt, dass sich bei bestimmten Schweißparametern an den Elektroden Zink ansammelt, das nach einer bestimmten Anzahl von Punktschweißungen unter heftiger Spritzerbildung abplatzt. Bei größeren Zinkablagerungen nimmt die Schweißpunktqualität bis zu 25,0 % ab. Nach einer derartigen Selbstreinigung der Elektroden steigt die Schweißpunktqualität erneut sprunghaft auf das ursprüngliche Niveau an. Dieser Prozess wiederholt sich in Abhängigkeit vom Werkstoff und der Schweißparameter in der Regel alle fünf bis 15 Punktschweißungen. Infolge dessen ist bei der Untersuchung der Schweißparameter in Abhängigkeit von der Schweißpunktqualität eine Qualitätsmessung einer jeden

einzelnen Punktschweißung unumgänglich. In Bild 3.5 ist die Abhängigkeit der Schweißpunktqualität von der Anzahl der mit einem Elektrodenpaar durchgeführten Schweißungen für verzinktes und unbeschichtetes Blech dargestellt.

Daraus folgt, dass im Fall von Zinkablagerungen an den Elektroden (Kennlinie 3 in Bild 3.5) bei Messungen, die der Modellierung eines mathematischen oder eines nummerischen Modells dienen, große Vorsicht geboten ist. Daher ist die Schweißpunktqualität für jeden einzelnen Schweißpunkt oder zumindest in bestimmten Intervallen zu messen. Bei Messungen an einem verzinkten Stahlblech, dessen Qualität unverzüglich nach dem Abplatzen der Zinkablagerung und ein weiteres Mal mit einer großen Zinkablagerung gemessen wurde, ergab das Ergebnis eine nicht eindeutige mathematische Funktion. In Bild 3.6 sind die Abhängigkeit der integrierten Elektrodenbeschleunigung vom Schweißpunktdurchmesser auf Grundlage von 17 nach jeweils 200 Punktschweißungen durchgeführten Messungen und der Soll-Wert dargestellt.

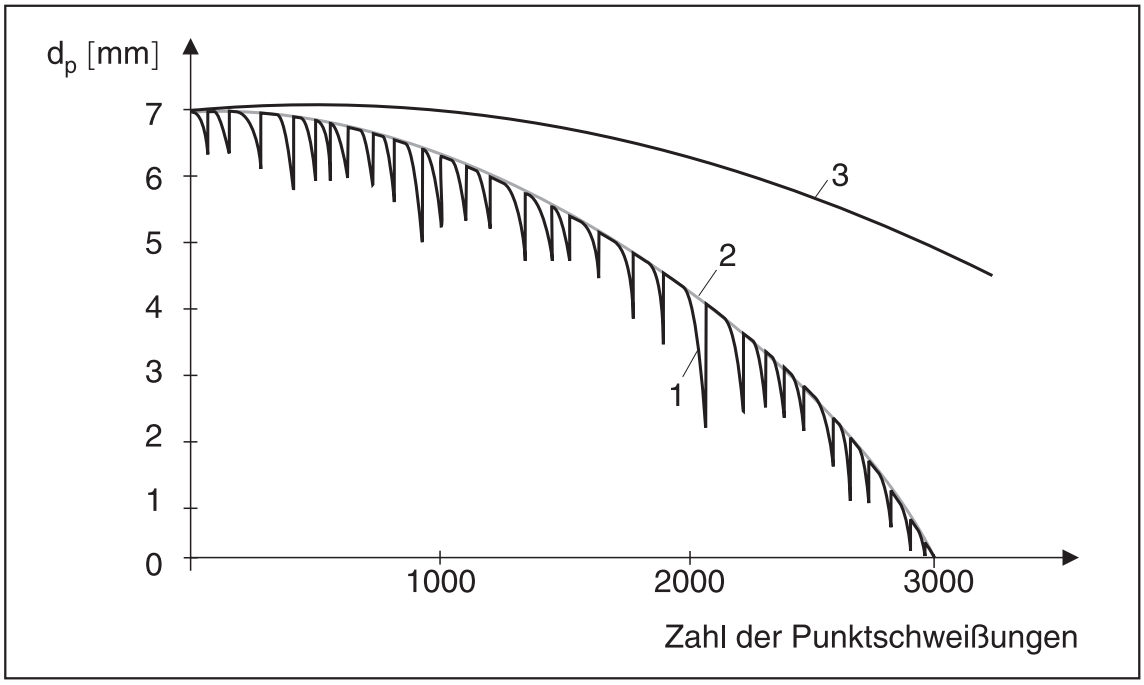

Bild 3.5: Schematische Darstellung der Abhängigkeit der Schweißpunktqualität von der Anzahl der mit einem Elektrodenpaar durchgeführten Schweißungen für: 1) verzinktes Stahlblech, bei dem sich an den Elektroden eine Zinkschicht bildet, 2) verzinktes Stahlblech und 3) unbeschichtetes Stahlblech.

Auf Grund der aus den vorangegangenen Versuchen hervorgehenden Ergebnisse wurden für die vorliegende Dissertation ausschließlich Schweißpunkte mit gemessenen Qualitätsparametern einer Analyse unterzogen.

Auf Grund der Möglichkeit, eine Vielzahl von Versuchen in relativ kurzer Zeit durchzuführen, wurde der Abrollversuch ausgewählt. Zur Verbesserung der Messgenauigkeit wurde vor Versuchsbeginn eine Abrollversuchprüfvorrichtung hergestellt (siehe Bild 3.7), durch welche die bei den Schweißpunktmessungen

auftretenden subjektiven Einflüsse minimiert werden. Die Grundlage für diese Vorrichtung bildet das DVS-Merkblatt 2916 zur Prüfung von Punktschweißungen. Die Kraft- und Abstandsmessungen erfolgen über optische Wegsensoren. Die zugeführte Kraft wird mittels der Federausdehnung gemessen, wobei etwaige Nichtlinearitäten oder Temperaturabhängigkeiten der Feder elektronisch kompensiert werden können. Für Prüfstücke verschiedener Härte kommen verschiedene Federn zur Anwendung, wobei die Federkonstante lediglich elektronisch neu einzustellen ist.

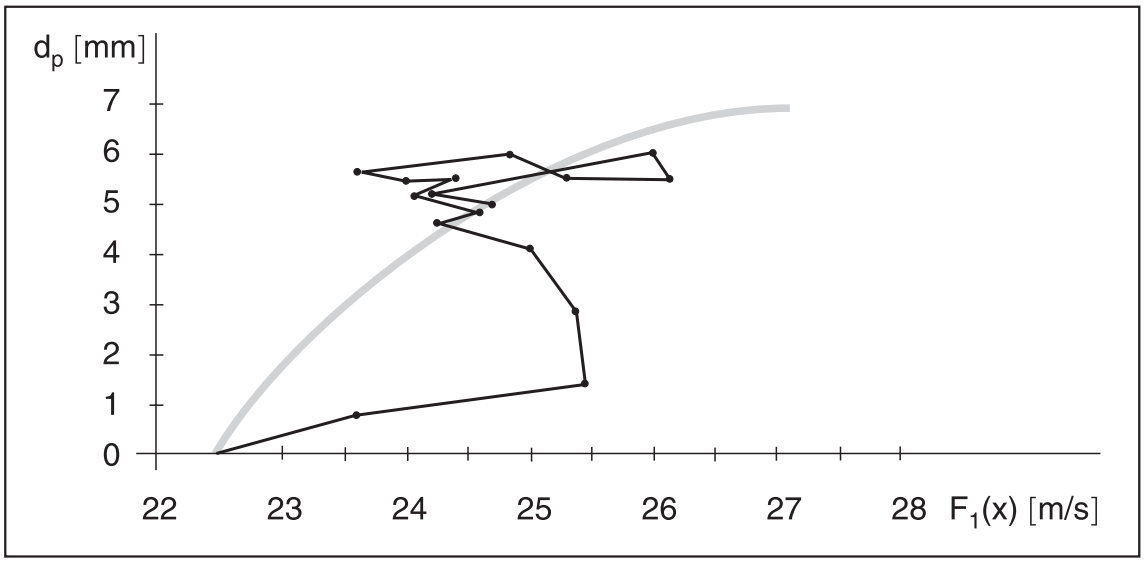

Bild 3.6: Abhängigkeit des durch Abrollversuche ermittelten Schweißpunktdurchmessers von der integrierten Elektrodenbeschleunigung.

Der elektronische Teil der Vorrichtung, eine ISA-Schnittstellenkarte, ist im Fuß der Vorrichtung eingebaut, an die jeder IBM-kompatible PC angeschlossen werden kann. Die Messgenauigkeit des Sensors beträgt ±0,02 mm/m und das Inkrement 0,01 mm, was bei normalen Ausdehnungen der Toleranzklasse 1 (Abweichung von unter 1,0 %) entspricht. Das Steuerungsprogramm liefert entweder die gesamten Kenndaten im ASCII-Code, die einer weiteren Verarbeitung zugeführt werden können, oder nur die Kraftmessungen oder das Messprotokoll. Des Weiteren besteht die Option zur Darstellung eines Hookschen Diagramms (siehe Bild 3.8), dem auch die Bruchform entnommen werden kann.

Die beschriebene Abrollversuchprüfvorrichtung ist auch bei der Jahrestagung des International Institute of Welding (IIW) 1996 in Peking im Dokument Nr. III-1069-96 vorgestellt worden [3-16] und [3-17].

Vor Beginn der Verwendung der beschriebenen Prüfvorrichtung für die durchzuführenden Versuche wurde nach der ISO-Norm 10447 die Korrelation zwischen der beim Ausknöpfbruch gemessenen Kraft und der Schweißpunktgröße überprüft.

Zur Bestimmung der optimalen Qualitätsparameter wurden Versuchen mit feuerverzinkten Blechen mit einer Dicke von s = 0,8 mm mit einer Zinkbeschichtung von 8,0 bis 12,0 µm durchgeführt. Die chemische Zusammensetzung der Stahlbleche ist der Tabelle 3.6 zu entnehmen.

Tabelle 3.6: Chemische Werkstoffzusammensetzung.

Element	**C**	**Mn**	**Si**	**P**	**S**	**Al**	**N**
Massenanteil [%]	0,060	0,210	0,010	0,013	0,02	0,049	0,006

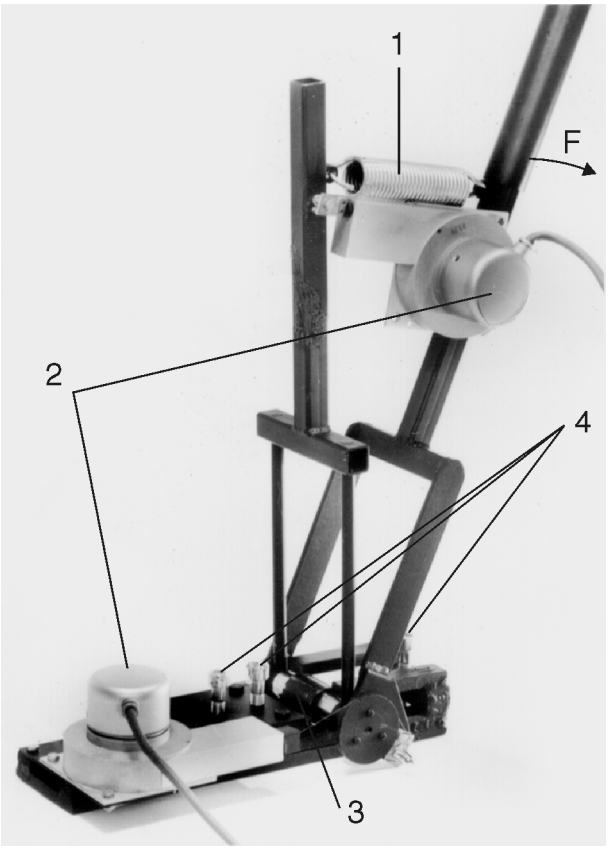

Bild 3.7: Abrollversuchprüfvorrichtung mit folgenden Komponenten: 1) Feder, 2) optische Wegsensoren, 3) Prüfstück und 4) Einspannvorrichtung.

Mit der Schweißmaschine VST wurden 100 Punktschweißungen mit folgenden Parametern durchgeführt:
F = 2580–3120 N,
t = 6–7 Perioden (50 Hz),
I_{eff} = 9630–14800 A und
U_1 = 390 V (50 Hz).

Die Elektrodenform ist derart verändert worden, dass folgende Kriterien erfüllt wurden:

Nach der Bruchart:
- 0 % Klebpunkte
- 20 % vollständige Ausknöpfbrüche und
- 80 % Ausknöpfbrüche.

Nach der Schweißpunktgröße:

$$\frac{d_1 + d_2}{2} \leq 4 \ mm \, . \tag{30}$$

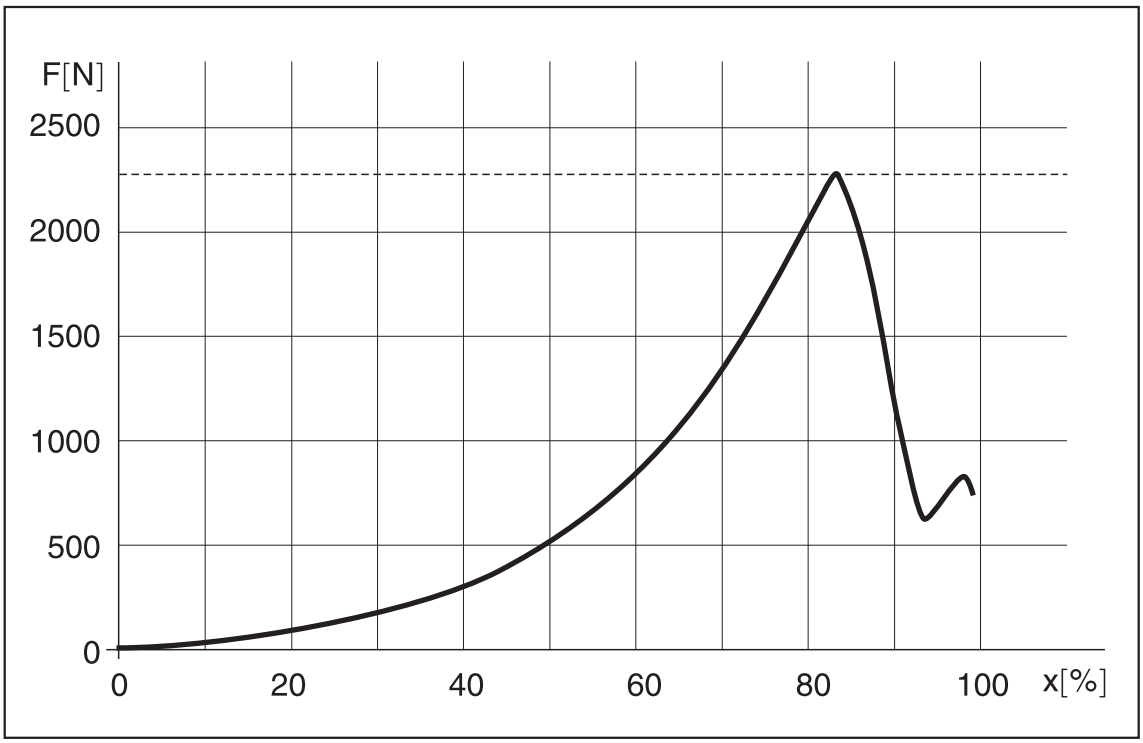

Bild 3.8: Darstellung der Kraft-Ausdehnungs-Kennlinie, wobei die Ordinate die Kraft und die Abszisse die Ausdehnung des Prüfstücks in % dargestellt. Die Dehnlänge des Prüfstücks ist über eine Länge von 80 mm gemessen worden, wobei die Ausdehnung zu Beginn der Kraftzunahme 0 % und bei der Höchstkraft 100 % beträgt.

Nach der Schweißpunktform:
- 30 % Schweißpunkte mit $d_2 < 1{,}1 \ d_1$,
- 35 % Schweißpunkte mit $d_2 > 1{,}1 \ d_1$ und $d_2 < 1{,}3 \ d_1$ sowie
- 35 % Schweißpunkte mit $d_2 > 1{,}3 \ d_1$.

Nach der Schweißpunktlage:
- 50 % quer zum Prüfstück und
- 50 % längs zum Prüfstück.

Die Abrollversuche mittels der oben erwähnten Prüfvorrichtung wurden nach der Empfehlung der ISO-Norm 10447 für manuelle Abrollversuche bei gleichzeitiger Kraftmessung durchgeführt. Die Abrollkraftmessung ist durch folgende Vorrichtungen kalibriert worden:

- einen kalibrierten Messschieber vom Typ CD-15 der Mitutoyo Messgeräte GmbH, Zertifikat-Nr. SI 141-557-851 und
- eine kalibrierte Waage vom Typ FW 150 der Alba d. o. o., Zertifikat-Nr. SI 532-44 197-02.

Bei einer Wahrscheinlichkeit von 95,0 % (Klasse 2 nach WECC bei Gaußscher Normalverteilung) haben die Prüfvorrichtung und die Kraftmessungen die Toleranzklasse 1 (Abweichungen von unter ±1,0 %) erzielt.

Die statistische Analyse der manuell gemessenen Schweißpunkte ergab folgende Ergebnisse:

- bei Messungen des Schweißpunktdurchmessers nach folgender Gleichung:

  $d = (d_1+d_2)/2$ (siehe Bild 3.9) (31)

  17,05 % vom Durchschnittswert des Schweißpunktdurchmessers,
- bei Messungen des Schweißpunktdurchmessers quer zum Prüfstück d_1 16,37 % und
- bei Messungen des Schweißpunktdurchmessers längs zum Prüfstück d_2, die durch Rückstände des Grundwerkstoffes beeinflusst wurden, 18,58 % vom Durchschnittswert des Schweißpunktdurchmessers.

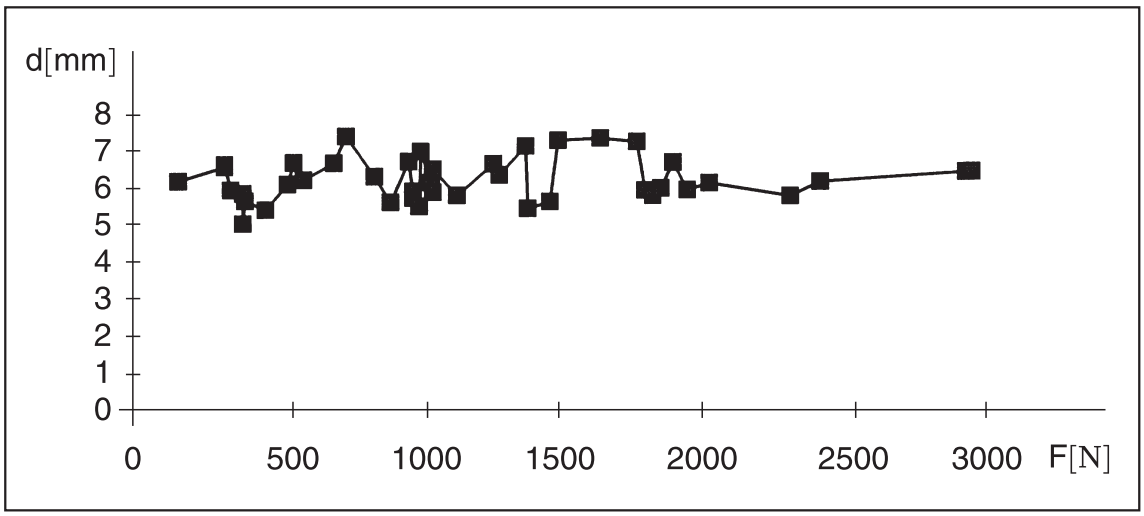

Bild 3.9: Diagramm der Abrollkraft *F* in Abhängigkeit vom durchschnittlichen Schweißpunktdurchmesser $d = (d_1+d_2)/2$.

Nach den erfolgten Messungen kann der Schluss gezogen werden, dass der Schweißpunktdurchmesser d_2 in keiner Korrelation mit der Abrollkraft steht. Denn im beschriebenen Fall wurden bei gleichen Durchmessern d_2 Kräfte von 332 bis 2980 N

gemessen, und die Regressionskraftkurve ist mit zunehmendem Schweißpunktdurchmesser sogar gesunken (siehe Bild 3.10).

Im Unterschied zum Schweißpunktdurchmesser längs zum Prüfstück d_2 ist das Ergebnis in Bezug auf den Schweißpunktdurchmesser quer zum Prüfstück d_1 eine lineare Abhängigkeit (siehe Bild 3.11). Beim mathematischen Modellieren der Abhängigkeit des Schweißpunktdurchmessers d_1 von der Kraft F mit Hilfe einer linearen Regressionsgleichung beträgt der Korrelationskoeffizient zwischen den beiden Größen 0,86.

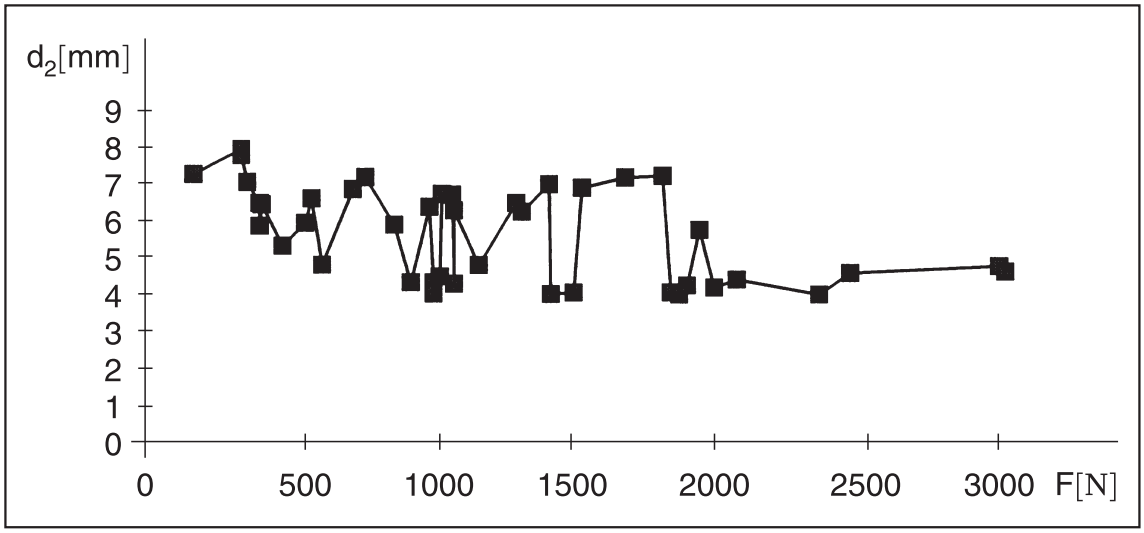

Bild 3.10: Diagramm der Abrollkraft F in Abhängigkeit vom Schweißpunktdurchmesser d_2.

In diesem Fall wäre es demnach vorteilhafter, statt der Gleichung $d = (d_1+d_2)/2$ Gebrauch von $d = d_1$ zu machen.

In einem noch größeren Maß korreliert die Abrollkraft mit der gemessenen bogenförmigen Länge bei Ausknöpfungsbeginn (siehe Bild 3.12). Auf Grund des nur schwer exakt bestimmbaren Beginns und Endes des Bruches, sind solche Messungen nur in Ausnahmefällen (hochfeste Stähle) zweckmäßig. Die bogenförmige Länge bei Ausknöpfungsbeginn wird vor allem durch folgende Faktoren beeinflusst:

- den Werkstoffeigenschaften,
- der Art der Stromzufuhr und
- der Menge der zugeführten Energie.

Ziel der vorliegenden Dissertation ist vor allem der Vergleich verschiedener, während des Schweißprozesses veränderbarer Parameter. Aus diesem Grund war es erforderlich, die Qualität aller durchgeführten Punktschweißungen zu messen. Bei Punktschweißungen zur Elektrodenabnutzung wurden die aktiven Schweißparameter überwacht, während bei Schweißungen für die Parameteranalyse die Qualität nach der

ISO-Norm 10447 unter besonderer Berücksichtigung der im vorliegenden Kapitel beschriebenen Vorgaben und Empfehlungen gemessen wurde.

3.5 Auswahl der Analyseparameter

Folgende Analyseparameter wurden ausgewählt:

- der Schweißstrom,
- die zwischen den Elektroden anliegende Spannung,
- der Elektrodenabstand,
- die Elektrodenbeschleunigung in Richtung der Elektrodenachse und
- die an der unteren Elektrode gemessene Elektrodenkraft.

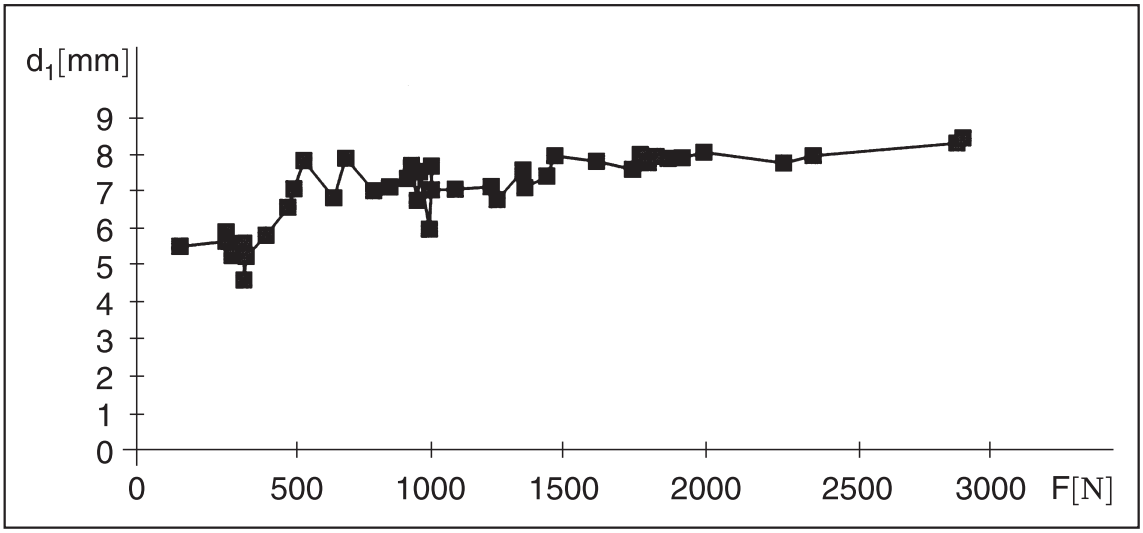

Bild 3.11: Diagramm der Abrollkraft *F* in Abhängigkeit vom Schweißpunktdurchmesser d_1.

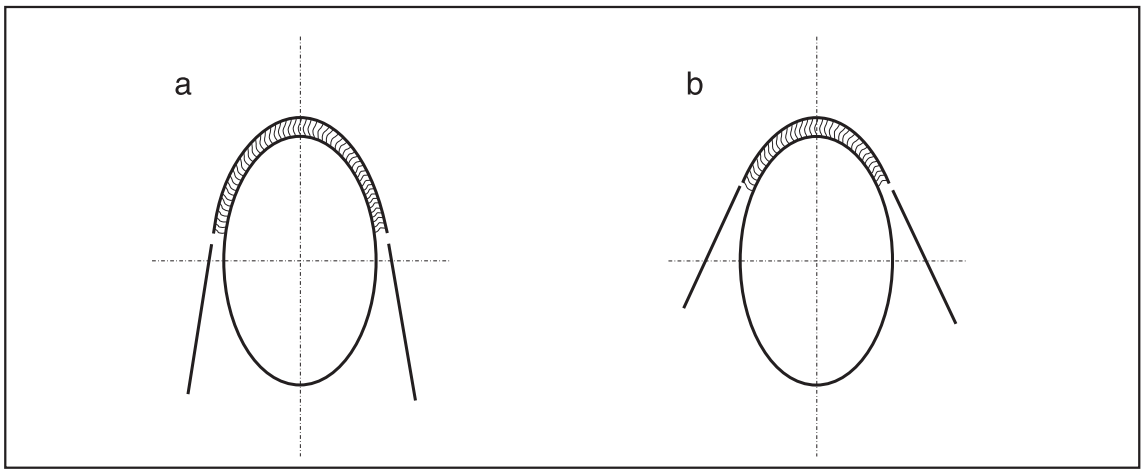

Bild 3.12: Darstellung zweier bogenförmiger Ausknöpfbrüche. Punkt a hält trotz identischem Schweißpunktdurchmesser nach der ISO-Norm 10447 größeren Kräften als Punkt b stand.

3.5.1 Aus dem Schweißstrom gewonnene Analyseparameter

In einer Rogowski-Spule wird die Spannung wie folgt induziert:

$$u_R = K_R . \frac{di_s}{dt} + u_s \,, \tag{32}$$

wobei:

K_R die Spulenkonstante, die in der Regel 150 mV $\hat{=}$ 1 kA beträgt, und

u_S die durch die elektromagnetischen Felder verursachten Störungen darstellt.

Zur Messung des Schweißstroms I_s ist es erforderlich, die gemessene Spannung der Zeit nach zu integrieren, wofür folgende drei Möglichkeiten zur Anwendung kommen können:

1. Die Integration mittels eines RC-Gliedes, das in der Spule oder am Eingang des Messsystems befestigt ist.

   Bei der Auswahl der beiden Elemente des RC-Gliedes ist zu berücksichtigen, dass das Ausgangssignal seiner Form nach in etwa der Schweißspannung entspricht und dass die Amplitude der induzierten Spannung im vorgesehenen Verhältnis zum Schweißstrom steht. Bei der Wahl ist darüber hinaus auch vor allem die lange Ansprechzeit des RC-Gliedes zu berücksichtigen, das wie folgt auf positive Gradienten des Eingangssignals (Inbetriebnahme des Thyristorblocks) reagiert:

   $$u_C(t) = (1 - e^{-\frac{t}{RC}}) \,, \tag{33}$$

   wobei:

   u_c die Spannung am Kondensator des RC-Gliedes darstellt.

Bei raschen negativen Veränderungen des Schweißstroms erfolgt die Signalglättung durch das RC-Glied wie folgt:

$$u_C(t) = e^{-\frac{t}{RC}}. \tag{34}$$

In der Praxis ist das RC-Glied somit nicht im Stande, auf schnelle Änderungen zu reagieren. Da aber trotzdem die Fläche unter der Kennlinie des Eingangssignals erhalten bleibt, kann die Veränderung nur durch eine scheinbare Verschiebung des Signals um eine bestimmte Verzögerung (φ_{in}) erfolgen.

2. Die Integration mittels eines Rechners, wie sie auch in der vorliegenden Dissertation durchgeführt wurde. Der Integrator wurde nach dem in Bild 3.13 abgebildeten Schaltbild mit nachstehender Reaktionsfunktion entworfen:

$$v_{aus} = \frac{1}{R_1.C_1}\int_{t_2}^{t} v_{ein}\,dt, \tag{35}$$

wobei:

v_{aus} die Ausgangsspannung und
v_{ein} die Eingangsspannung darstellt.

Aus der Funktion ist ersichtlich, dass durch den Integrator keine zusätzlichen Verzögerungen verursacht werden. Der Nachteil dieser Schaltung liegt darin, dass sie nur für einen Impuls ideal arbeitet, während in der Praxis bei Messungen von wechselnden Schweißsignalen der Wert Null zwischen den Halbwellen allmählich verloren geht (Offset). Um diesem Phänomen entgegenzuwirken, wurde im Rahmen dieser Dissertation ein Integrator nach dem im Bild 3.14 abgebildeten Schaltbild verwendet. Bei diesem Integrator ist die Verzögerung φ_{in} relativ gering, die ungeachtet dessen bei theoretischen Untersuchungen zu berücksichtigen oder zu kompensieren ist.

3. Die dritte Möglichkeit stellt die Integration durch ein Programm nach erfolgter Messung dar. In diesem Fall ist stets ein Integrationsintervall zu bestimmen, das wie folgt definiert wird:

$$t_2 - t_1 = N.\Delta t, \tag{36}$$

wobei:

Δt die Zeit zwischen zwei nacheinander gemessenen Prüfstücken und
N die Anzahl der Prüfstücke darstellt.

Bei diesem Integrationsverfahren sind die Folgen der Signalglättung bei einem raschen Signalwechsel sowie die Fehler zu Messbeginn und -ende zu berücksichtigen. In diesem Fall ergibt sich für φ_{in}:

$$\varphi_{in} = \frac{N.\Delta t}{2}. \tag{37}$$

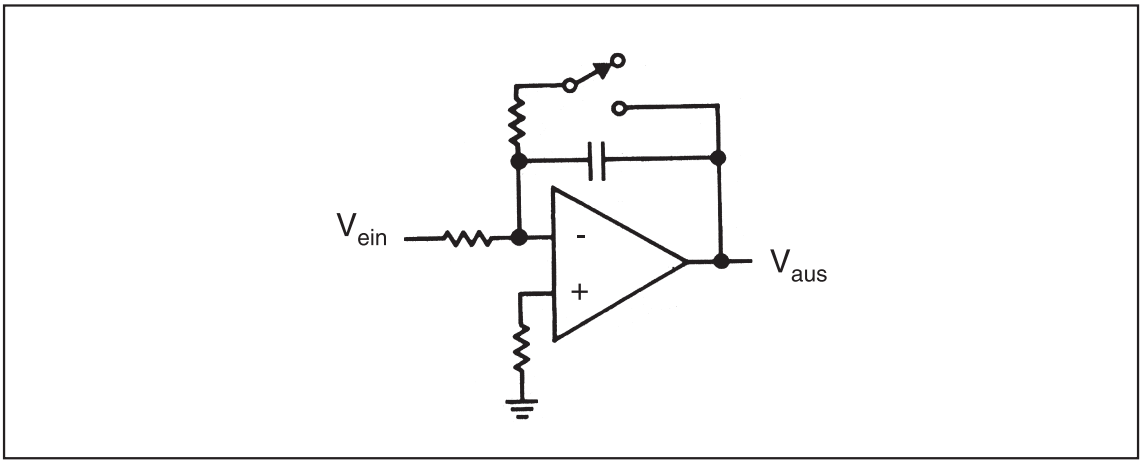

Bild 3.13: Grundschaltbild des Integrators mit Betriebsverstärker.

Um eine Anwendung des Programms mit dem verwendeten Integrator auch bei Messungen zu gewährleisten, die durch andere beschriebene Integrationsverfahren durchgeführt werden, wurde am Eingang des Moduls zur mathematischen Bearbeitung ein Digitalfilter verwendet. Dieser Filter misst in der Mitte der Halbwelle, bei der der Spannungswert Null beträgt, den Stromwert. Das Messergebnis I_{hwn} wird während des Filterverfahrens vom gemessenen Stromwert der Halbwelle subtrahiert:

$$I_f = i(t) - I_{hwn} \tag{38}$$

Dieses Verfahren wird bei allen Halbwellen angewandt.

Der Strom auf der Sekundärseite der Schweißmaschine kann als nachstehende Sinusoide niedergeschrieben werden:

$$i_2 = \hat{I}_2 f\left(\sin(\omega.t + \varphi_i), .. \sin(n\omega.t + \varphi_i)\right), \tag{39}$$

wobei:

$\hat{I}_i$ die Amplitude des Sekundärstroms und

φ_i die Phasenverschiebung vom festgelegten zeitlichen Ausgangspunkt darstellt.

Wird die gemessene Sekundärspannung als Grundlage für die zu bildende Zeit-Achse festgelegt und geht man von einem bestehenden Zusammenhang zwischen dem Strom und der Spannung aus, was anhand der Möglichkeit einer direkten Messung der Spannung als zweckmäßig erscheint, so stellt φ_i die Phasenverschiebung zwischen dem Strom und der Spannung dar. In der Regel stellt φ_i jedoch die Verschiebung der durch die im Wechselstromkreis verursachten induktiven Komponenten dar. Bei Messungen mit einer Rogowski-Spule mit darauf folgender A/D-Umwandlung ist die Phasenverschiebung φ_i in folgende drei Komponenten zu unterteilen:

$$\varphi_i = \varphi + \varphi_s + \varphi_{in}, \tag{40}$$

wobei:

φ die durch induktive Komponenten verursachte Phasenverschiebung,

φ_s die Differenz zwischen der Strom- und Spannungsabtastung (In der Praxis ist es nicht möglich, beide Messungen gleichzeitig zu erfassen.) und

φ_{in} die durch die Integration der in der Messspule induzierten Spannung verursachte Differenz darstellt.

Auch im Fall, dass es während der Messung möglich ist, die induktive Komponente φ auszuschließen, bleibt der Strom hinter dem Wert $\varphi_s + \varphi_{in}$ zurück. Aus diesem Grund wurde am Eingang des Moduls zur mathematischen Bearbeitung ein Digitalverfahren zur Kompensation der gemeinsamen Phasenverschiebung φ_i verwendet.

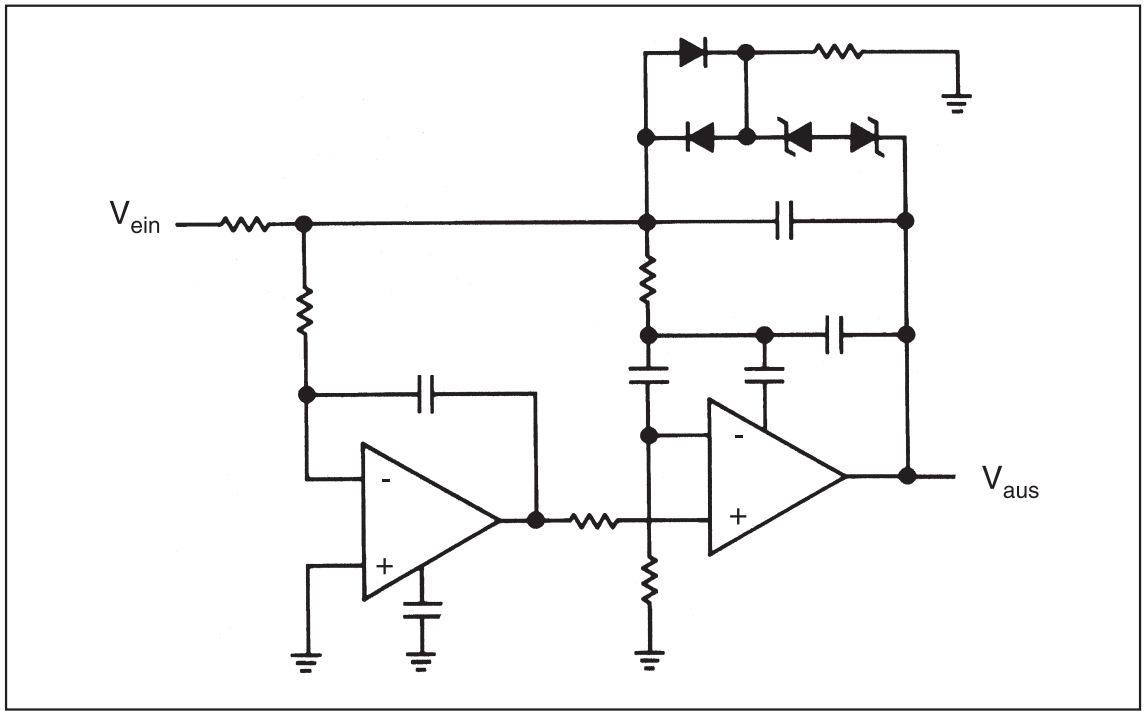

Bild 3.14: Schaltbild des in der Dissertation verwendeten Integrators.

Für den derart gefilterten Schweißstrom sind folgende Analyseparameter direkt bestimmt worden:

- I_{1max}, der den höchsten Stromwert in der ersten Halbwelle darstellt. Zweck dieser Messung ist die Überprüfung des Stromanfangswerts,
- I_{11}, der den höchsten Stromwert in der 11. Halbwelle darstellt,
- I_{12}, der den höchsten Stromwert in der 12. Halbwelle darstellt. Bei einem idealen Schweißprozessverlauf erreicht der Strom des gesamten Schweißprozesses bei der 11. oder 12. Halbwelle sein Maximum und
- I_{16}, der den höchsten Stromwert in der 16. Halbwelle darstellt.

Bei der Berechnung des Höchstwerts ist zu berücksichtigen, dass es auf Grund der hohen Induktivität des Schweißtransformators und der überaus schnellen Schaltvorgänge im Thyristorblock sowohl beim Strom als auch insbesondere bei der Spannung Übergangserscheinungen und infolge dessen Signalspitzen auftreten. Diese können die Höchstwerte der gesamten Halbperiode um ein Vielfaches übertreffen. Vom Standpunkt der Leistung aus betrachtet, üben diese Spitzen wegen ihrer kurzen Dauer keinen Einfluss auf die Erwärmung des Schweißpunktes aus. Jedoch ist es vorteilhaft, diese Spitzen vor einer Weiterverarbeitung mittels eines analogen Filters zu glätten oder digital zu bearbeiten.

In Bild 3.15 ist der direkte Kennlinienverlauf des Schweißstroms abgebildet.

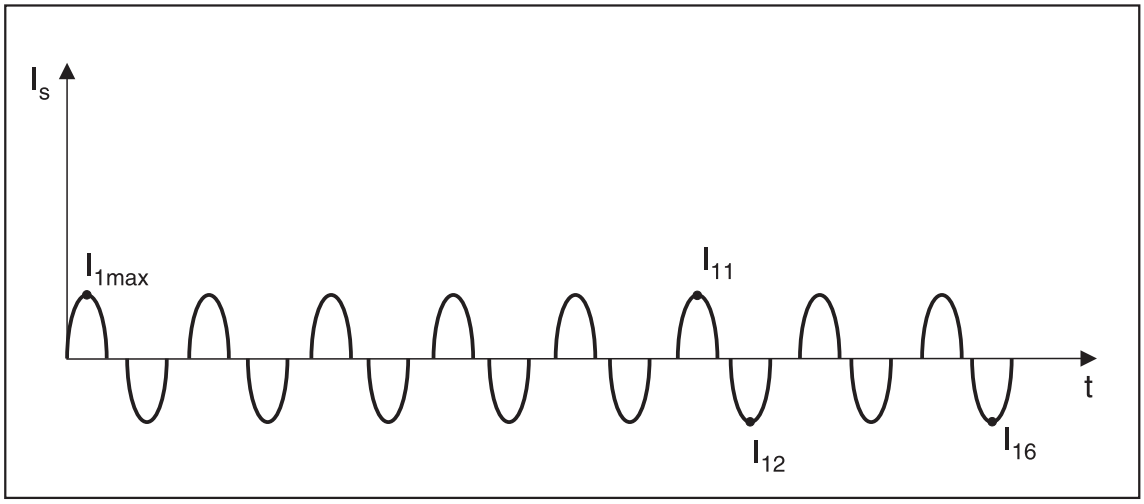

Bild 3.15: Verlauf des Schweißstroms mit den dazugehörigen Analyseparametern.

3.5.2 Aus der Schweißspannung gewonnene Analyseparameter

In Bild 3.16 ist der Analyseparameter U_{1max} abgebildet, der den höchsten Spannungswert in der ersten Halbwelle darstellt. Aus den Spannungskenndaten werden auch alle anderen Maxima der einzelnen Halbwellen sowie ihre Lage auf der Abszisse berechnet.

Der Fachliteratur ist zu entnehmen, dass bestimmte Autoren den Messungen der Schweißspannung gegenüber Messungen des Schweißstroms den Vorzug geben. Unbestritten ist, dass solche Messungen direkter und infolge dessen die Abweichungen geringer sind. Indes sind aber auch nachstehende, überaus komplexe Einflussgrößen zu berücksichtigen, die zu einer Verfälschung des klaren physikalischen Bildes führen:

- Geht man beim Realwert der Sekundärspannung von einer Konstanten aus, unterliegen die an den Elektroden gemessenen Kennwerte der gemeinsamen Spannung dennoch einer Veränderung. Das Ausmaß der Veränderung ist von der Verteilung der Ohmschen Widerstände im gesamten Sekundärstromkreislauf abhängig. Die Ohmschen Komponenten sind von der Erwärmung einzelner Elemente des Stromkreislaufes abhängig, vor allem von den Elektroden, den Haltern, den Sekundärwicklungen und sämtlichen Kontaktoberflächen.

- Während der Messungen sind die dynamischen Spannungsänderungen im Schweißpunkt zu berücksichtigen, die nur schwer aus dem Gesamtspannungsabfall zwischen den Elektroden herauszufiltern sind. Weitere Spannungsabfälle treten an folgenden Stellen auf:
  1. zwischen dem oberen Elektrodenhalter und der Elektrodenkappe,
  2. auf der sich erhitzenden oberen Elektrodenkappe,
  3. an der Kontaktoberfläche zwischen der Elektrode und dem oberen Werkstückteil,
  4. am oberen Werkstück sowie
  5. an den entsprechenden Stellen auf der Unterseite.

- Es ist zu berücksichtigen, dass neben dem Schweißpunkt zwischen den beiden Werkstücken weitere Kontakte einschließlich der Kontakte über die benachbarten Schweißpunkte vorhanden sind. Aus diesem Grund kamen zu Versuchszwecken Prüfstücke mit einer Breite von 30,0 mm und einer Länge von 140,0 mm mit gleichartiger Oberfläche zur Anwendung. Zur Vermeidung von Nebenschlüssen wurde an diesen Prüfstücken nur eine Punktschweißung durchgeführt.

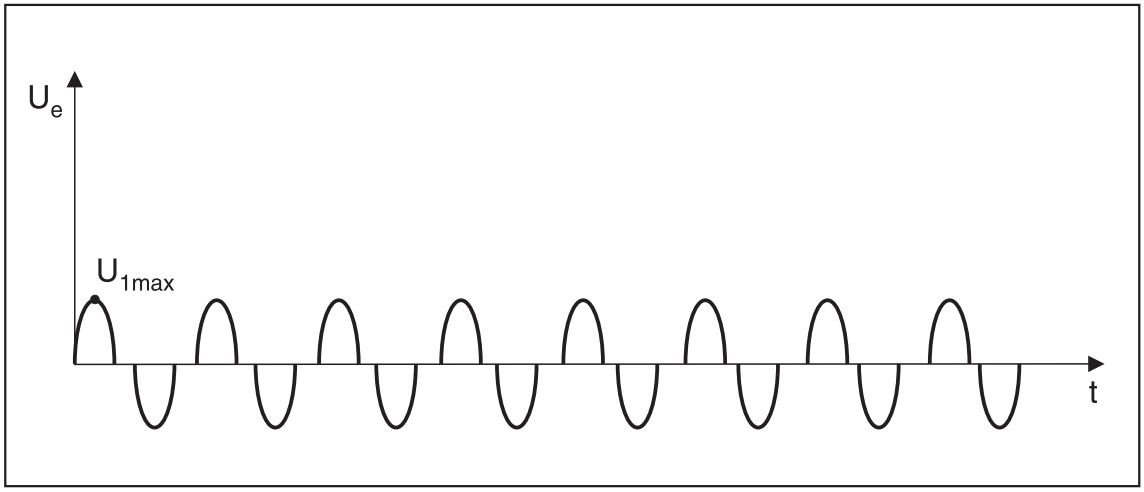

Bild 3.16: Verlauf der Schweißspannung mit dem dazugehörigen Analyseparameter.

- Des Weiteren ist zu berücksichtigen, dass die Messungen in einem äußerst starken dynamischen Magnetfeld durchgeführt werden. Trotz des Umstandes, dass zwischen den beiden Messpunkten über den Sekundärstromkreis praktisch ein

Kurzschluss besteht, sind die überaus starken induktiven Komponenten zu berücksichtigen, die sich in den Messergebnissen superponieren. Da es nicht möglich ist, die Magnetfeldmessungen mittels einer zusätzlichen Spule und die Spannungsmessungen am demselben Ort durchzuführen, sind die Werte der induktiven Komponenten nur schwer zu ermitteln. Ebenso ist es schwierig zu bestimmen, welcher Teil des gemessenen Feldes sich bis zum Messergebnis fortgepflanzt hat. Moderne Spannungsmessinstrumente verfügen über äußerst hohe Eingangswiderstände, was sie für derartige Einflüsse äußerst empfindlich macht. Aus diesem Grund werden die Eingänge mit Operationsvorverstärkern ausgerüstet, sodass die Verstärkung 1 beträgt und am Eingang ein niedrigerer Widerstand anliegt. In jedem Fall haben die Kabel bestmöglich geschirmt zu sein, und die Schleife zwischen den beiden Messpunkten muss so kurz wie möglich sein.

- Bei der Beobachtung der Spannungsform ist zu berücksichtigen, dass die Messung ungeachtet des Messpunktes vom gesamten Stromkreislauf abhängig ist. Die Spannungsform wird wesentlich von der Reaktion des Schweißtransformators auf eine konkrete Belastung beeinflusst.

3.5.3 Aus der Schweißspannung und dem Schweißstrom gewonnene Analyseparameter

Im Zuge der Strom- und Spannungsmessungen sind durch ein Programm die genauen Halbwellengrenzen sowie die Höchst-, Effektiv- und Mittelwerte einer jeden Halbwelle zu bestimmen. Darüber hinaus sind die auftretenden induktiven Spitzen einer Filterung zu unterziehen. Die Ergebnisse sind derart zu skalieren, dass sie dem tatsächlichen Schweißzustand entsprechen. Aus diesen Kenndaten ist es möglich, nach den in Kapitel 2.2.4 angeführten Gleichungen (3) (4) oder (5) die Kennlinie des dynamischen Widerstands als Quotient aus dem Spannungswert und dem Stromwert ein und derselben Halbwelle zu berechnen. Das Ergebnis sind 16 für jede einzelne Halbwelle charakteristische Punkte, die nur für die Messung gelten, bei der sie berechnet wurden. Somit hat eine Veränderung der Schweißbedingungen eine Veränderung der aus diesen Daten gewonnenen Kennlinie zur Folge.

In Bild 3.17 sind die Kenngrößen angeführt, die bei einer derart berechneten Kennlinie des dynamischen Widerstands als Analyseparameter ausgewählt wurden:

- β_{R46} stellt die Tangentensteigung am Widerstandsmaximum der 4. und 6. Halbwelle dar.
- β_{R57} stellt die Tangentensteigung am Widerstandsmaximum der 5. und 7. Halbwelle dar. Beide Parameter treten im ersten Drittel des Schweißprozesses auf und können bei einer guten Korrelation zur Qualität als Regelungsparameter des Schweißprozesses herangezogen werden.
- A_{Rmax} stellt die Fläche zwischen dem höchsten Widerstandswert und dem zweiten Teil bzw. dem Ende des Schweißprozesses dar. Dieser Schweißparameter ist als Bestätigung für den korrekt abgeschlossenen Schweißprozess angemessen, während er als Korrekturfaktor zu spät in Erscheinung tritt.

- t_{max} stellt die Halbwelle dar, bei welcher der höchste Widerstandswert erreicht wird.
- R_0 stellt den Widerstand der 1. Halbwelle dar.
- R_{k11} stellt den Widerstand der 11. Halbwelle dar.
- R_{k12} stellt den Widerstand der 12. Halbwelle dar.
- R_{max} stellt den höchsten Widerstandswert im 2. Teil des Schweißprozesses und
- R_{k16} stellt den Widerstand der 16. Halbwelle dar.

Bei der Impedanz handelt es sich um die Summe des Wirk- und Scheinwiderstands. Obwohl auf Grund der nicht erforderlichen Kompensation der induktiven Komponente die Impedanz gegenüber dem Wirkwiderstand leichter zu messen ist, ist sie auf Grund der induktiven Störungen als Qualitätsparameter nur eingeschränkt geeignet. Sowohl der Widerstand als auch die induktive Komponente sind während des Schweißprozesses dynamischen Veränderungen unterworfen, sodass für derartige Signale nicht das Gesetz der Superposition gilt. Im Vergleich zum Verlauf des dynamischen Widerstands, der gut untersucht ist und ansatzweise durch Annäherungen auch modelliert werden kann (siehe Kapitel 2), sind induktive Komponenten von Veränderungen im elektromagnetischen Feld abhängig und verfügen infolge dessen über dynamischere Eigenschaften.

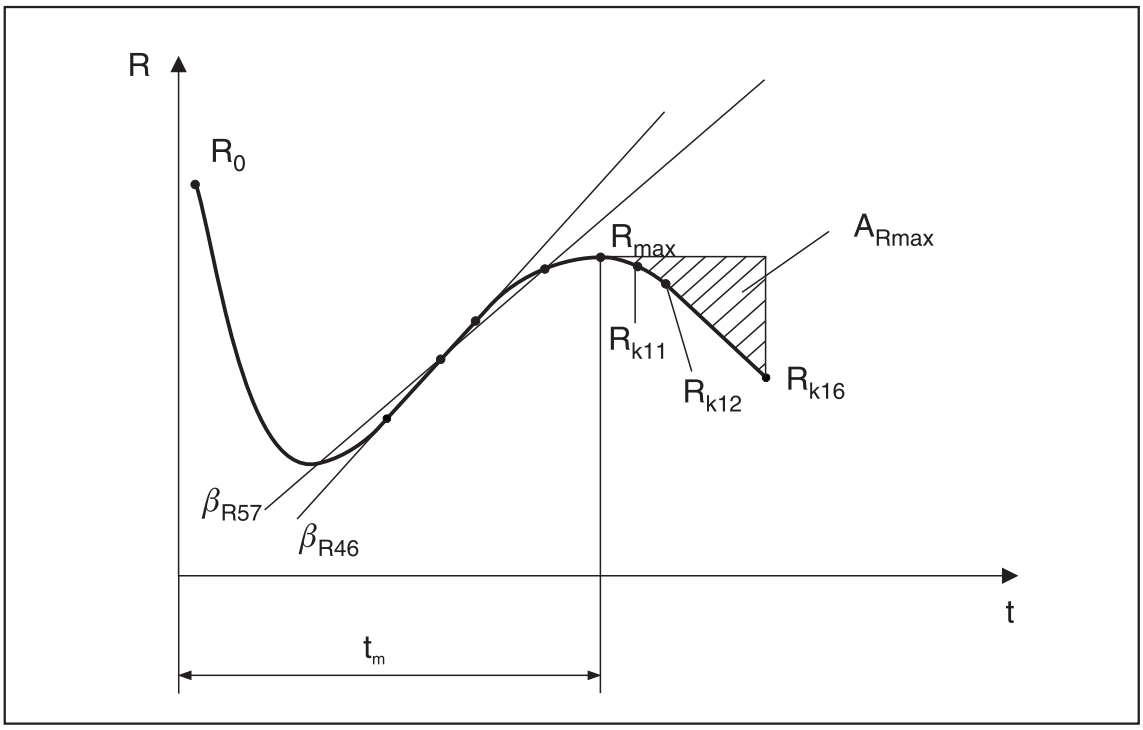

Bild 3.17: Verlauf des dynamischen Widerstands mit den dazugehörigen Analyseparametern.

Der Schweißpunkt verfügt über einen Wirkwiderstand [3-18] und [3-19], der wie folgt definiert wird:

$$P(t,i,u,F,...) = I_2^2(t) \cdot R_b(t,i,u,F,...), \tag{41}$$

an dem Wärme abgegeben wird.

Über die Schweißspannungs- und Schweißstromkennwerte wurden nach erfolgter Filterung der induktiven Spitzen und der Übergangserscheinungen beim Durchgang durch Null sowie nach der Einstellung des Stromwerts auf Null (siehe Kapitel 2.2) sowie vor der Kompensierung der Phasenverschiebung φ folgende Kenngrößen berechnet:

- Q_k, die eine zur Gänze imaginäre Komponente,
- S_{Pmax}, die den Höchstwert der realen Komponente und
- S_{Srms}, die den Effektivwert der Gesamtleistung darstellt.

Alle in dieser Dissertation berechneten derartigen Komponenten stellen die gemittelten Absolutwerte für die gesamte Schweißzeit dar, während erfasste Teilergebnisse (für jede einzelne Halbwelle) auch eine Analyse für kürzere Zeitabstände ermöglichen.

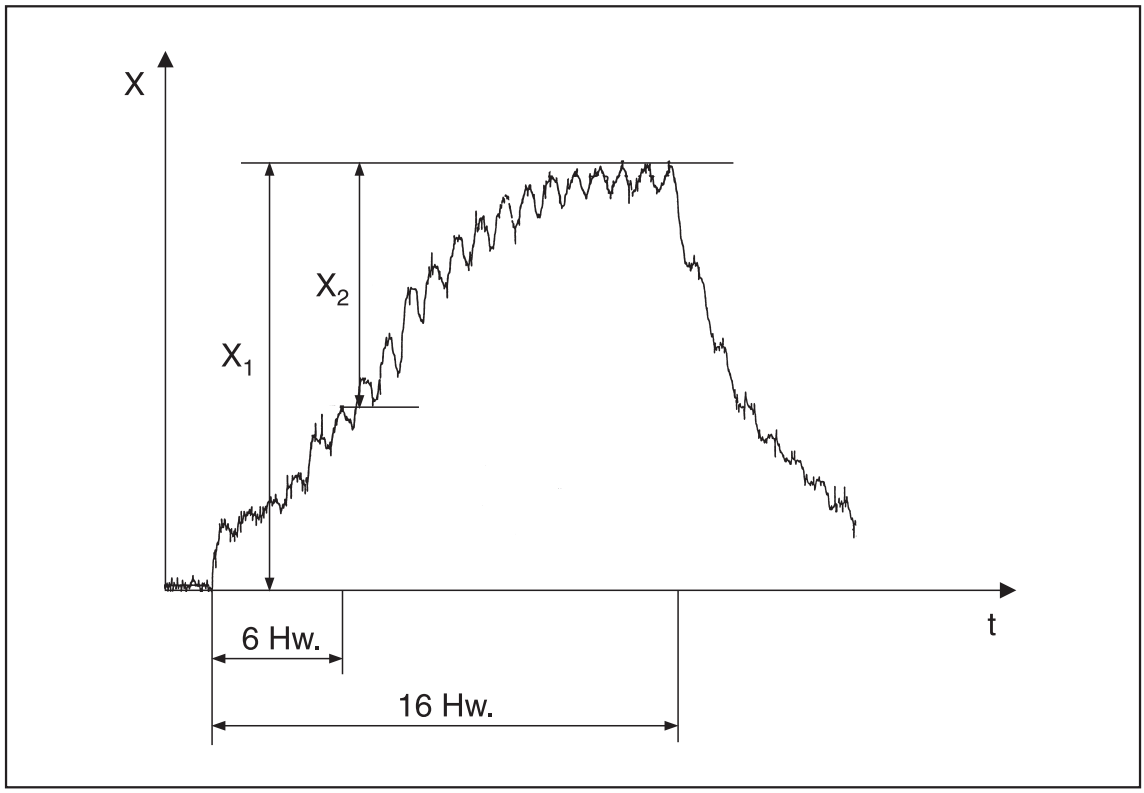

Bild 3.18: Verlauf des Elektrodenhubs mit den dazugehörigen Analyseparametern.

3.5.4 Aus dem Elektrodenabstand und der Elektrodenbeschleunigung gewonnene Analyseparameter

Die Sensoren zur Messung des Elektrodenabstands liefern den in Bild 3.18 abgebildeten Kennlinienverlauf, aus dem der Beginn und das Ende des Schweißprozesses ersichtlich ist. Für den gesamten Verlauf des Schweißprozesses wurde der Parameter X_1 festgelegt. Da die Elektrodenbewegung zu Beginn mit bestimmten Anomalien behaftet ist, wie z.

B. eine schlechte Passung, das Abplatzen der Zinkschicht von den Elektroden u. Ä., ist darüber hinaus der Parameter X_2 bestimmt worden, der den Elektrodenhub von der 6. Halbwelle bis zur Beendigung der Stromzufuhr beschreibt.

Der Kennlinienverlauf der Elektrodenbeschleunigung ist zu ungleichmäßig, als dass ihm direkt physikalische Eigenschaften entnommen werden könnten. Zwecks Filterung und der damit verbundenen besseren Anschaulichkeit wurden die gewonnenen Messergebnisse vor der Speicherung zu einer Beschleunigungsrampe (siehe Bild 3.19) integriert, aus der folgende Kenngrößen berechnet wurden:

- das Integral der Elektrodenbeschleunigung F_1 von der 1. bis zur 16. Halbwelle und
- das Integral der Elektrodenbeschleunigung F_2 von der 6. bis zur 16. Halbwelle.

3.5.5 Aus der Elektrodenkraft gewonnene Analyseparameter

Die vom an der Schweißzange befestigten Kraftsensor gelieferten Kenndaten waren auf Grund der Kraftänderungen bei der Erwärmung der Elektrodenhaltern und den großen Abweichungen beim Schmelzen der Zinkschicht nur bedingt verwertbar, weshalb diese bei der Analyse nicht berücksichtigt worden sind.

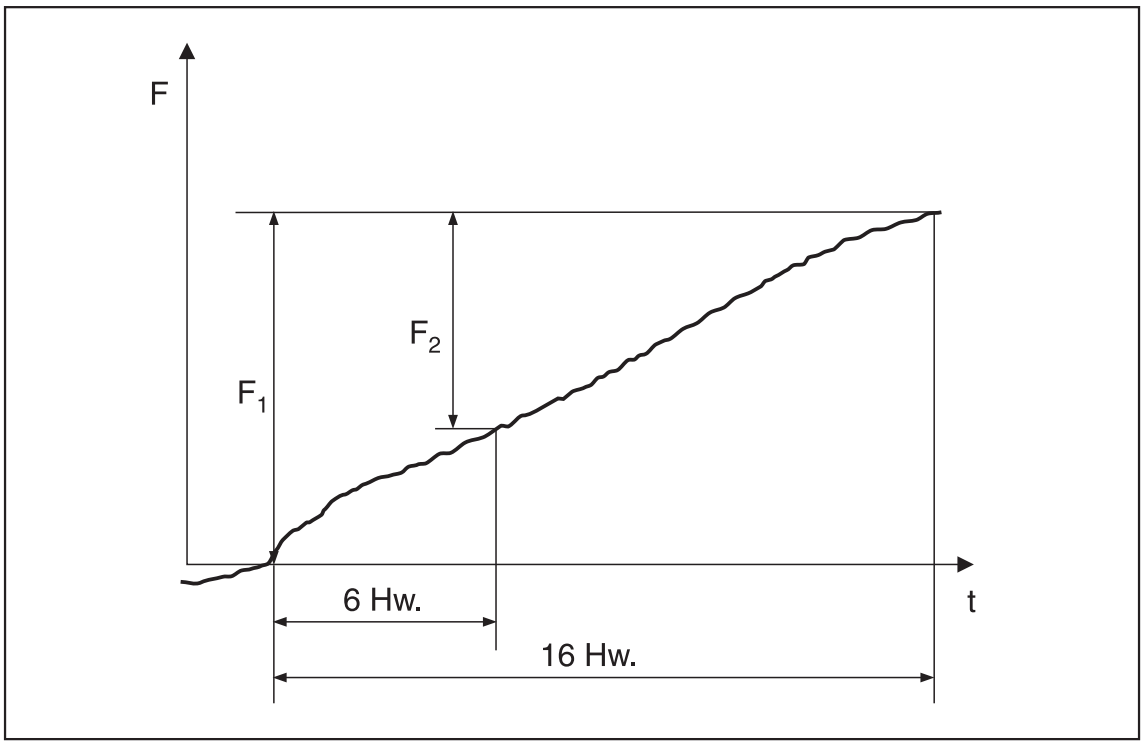

Bild 3.19: Verlauf der Elektrodenbeschleunigungsrampe mit den dazugehörigen Analyseparametern.

3.6 Bestimmung der mathematischen Methode

Auf Grundlage der großen Anzahl von Einflussgrößen, die überwiegend nichtlinear in den Schweißprozess eintreten und in einer nur schwer zu bestimmenden Korrelationen zueinender stehen, wurde der Entschluss gefasst, die Prozessanalyse mittels eines Merkmalsraums durchzuführen.

Bei der klassischen Vorgangsweise im Merkmalsraum ist ein System von Differenzialgleichungen aufzustellen, die nach Möglichkeit erster Ordnung sein sollten. Die Reaktionen des Systems werden durch algebraische oder elektronische Integrationen nach einer der vielen bekannten Methoden mittels Zeitdiskretisierung definiert. Im vorliegenden Fall können sowohl das Gleichungssystem als auch die Ergebnisse nur eine Annäherung darstellen.

Der Merkmalsraum verfügt über mehrere Dimensionen, die durch die Zeit abhängigen Größen Strom, Spannung sowie Elektrodenkraft und -hub definiert werden. Der Prozesszustand ist durch 20 Eingabefunktionen bzw. Parameter definiert, die durch Messungen der zuvor beschriebenen Größen gewonnen wurden. Die Lösung dieses Systems wird durch die Tatsache erschwert, dass die Parameter in Korrelation zueinander stehen und zu verschiedenen Zeitpunkten des Schweißprozesses gemessen werden.

Nach erfolgter Versuchsdurchführung und Durchsicht der möglichen zur Anwendung kommenden Ergebnisse wurde die Analyse mittels eines kombinierten Systems durchgeführt. Dieses System beinhaltet nach der Verwendung der 20 Eingabevariablen, die jede auf ihrer eigenen Achse dargestellt werden, auch Elemente des Merkmalsraums. Die einzelnen Variablen sind untereinander durch ein Netz und am Ausgang mit dem Qualitätsparameter verbunden, der auf 71 Zustände diskretisiert ist. Diese Zustände sind durch die gemessenen Ausknöpfbruchdurchmesser von 0,0 bis zu 7,0 mm in Stufen von jeweils 0,1 mm definiert. Dem Qualitätsparameter wurden bei der Berechnung des Merkmalsraums am Ausgang nur drei von der gewünschten Schweißpunktqualität abhängige Merkmale zugewiesen: gut, zu gering und über Spritzergrenze. Eine zu hohe Energiezufuhr würde zur Spritzerbildung und zu einer beschleunigten Elektroden-abnutzung führen, weshalb diese in der Regel nicht erwünscht ist. Aus diesem Grund soll das Programm zur Berechnung des Merkmalsraums die Bestimmung der Ober- und Untergrenze der Schweißpunktqualität ermöglichen, wobei die Obergrenze der Spritzerbildungsgrenze entspricht.

In den verborgenen Schichten wurde im Gegensatz zur diskreten Lösung von Differenzialgleichungssystemen und von der statistischen Analyse Gebrauch gemacht, wobei für jeden *i*-ten Punkt folgende Gewichtungen (G_i) verwendet wurden:

- $G_i = 1$, wenn ein Schweißpunkt mit guter Qualität und dessen Eigenschaften innerhalb bestimmter Grenzen liegen,
- $G_i = -1$, wenn ein Schweißpunkt mit unzureichender Qualität und dessen Eigenschaften innerhalb bestimmter Grenzen liegen,

- $G_i = -1$, wenn ein Schweißpunkt mit guter Qualität und dessen Eigenschaften außerhalb bestimmter Grenzen liegen, sowie
- $G_i = 1$, wenn ein Schweißpunkt mit unzureichender Qualität und dessen Eigenschaften außerhalb bestimmter Grenzen liegen.

Die durchschnittliche Wahrscheinlichkeit des Merkmalsraums in Abhängigkeit vom Qualitätsparameter (Punktdurchmesser) einer bestimmten Versuchsreihe wird wie folgt definiert:

$$K_{dp} = \frac{\sum_{i=1}^{N} G_i}{N} 100[\%], \tag{42}$$

wobei:

K_{dp} die durchschnittliche Wahrscheinlichkeit des Merkmalsraums in Abhängigkeit vom Qualitätsparameter und

G_i die Gewichtung darstellt.

Die zwischen den Eingabeparametern bestehenden Netzverbindungen sind in der Zustandsraum-Theorie nicht festgelegt. Um bei der verwendeten Analyse eine größtmögliche Unabhängigkeit beim Vergleich verschiedener Eingabeparameter zu gewährleisten, sind diese vor der Verknüpfung gleich gewichtet und mit allen möglichen Zuständen verbunden. Infolge dessen kann bei einer *r*-ten Anzahl ausgewählter Dimensionen und einer *n*-ten Anzahl von Eingabeparametern nach der nachstehenden Gleichung die Anzahl der Verbindungen berechnet werden:

$$C_n^m = \frac{n(n-1)(n-2)...(n-m+1)}{1.2.3...m} = \frac{n!}{m!(n-m)!}, \tag{43}$$

wobei:

$m = n - r$ darstellt. (44)

Bei diesem Verfahren werden bei der Berechnung der Räume mit einer größeren Anzahl von Dimensionen auch alle Räume mit einer niedrigeren Dimensionsanzahl mitberücksichtigt. Die Gesamtanzahl der Kombinationen diesem Verfahren nach beträgt somit:

$$C = C_{20}^{20-1}.C_{20}^{20-2}...C_{20}^{20-r}, \tag{45}$$

wobei die 20 Eingabeparameter und die größte Anzahl der Dimensionen am Ausgang *r* berücksichtigt werden.

Der behandelte Raum verfügt somit über 20 Eingänge mit jeweils 71 Elementen und drei Ausgänge.

Jede Reihe von Eingabedaten ist aus 200 Messungen (verschiedener Schweißpunkte) über fünf Kennlinien (die Spannung *U*, der Strom *I*, die Elektrodenbeschleunigung *a*, der Elektrodenhub *x* und die Elektrodenkraft *F*) mit der Berechnung der zuvor

erwähnten 20 Parameter hervorgegangen. Auf diese Art wurden 200 x 20 = 4000 Eingabedaten gewonnen.

Die Grenzen im Merkmalsraum wurden mittels statistischer Gewichte definiert, die durch die in diesem Kapitel beschriebene statistische Methode gewonnen wurden. Die Grenzen der einfachsten Analyseform im Merkmalsraum sind linear und verlaufen rechtwinklig zueinander.

Die Anzahl der Grenzen entspricht der der Ausgänge (3), während die Anzahl der Dimensionen der Anzahl der verwenden Eingabekriterien, d. h. 1 bis 20, entspricht. Die Grenzen für drei Dimensionen können somit als Quader am Ende des Raumvektors dargestellt werden (siehe Bild 3.20).

Der Selbstlernvorgang des in dieser Dissertation ausgearbeiteten Merkmalsraums ist in den Bildern 3.21 und 3.22 und das Arbeitsprinzip in Bild 3.23 abgebildet. Ferner besteht die Möglichkeit, einzelne Eingangsdaten verschieden statistisch zu gewichten. In Bezug auf die Grenzen des Merkmalsraums können diese eine ellipsoide Form oder die Form verschiedener Gaußscher Verteilungen (symmetrische und asymmetrische) annehmen.

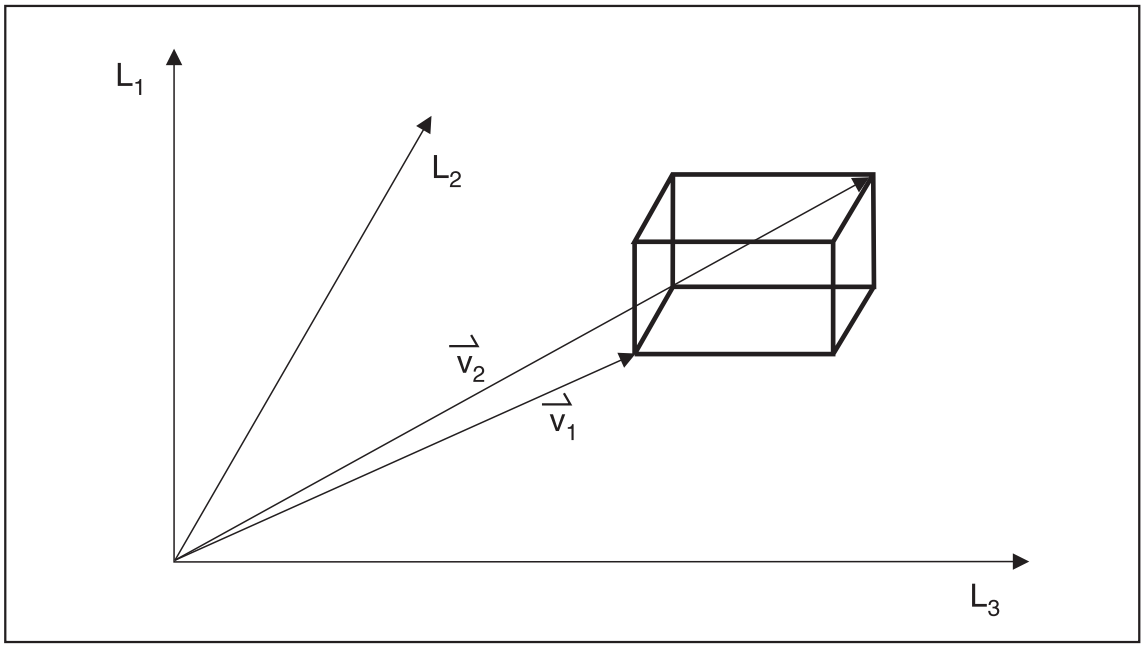

Bild 3.20: Räumliche Darstellung der Grenzen dreier Eingabeparameter. Die Untergrenzen für die Eigenschaften L1, L2 und L3 werden durch das Vektorende $\vec{v}_1$ definiert.

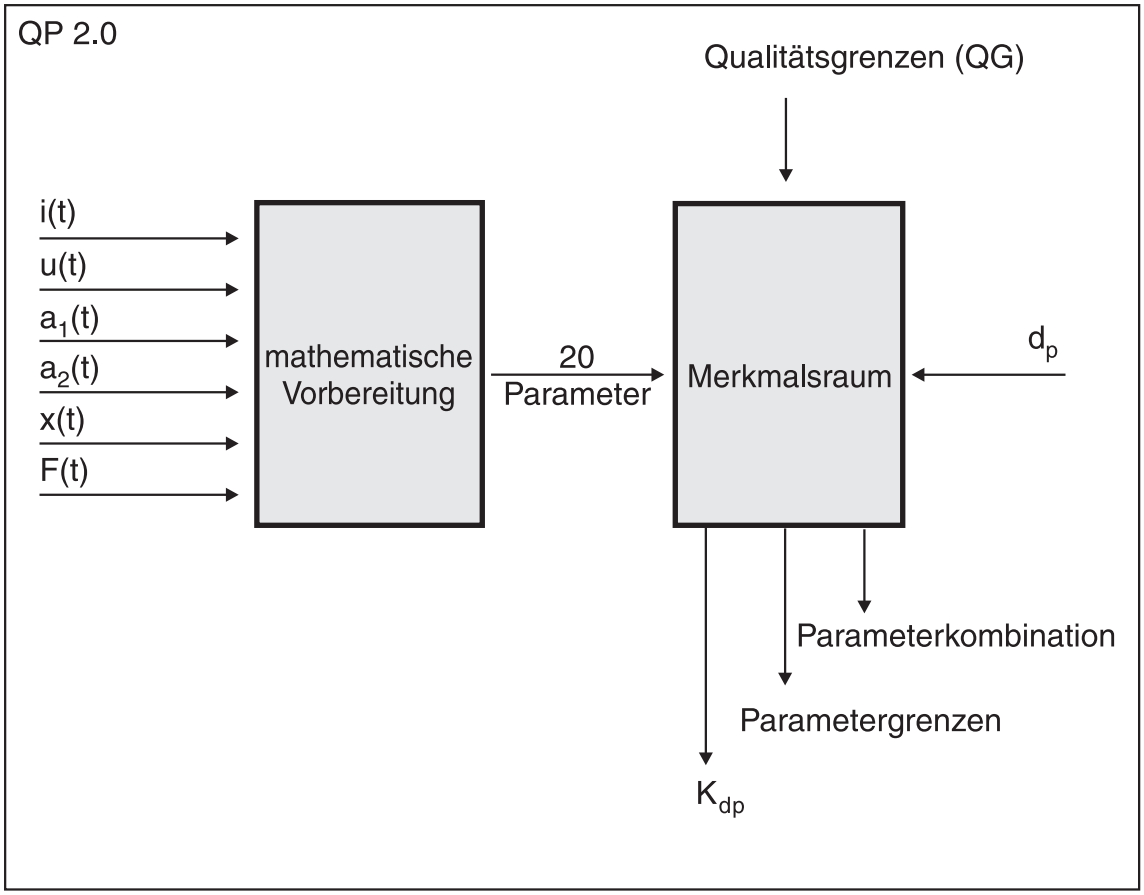

Bild 3.21: Selbstlernvorgang des Merkmalsraums – Schritt 1.

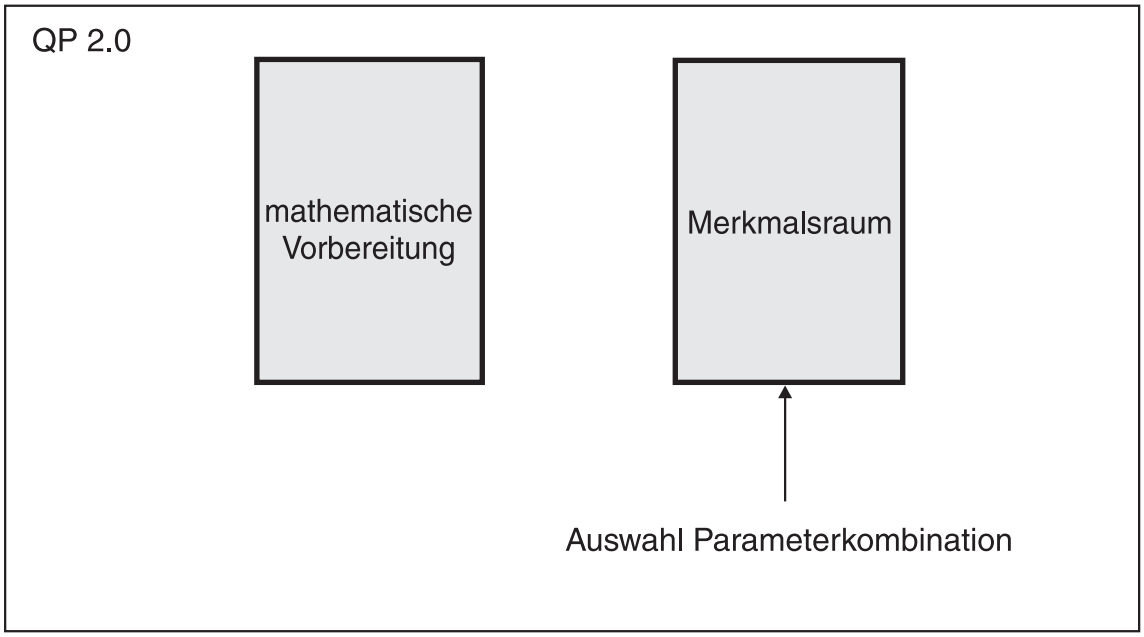

Bild 3.22: Selbstlernvorgang des Merkmalsraums – Schritt 2.

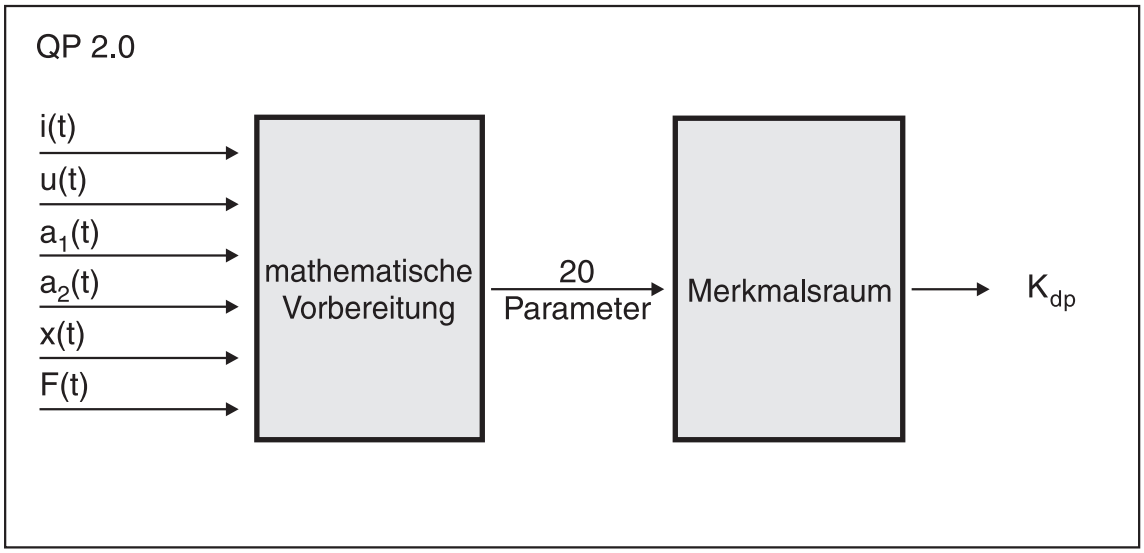

Bild 3.23: Schematische Darstellung des Arbeitsprinzips nach abgeschlossenem Selbstlernvorgang.

Letztere würden in statistischer Hinsicht zwar bessere Wahrscheinlichkeitswerte zur Folge haben, dafür wäre aber die Darstellung, wie z. B. ein fünfdimensionaler asymmetrischer Gaußscher Raum, und die damit verbundene Kontrolle im Zuge der Überprüfung der Programmergebnisse erheblich erschwert.

Es ist erforderlich, für jede einzelne Dimension die optimalen Grenzen zu definieren, zwischen denen die Werte eines bestimmten Parameters liegen müssen. Dadurch wird die größtmögliche Wahrscheinlichkeit gewährleistet, dass der Schweißpunkt den geforderten Qualitätsanforderungen entspricht. Der Merkmalsraum sollte darüber hinaus über eine variable Anzahl von Eingängen verfügen, wobei zwei bis 20 Parameter zur Auswahl stehen. Hierauf unterzieht das Programm ungeachtet der Anzahl der Merkmalsraumdimensionen alle mögliche Kombinationen zwischen allen vorgeschriebenen Parametern einer Überprüfung und bestimmt die möglichen Kombinationen. Diese Kombinationen gewährleisten mit größtmöglicher statistischer Wahrscheinlichkeit, dass der so definierte Raum mit der Ausgangsfunktion korreliert.

4. Programmteil der Aufgabe

Neben den grundsätzlichen Eigenschaften, über die ein Programm verfügen muss (siehe Kapitel 4.2), waren bei der Programmentwicklung nachfolgende Vorgaben zu berücksichtigen:

- ein komplexer und noch nicht zur Gänze ausgearbeiteter Algorithmus, weshalb dieser schrittweise zu entwickeln ist,
- das Programm muss im Stande sein, bereits gespeicherte Daten aus vorhandenen Datenbanken zu lesen,
- das Programm muss im Stande sein, neue Messungen zu erfassen,
- die Ausgänge sind ausschließlich graphische Darstellungen auf dem Monitor,
- die Analyseergebnisse sind noch unbekannt und werden durch das Programm ermittelt, das derart zu entwickeln ist, dass es leicht erweitert und weiterentwickelt werden kann,
- die Programmentwicklung, die Kodierung und die Fehlerbehebung des Programms sollen möglichst leicht sein,
- eine hohe Programmstabilität sowie
- die Abarbeitungsgeschwindigkeit und die Architektur sind nicht von vorrangiger Bedeutung.

Der Programmteil der Aufgabe umfasst die Ausarbeitung eines Programms zur Bearbeitung der aus der Messvorrichtung zur Überprüfung der Schweißpunktqualität RWS 2008 gewonnenen Kenndaten. Des Weiteren soll das Programm im Stande sein, neue aus zusätzlichen Messungen hervorgehende Kenngrößen (wie z. B. die Temperatur, den Schall) zu bearbeiten.

Darüber hinaus muss das Programm in der Lage sein, vorangegangene Messungen von der Festplatte zu lesen und auf Grundlage der gelesenen physikalischen Kenngrößen mindestens 20 Berechnungen bestimmter Parameter durchzuführen sowie diese auf Festplatte abzuspeichern. Bei diesen Parametern handelt es sich um die in Kapitel 3.5. beschriebenen Kenngrößen R_0, R_{max}, β_{R46}, β_{R57}, A_{Rmax}, I_{1max}, U_{1max}, X_1, X_2, F_1, F_2, S_{Pmax}, S_{Srms}, S_{Qk}, R_{k11}, R_{k12}, R_{k16}, I_{11}, I_{12} und I_{16}. Die Eingabe dieser Qualitätsparameter erfolgt manuell.

Ferner muss das Programm im Stande sein, die Prüfergebnisse statistisch zu bearbeiten und die optimalen Bereiche für alle Parameter aus einer Versuchsreihe zu bestimmen, diese graphisch darzustellen sowie die Berechnungen auf Festplatte abzuspeichern.

Weiterhin soll die Möglichkeit zur Auswahl zwischen zwei und 20 Eingabeparametern und nach erfolgter Auswahl die Berechnung der optimalen Parameterkombination im Merkmalsraum gegeben sein. Das Programm soll darüber hinaus eine abschließende Optimierung sowie die Aufzeichnung auf Festplatte oder Papier ermöglichen.

Der zweite Programmteil dient der Überprüfung der durchgeführten Analysen, auf deren Grundlage die Qualität der darauf folgend geschweißten und gemessenen Schweißpunkte prognostiziert wird.

Abschließend muss das Programm im Stande sein, die Tendenzen bezüglich der Veränderung der Schweißpunktqualität über die letzten gemessenen Schweißpunkte und die statistische Wahrscheinlichkeit der Schweißpunktqualität in Echtzeit zu überwachen. Weiter soll das Programm bei sich wiederholender unzureichender Schweißpunktqualität einen Alarm auslösen.

Zur Umsetzung der angeführten Vorgaben wurde der Entschluss gefasst, nach dem Top-down-Prinzip vorzugehen [6-1] und [6-2], um eine möglichst leichte Umsetzung der Vorgaben zu gewährleisten. Die theoretische Planung und die Spezifizierung von Kriterien sind vor der eigentlichen Kodierung durchzuführen. Da das Programm gleichzeitig über ein Programm zur statistischen Analyse der Eingabeparameter verfügt, ist es erforderlich, mit der Kodierung vor dem Abschluss der Planungsphase zu beginnen.

Für das vorliegende Projekt ist das Objektorientierte Programmieren am angemessensten. Bei der Strukturierung des Programms wird für jeden Teil des Programmcodes dessen Rahmen bestimmt, der beim Programmablauf auch auf dem Monitor visuell dargestellt wird. Auf diese Art ist der Programmablauf auch für mit dem Programm nicht vertraute Anwender verständlich. Des Weiteren wird dadurch auch gewährleistet, dass dem zukünftigen Anwender das Funktionsprinzip leicht erklärt und das Programm problemlos erweitert werden kann. Auf der Teilprogrammebene wird jedem Teilprogramm ein Objekt zugeordnet, wobei innerhalb des Objektrahmens die Struktur klar definiert sowie der Datenaustausch zwischen den einzelnen Objekten und Rahmen streng reglementiert sein muss.

Auf Grund der angeführten Anforderungen wurde das Betriebssystem Windows und die Programmiersprache Visual Basic verwendet.

4.1 Definitionen und Eigenschaften eines Algorithmus

4.1.1 Strukturiertes Planen

Bei der Programmentwicklung ist die Beherrschung aller Details der gestellten Problemstellung erforderlich. Da es möglich ist, die aus der Problemstellung hervorgehenden Anforderungen auf verschiedene Art und Weise und auf verschiedenen Computern umzusetzen, stellt das jeweils entwickelte Programm nur eine von vielen möglichen Lösungen dar. Die Auswahl der Mittel zur Ausarbeitung des Programms QP 2.0 basierte auf den gegebenen Arbeitsbedingungen und -anforderungen, wie sie zu Beginn von Kapitel 4 angeführt sind. Das Programm besteht aus Algorithmen und Daten, die in diesem Fall durch die technischen Eigenschaften der Messvorrichtung RWS 2008 definiert sind.

Auf Grund der engen Wechselbeziehungen zwischen den Algorithmen und Daten erfolgte ihre Ausarbeitung zeitgleich und in gegenseitiger Abhängigkeit. Da das geplante Programm über relativ komplexe Algorithmen und einfache Daten verfügt, wurde die Datenstruktur den Algorithmen angeglichen.

Auf Grund der Komplexität des Programms QP 2.0 wurde es auf mehrere, kleinere Module unterteilt. Dies ermöglichte eine leichtere Programmentwicklung und die Kodierung einzelner Module durch verschiedene Programmierer. Ferner verfügt eine derartige Programmstruktur über den weiteren Vorteil, dass auch einzelne Programmmodule zur Anwendung kommen können. Auf Grund der Entwicklung in der Mikroelektronik ist die Lebensdauer eines aus einem Guss bestehenden Computer-programms auf einige Jahre beschränkt. Ist ein Programm jedoch in einzelnen, gut dokumentierten Modulen programmiert und auf Datenstrukturen gestützt, ist eine bestimmte Routine über längere Zeit anwendbar.

Die Programmentwicklung verlief derart, dass jeder einzelne Programmschritt in Form von Funktionsanleitungen dokumentiert wurde und diese so lange aufgeteilt wurden, bis alle Anleitungen (in Bezug auf die genaue Funktionsweise, die Kenndaten, Eingänge usw.) für eine Kodierung ausreichend waren. Auf Grund der verwendeten Programmiersprache Visual Basic für Windows konnten bei der Planung Programmteile vernachlässigt werden, die sich auf die graphische Darstellung (mit Ausnahme der Grundanforderungen), die Festplatten- und Diskettenverwaltung, das Betriebssystem, die Gatter u. Ä. beziehen. Statt dessen wurden der Einfachheit halber Routinen aus bereits bestehenden Bibliotheken benutzt.

4.1.2 Top-down-Design

Die Ausarbeitung des Programms QP 2.0 erfolgte nach dem Top-down-Design, bei dem die Algorithmen und Datenstrukturen schrittweise so weit verfeinert werden, dass ein Programmcode verfasst werden kann. Die Kodierung erfolgte mittels des Objektorientierten Programmierens, bei dem in einer bestimmten Phase der Programmentwicklung einem Teil der Programmstruktur ein graphisches Objekt mit

den dazugehörigen definierten Eigenschaften zugeordnet wird. Diese Objekte haben entweder eine erklärende oder darstellende Funktion.

Bei jedem einzelnen Verfeinerungsschritt sind möglichst wenig Aspekte der Problemstellung zu berücksichtigen, was eine schrittweise Unterteilung eines komplexen Problems in mehrere, leichter zu beherrschende und einzeln zu bearbeitende Module bedeutet.

4.1.2.1 Erster Programmentwicklungsschritt

Schritt 1 der Programmentwicklung umfasst die Beschreibung der Problemstellung und die Entwicklung eines Rahmenkonzeptes zu deren Lösung unter Berücksichtigung folgender Vorgaben:

- dass die Messdaten des Schweißstroms, der Elektrodenspannung, der Elektrodenbeschleunigung und des Elektrodenhubs gelesen werden können und die Option zur Erfassung weiterer Kenngrößen (Temperatur, Schall usw.) gegeben ist,
- dass die Option vorhanden ist, bereits durchgeführte Messungen von der Festplatte zu lesen, die Qualitätsparameter manuell einzugeben und die Messdateien nach der Schweißpunktqualität zu verwalten und umzubenennen bei gleichzeitiger Dokumentierung auf Festplatte,
- dass an den gelesenen physikalischen Größen mindestens 21 Berechnungen durch die aus den vorangegangenen Versuchen definierten Parametern durchgeführt und diese auf Festplatte gespeichert werden,
- dass die Möglichkeit zur statistischen Bearbeitung der Versuche gegeben ist,
- dass für alle aus einer Versuchsreihe stammenden Parameter die optimalen Mengen definiert, graphisch dargestellt und die Berechnungen auf Festplatte gespeichert werden,
- dass die Wahl zwischen zwei bis 20 Parameter gewährleistet ist und nach erfolgter Auswahl die optimale Parameterkombination im Merkmalsraum berechnet wird,
- dass die Möglichkeit für eine abschließende Optimierung und das Schreiben auf Festplatte oder Papier gegeben ist,
- dass im zweiten Programmteil eine Überprüfung der durchgeführten Analyse und die Zuordnung neuer gemessener Schweißpunkte ihrer Qualität nach möglich ist,
- dass das Programm im Stande ist, die Tendenz bezüglich der Veränderung der Schweißpunktqualität über die letzten gemessenen Schweißpunkte und in Echtzeit die statistische Wahrscheinlichkeit über die Schweißpunktqualität zu überwachen, sowie
- dass das Programm bei sich wiederholender unzureichender Schweißpunktqualität einen Alarm auslöst.

Die Schnittstellen der einzelnen Module sind im Blockdiagramm in Bild 4.1 dargestellt.

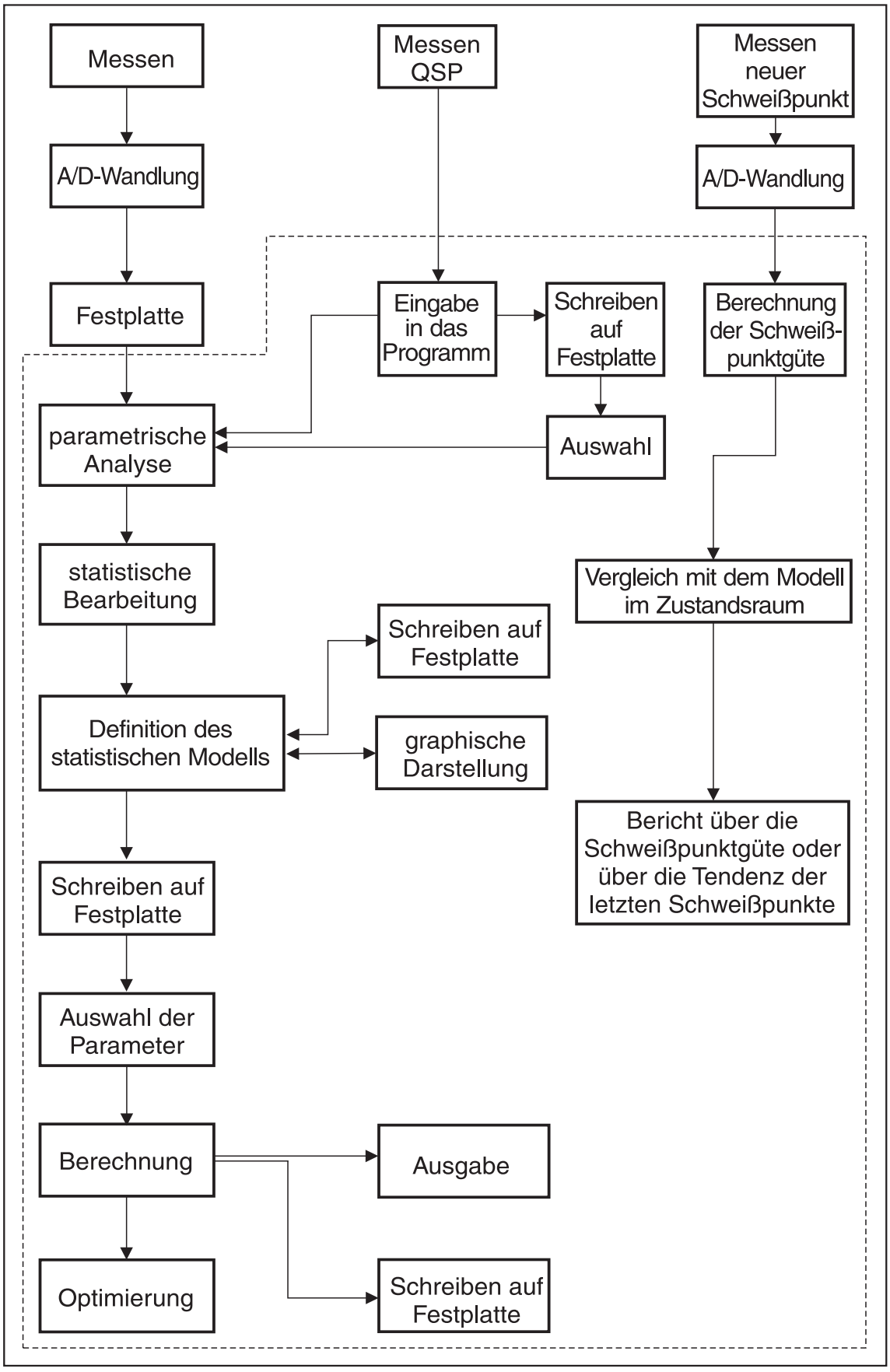

Bild 4.1: Blockdiagramm des Programms QP 2.0.

4.1.2.2 Zweiter Programmentwicklungsschritt

Der zweite Programmentwicklungsschritt umfasst eine detailliertere Beschreibung der in einzelnen Rahmen gegliederten Problemstellung und einen detaillierteren Plan zur deren Lösung.

Zu diesem Zweck ist eine vorhergehende genaue Definition der Datenstruktur erforderlich:

Die von der Festplatte gelesen Daten verfügen über folgenden Dateinamen: *c:\datei\AANNN.ASC.,*
wobei:
A den Buchstaben und
N die Zahl darstellt.

Das Format, in dem die Daten in die Datei geschrieben werden, ist:
Nr, u(s), i(s), F(s), x1(s), x2(s),
wobei:
Nr. den vierstelligen ASCII-Code des Prüfstücks,
u(s) die Spannung in Volt im ASCII-Code im Format *±N.NNNNNE±NN* (sechsstellige exponentielle Schreibweise),
i(s) den Schweißstrom in kA in derselben exponentiellen Schreibweise,
F(s) die Elektrodenkraft in kN in derselben exponentiellen Schreibweise,
x1(s) den Hub der oberen Elektrode in mm und
x2(s) den Hub der unteren Elektrode in mm in derselben exponentiellen Schreibweise darstellt.

Die Messdauer eines Schweißpunktes dauerte 16 Halbwellen bei insgesamt 556 Abtastungen.

Beispiel des Formats von in einer Datei gespeicherten Schweißdaten:
1248,-8.12345E-01,-1.12345E+05, 2.55555E+00,- 1.12345E+01, 2.55555E-05
(steht anstelle eines Vorzeichens ein Leerzeichen, geht das Programm von einem positiven Wert aus).

Neben der oben angeführten Eingabedatei verfügt das Programm über folgende vier Ausgabedateien:

- In die erste Ausgabedatei werden die Qualitätsparameter in Verbindung mit dem Namen der Datei geschrieben, in welche die Messungen der einzelnen Schweißpunkte geschrieben werden. Diese Datei dient der einmaligen Eingabe der Qualitätsparameter (wie z. B. des Schweißpunktdurchmessers). Zur leichteren Überprüfung und Fehlerbehebung ist die Datei im ASCII-Code geschrieben, was eine weitere Bearbeitung durch alle gängigen Textbearbeitungsprogramme ermöglicht. Das Datenformat ist wie folgt festgelegt:
  NNN,N.N.

Die erste Zahl stellt die Nummer des Schweißpunktes und die zweite die des Qualitätsparameters dar. Wird der Qualitätsparameter bei der Dateneingabe nicht eingegeben, schreibt das Programm in die zweite Stelle die Nummer 99999 und unterzieht diesen Schweißpunkt keiner Analyse. Diese Dateien verfügen über einen fünfzeiligen Begleitkommentar und die Dateinamenerweiterung SRT.

- In die zweite Ausgabedatei werden die Ergebnisse der parametrischen und statistischen Analyse geschrieben. Diese Dateien haben die Dateinamenerweiterung STA und werden für die weitere Datenverarbeitung durch das Programm verwendet.

- In die dritte Ausgabedatei mit der Dateinamenerweiterung ERG werden auf Befehl die Ergebnisse der parametrischen Analyse gemeinsam mit den Qualitätsparametern geschrieben. Diese Dateien können zur weiteren graphischen Darstellung der Analyseergebnisse und mathematischen Bearbeitung benutzt werden.

  Die Daten im ASCII-Code werden in die Datei wie folgt geschrieben:
  - der Qualitätsparameter (*N.N*) und
  - 21 Parameter, die durch Komma ohne Leerzeichen in verschiedenen Normformaten (INTEGER, REAL, DOUBLE PRECISION) geschrieben werden, wobei sich alle Kenndaten für einen Schweißpunkt in einer Zeile befinden.

- In die vierte Ausgabedatei mit der Dateinamenerweiterung ZR werden die besten Analyseergebnisse im Merkmalsraum geschrieben.

Die Erstellung der angeführten Dateien erfolgt in entsprechenden Programmteilen durch die Betätigung der Funktionstaste <SPEICHERN>.

Unter Zuhilfenahme eines Flussdiagramms wurden für das Programm folgende Hauptobjekte (Fenster) definiert:

1. Die Programmpräsentation – dieses Fenster beinhaltet Informationen zum Programm sowie die Option, das Programm zu beenden oder mit ihm fortzufahren.

2. Das Hauptmenü – in diesem Fenster stehen folgende Optionen zur Auswahl:
   - die Analyse einer neuen Punktschweißung vom A/D-Wandler,
   - die Analyse einer neuen Punktschweißung von der Festplatte,
   - die Qualitätsüberwachung einer Punktschweißung vom A/D-Wandler nach vorhergehender Berechnung des Modells im Merkmalsraum,
   - die Simulation der Qualitätsüberwachung einer Punktschweißung von der Festplatte nach vorhergehender Berechnung des Modells im Merkmalsraum und
   - die Berechnung des Merkmalsraums für bereits rechnerisch und statistisch bearbeitete Punktschweißungen (siehe Bild 4.2).

3. Die Dateiauswahl – in diesem Fenster werden die zu bearbeitenden Dateien abgespeichert, wird der Speicherplatz der Dateien auf der Festplatte bestimmt und

das Programm meldet Warnungen und Anleitungen. Des Weiteren werden die Qualitätsparameter eingegeben und die Dateien in Bezug auf die Schweißpunktqualität verwaltet (siehe Bild 4.3).

4. Die Methodenauswahl – hier erfolgt die Analyse der gemessenen Schweißparameter, die Berechnung aller Überwachungsparameter, die statistische Analyse mit nachfolgender Optimierung sowie die graphische Darstellung mit der Option zur Ausgabe in gedruckter Form. Auf Grundlage der langen Prozesszeiten wird der Bearbeitungsstatus des Analysevorganges auf dem Monitor angezeigt. In diesem Fenster werden des Weiteren die zu Beginn des Kapitels beschriebenen ERG- und STA-Dateien erstellt sowie alle möglichen Achsen für die Bearbeitung im Merkmalsraum vorbereitet.

5. Die Parameterauswahl – in diesem Fenster werden die zu berechnenden Parameter, die Art der statistischen Bearbeitung sowie die Analysemethode im Merkmalsraum ausgewählt.

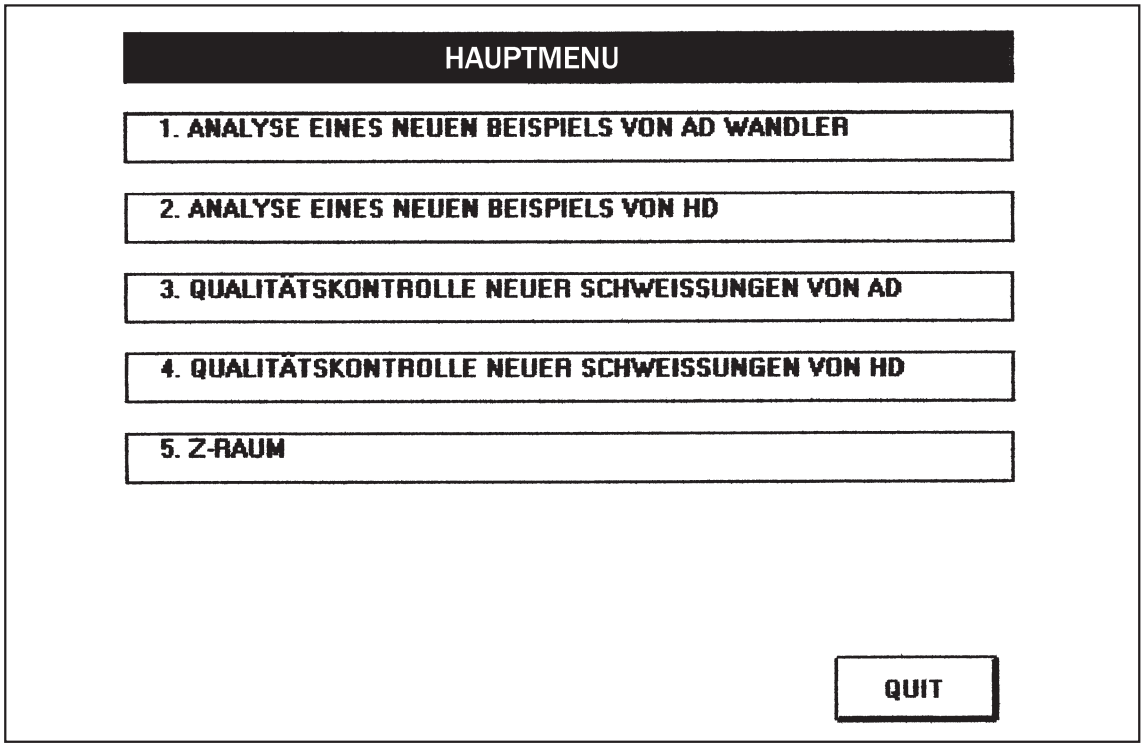

Bild 4.2: Benutzeroberfläche des Hauptmenüs.

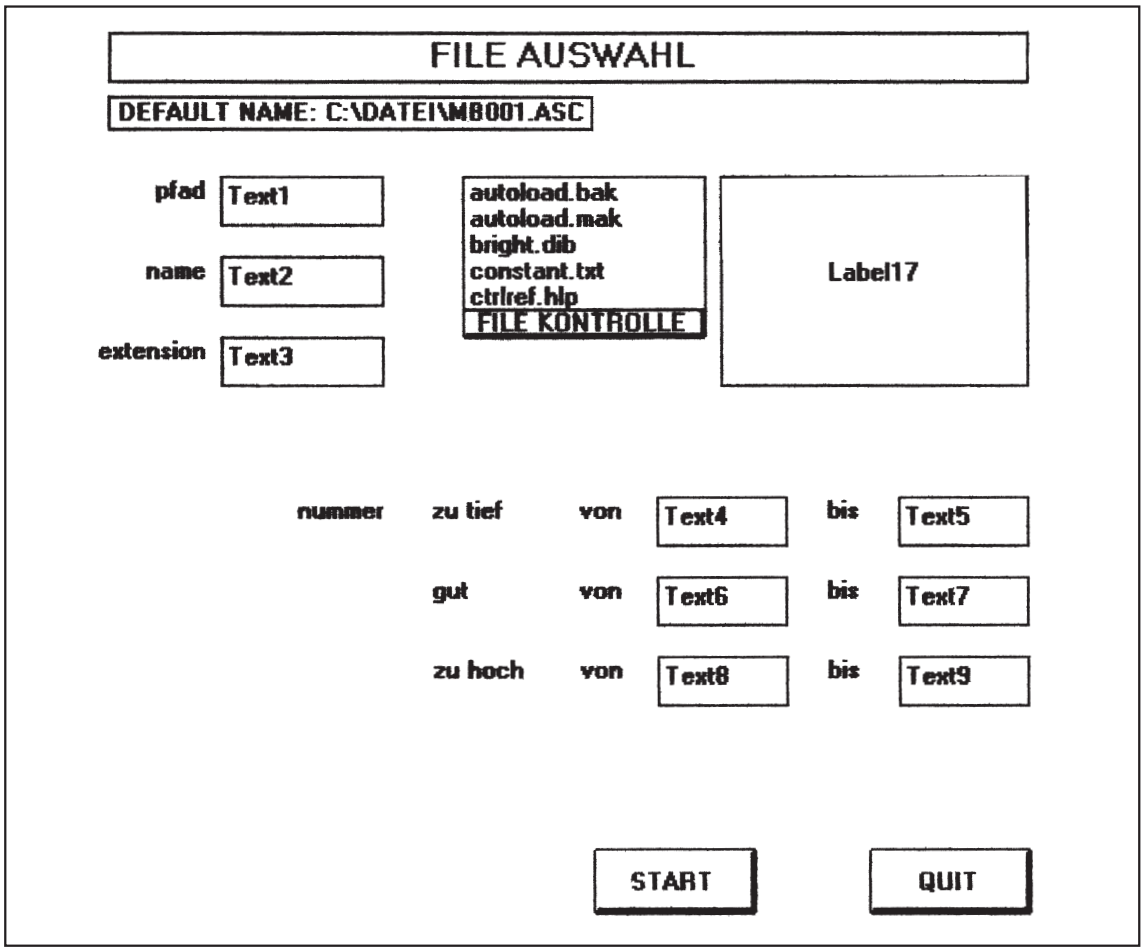

Bild 4.3: Benutzeroberfläche des Fensters zur Dateiauswahl.

6. Der Merkmalsraum – unter den statistisch besten Parametern werden je nach Bedarf für die Analyse 2 bis 20 Parameter ausgewählt, worauf das Programm die voraussichtliche Analysezeit anzeigt. Durch das Anklicken von <OK> werden die Algorithmen zur Analyse im Merkmalsraum aktiviert. Das Analyseergebnis wird als ZR-Datei gespeichert oder ausgedruckt.

7. Die Überwachung eines neuen Schweißpunktes – nach erfolgter vorhergehender Analyse im Merkmalsraum ist es möglich, das Modell mittels der gespeicherten oder neu erfassten Kenndaten einer Überprüfung zu unterziehen.

4.1.2.3 Dritter Programmentwicklungsschritt

Im dritten Programmentwicklungsschritt wurden die Objekte, ihre genaue Bedeutung und die Funktionsanforderungen der Rahmen definiert sowie die graphische Erscheinungsform der Rahmen und Objekte sowie die Form der Diagramme definiert. Ferner wurden auch die Routinen der einzelnen Objekte einer weiteren Verfeinerung unterzogen und die Variablentypen bestimmt, die zwischen den einzelnen Objekten ausgetauscht werden. Nach beendigter Programmplanung verfügte das Programm QP

2.0 über 270 Objekte, weshalb in der vorliegenden Dissertation nicht alle detailliert vorgestellt werden sollen.

4.1.2.4 Vierter Programmentwicklungsschritt

In diesem Schritt wurden die Eigenschaften und Flussdiagramme für alle Unterprogramme, Objekte und deren Variablentypen definiert, und nach Bedarf wurden einzelne komplexe Programmmodule weiter verfeinert. Es hat sich als vorteilhaft erwiesen, jede Routine zur Berechnung jedes einzelnen der 20 Parameter gesondert zu entwickeln und das Programm zur Parameterberechnung einer eigenen Überprüfung zu unterziehen. Diese Programme wurden als Unterroutinen in das Hauptprogramm erst dann integriert, nachdem die Entwicklung abgeschlossen und die Funktionsfähigkeit einer Überprüfung unterzogen worden war.

Da der Programmcode zusammen mit der Objektbeschreibung über hundert Seiten umfasst, sollen in den Kapiteln 4.1.3 und 4.1.4. nur ein Teil der Signalvorbereitung und Teile der mathematischen Koeffizientenanalyse vorgestellt werden, die am interessantesten sein dürften und auch in anderen Programmen zur Anwendung kommen könnten.

4.1.3 Signalvorbereitung zur Parameterberechnung

Der erste Teil des Unterprogramms zur mathematischen Koeffizientenanalyse bezieht sich auf die Bestimmung der Höchststrom- und Höchstspannungswerte. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass durch die Inbetriebnahme des Thyristorblocks eine Spitze verursacht wird, die in der Regel das gesuchte Maximum der sinusförmigen Halbwelle um bis zu 400,0 % übersteigt.

Diesem Problem kann durch nachfolgende Filtermethoden entgegengewirkt werden:
- mittels eines Aktivfilters,
- mittels eines RC-Gliedes oder
- mittels eines Digitalfilters.

Auf Grund einer irreversiblen Verfälschung des Signals durch die ersten beiden Filtermethoden wurde von der digitalen Programmfilterung Gebrauch gemacht, wobei die Signalglättung am einfachsten mittels einer bestimmten Anzahl von Tests erfolgt. Diese Methode wird bei der Mehrzahl der handelsüblichen Programme, wie Microsoft Excel u. Ä., verwendet. Das Ergebnis dieser Methode ähnelt der Signalglättung durch ein RC-Glied. Durch die Glättung wird die Systemdynamik verringert und die exakten Signalwerte werden unscharf, wodurch ein Teil der Information unwiederbringlich verloren geht. Um dem entgegenzuwirken, ist es vorteilhaft vom Höchstwert ohne Berücksichtigung der Signalspitzen Gebrauch zu machen. Diese Spitzen verfügen über einen zu großen Gradienten, der kürzer als die Soll-Zeit dauert und somit bei der Bearbeitung ausgelassen wird. Dieses Verfahren ist ungeeignet, wenn der Schweißtransformator stark überdimensioniert ist und der Zündwinkel weniger als 40,0º beträgt. In diesem Fall verfügen die gemessenen Werte über eine Spitze, die sich über

den fallenden Teil der Halbwelle fortsetzt, weshalb ein tatsächliches Maximum außerhalb der Spitze nicht festgestellt werden kann. In einem solchen Fall müsste der Zündwinkel des Thyristors festgestellt und nach einer bestimmten Anzahl von Abtastungen das Maximum ermittelt werden.

In einer weiteren Vorbereitungsphase wird das Messsignal durch das Programm nach den in Kapitel 2.2.4 beschriebenen Beobachtungen gefiltert. Hierbei überprüft das Programm, ob auf der Zeitachse das Stromsignal genau über dem Spannungssignal liegt, und gleicht bei Bedarf beim Signalmaximum ihre Positionen an. Ferner schreibt das Programm bei einem Spannungswert von Null auch dem Stromwert diesen Wert zu. Darüber hinaus überprüft das Programm die Stellen, an denen der Strom-Soll-Wert Null betragen sollte, und verschiebt bei einem nicht entsprechenden Strom-Ist-Wert das gesamte Halbwellensignal entlang der Abszisse.

Zur Erleichterung der Programmentwicklung wurden weitere drei bei den in dieser Dissertation durchgeführten Analysen auftretende Erscheinungen berücksichtigt:

- die beim Einschalten des Thyristors auftretende Spitze ist kurz und dauert von Null bis zwei Abtastungen,
- die Spannungs- und Stromfrequenz beträgt 50 Hz, was eine Grobbestimmung der Lage aller Höchstwerte entbehrlich macht, da sie innerhalb der ersten 33 bis 34 Abtastungen liegen. Aus diesem Grund ist es ausreichend, das erste Maximum zu bestimmen und die weiteren innerhalb dieses Intervalls zu bestimmen, und
- die Anzahl der Halbwellen beträgt immer 16.

Es ist möglich, die angeführten Vorgaben durch eine Programmcodeänderung an einigen genau dokumentierten Programmstellen zu verändern. Ebenso ist es bei der Analyse anderer Signale erforderlich, die zu Beginn angeführten Vorgaben aus dem Programm zu entfernen.

Der Programmcode zur Filterung und Bestimmung der Maxima einzelner Halbwellen lautet:

```
' Bestimmung des Strom- und Spannungsmaximums zur Berechnung des dynamischen Widerstandes, der Leistung und Spannungen

    ' Deklaration (die übrigen Variablen sind als globale Variablen oder in der Kopfzeile des Rahmens 6 deklariert)
 swich = 0
 aw = 5              ' Das erste Maximum befindet sich zwischen der ersten und 25. Abtastung
 bw = 25

 For stt = 1 To 16 Step 1        ' Für 16 Halbwellen läuft der Zähler bis 16
 umaxz = .5                  ' Reset
 imaxz = 1                   ' Reset
 For st = aw To bw Step 1        ' drei Bedingungssätze zur Bestimmung des Maximums mit Spitzenfilter
 If Abs(u(st)) > umaxz Then
```

```
If Abs(u(st + 2)) > .5 Then
If Abs(u(st)) / Abs(u(st + 1)) < 1.04 And Abs(u(st)) / Abs(u(st + 2)) < 1.08 Then
umaxz = Abs(u(st))
nrumaxz = st
End If
End If
End If
If Abs(i(st)) > imaxz Then          ' Schreiben in die globale Variable
imaxz = Abs(i(st))
nrimaxz = st
End If
Next st
umax(stt) = Csng(umaxz)             ' Schreiben in die globale Variable
nrumax(stt) = nrumaxz
imax(stt) = CSng(imaxz)
nrimax(stt) = nrimaxz
If swich = 0 Then                   ' Bestimmung des zweiten bis 16. Maximums
swich = 1
aw = aw + 33                        ' Schritt zu je 33 Abtastungen
bw = bw + 33
Else
swich = 0
aw = aw + 34                        ' Schritt zu je 34 Abtastungen
bw = bw + 34
End If
Next stt
```

4.1.4 Parameterberechnung

Der Kontaktwiderstand wird als Quotient aus der Schweißspannung und dem Schweißstrom bei der dritten Abtastung vom ersten Stromeintritt in die Punktschweißung berechnet. Die ersten beiden Abtastungen sind zu unzuverlässig und in zahlreichen Fällen beträgt der Wert Null, weshalb die Berechnung des Widerstands erst beim 3. gemessenen (10. auf Festplatte geschriebenen) Wert möglich ist. In der Praxis stellt dies einen Widerstand innerhalb einer Millisekunde nach Schweißbeginn dar. Der entsprechende Programmcode lautet:

```
' Ro Wert von R beim dritten Punkt lt(x,1). lt ist die globale Variable für 20 berechnete Faktoren
lt(h, 1) = CSng(u(10) / i(10))
```

Der Widerstandshöchstwert wird über die gemessene Schweißspannung und den gemessenen Schweißstrom berechnet, wobei die Spannungs- und Stromhöchstwerte von der dritten Halbwelle an dividiert werden. Erreicht der Widerstand vor der 4. Halbwelle seinen Höchstwert (nichtrostende Stähle, Kupfer und Aluminium), hat dies einen Abfall des Widerstands über den gesamten Schweißprozess zur Folge, was diesen Parameter für eine Analyse ungeeignet macht. In diesem Fall wird in die Datei eine 0 geschrieben.

```
' Rmax nach der dritten Halbwelle. Liegt das Maximum vor der vierten Halbwelle, ist es ungeeignet. In die Datei wird 0 geschrieben
 Dim rmaxz As Single                ' Deklaration
 lt(h, 2) = 0                       ' Reset
 For jj = 4 To 16
 rmaxz = CSng(umax(jj) / imax(jj))
 If rmaxz > lt(h, 2) Then
 lt(h, 2) = rmaxz
 End If
 Next jj

 If CSng(umax(4) / imax(4)) = lt(h, 2) Then
 lt(h, 2) = 0 ' Ist die Kennlinien stetig fallend = 0
 End If
```

Die Berechnung der Kenngrößen β_{R46} und β_{R57} erfolgt wie folgt:

```
 ' βR46 Tangente der Rmax-Kennlinie, der Faktor .04 ist auf Messungen mit dem System RWS 2008 kalibriert
 lt(h, 3) = CSng(((umax(6) / imax(6)) - (umax(4) / imax(4))) / .04)

 ' βR57 Tangente der Rmax-Kennlinie, der Faktor .04 ist auf Messungen mit dem System RWS 2008 kalibriert
 lt(h, 4) = CSng(((umax(7) / imax(7)) - (umax(5) / imax(5))) / .04)
```

Die Kenngröße A_{Rmax} stellt die Fläche über der Kennlinie des dynamischen Widerstands vom Maximum bis zum Ende der Schweißung dar. Der dazugehörige Programmcode lautet:

```
 ' ARmax Fläche über der Rmax-Kennlinie vom Maximum bis zum Schweißprozessende
 Dim mk As Single          ' Deklaration
 Dim ar As Single                  ' Deklaration
 ar = 0                            ' Reset
 mk = 0
 kcl = 0
 For ajj = 4 To 16          ' Bestimmung des Maximums
 armaxz = CSng(umax(ajj) / imax(ajj))
 If armaxz > mk Then
 mk = rmaxz
 kcl = ajj
 End If
 Next ajj

 If kcl > 4 And kcl < 16 Then                ' Bedingung in Milliohm * Millisekunden
 For wq = kcl To 15 Step 1                   ' Addition der Fläche
 fmax0 = CSng(umax(kcl) / imax(kcl))
```

```
fmax1 = CSng(umax(wq) / imax(wq))
fmax2 = CSng(umax(wq + 1) / imax(wq + 1))
ar1 = CSng(Abs(fmax0 - fmax1) * 10 + Abs(fmax1 - fmax2) * 5)
lt(h, 5) = lt(h, 5) + ar1
Next wq
Else
lt(h, 5) = 0
End If
```

Die aus den Beschleunigungs- und Wegsensoren gewonnenen und berechneten Kennwerte können auf Grund der bereits durch die Messvorrichtung RWS 2008 durchgeführten Beschleunigungsintegrierung der Einfachheit halber aus dem Kennlinienverlauf entnommen werden. Diese Kennlinie gilt ausschließlich für 536 Abtastungen bei 16 Halbwellen.

```
' X1 Wert der 536. Abtastung minus des Durchschnitts der ersten bis sechsten Abtastung * 1000
lt(h, 8) = CSng(X(536) - ((X(1) + X(2) + X(3) + X(4) + X(5) + X(6)) / 6)) * 1000

' X2 Wert der 536. Abtastung minus des Werts der 200. Abtastung * 1000
lt(h, 9) = CSng(X(536) - X(200)) * 1000

' F1 Wert der 536. Abtastung minus des Werts der ersten Abtastung in Millionen vorhergehenden Einheiten
lt(h, 10) = CSng(a1(536) - a1(1)) * 1000000

' F2 Wert der 536. Abtastung minus des Werts der 200. Abtastung in Millionen vorhergehenden Einheiten
lt(h, 11) = CSng(a1(536) - a1(200)) * 1000000
```

Der Programmcode für die Kenngröße S_{Pmax} lautet wie folgt:

```
' Spmax ist die Summe der Maxima über alle 16 Halbwellen
lt(h, 12) = 0          ' Reset
For ooo = 1 To 16
lt(h, 12) = lt(h, 12) + CSng(umax(ooo) * imax(ooo) / 100)
Next ooo
```

Die Kenngröße S_{Qk} wird wie folgt berechnet:

```
' SQk ist die Summe der Maxima und Pis über alle 16 Halbwellen multipliziert mit dem am System RWS 2008 kalibrierten Umrechnungsfaktor
lt(h, 14) = 0          ' Reset
For ooo = 1 To 16
fi = nrumax(ooo) - nrimax(ooo)
lt(h, 14) = lt(h, 14) + CSng(umax(ooo) * imax(ooo) * Abs(fi) * .02 * 8 / 573)
Next ooo
```

Die Kenngröße S_{Srms}, die den Effektivwert des Signals darstellt, wird wie folgt berechnet:

```
' SSrmst Gesamteffektivwert
zmno = 0              ' Reset
For dd = 1 To 537
zmno = zmno + Sqr(u(dd) * u(dd)) * Sqr(i(dd) * i(dd))
Next dd
lt(h, 13) = CSng(zmno)
```

Die Kenngröße t_m beschreibt die Halbwelle, bei der von der vierten Halbwelle bis zum Ende des Schweißprozesses die Kennlinie des dynamischen Widerstands ihren Höchstwert erreicht.

```
' tm Halbwelle, bei der nach der dritten Halbwelle das Maximum auftritt
hjkl = CSng(0)
jjkl = 0
For jj = 4 To 16
rmaxz = CSng(umax(jj) / imax(jj))
If rmaxz > hjkl Then
hjkl = rmaxz
jjkl = jj
End If
Next jj
lt(h, 21) = CSng(jjkl)
```

4.2 Programmeigenschaften

In den nachfolgenden Kapiteln wird beschrieben, wie die für ein Computerprogramm wesentlichen Eigenschaften, wie Zuverlässigkeit, Effizienz, Flexibilität, Portabilität und Verständlichkeit, im Programm QP 2.0 umgesetzt und gewährleistet wurden.

4.2.1 Zuverlässigkeit

Das Programm QP 2.0 basiert auf dem Betriebssystem Windows und wurde in der Programmiersprache Visual Basic verfasst, wodurch eine ausreichende Zuverlässigkeit in der Programmabarbeitung gewährleistet ist. Bei der Anwendung des Programms treten lediglich die mit diesem Betriebssystem verbundenen Mängel auf.

4.2.2 Effizienz

Bei der Entwicklung wurde festgestellt, dass die Effizienz des Programms QP 2.0 zur statistischen Analyse und zur Auswahl des mathematisch-physikalischen Modells auf dem verwendeten Betriebssystem und der verwendeten Hardware ausreichend ist. Aus

diesem Grund wurden im Programm die Variablen und der Programmcode in Bezug auf die Abarbeitungsgeschwindigkeit nicht weiter optimiert.

Für eine Feedback-Steuerung des Schweißprozesses wäre es erforderlich, aus den gewonnenen Erkenntnissen ein schnelleres und in einer Maschinensprache geschriebenes Programm zu verfassen, das in die Steuerung der Schweißvorrichtung zu integrieren wäre. Hierfür ist der im Rahmen der vorliegenden Dissertation ausgearbeitete Programmcode jedoch weder vorgesehen noch geeignet.

4.2.3 Flexibilität und Portabilität

Das ausgearbeitete Programm ist zur Übernahme einer kontrollierten Veränderung der Hard- und Software, eines veränderten Algorithmus oder einer veränderten Datenstruktur in der Lage.

Die Anpassungsfähigkeit des Programms an eine veränderte Hardware und ein verändertes Betriebssystems ist von den Vorgaben des Herstellers der Programmiersprache Visual Basic – Microsoft – abhängig. Die Programmiersprache bzw. der Softwarehersteller wurden gerade wegen der weiten Verbreitung und Portabilität auf zukünftige Betriebssysteme ausgewählt. Die Portabilität ist auf Grund der möglichen Übertragung mittels Installationsdisketten sowie der Übertragung aus dem deutschsprachigen auf das slowenischsprachige Betriebssystem gewährleistet. Die Übertragung des Programmcodes in eine neuere Visual-Basic- und Betriebssystem-Version ist nur stufenweise möglich.

Die Anpassungsfähigkeit des Programms an veränderte Algorithmen wurde durch strukturiertes und Objektorientiertes Programmieren sowie durch das Verfassen einer umfangreichen Dokumentation in Form von Kommentaren im Programmcode gewährleistet. Das Programm ist mit anderen Datenstrukturen nicht kompatibel, sodass im Fall einer veränderten Datenstruktur der Programmcode zu modifizieren oder ein Emulationsprogramm zu verfassen ist.

4.2.4 Verständlichkeit

Die Verständlichkeit des Programms ist durch eine deutsch- und slowenischsprachige Bedienungsanleitung gewährleistet. Während des Programmablaufes erscheinen zur Unterstützung mehrere Warn- und Hinweisfenster. Unzulässige Operationen werden angezeigt und derart abgebrochen, dass das Programm zur vorhergehenden Menüauswahl zurückkehrt, wodurch ein unkontrollierter Programmabbruch vermieden wird. Dies wird dadurch gewährleistet, dass das Programm im Vorhinein jegliche Veränderung und ihre Ausführung verhindert, während es jeden erlaubten logischen Programmschritt einzeln zulässt. So werden in den Fenstern nur jene Objekte angezeigt, mit denen mit dem Programm fehlerfrei fortgefahren werden kann.

Ein weiterer Aspekt ist die Verständlichkeit des Programmcodes. Nach [6-2] wird die Verständlichkeit eines Programms als die Wahrscheinlichkeit definiert, nach der

innerhalb einer festgelegten Zeit die logische Bedeutung und der Verlauf eines jeden Satzes im Programm festgestellt wird. Die Verständlichkeit des Programmcodes ist durch das Top-down-Design, das Objektorientierte Programmieren und durch Kommentare im Programmcode gewährleistet.

4.3 Kodierung

Auf Grund der ausgearbeiteten und oben beschriebenen Algorithmen ist im Rahmen der Dissertation der Programmcode in Visual Basic verfasst und überprüft worden.

4.4 Fehlerbehebung

Die Fehlerbehebung stellte den zeitaufwendigsten Teil bei der Programmentwicklung dar und verlief in vier Schritten:

1. Überprüfung der Richtigkeit des Programmcodes und der Variablen,
2. Feststellung von Fehlern bei der Programmabarbeitung,
3. Fehlerbestimmung und -suche sowie
4. Fehlerbehebung und Verifizierung der Korrekturen.

Die Überprüfung des Programms beginnt mit dem Programmstart, wobei der Compiler versucht, das Programm auszuführen, und dabei eine bestimmte Anzahl von Fehlern feststellt, die vom Compiler selbst gefunden werden. Konnte die Fehlerquelle vom Compiler nicht gefunden werden, war es erforderlich, den Fehler zu finden bzw. das Funktionsprinzip des Algorithmus zu verändern. Dieses Prozedere wurde so lange wiederholt, bis das Programm zur Gänze fehlerfrei abgearbeitet wurde.

Bei der Fehlerbehebung hat es sich als vorteilhaft erwiesen, die komplexeren Routinen auszuführen und diese in einem gesonderten kurzen Programm einer Überprüfung zu unterziehen. Diese wurden nach erfolgter Überprüfung erneut in das Programm integriert, worauf die Variablen, Binder und Datenstrukturen angeglichen sowie die Routinen einer erneuten Überprüfung unterzogen wurden.

Am schwierigsten erweist sich die Erkennung von fehlerhaften Eingabedaten infolge Messfehler oder Störungen des Schweißprozesses. In den häufigsten Fällen führt ein derartiger Fehler zu einem Programmabsturz, während in der Regel das Programm bei einer Division durch Null darauf hinweist oder einen anderen Fehler meldet. In anderen Fällen liefert das Programm ein falsches Ergebnis, das sich als verzerrtes statistisches Bild und nichtreales Modell im Merkmalsraum zeigt. Da fehlerhafte Eingabedaten kaum vermeidbar sind, verfügt das Programm QP 2.0. über folgende Sicherheitsmaßnahmen:

- Hat die Datenstruktur nicht die gewünschte Form und Größe, wird der Prozess durch eine Warnfunktion unterbrochen, und
- die Option, jedes Teilresultat in eine Datei zu schreiben oder in graphischer Form darzustellen, wodurch die außerhalb des Erwartungsbereichs liegenden Ergebnisse überprüft werden können.

4.5 Überprüfung

Nach der erfolgten Fehlerbeseitigung und einer fehlerfreien Abarbeitung des Programms wurde das Programm in der ersten Testphase auf seine Stabilität durch die Eingabe verschiedener Eingabeparameter überprüft.

In der zweiten Testphase wurde die Richtigkeit der Zwischen- und Endergebnisse einer Überprüfung unterzogen. Zu diesem Zweck wurden über 100 Diagramme mit allen errechneten Ergebnissen erstellt, wobei festgestellt wurde, dass bestimmte Unregelmäßigkeiten diesen Diagrammen am leichtesten entnommen werden konnten. Darauf wurden einzelne Punkte stichprobenartig ausgewählt und manuell berechnet. Zur Überprüfung wurden ausschließlich gemessene Schweißpunkte mit überprüftem Qualitätsparameter verwendet.

4.6 Beschreibung des Programms zur Schweißqualitätsprognose

Das Programm QP 2.0 kann ausschließlich bei Schweißungen mit Wechselstrom ohne schrittweise Stromerhöhung und bei einer Schweißzeit von 16 Halbwellen zur Anwendung kommen. Am Eingang liest es die von den Weg-, Elektrodenkraft-, Spannungs- und Stromsensoren erfassten Daten und führt diese einer weiteren Bearbeitung zu. Die so erfassten Daten eines einzelnen Schweißpunktes verwaltet das Programm in Abhängigkeit von der Schweißpunktqualität. Die Eingabe des Qualitätsparameters erfolgt manuell. Um die für eine erneute Analyse notwendige Zeit zu verringern, erfolgt die Eingabe der Daten und des Qualitätsparameters einmal, da diese für spätere Analysen auf Festplatte gespeichert werden. Hierauf werden die gewünschten Qualitätsober- und -untergrenzen eingegeben, worauf das Programm QP 2.0 20 verschiedene mathematische Parameter berechnet, mittels Korrelationsanalyse analysiert und für jeden einzelnen Parameter in Abhängigkeit von der statistischen Verlässlichkeit die optimalen Grenzen definiert. Die Parameter werden hinsichtlich ihrer Korrelation mit dem Qualitätsparameter geordnet und graphisch dargestellt, worauf die gewünschten Parameter für die Analyse im Merkmalsraum ausgewählt werden. Diese Option wurde wegen eines größeren Spielraums bei den Experimenten als auch wegen des Bedarfs nach einer höheren Programmgeschwindigkeit hinzugefügt. Bei der Übertragung der Daten in die Praxis hat sich diese Option als vorteilhaft erwiesen, wenn nach erfolgter statistischer Analyse für eine konkrete Schweißung festgestellt wird, dass einer der verwendeten Sensoren nicht unbedingt erforderlich ist und von der weiteren Bearbeitung ausgeschlossen werden kann.

Im darauf folgenden Schritt bestimmt das Programm mittels der Qualitätsparameter die am besten in Korrelation zueinander stehenden Parameterkombinationen unter Berücksichtigung aller möglichen Kombinationen.

Die Grenzen zwischen guten und schlechten Schweißpunkten sind genau definiert und werden aus den vorangehenden Analysen der einzelnen Parameter übernommen, die auf jeder einzelnen Merkmalsraumachse einer Optimierung unterzogen wurden.

Darüber hinaus verfügt das Programm über folgende zwei Optimierungsmethoden:

1. Nach der Berechnung des Merkmalsraums wird mittels Graphen ermittelt, welche Schweißpunkte die Korrelation verringern (gute Schweißpunkte, die weit außerhalb des definierten Bereichs liegen, oder schlechte Schweißpunkte, die in dessen Zentrum liegen). Diese Punkte werden als Störgrößen systematisch und überwacht aus der weiteren Bearbeitung ausgesondert, worauf die gesamte Analyse wiederholt wird. Diese nur manuell überprüfte Methode steht bei der vorliegenden Programmversion zur Verfügung und hat sich im Vergleich zur Optimierung der Parametergrenzen im Merkmalsraum als effizienter erwiesen.

2. Die zweite Methode befindet sich im letzten Programmteil, bei dem von der Festplatte oder aus einer Datei ein neuer, zufällig ausgewählter Schweißpunkt gelesen wird und dessen Qualität im zuvor berechneten Merkmalsraum prognostiziert wird. Diese Methode ist überaus vorteilhaft zur Analyse der Schweißpunktqualitätstendenz der zuletzt durchgeführten Punktschweißungen geeignet. Prognostiziert das Programm eine bestimmte Anzahl von Schweißpunkten mit unzureichender Qualität, die vorhergehend manuell eingegeben wird, löst es einen Alarm aus.

Beispiel:

Ist das Ergebnis einer Analyse im Merkmalsraum die Lösung eines Schweißpunktes mit 90-prozentiger Wahrscheinlichkeit, steigt diese bei der Analyse zweier aufeinander folgender Punkte mit gleichem Ergebnis bereits auf 99,0 % an.

Bei der beschriebenen Methode handelt es sich um eine äußerst einfache, effiziente und praxisnahe Methode, da das Schweißgut in der Regel über mehrere Schweißpunkte verfügt und sich die Schweißprozessbedingungen allmählich verschlechtern (Änderung des Elektrodenzustands, der Versorgungsspannung, usw.).

5. Analyseergebnisse der gemessenen Parameter und Überprüfung der Methode

5.1 Statistische Analyse

Die Ergebnisse der statistischen Analyse der Ausgangsparameter hängen in großem Maß von den Schwankungen der Eingabeparameter ab. Aus diesem Grund wurden Schweißungen mit einem nichtkonstanten Schweißstrom und Schweißprozesse unter Berücksichtigung der Elektrodenabnutzung unabhängig voneinander einer statistischen Analyse unterzogen.

Im gesamten Kapitel 5 sind die Ergebnisse der Korrelationsanalyse zwischen den 20 Analyseparametern (nachfolgend Parameter genannt), die aus den fünf Schweißparametern berechnet wurden, und dem Qualitätsparameter (Schweißpunktdurchmesser) angeführt. Die verwendeten Parameter sind:

I_{1max} der Höchststromwert bei der 1. Halbwelle,
I_{11} der Höchststromwert bei der 11. Halbwelle,
I_{12} der Höchststromwert bei der 12. Halbwelle,
I_{16} der Höchststromwert bei der 16. Halbwelle,
U_{1max} der Höchstspannungswert bei der 1. Halbwelle,
β_{R46} die Tangentensteigung an der 4. und 6. Halbwelle,
β_{R57} die Tangentensteigung an der 5. und 7. Halbwelle,
A_{Rmax} die Fläche zwischen dem höchsten Widerstandswert und dem 2. Teil des Schweißprozesses,
R_0 der Widerstand der 1. Halbwelle,
R_{k11} der Widerstand der 11. Halbwelle,
R_{k12} der Widerstand der 12. Halbwelle,
R_{k16} der Widerstand der 16. Halbwelle,
R_{max} der höchste Widerstandswert im 2. Teil des Schweißprozesses,
t_m die Halbwelle mit dem höchsten Widerstandswert im 2. Teil des Schweißprozesses,
X_1 der Elektrodenabstand von der 1. bis zur 16. Halbwelle,
X_2 der Elektrodenabstand von der 6. bis zur 16. Halbwelle,

F_1 das Integral der Elektrodenbeschleunigung von der 1. bis zur 16. Halbwelle,
F_2 das Integral der Elektrodenbeschleunigung von der 6. bis zur 16. Halbwelle,
Q_k die Blindleistung,
S_{Pmax} der Höchstwert der Wirkleistung und
S_{Srms} der Effektivwert der Gesamtleistung.

5.1.1 Schweißprozessanalyse bei nichtkonstantem Schweißstrom

Alle Messungen zur Schweißprozessanalyse bei einem nichtkonstanten Schweißstrom wurden nach den in Kapitel 5 angeführten Bedingungen und Methoden durchgeführt. Die Schweißzeit betrug, wie bei allen Versuchen, 16 Halbwellen, und alle Schweißbedingungen mit Ausnahme des eingestellten Schweißstroms waren konstant. In der Berechnungsphase und in der Phase zur Bestimmung der Parametergrenzen (Lernphase) analysierte das Programm QP 2.0 200 Schweißpunkte, von denen ca. die Hälfte von ausreichender und die andere Hälfte von unzureichender Qualität war. Versuche haben ergeben, dass zur Definition des Merkmalsraums mindestens 50 Schweißpunkte benötigt werden, während sich die Ergebnisse nach 120 Punktschweißungen nur noch geringfügig verändern. Die übrigen und für das Lernen des Systems nicht benötigte Messwerte wurden in entsprechenden Dateien abgespeichert und zur praktischen Überprüfung der Endergebnisse herangezogen.

Die Versuche mit der Schweißmaschine OFS haben ergeben:

1. Das Ergebnis von Schweißungen am Werkstoff UBS mit folgenden Schweißparametern: Elektrodenkraft F_e = 2.000 N, Schweißzeit: 16 Halbwellen bei 50 Hz, Elektroden vom Typ B16 und bei einem überwachten Schweißstromabfall von der Spritzer- bis zur Klebstellenbildung ist die in Bild 5.1 abgebildete Wahrscheinlichkeit.

2. Das Ergebnis von Schweißungen am Werkstoff EVS mit folgenden Schweißparametern: Elektrodenkraft F_e = 2.000 N, Schweißzeit: 16 Halbwellen bei 50 Hz, Elektroden vom Typ B16 und bei einem überwachten Schweißstromabfall von der Spritzer- bis zur Klebstellenbildung ist die in Bild 5.2 abgebildete Wahrscheinlichkeit.

3. Das Ergebnis von Schweißungen am Werkstoff FVS mit folgenden Schweißparametern: Elektrodenkraft F_e = 2.300 N, Schweißzeit: 16 Halbwellen bei 50 Hz, Elektroden vom Typ B16 und bei einem überwachten Schweißstromabfall von der Spritzer- bis zur Klebstellenbildung ist die in Bild 5.3 abgebildete Wahrscheinlichkeit.

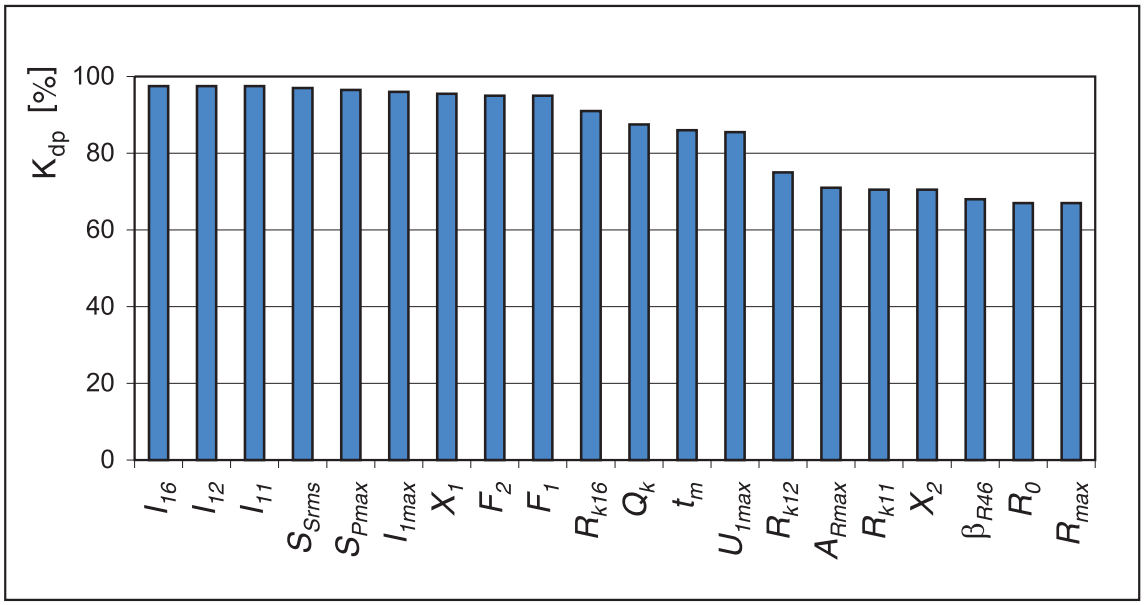

Bild 5.1: Wahrscheinlichkeit K_{dp} eines jeden einzelnen Parameters beim Punktschweißen des Werkstoffes UBS mit der Schweißmaschine OFS für einen Schweißpunktdurchmesser von über 4,0 mm.

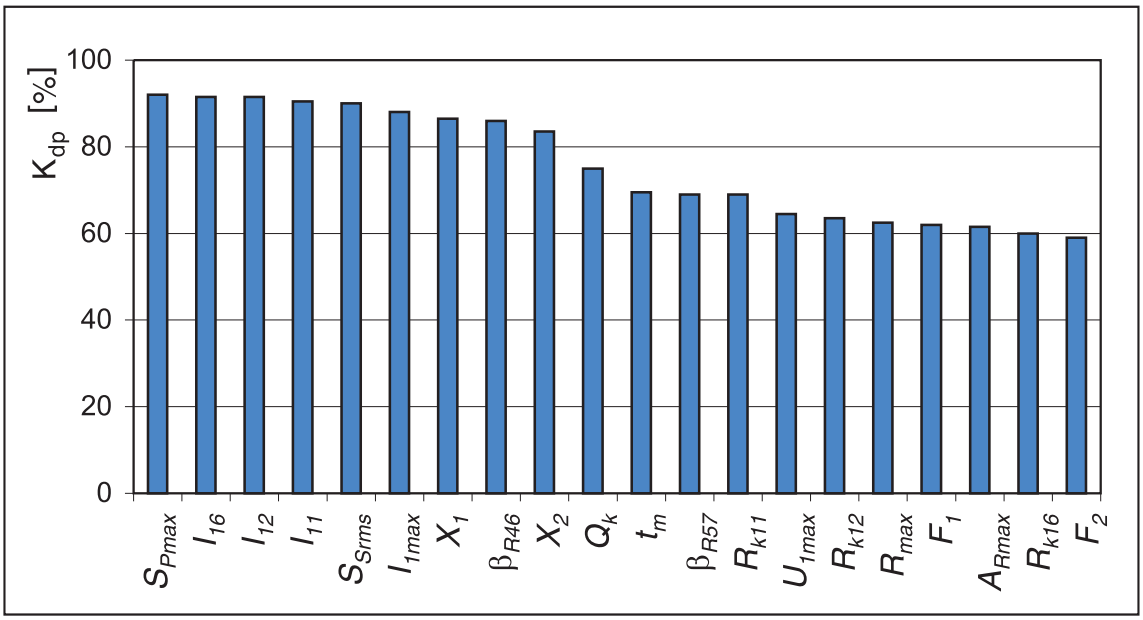

Bild 5.2: Wahrscheinlichkeit K_{dp} eines jeden einzelnen Parameters beim Punktschweißen des Werkstoffes EVS mit der Schweißmaschine OFS für einen Schweißpunktdurchmesser von über 4,0 mm.

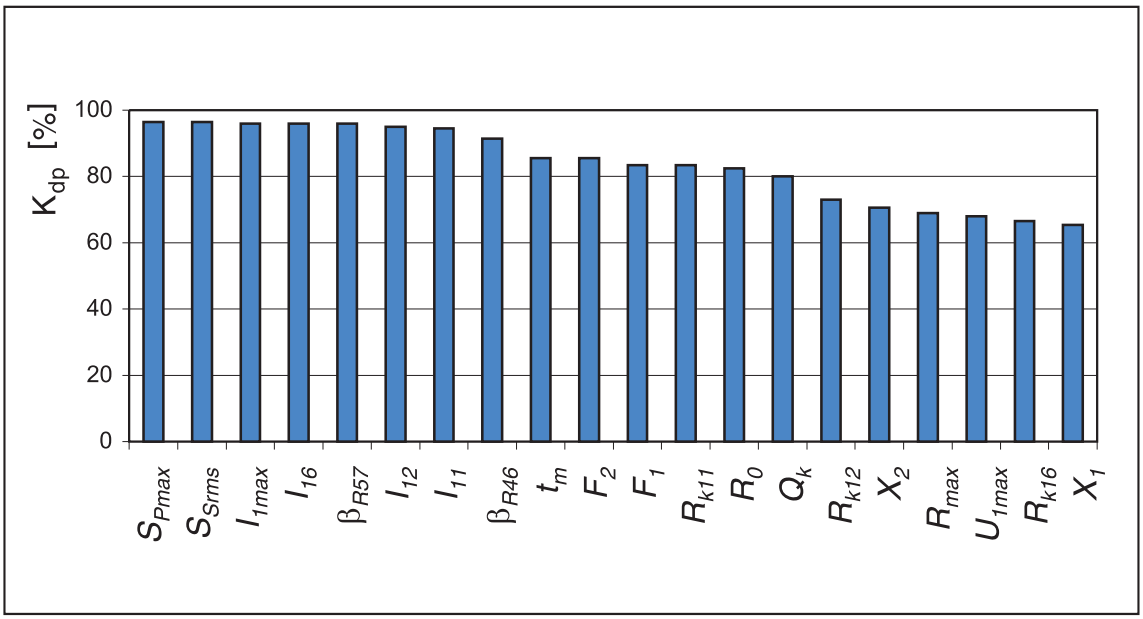

Bild 5.3: Wahrscheinlichkeit K_{dp} eines jeden einzelnen Parameters beim Punktschweißen des Werkstoffes FVS mit der Schweißmaschine OFS für einen Schweißpunktdurchmesser von über 4,0 mm.

Die Ergebnisse der Parameteranalyse bei Versuchen mit der Schweißmaschine CRS mit verschiedenen Werkstoffen und unter verschiedenen Schweißbedingungen sind:

1. beim Werkstoff UBS, Elektrodenkraft F_e = 2.000 N, Schweißzeit: 16 Halbwellen bei 50 Hz, Elektroden vom Typ G16 und bei einem überwachten Schweißstromabfall von der Spritzer- bis zur Klebstellenbildung in Bild 5.4 abgebildet,
2. beim Werkstoff EVS, Elektrodenkraft F_e = 2.200 N, Schweißzeit: 16 Halbwellen bei 50 Hz, Elektroden vom Typ G16 und bei einem überwachten, wie oben beschriebenen Schweißstromabfall in Bild 5.5 abgebildet und
3. beim Werkstoff FVS, Elektrodenkraft Fe = 2.300 N, Schweißzeit: 16 Halbwellen bei 50 Hz, Elektroden vom Typ B16 und bei einem überwachten, wie oben beschriebenen Schweißstromabfall in Bild 5.6 abgebildet.

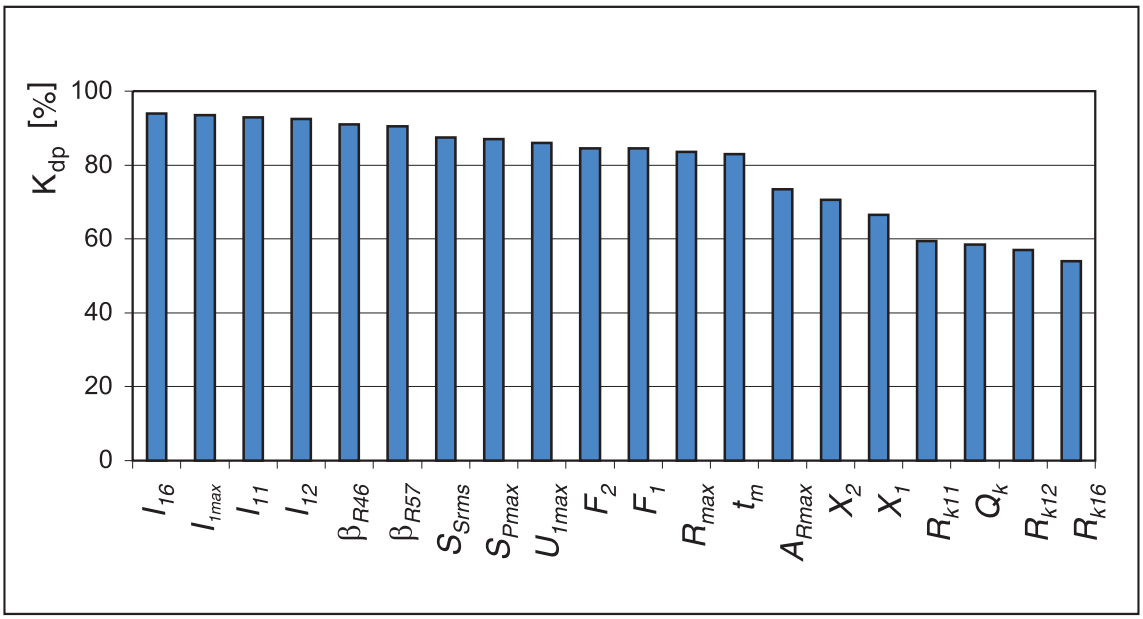

Bild 5.4: Wahrscheinlichkeit K_{dp} eines jeden einzelnen Parameters beim Punktschweißen des Werkstoffes UBS mit der Schweißmaschine CRS für einen Schweißpunktdurchmesser von über 4,0 mm.

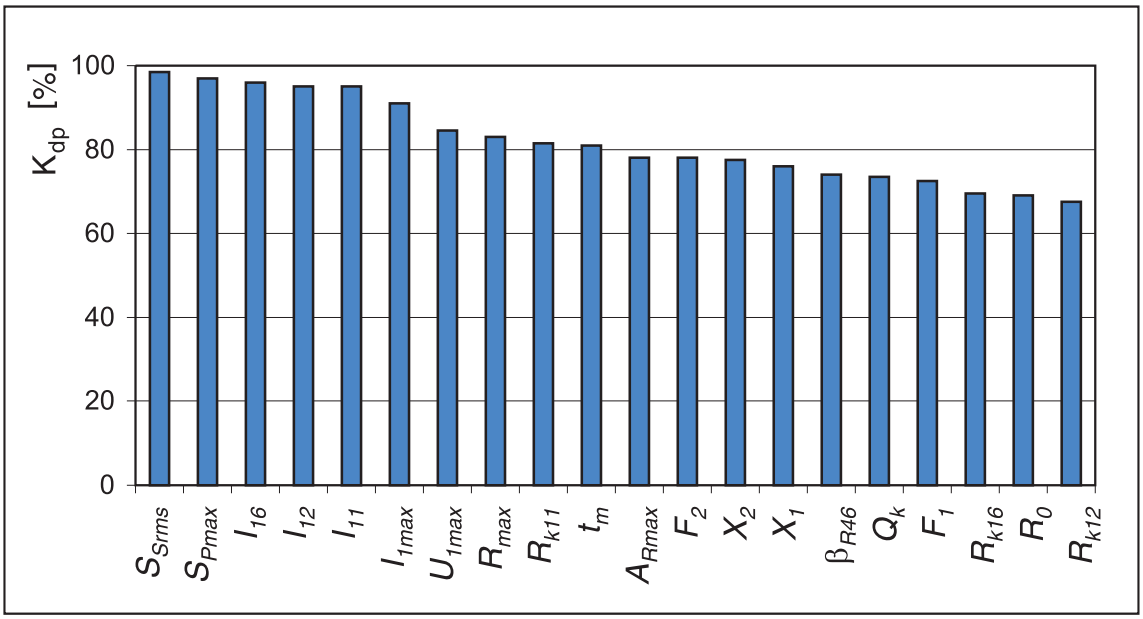

Bild 5.5: Wahrscheinlichkeit K_{dp} eines jeden einzelnen Parameters beim Punktschweißen des Werkstoffes EVS mit der Schweißmaschine CRS für einen Schweißpunktdurchmesser von über 4,0 mm.

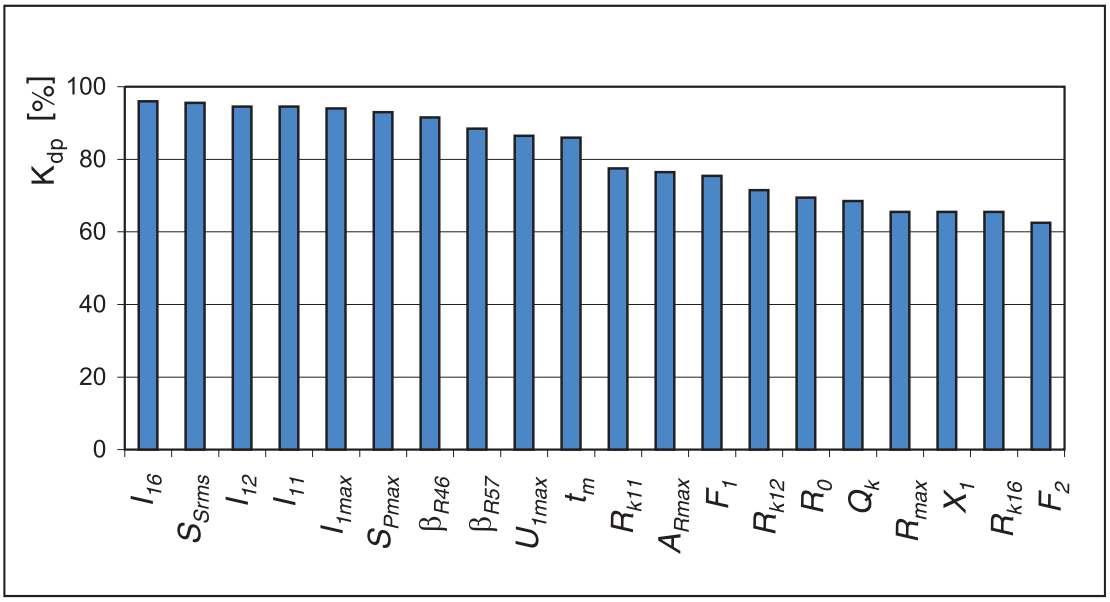

Bild 5.6: Wahrscheinlichkeit K_{dp} eines jeden einzelnen Parameters beim Punktschweißen des Werkstoffes FVS mit der Schweißmaschine CRS für einen Schweißpunktdurchmesser von über 4,0 mm.

5.1.2 Schweißprozessanalyse bei nichtkonstanten Elektrodenbedingungen

Die ersten beiden Versuchsreihen zur Schweißprozessanalyse bei nichtkonstanten Elektrodenbedingungen wurden bei einem Schweißstrom von 9,8 kA, was bei neuen Elektroden 200 A unter der Spritzerbildung liegt, am Werkstoff EVS und bei einer Elektrodenkraft von 2.200 N durchgeführt. Für diese Schweißungen wurden die verwendeten Prüfstücke in 60,0 mm breite Streifen geschnitten (siehe Bild 5.7). Auf 100 durchgeführte Schweißungen wurden fünf Prüfstücke für den Abrollversuch und zwei Prüfstücke mit einer Breite von 30,0 mm und einer Länge von 140,0 mm für den Scherzugversuch hergestellt. Die Vorhaltezeit betrug 30 Perioden, die Schweißzeit acht Perioden und die Nachhaltezeit neun Perioden.

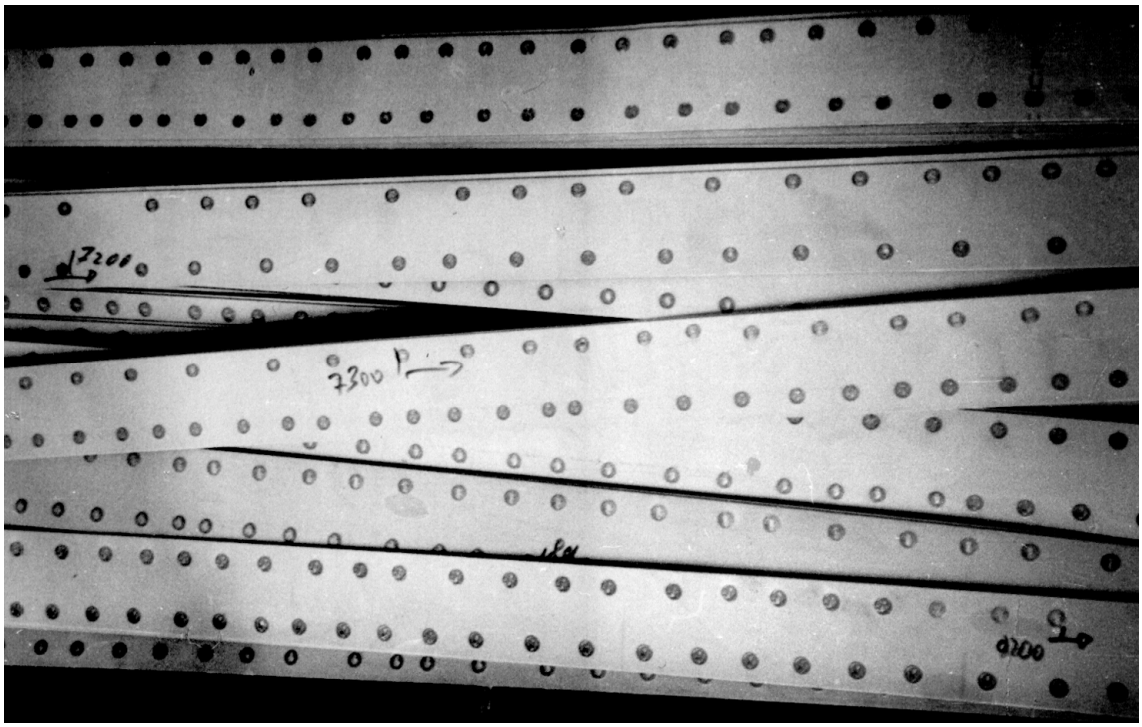

Bild 5.7: Bei den Versuchen zur Elektrodenabnutzung erhaltene Werkstücke.

Nach den zuvor angeführten Schweißparametern wurden mit der Schweißmaschine OFS mit nach der DIN-ISO-Norm 5148 hergestellten Elektrodenkappen vom Typ B14 Schweißungen durchgeführt. Die Ergebnisse der Wahrscheinlichkeitsanalyse einzelner Schweißparameter sind in Bild 5.8 abgebildet.

Der gleiche wie in Punkt 1 beschriebene Versuch wurden mit der Schweißmaschine CRS mit Elektroden vom Typ G16 durchgeführt. Die Ergebnisse der Wahrscheinlichkeitsanalyse einzelner Schweißparameter sind in Bild 5.9 abgebildet.

In Bild 5.10 sind die Elektrodenabdrucke von Schweißungen mit der Schweißmaschine OFS am Werkstoff EVS mit den oben beschriebenen Schweißparametern abgebildet.

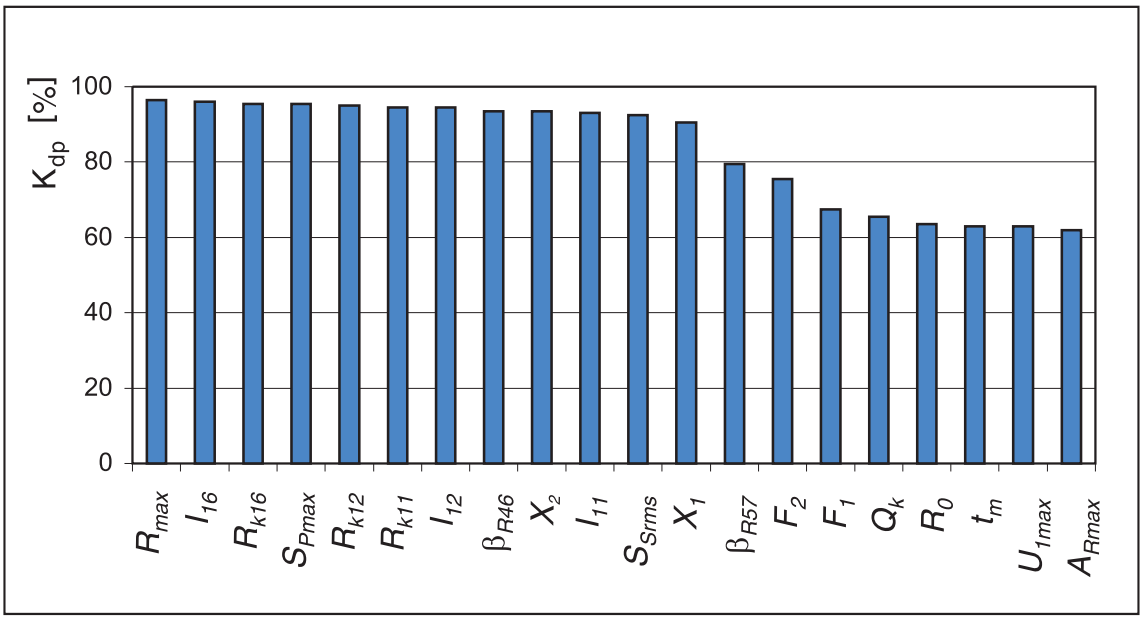

Bild 5.8: Wahrscheinlichkeit K_{dp} eines jeden einzelnen Parameters beim Punktschweißen des Werkstoffes EVS mit der Schweißmaschine OFS für einen Schweißpunktdurchmesser von über 3,9 mm.

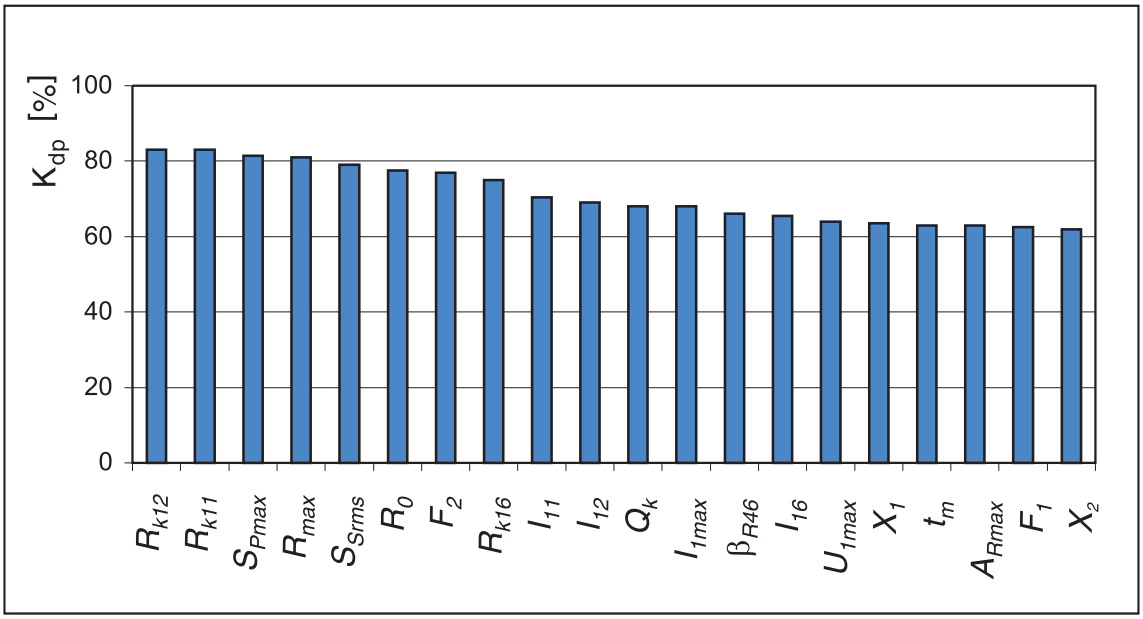

Bild 5.9: Wahrscheinlichkeit K_{dp} eines jeden einzelnen Parameters beim Punktschweißen des Werkstoffes EVS mit der Schweißmaschine CRS für einen Schweißpunktdurchmesser von über 3,9 mm.

Die nachfolgenden zwei Versuchsreihen wurden bei einem Anfangsschweißstrom von 8,9 kA mit neuen Elektroden durchgeführt. Nach einer fünfmaligen aufeinaderfolgenden Abnahme des Schweißpunktdurchmessers auf unter 3,3 mm wurde der Schweißstrom

während des Prozesses bis knapp unterhalb der Spritzerbildungsgrenze erhöht. Die höchsten durchschnittlichen Schweißstromwerte, 15,1 kA, wurden bei abgenutzten Elektroden gemessen. Zur Herstellung der Prüfstücke wurde der Werkstoff EVS, der in 60,0 mm breite Streifen geschnitten wurde (siehe Bild 5.7), bei einer Elektrodenkraft von 2.200 N geschweißt. Nach jeweils 100 durchgeführten Schweißungen wurden fünf Prüfstücke für den Abrollversuch und zwei Prüfstücke mit einer Breite von 30,0 mm und einer Länge von 140,0 mm (siehe Bild 5.8) für den Scherzugversuch hergestellt. Die Vorhaltezeit betrug 30 Perioden, die Schweißzeit acht Perioden und die Nachhaltezeit neun Perioden. Während des Versuchs war es erforderlich, den Schweißstrom achtmal anzuheben.

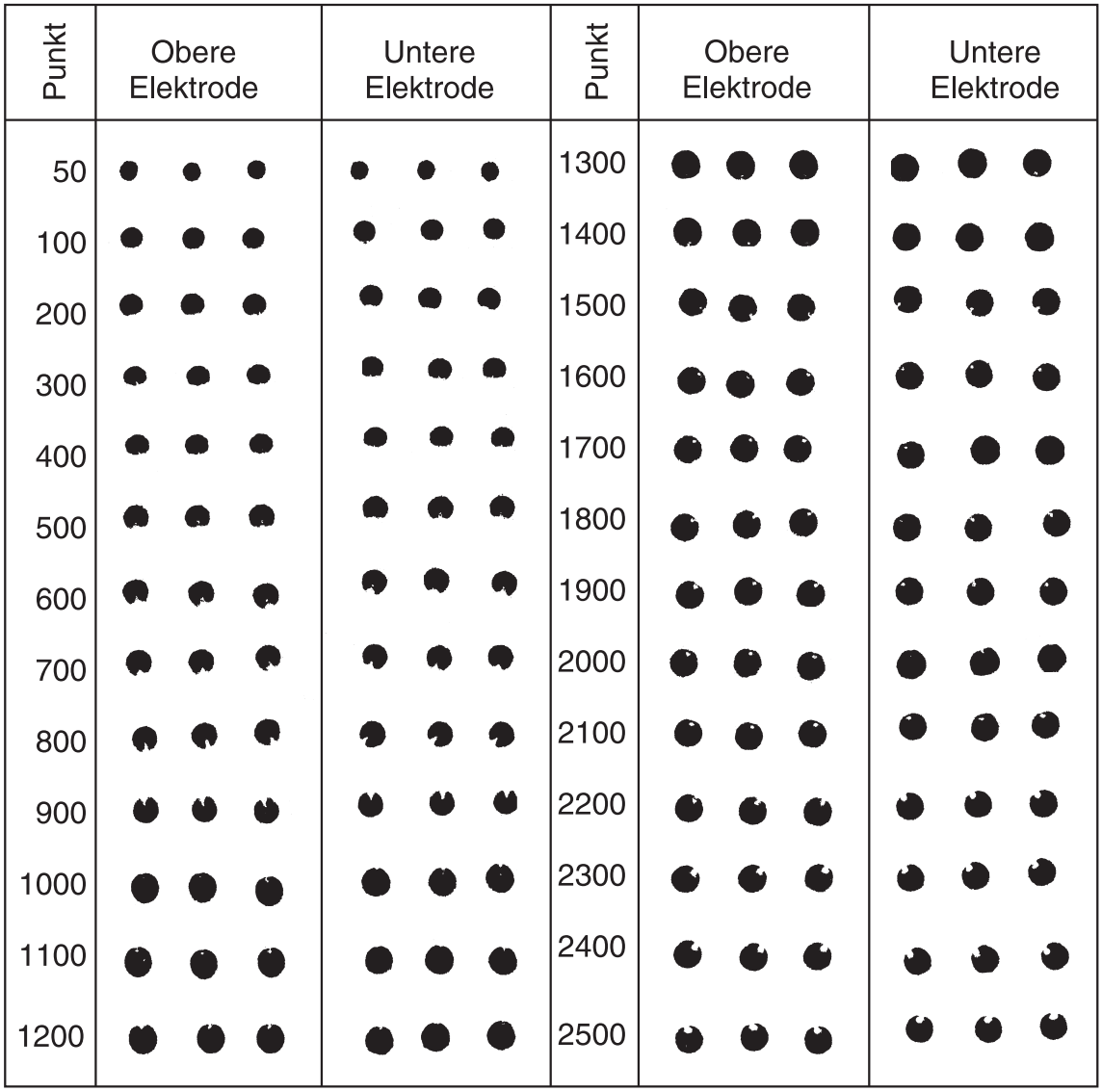

Bild 5.10: Die beim in Bild 5.9 dargestellten Versuch entstandenen und mittels Kopierpapier entnommenen Abdrücke der Elektrodenkontaktoberflächen.

Für eine eigenständige Analyse konnten die ersten vier Stromstufen mit jeweils über 1.000 Punktschweißungen verwendet werden, auf Grundlage derer man über eine ausreichende Anzahl von entnommenen Prüfstücken verfügt. Nach 9.000 durchgeführten Punktschweißungen wurde der Schweißprozess beendet, da infolge der verwendeten Elektrodenkraft und der geforderten Schweißpunktqualität die Schweißstromdichte nicht weiter erhöht werden konnte, ohne dass Spritzer entstünden. In Bild 5.11 ist die geglättete Abhängigkeit des Schweißpunktdurchmessers von den durchgeführten Punktschweißungen angebildet. Bild 5.12 stellt die Erhöhung des eingestellten Schweißstroms und Bild 5.13 die Elektrodenabnutzung dar. In Bild 5.14 und Bild 5.15 sind die Ergebnisse der Punktschweißungen abgebildet, die mit der Schweißmaschine OFS mit Elektrodenkappen vom Typ 14 und der Schweißmaschine CRS durchgeführt wurden.

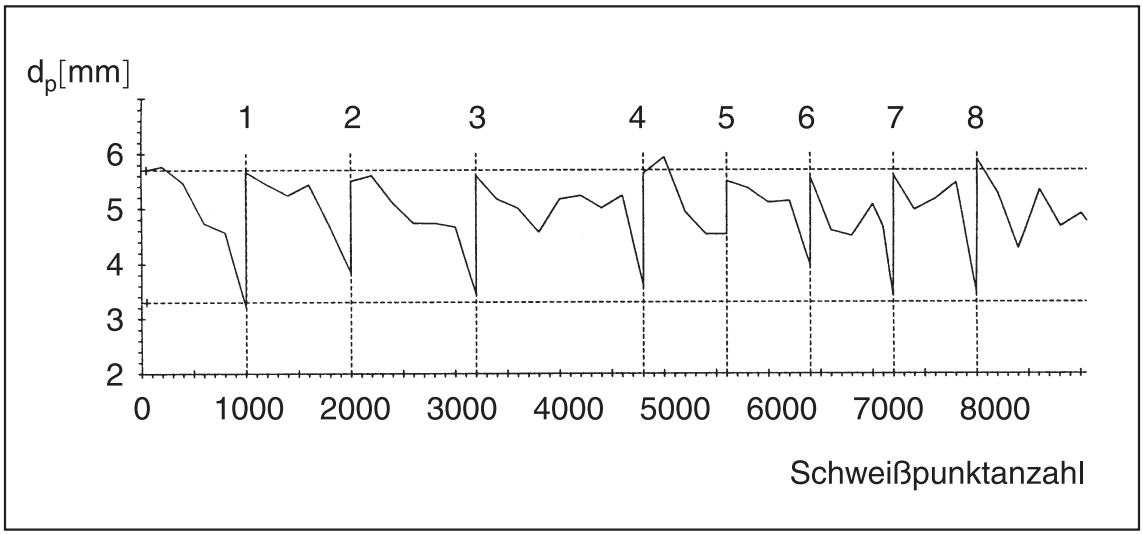

Bild 5.11: Abhängigkeit des Schweißpunktdurchmessers von der Anzahl der durchgeführten Punktschweißungen.

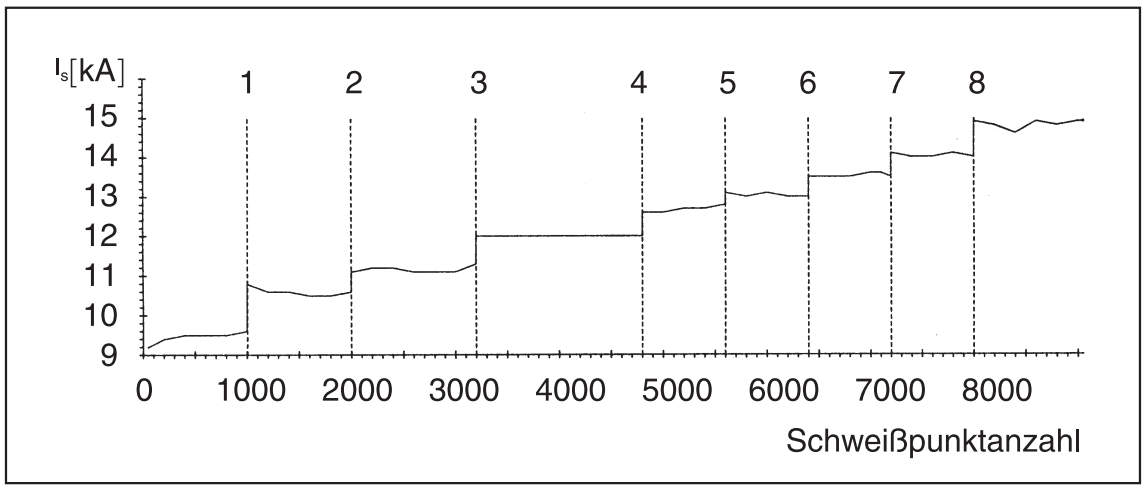

Bild 5.12: Schweißstromerhöhung während des Versuches zur Überprüfung des Einflusses der Elektrodenabnutzung.

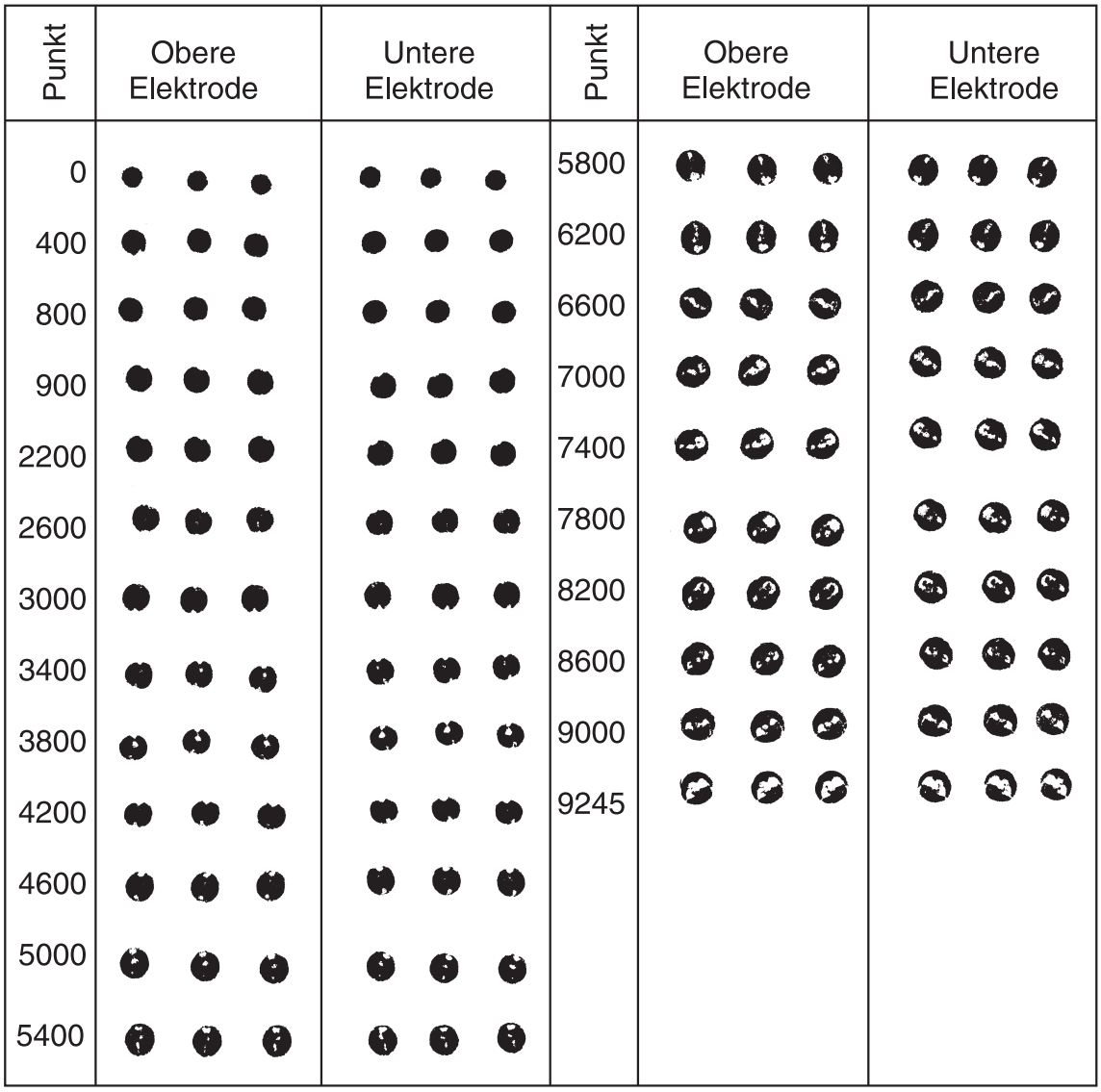

Bild 5.13: Die beim in Bild 5.14 dargestellten Versuch entstandenen und mittels Kopierpapier entnommenen Abdrücke der Elektrodenkontaktoberflächen von der ersten bis zur 9.245. Punktschweißung.

5.2 Vergleich der Anwendbarkeit verschiedener Parameter

Bei der Auswahl des optimalen Parameters aus den in Kapitel 5.1 analysierten Kenngrößen ist festzustellen, dass bei verschiedenen Schweißarbeiten die Korrelation zwischen den einzelnen Parametern und dem Qualitätsparameter großen Schwankungen unterworfen ist. Auf Grund des großen Einflusses dieser Schwankungen infolge veränderter Einflussgrößen erwies es sich als zielführend, die Ergebnisse für die Schweißstromschwankung und Elektrodenabnutzung getrennt voneinander zu analysieren.

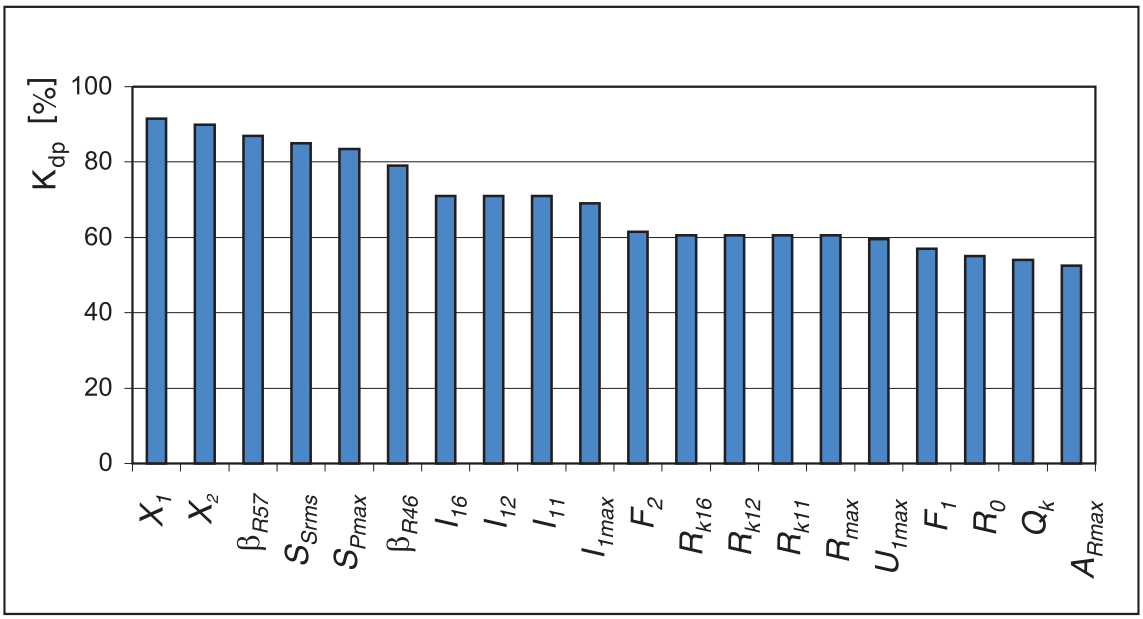

Bild 5.14: Wahrscheinlichkeit K_{dp} eines jeden einzelnen Parameters beim Punktschweißen des Werkstoffes EVS mit der Schweißmaschine OFS für einen Schweißpunktdurchmesser von über 4,3 mm. Eingabevariablen sind der Elektrodenzustand und der in acht Stufen erhöhte Schweißstrom.

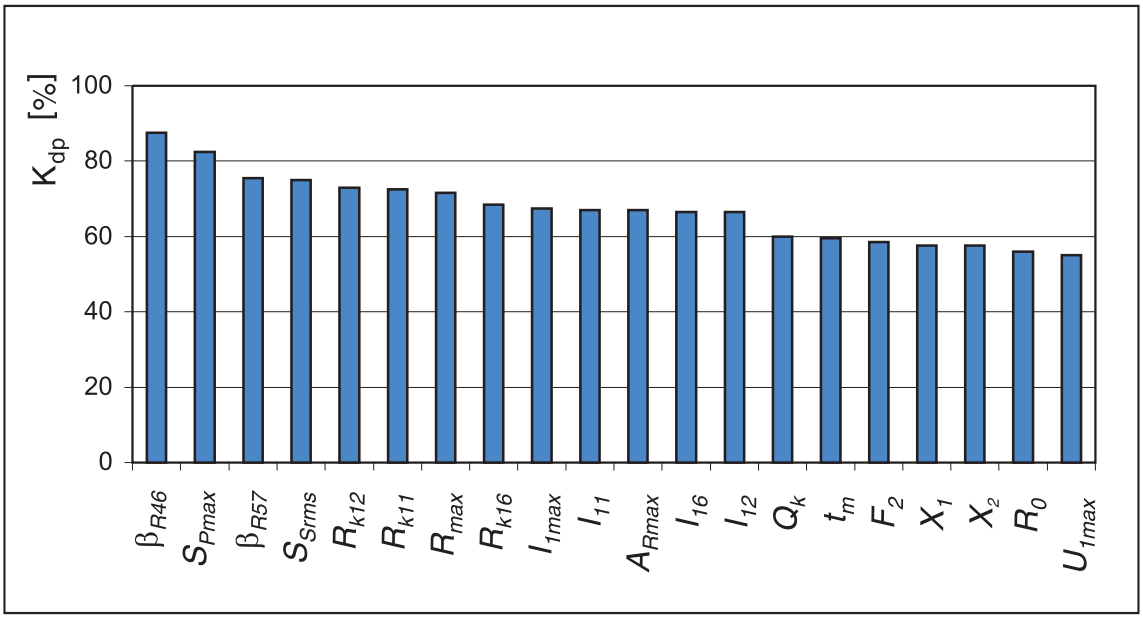

Bild 5.15: Wahrscheinlichkeit K_{dp} eines jeden einzelnen Parameters beim Punktschweißen des Werkstoffes EVS mit der Schweißmaschine CRS für einen Schweißpunktdurchmesser von über 4,3 mm. Eingabevariablen sind der Elektrodenzustand und der in acht Stufen erhöhte Schweißstrom.

5.2.1 Parameteranalyse von Schweißungen bei nichtkonstantem Schweißstrom

Aus der Analyse der aus den Schweißstromschwankungen gewonnen Ergebnisse (siehe Bild 5.1 bis 5.6) geht hervor, dass mit der Schweißqualität vor allem die Schweißstromwerte in der Abschlussphase des Schweißprozesses korrelieren. Unterzieht man die an zwei unterschiedlichen Schweißvorrichtungen und drei verschiedenen Stahlblechen gemessenen Durchschnittswerte der Stromparameter (siehe Bild 5.16) einem Vergleich, kann festgestellt werden, dass die Werte in der letzten Halbwelle über die höchste Korrelation verfügen. Ferner verfügen auch die Werte bei der 11. und 12. Halbwelle oder im Bereich des Maximums des Kennlinienverlaufs des dynamischen Widerstands über eine gute Korrelation. Hierbei wurden in allen sechs Fällen die besten Wahrscheinlichkeitswerte beim Parameter I_{16} (als Einzelparameter oder in Verbindung mit anderen Parametern) erzielt. Die verwendeten Schweißmaschinen und Bleche üben indes keinen wesentlichen Einfluss auf die Korrelation aus.

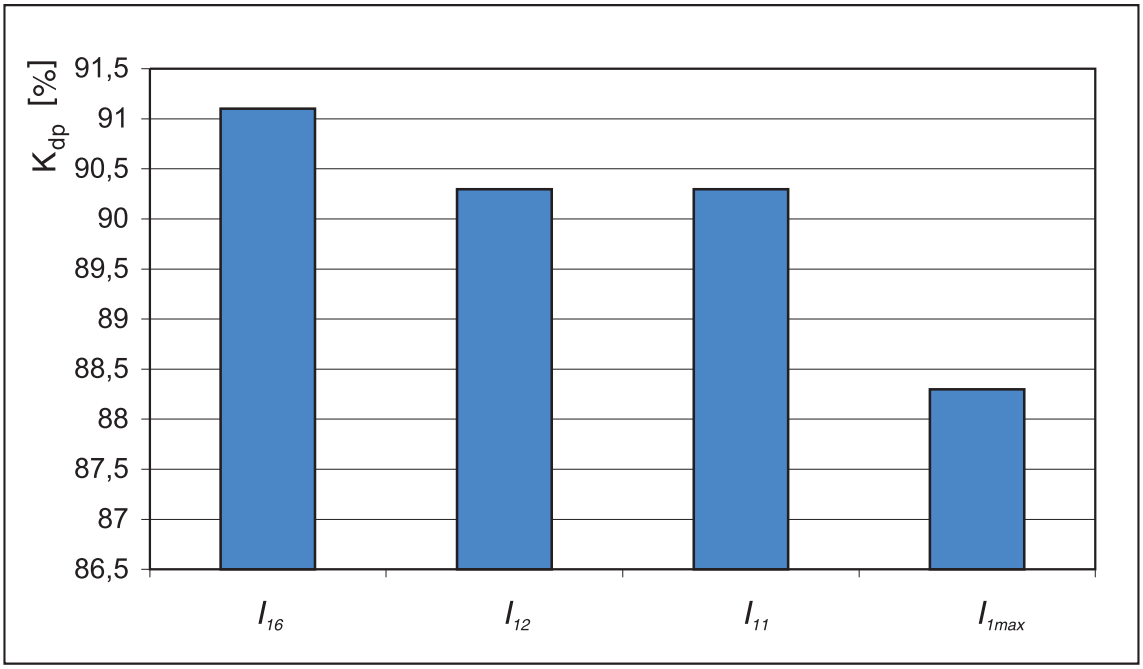

Bild 5.16: Auf Grundlage des Schweißstroms ermittelte durchschnittliche Wahrscheinlichkeit K_{dp} eines jeden einzelnen Parameters beim Punktschweißen dreier verschiedener Stahlbleche mit den Schweißmaschinen OFS und CRS für einen Schweißpunktdurchmesser von über 3,8 mm. Eingabevariable ist der Effektivschweißstrom.

Aus den in Bild 5.17 dargestellten Versuchsergebnissen geht hervor, dass bei Schweißpunktdurchmessern von über 4,0 mm die Schweißstromwerte stets über 14,5 kA und bei Schweißpunktdurchmessern von unter 3,5 mm unter 14,3 kA liegen. Bei den Grenzwerten des Schweißpunktdurchmessers (3,5–4,0 mm) ist eine größere Streuung der Parameterwerte festzustellen, was den größten Einfluss auf die Verringerung der Korrelation ausübt. Auch bei allen anderen Schweißungen standen die Kleb- und

Schweißpunkte von unzureichender Qualität in guter Korrelation mit den niedrigen Schweißstromwerten.

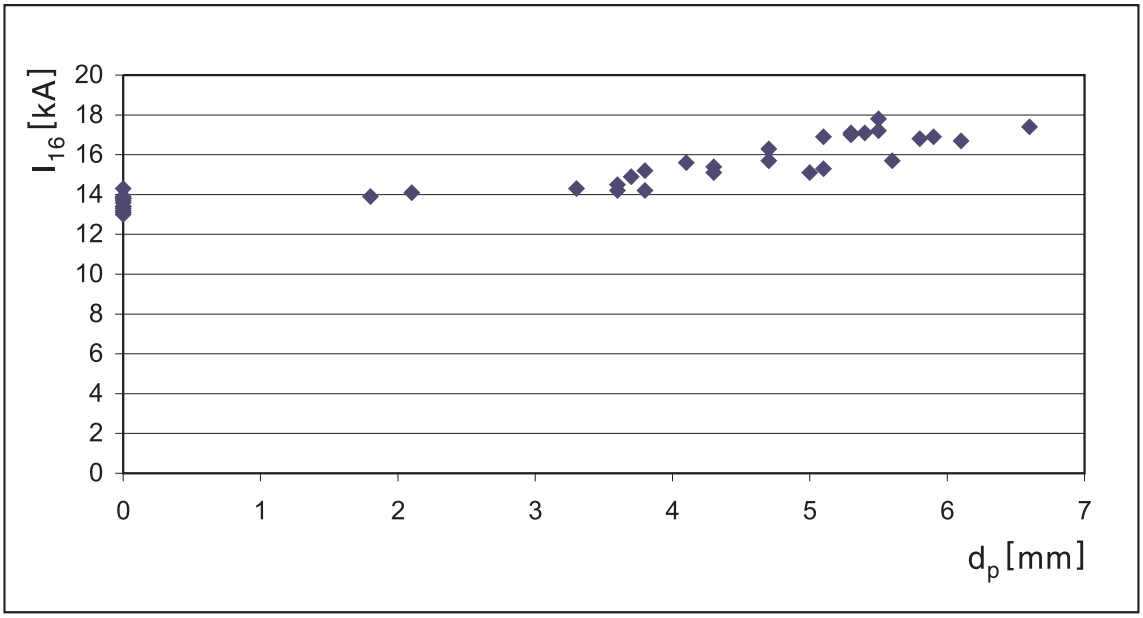

Bild 5.17: Abhängigkeit des Schweißpunktdurchmessers vom Parameter I_{16} für die ersten 50 mit der Schweißmaschine OFS am Werkstoff FVS durchgeführten Schweißungen.

In Bild 5.18 sind die aus den Strom- und Spannungsmessungen gewonnen Parameter abgebildet. In einigen Fällen sind die Parameter S_{Pmax} und S_{Srms} mit dem Parameter I_{16} identisch, während die Blindleistung Q_k und der Kontaktwiderstand R_0 erwartungsgemäß unzureichend Korrelieren.

In der in Bild 5.19 dargestellten Abhängigkeit des Schweißpunktdurchmessers vom Parameter R_0 ist eine weite Streuung der Messergebnisse erkennbar. Für die abgebildeten mit der Schweißmaschine CRS am Werkstoff FVS durchgeführten Schweißungen beträgt die Wahrscheinlichkeit des Parameters R_0 nur 54,0 %. Trotz dieser niedrigen Wahrscheinlichkeit können dem Diagramm folgende Charakteristiken entnommen werden: So sind alle Schweißpunkte, deren Messwerte unter 0,07 mΩ liegen, von guter Qualität. Bei der Bestimmung von z. B. ausschließlich Klebpunkten kann mit großer Wahrscheinlichkeit gesagt werden, dass der 5 ms nach Schweißbeginn gemessene Kontaktwiderstand die festgelegte Untergrenze überschreiten wird. Diese beträgt z. B. für die in Bild 5.19 abgebildeten Schweißungen 0,077 mΩ. Aus physikalischer Sicht bedeutet dies, dass bei einem hohen Kontaktwiderstand ein Teil der zugeführten Energie für die Gewährleistung von Bedingungen für den Schweißstromdurchfluss verwendet wird. Ferner beginnen Prozesse mit hohen Anfangswiderständen langsamer, was eine Verringerung der effektiven Schweißzeiten zur Folge hat.

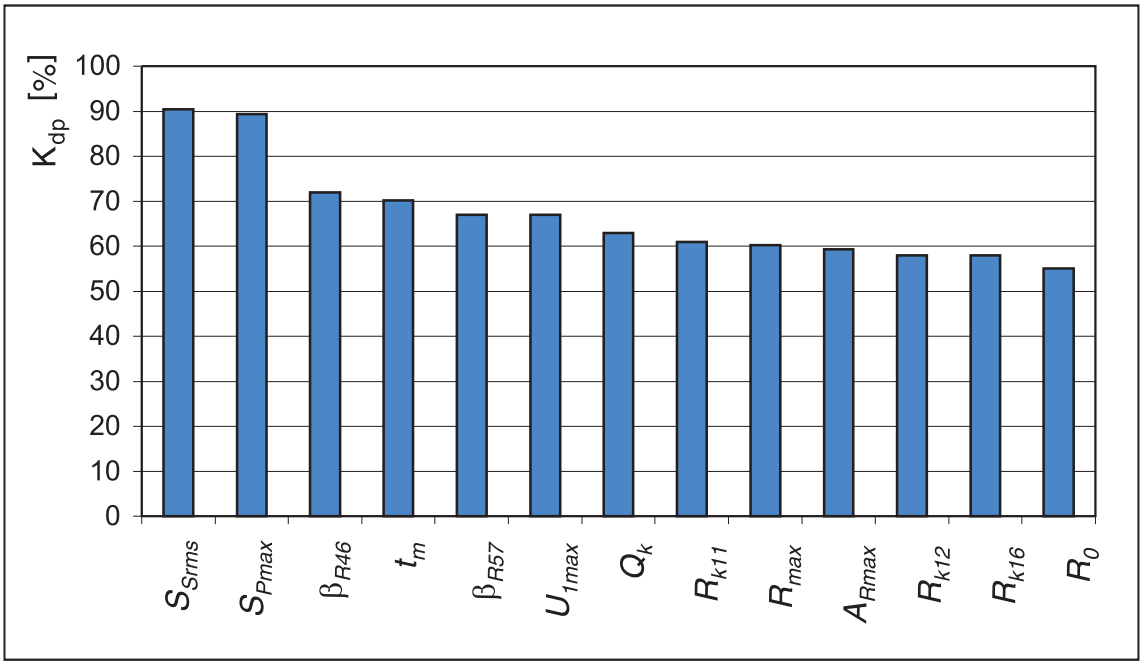

Bild 5.18: Auf Grundlage des Schweißstroms und der Schweißspannung ermittelte durchschnittliche Wahrscheinlichkeit K_{dp} eines jeden einzelnen Parameters beim Punktschweißen dreier verschiedener Stahlbleche mit den Schweißmaschinen OFS und CRS für einen Schweißpunktdurchmesser von über 3,8 mm. Eingabevariable ist der Effektivschweißstrom.

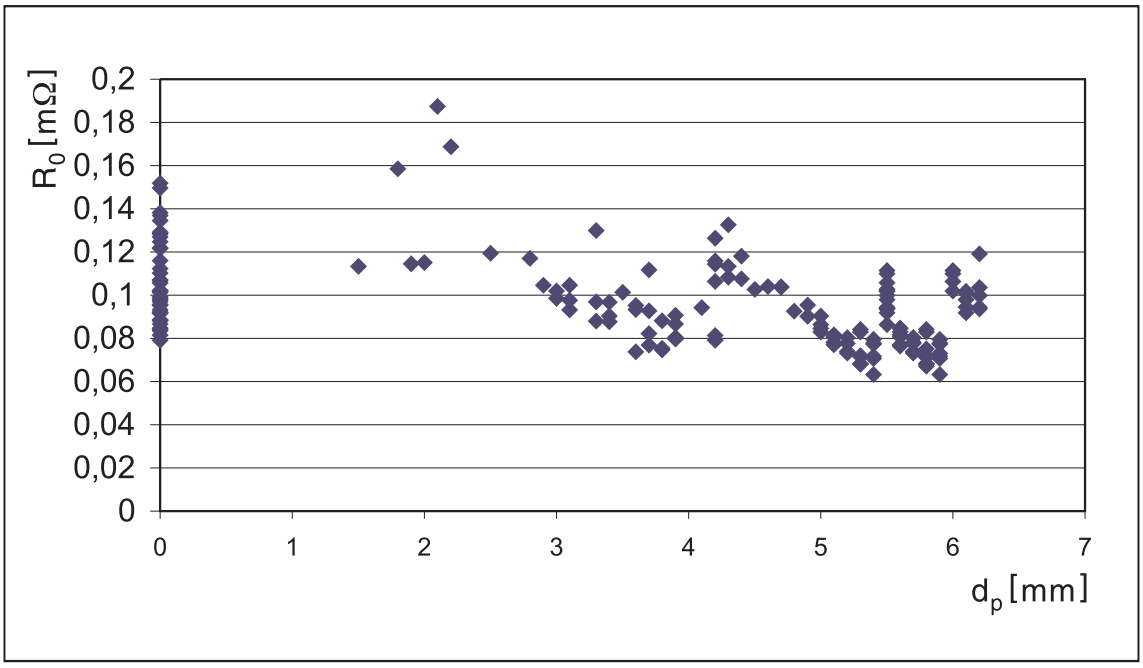

Bild 5.19: Abhängigkeit des Schweißpunktdurchmessers vom Parameter R_0 für mit der Schweißmaschine OFS am Werkstoff FVS durchgeführte Schweißungen.

Die auf Grundlage des dynamischen Widerstands gewonnenen Parameter verfügen über variierende Werte. Die Widerstandswerte korrelieren eher bei den Halbwellen in der Umgebung des Höchstwerts des dynamischen Widerstands mit dem Schweißpunktdurchmesser als zu Ende des Schweißprozesses.

Aus dem Vergleich der auf Grundlage der Messungen des Elektrodenhubs und der Elektrodenbeschleunigung gewonnenen und in Bild 5.20 abgebildeten Parametergruppen geht hervor, dass die ermittelten Wahrscheinlichkeitswerte zu gering sind, als dass sie als selbstständige Überwachungsparameter geeignet wären. Bei der Parameterbestimmung wurde prognostiziert, dass sowohl beim Elektrodenhub als auch bei den integrierten Elektrodenbeschleunigungswerten die größten Nichtlinearitäten und Abweichungen zu Beginn des Schweißprozesses eintreten würden. Aus diesem Grund wurden die Parameter X_2 und F_2 eingeführt, auf Grundlage derer bei der Analyse die ersten sechs Halbwellen nicht berücksichtigt werden. Wider Erwarten konnten nach erfolgter Analyse keine nennenswerten Vorteile dieser Methode gefunden werden.

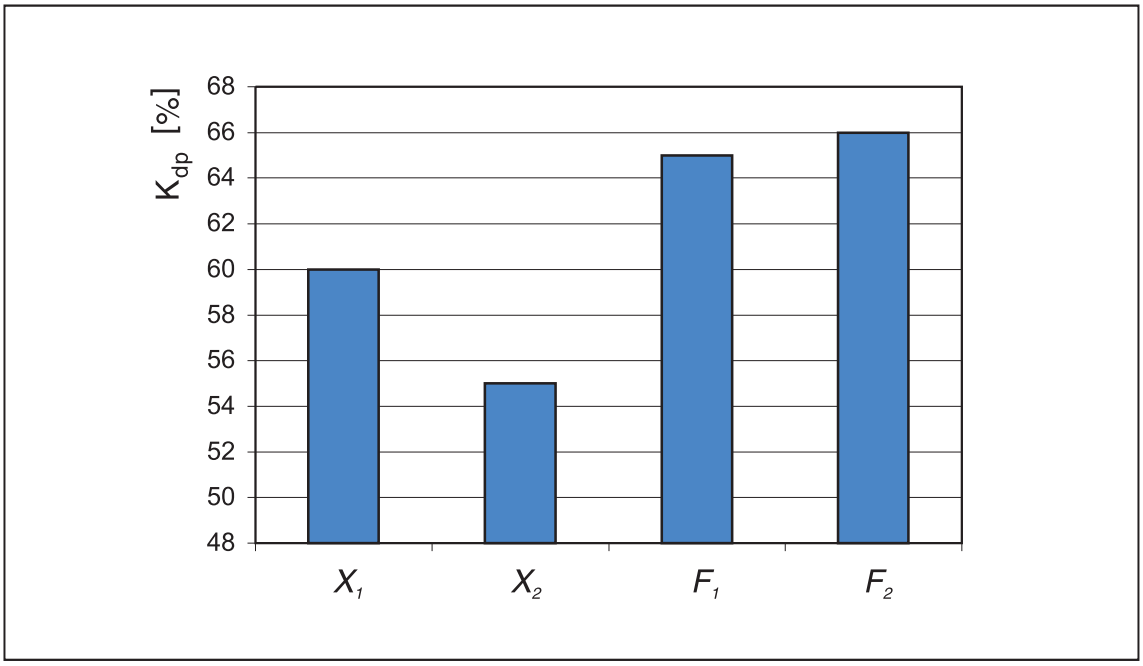

Bild 5.20: Auf Grundlage der von den Weg- und Beschleunigungssensoren ermittelten Parameter durchschnittliche Wahrscheinlichkeit K_{dp} eines jeden einzelnen Parameters beim Punktschweißen dreier verschiedener Stahlbleche mit den Schweißmaschinen OFS und CRS für einen Schweißpunktdurchmesser von über 3,8 mm. Eingabevariable ist der Effektivschweißstrom.

Bei der Beobachtung der Elektrodenbewegung übt die Zinkbeschichtung des Stahlblechs einen erheblichen Einfluss auf die Korrelation aus. Wegen Zinkablagerungen auf den Elektroden sind die Messergebnisse Streuungen unterworfen, wodurch die Korrelation verringert wird.

5.2.2 Parameteranalyse von Schweißungen bei nichtkonstanten Elektrodenbedingungen

Die Analysen bei nichtkonstanten Elektrodenbedingungen wurden ausschließlich an elektrolytisch verzinktem Stahlblech durchgeführt. Bei den ersten beiden Versuchsreihen war der Schweißstrom konstant, während er bei den folgenden zwei, länger dauernden Versuchen (siehe Bild 5.12) verändert wurde. Bei der Erhöhung des Schweißstroms bei gleichzeitiger Elektrodenabnutzung sinkt die Wahrscheinlichkeit und gleichzeitig geht der physikalische Hintergrund verloren. Aus diesem Grund wurde bei der Berechnung der Durchschnittswerte parallel dazu eine Messserie bei konstanten Stromwerten durchgeführt. Die Versuchswerte wurden aus den ersten beiden Versuchsreihen, bei denen der Strom über den gesamten Schweißprozess konstant war, und aus den beiden darauf folgenden Versuchsreihen gewonnen, bei denen die ersten vier Stufen der Stromerhöhung berücksichtigt wurden. Die im weiteren Verlauf beschriebenen statistischen Wahrscheinlichkeitswerte wurden aus zehn Versuchsreihen gewonnen. Bei diesen Versuchsreihen wurden die verschiedenen Stadien der Elektrodenabnutzung und verschiedene, aber konstante Schweißparameter gemessen. Diese Versuche wurden jeweils zur Hälfte mit der Schweißmaschine OFS und der Schweißmaschine CRS durchgeführt.

Grundsätzlich kann gesagt werden, dass bei der Elektrodenabnutzung die Korrelation verschiedener Parameter in noch größerem Maß als bei einem nichtkonstanten Schweißstrom Streuungen unterworfen ist (siehe Bild 5.8, 5.9, 5.14 und 5.15).

Die auf Grundlage des konstanten Schweißstroms und der Elektrodenabnutzung gewonnenen Wahrscheinlichkeiten (siehe Bild 5.21) verfügen über ausreichende Werte. Diese erreichen jedoch nicht die des stufenweise angehobenen Schweißstroms. Als statistisch am verlässlichsten hat sich der Parameter I_{12} und somit der Strom in der Umgebung des Maximums des dynamischen Widerstands und nicht zu Ende des Schweißprozesses erwiesen.

Die aus dem dynamischen Widerstand ermittelten Parameter ähneln denen, die auf Grundlage der Analyse des Schweißstroms gewonnen wurden. Die Parameter S_{Pmax} und S_{Srms} verfügen über ausgezeichnete Korrelationen und treten oft gemeinsam als beste Parameter in Erscheinung.

Die beiden Tangenten an der Kennlinie des dynamischen Widerstands sind in Bezug auf ihre Korrelation starken Schwankungen unterworfen, sodass der Parameter β_{46} von sehr guten bis zu völlig ungeeigneten Werten variiert.

Die Kennlinie des dynamischen Widerstands erreicht in der Regel bei der 11. bzw. 12. Halbwelle oder zu Ende des Schweißprozesses ihren Höchstwert. Auf Grund der ausgewählten Schweißdauer von 16 Halbwellen treten die Maxima des dynamischen Widerstands sowohl bei den unzureichenden als auch guten Schweißpunkten zu Ende

des Schweißprozesses auf. Infolge dessen ist auch die Korrelation des Parameters t_m äußerst niedrig, was aber nicht bedeutet, dass dies für alle Widerstandspunktschweißverfahren zutrifft. Aus dem gleichen Grund korreliert auch die Fläche über dem Kennlinienverlauf des dynamischen Widerstands A_{Rmax} nur wenig.

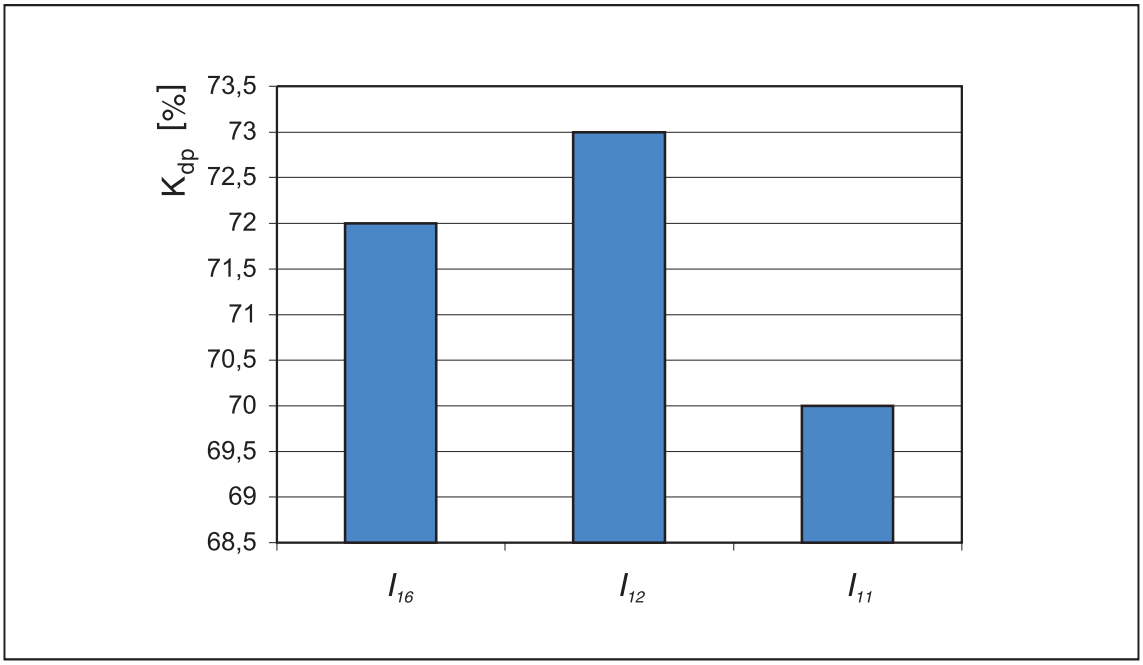

Bild 5.21: Durchschnittliche Wahrscheinlichkeit K_{dp} für verschiedene Parameter beim Punktschweißen des Werkstoffes EVS mit den Schweißmaschinen OFS und CRS für einen Schweißpunktdurchmesser von über 3,9 mm. Eingabevariable ist der Elektrodenzustand.

Bei den Schweißungen mit einem nichtkonstanten Elektrodenzustand (siehe Bild 5.22) verfügen der Widerstand bei der ersten Halbwelle R_0, der Spannungshöchstwert bei der ersten Halbwelle U_{1max} und die Scheinleistung Q_k über eine unzureichende Korrelation.

Die aus der Elektrodenbeschleunigung ermittelten Parameterwerte sind auf Grundlage der Zinkbeschichtung großen Streuungen unterworfen (siehe Bild 5.23), und die durch die Messungen des Elektrodenhubs ermittelten Parameter verfügen über eine Wahrscheinlichkeit von 60,0 bis 70,0 %. Letztere stellt einen akzeptablen, aber schlechteren Wert als die auf Grundlage von Strom- und Spannungsmessungen gewonnen Werte dar.

Zur Gewinnung von Parametereigenschaften, die Schweißungen in der Praxis entsprechen, wurde ein entsprechender Versuch durchgeführt, bei dem mit einem Elektrodenpaar nach 1.000 nicht gemessenen Schweißungen 1.200 Schweißungen zu Versuchszwecken durchgeführt wurden. Die Punktschweißungen wurden am Werkstoff EVS mit der Schweißmaschine OFS durchgeführt. In den Bildern 5.24 und 5.26 bis 5.35 sind die einzelnen Werte verschiedener Parameter in Abhängigkeit vom

Qualitätsparameter abgebildet. Für eine bessere Übersicht sind in den Diagrammen die Parameter jedes 24. gemessenen Schweißpunkts abgebildet. Bei diesen Schweißungen sind bei Punktschweißungen von unzureichender Qualität die Ströme zu Ende des Schweißprozesses höher. Bei den in Kapitel 5.1.1. durchgeführten Versuchen ist indes der Stromwert über den gesamten Schweißprozess und somit auch die Effektivleistung und infolge dessen auch die zugeführte Energie niedriger. In Bezug auf die Veränderung des Elektrodenzustandes ist Folgendes festzustellen: Der Strom ist zu Beginn des Schweißprozesses in Abhängigkeit vom Qualitätsparameter Streuungen unterworfen, in der Mitte des Schweißprozesses ist er konstant, und zu Ende des Schweißprozesses wird er im großen Maß durch die Stromleitfähigkeit durch den Schweißpunkt beeinflusst. Die Leitfähigkeit steht im umgekehrten Verhältnis zum Widerstand, durch dessen Zunahme ein Stromabfall auf der Sekundärseite des

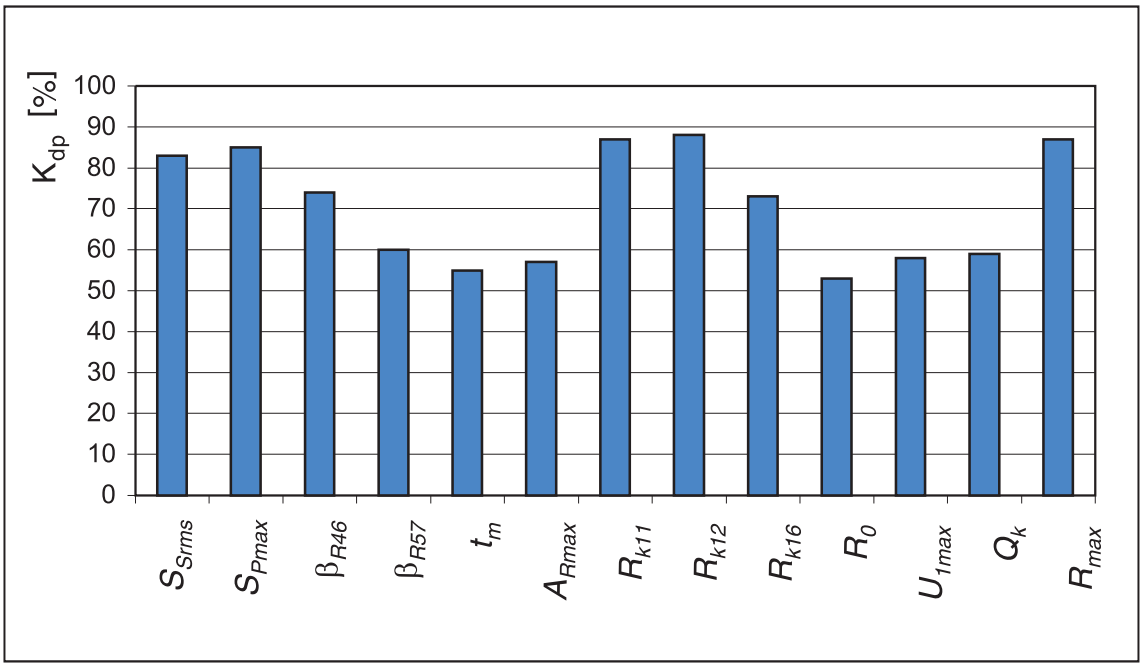

Bild 5.22: Auf Grundlage des Schweißstroms und der Schweißspannung ermittelte durchschnittliche Wahrscheinlichkeit K_{dp} für verschiedene Parameter beim Punktschweißen des Werkstoffes EVS mit den Schweißmaschinen OFS und CRS für einen Schweißpunktdurchmesser von über 3,9 mm. Eingabevariable ist der Elektrodenzustand.

Transformators verursacht wird. Dies ist auf die weichen Strom-Spannungs-Charakteristiken des Schweißtransformators zurückzuführen (siehe Bild 5.25). Denn bei einer sehr harten Kopplung zwischen den beiden Transformatorteilen würde ein niedriger Ausgangswiderstand Spritzer, eine erhöhte Elektrodenabnutzung und zu hohe Eingangsströme zur Folge haben.

Auf Grund der stärkeren Stromabnahme im letzten Drittel des Schweißprozesses nähern sich die sich später gebildeten Schweißpunkte der Qualität der Schweißpunkte an, deren Erstarrungsprozess früher begonnen hat. Dasselbe Prinzip ist bei Schweißungen zu beobachten, bei denen mit einer Doppelelektrode und einem Unterkupfer zwei

Schweißpunkte gleichzeitig geschweißt werden. Hierbei werden auf Grund der verschiedenen Widerstände der beiden Schweißpunkte die Schweißlinsen zeitlich versetzt ausgebildet. Der Punkt mit dem deutlich höheren Kontaktwiderstand wird im ersten Drittel des Schweißprozesses mit einem kleineren Schweißstrom geschweißt. In der Regel wird der Schweißprozess zu früh beendet, als dass dieser Punkt eine ausreichende Qualität erzielen könnte. Dem Bild 5.24 ist zu entnehmen, dass trotz des geringen Stromabfalls (ca. 2,0–4,0 %) die gemessenen Punkte regelmäßig linear abfallen.

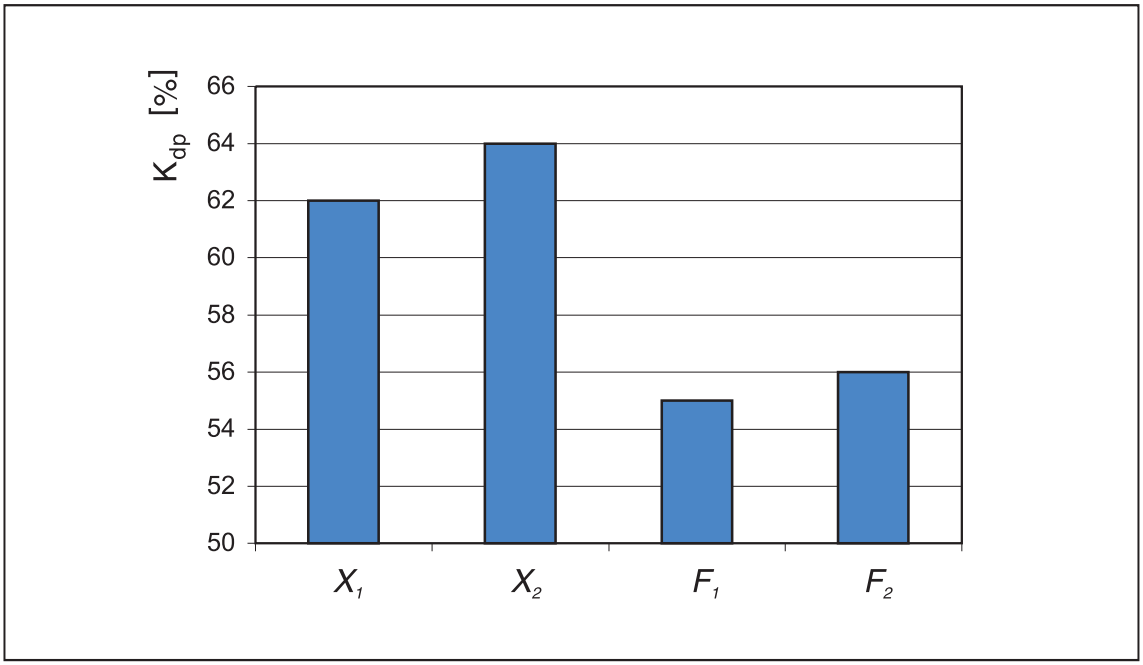

Bild 5.23: Auf Grundlage der von den Weg- und Beschleunigungssensoren ermittelten Parameter durchschnittliche Wahrscheinlichkeit K_{dp} eines jeden einzelnen Parameters beim Punktschweißen des Werkstoffes EVS mit den Schweißmaschinen OFS und CRS für einen Schweißpunktdurchmesser von über 3,8 mm. Eingabevariable ist der Elektrodenzustand.

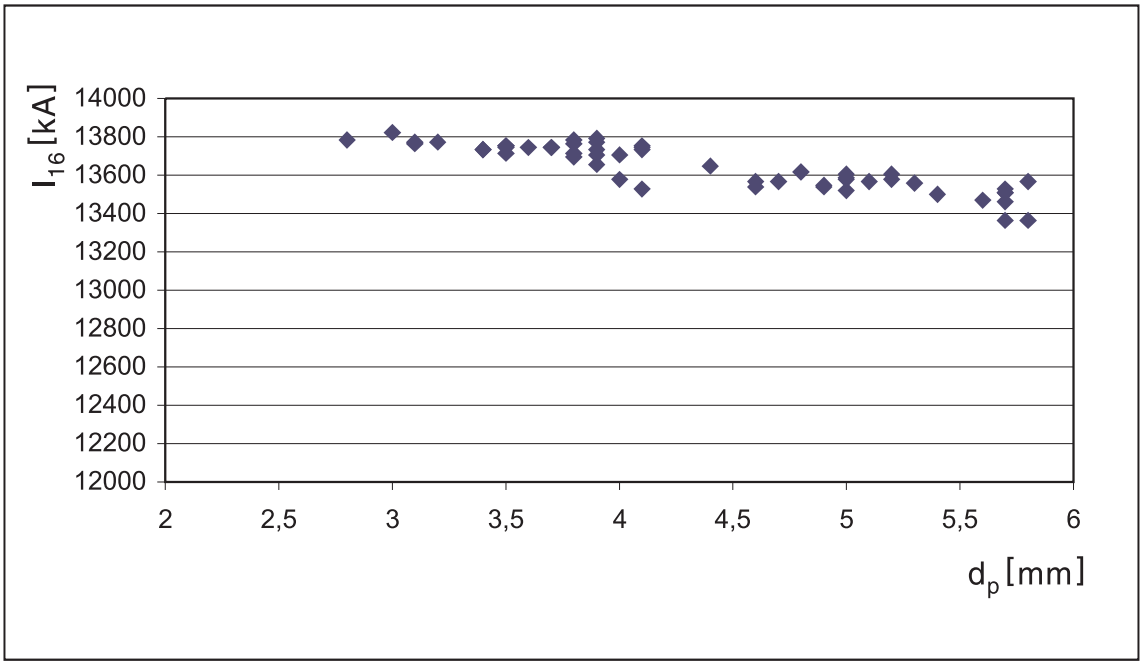

Bild 5.24: Verteilung des Parameters I_{16} in Abhängigkeit vom Ausknöpfbruchdurchmesser.

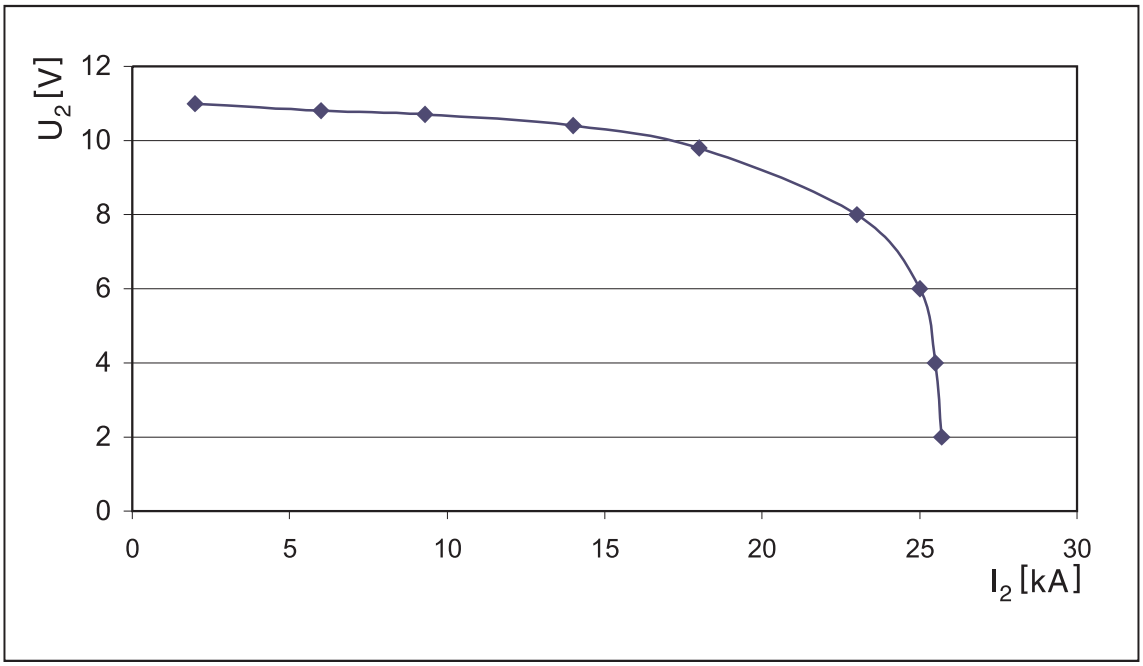

Bild 5.25: Strom-Spannungs-Charakteristik des Schweißtransformators der Schweißmaschine OFS.

Die Ergebnisse der Parameteranalyse der Gesamt- und Wirkleistung ähneln sich. Da die Blindleistung gering ist und ihr Einfluss auf die Gesamtleistung zum Quadrat addiert wird, ist die Verteilung der Parameter S_{Pmax} und S_{Srms} auf der Qualitätsparametersachse fast identisch (siehe hierzu Bild 5.26 und 5.27). In Bezug auf den Qualitätsparameter

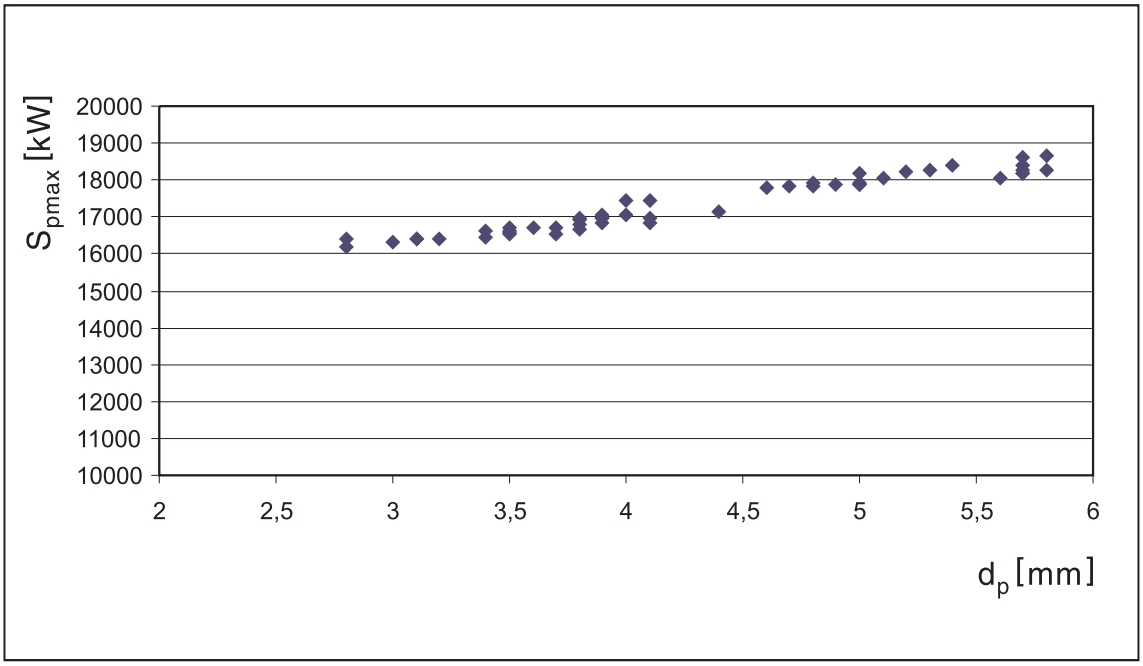

Bild 5.26: Verteilung des Parameters S_{Pmax} in Abhängigkeit vom Ausknöpfbruchdurchmesser.

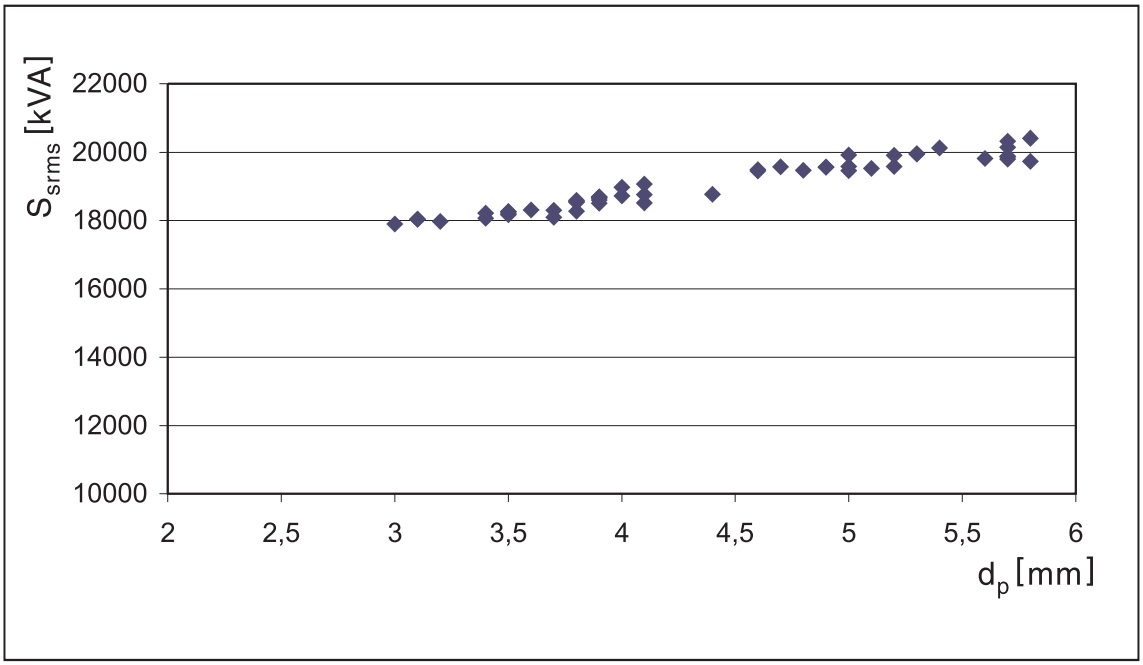

Bild 5.27: Verteilung des Parameters S_{Srms} in Abhängigkeit vom Ausknöpfbruchdurchmesser.

sind die S_{Pmax}- und S_{Srms}-Werte steigend. Mit der Zunahme des Schweißpunktdurchmessers von 2,8 auf 5,8 mm steigt die Leistung um ca. 12,0 % an. Da die Ergebnisverteilung ohne größere Streuungen behaftet ist, beträgt die Wahrscheinlichkeit bei den durchgeführten Schweißungen ca. 80,0 % und in einigen Fällen auch mehr.

Die Blindleistung Q_k nimmt mit zunehmender Schweißpunktqualität stark ab, wobei die Ergebnisse einer derartigen Streuung unterworfen sind, dass die Korrelation in der Regel zu gering und infolge dessen ungeeignet ist (siehe Bild 5.28).

Der Widerstand wurde bei drei verschiedenen Halbwellen (R_{k11}, R_{k12} und R_{k16}) einer detaillierten Analyse unterzogen. In Bild 5.29 ist der Parameter R_{k16} abgebildet, der bei den Versuchen zur Elektrodenabnutzung in Vergleich zu den anderen beiden Parametern erhöhten Streuungen unterworfen war. Die Wahrscheinlichkeit dieses Parameters betrug ca. 75,0 % und die der anderen beiden ca. 85,0 %. Die Widerstandswerte für Schweißpunkte mit einem Durchmesser von über 4,0 mm liegen unter 0,1 mΩ, während die Widerstandswerte von Punkten mit einem Durchmesser von unter 4,0 mm über 0,1 mΩ liegen. Die Korrelation wird nur von den im Grenzbereich liegenden Schweißpunkten mit einem Durchmesser von 3,8 bis 4,0 mm verringert. Die Kennlinienverläufe der Parameter R_{k11} und R_{k12} in Abhängigkeit vom Ausknöpfbruchdurchmesser verfügen über verschiedene Widerstandswerte, während sie ihrer Form nach identisch sind.

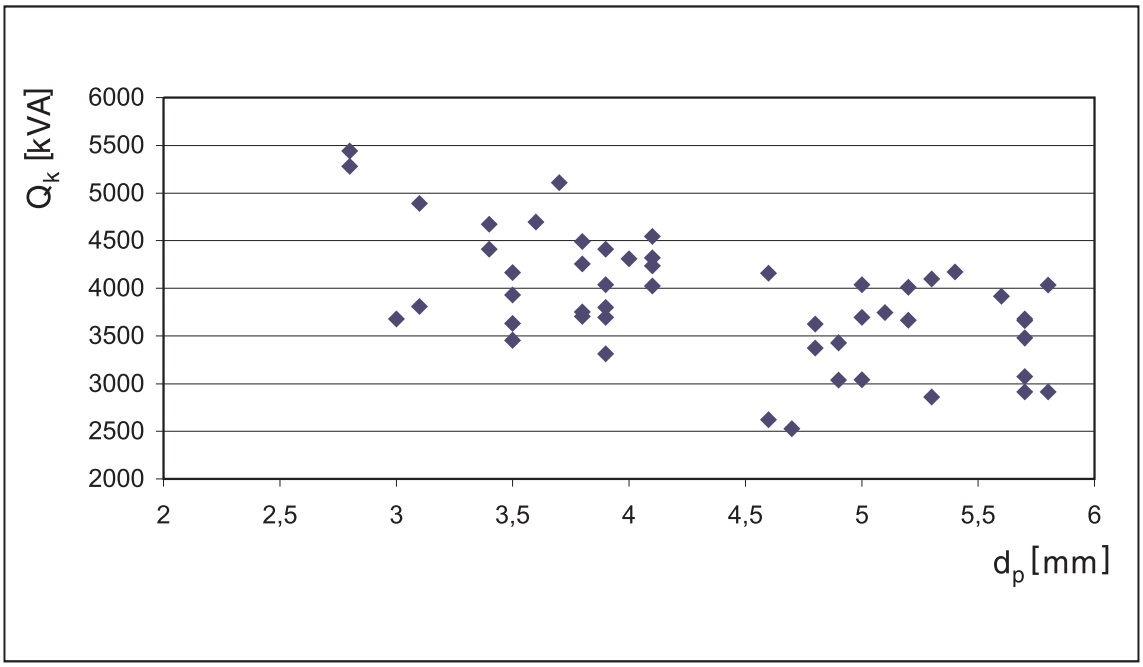

Bild 5.28: Verteilung des Parameters Q_k in Abhängigkeit vom Ausknöpfbruchdurchmesser.

Bei allen im Rahmen dieser Dissertation durchgeführten Versuchsreihen wurden die Schweißparameter derart eingestellt, dass die durchschnittlichen Widerstandshöchstwerte in den einzelnen Halbwellen in der Regel in den beiden letzten Halbwellen erreicht wurden. Infolge der vor Versuchsbeginn eingestellten konstanten Elektrodenkraft und einer Schweißzeit von 16 Halbwellen war eine Schweiß-stromeinstellung ohne Spritzerbildung bei einem gleichzeitigen Widerstandshöchstwert in der Umgebung der 11. Halbwelle nicht möglich. Hieraus folgt, dass eine auf dem Höchststromwert basierende Analyse nicht über eine ausreichende Korrelation verfügt. Dies wird auch durch die Parameter t_m (siehe Bild 5.30) und A_{Rmax} (siehe Bild 5.31) bestätigt, die ungeachtet der Schweißpunktqualität zu gleichmäßig verteilt sind.

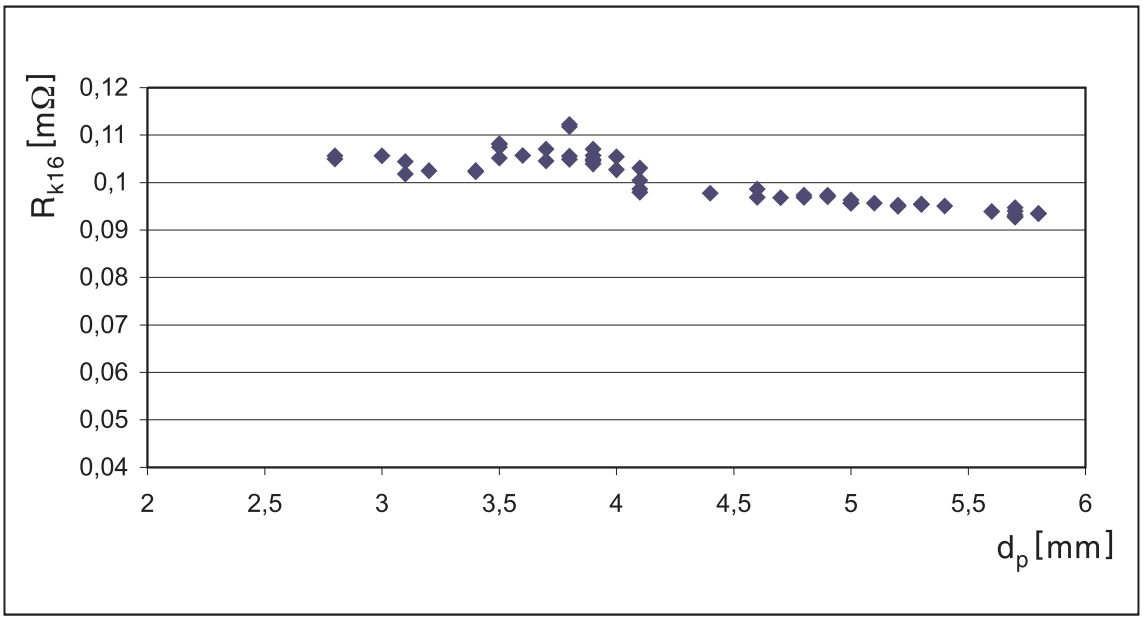

Bild 5.29: Verteilung des Parameters R_{k16} in Abhängigkeit vom Ausknöpfbruchdurchmesser.

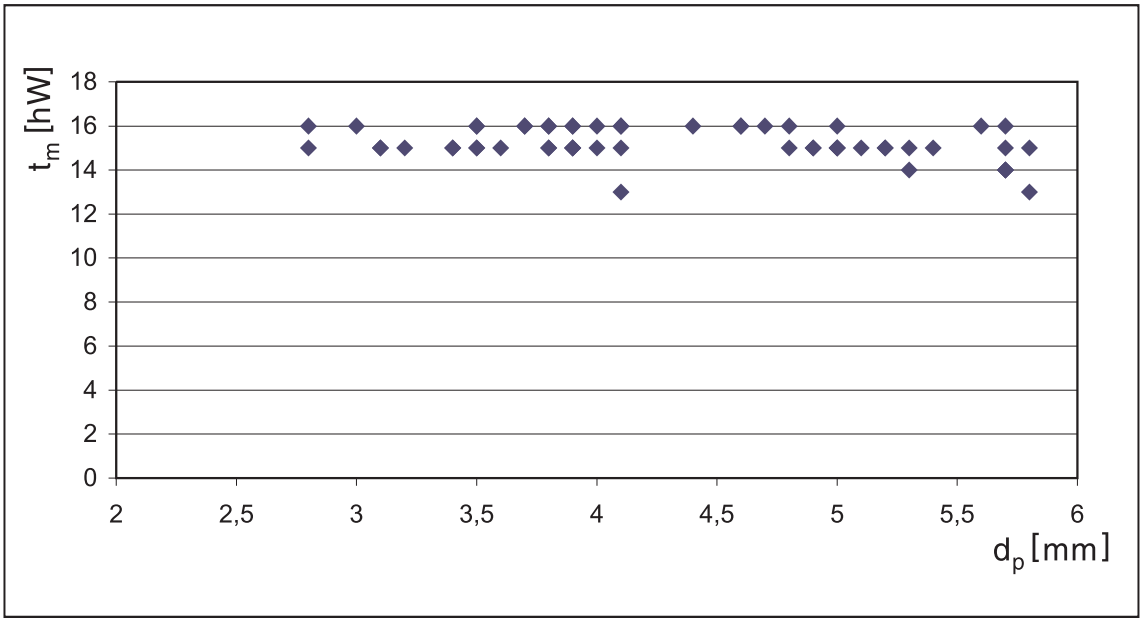

Bild 5.30: Verteilung des Parameters t_m in Abhängigkeit vom Ausknöpfbruchdurchmesser.

Alle Schweißpunkte mit einem großen A_{Rmax}-Wert, die infolge dessen früh genug verbunden wurden (13. und 14. Halbwelle) und einen frühen dynamischen Widerstandshöchstwert aufweisen, zeichnen sich durch eine ausreichend gute Qualität aus.

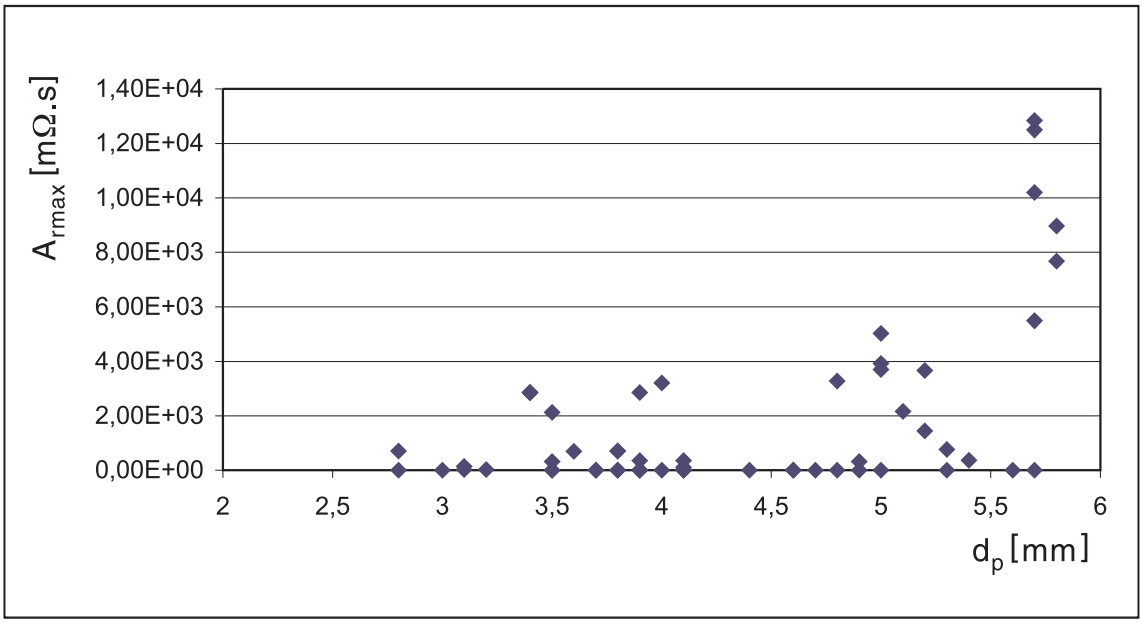

Bild 5.31: Verteilung des Parameters A_{Rmax} in Abhängigkeit vom Ausknöpfbruchdurchmesser.

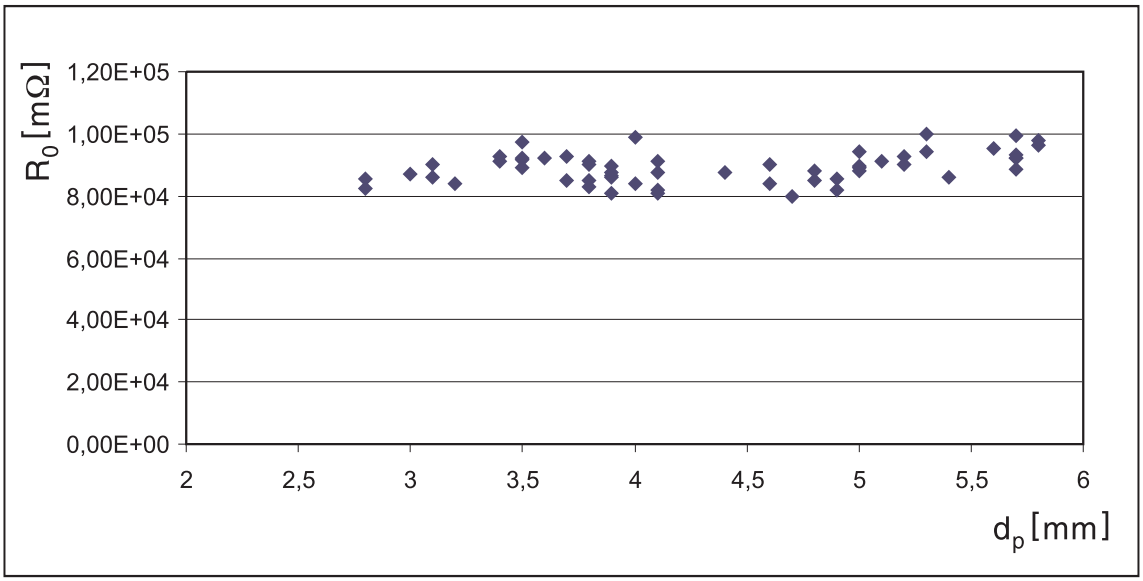

Bild 5.32: Verteilung des Parameters R_0 in Abhängigkeit vom Ausknöpfbruchdurchmesser.

Aus der Analyse des Parameters R_0 (siehe Bild 5.32) geht hervor, dass der Widerstand der ersten Halbwelle in keiner Korrelation mit der Schweißpunktqualität steht. Gleiches würde auch für den Kontaktwiderstand zutreffen, wenn er auf eine andere Art gemessen worden wäre. Eine Analyse mittels ähnlicher Parameter wäre für Schweißungen nur dann sinnvoll, wenn die Elektrodenkraft relativ niedrig ist und in einigen Fällen das Blech vor Schweißbeginn erst erwärmt und verformt werden muss.

Im Vergleich zum Parameter R_0 verfügt der Parameter β_{R46} (siehe Bild 5.33) über eine bessere Korrelation mit dem Schweißpunktdurchmesser.

Beginnt die Abtastung eines 16 Halbwellen dauernden Schweißprozesses bei der 6. Halbwelle, bleiben zehn Halbwellen (0,1 sec.) für eine Analyse und zur Durchführung einer Feedback-Steuerung. Heute ist es möglich, die kurz vor Beendigung des Schweißprozesses erfassten Parameter zu verwenden, die im größeren Maße mit dem Qualitätsparameter korrelieren. Die Wahrscheinlichkeit des Parameters β_{R46} ist weit gestreut und variiert zwischen 58,0 % und 84,0 %.

Unterzieht man zum Abschluss die mechanischen Parameter einer Analyse, kann festgestellt werden, dass die beim Schweißen von verzinkten Stahlblechen vom Beschleunigungssensor gemessenen Werte im großen Maß ungeeignet sind, denen nicht einmal ein Trend entnommen werden kann (siehe Bild 5.34). Bei unbeschichteten Blechen und einer großen Schweißstromdynamik konnten eine vergrößerte Elektrodenvibration und infolge dessen höhere Werte der Integralrampe festgestellt werden. Aus diesem Grund wird die Möglichkeit eingeräumt, dass bei steiferen Schweißmaschinen und höheren Schweißleistungen die Beschleunigung im größeren Maß von der Schweißlinsenbildung abhängt.

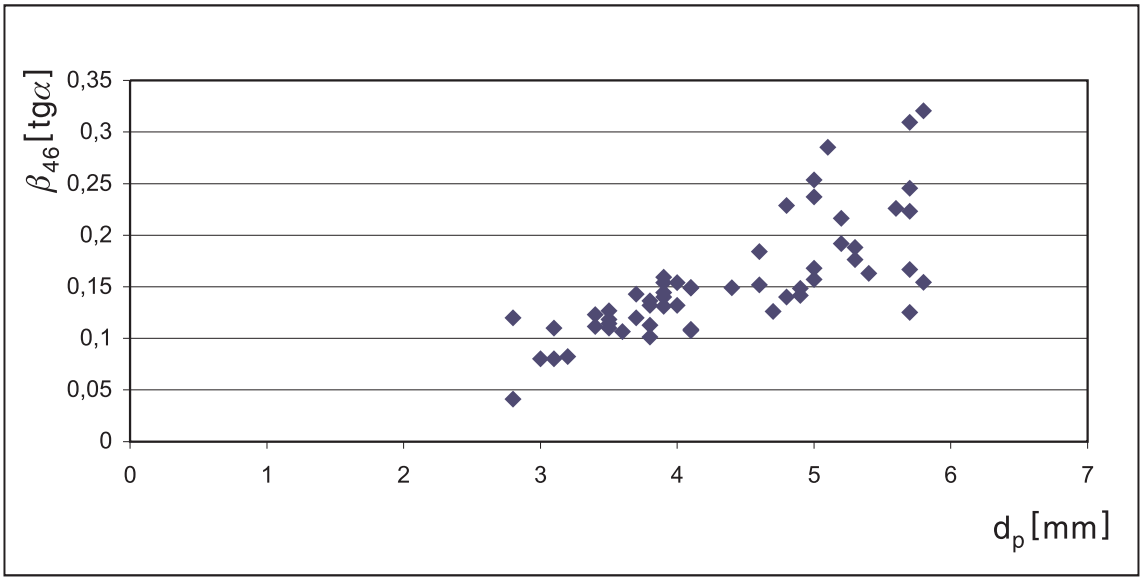

Bild 5.33: Verteilung des Parameters β_{R46} in Abhängigkeit vom Ausknöpfbruchdurchmesser.

Die Parameter X_1 und X_2 stellen den Hub zwischen den Elektroden dar. Der Kennlinienverlauf des Elektrodenhubs wird von zahlreichen Einflussgrößen beeinflusst, die vom Sensortyp, der Befestigungsart des Sensors, der Art der Schweißarbeit und auch von der Schweißvorrichtung abhängig sind. Aus diesem Grund wurde der Elektrodenabdruck im Blech einer Analyse unterzogen: Ein tieferer Elektrodenabdruck zeugt von einer erhöhten Energiezufuhr und infolge dessen von einer besseren Schweißpunktqualität. In Bild 5.35 ist der Parameter X_2 abgebildet, dem die

Elektrodenabdrucktiefe entnommen werden kann und dessen Werte mit größer werdender Schweißpunktqualität (2,8 mm auf 5,8 mm) ansteigen.

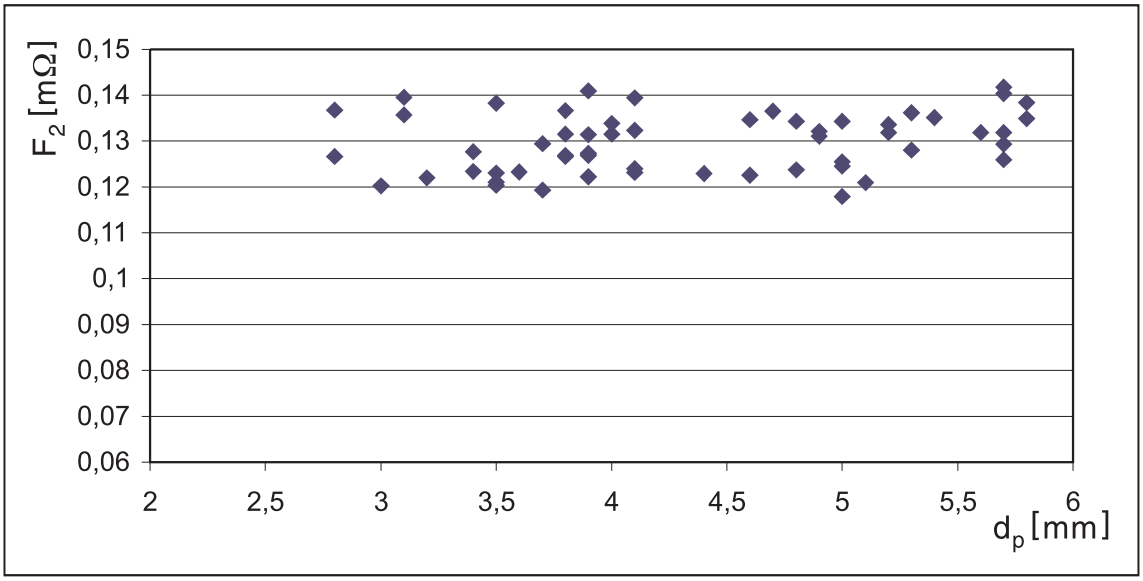

Bild 5.34: Verteilung des Parameters F_2 in Abhängigkeit vom Ausknöpfbruchdurchmesser.

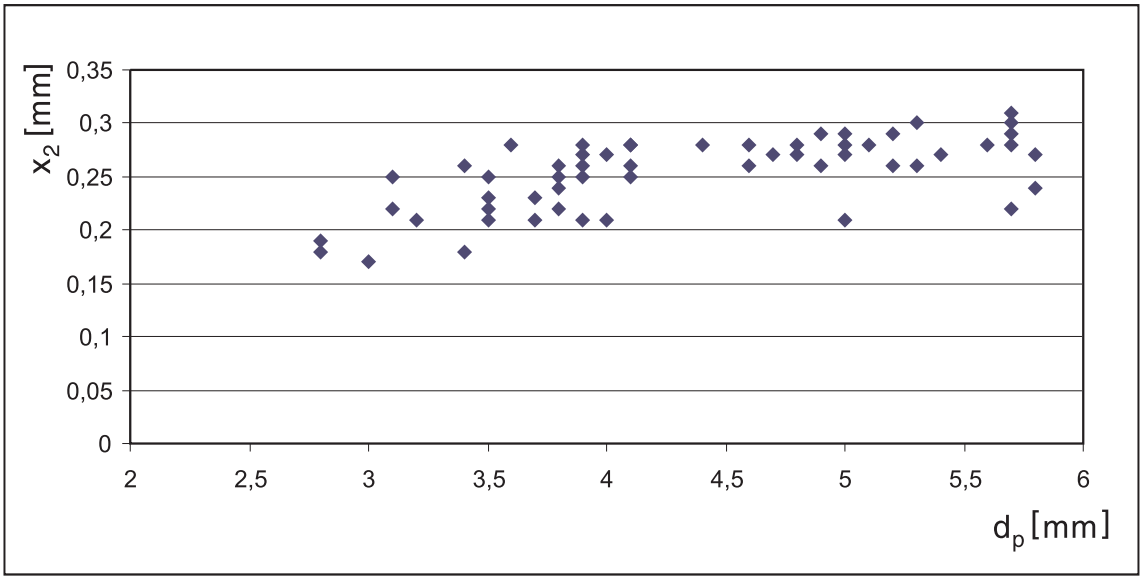

Bild 5.35: Verteilung des Parameters X_2 in Abhängigkeit vom Ausknöpfbruchdurchmesser.

5.3 Auswahl optimaler Eingangsparameter im Merkmalsraum

Bei der Analyse im Merkmalsraum wurde von dem in Kapitel 5.6 beschriebenen Raum Gebrauch gemacht, der über 20 Eingänge (die im Kapitel zuvor beschriebenen Parameter), drei Ausgänge (guter oder zu geringer Schweißpunktdurchmesser oder über Spritzergrenze) und an jedem Eingang über 71 Zustände (d_p = 0,0 bis 7,1 mm) verfügt.

Im Programm QP 2.0 wurden die Verknüpfungen zwischen den Eingängen, Zuständen und Ausgängen mittels scharfer logischer Methoden definiert.

Bei der ersten Methode handelt es sich um die nichtkorrelierende Verknüpfung von Eingangseigenschaften in Abhängigkeit von den Ausgängen, während bei der zweiten Methode die statistisch optimierten Grenzen der beschriebenen Merkmale definiert werden (siehe Kapitel 5.2).

Aus dem Kennlinienverlauf eines bestimmten Parameters (z. B. R_{k16} (d_p)) werden die Werte auf der Merkmalsachse 1 ermittelt (siehe Bild 5.36). Bei den Werten innerhalb der Parametergrenze P1 handelt es sich um Schweißpunkte mit ausreichender Qualität, während die Werte innerhalb der Parametergrenze P2 Schweißpunkte mit unzureichender Qualität darstellen. Werden die gewonnenen Eigenschaften mit den Eigenschaften eines anderen Parameters in einem zweidimensionalen Raum verknüpft, verringert sich die Schnittmenge der beiden Eigenschaften. In Bild 5.37 ist die Verknüpfung zweier Eigenschaften in rechteckiger Form abgebildet.

Eine andere Möglichkeit zur Verknüpfung von Eigenschaften stellt die Verknüpfung zu mehrdimensionalen Ellipsoiden (siehe Bild 3.38) dar.

Die zuvor beschriebenen Methoden sind in den Bildern 5.36 bis 5.38 dargestellt, aus denen die Effizienz der Verknüpfung der Merkmalachsen im mehrdimensionalen Raum ersichtlich ist. Bei der Darstellung einer Eigenschaft mit zwei Mengen auf einer Achse beträgt die Schnittmenge der ausreichenden und unzureichenden Schweißpunkte 10,0 %, während diese bei einer rechteckigen Verknüpfung auf zwei Achsen auf 1,0 % sinkt. Bei ellipsoiden Mengengrenzen ist die Schnittmenge der Parametergrenzen eine leere Menge. Verknüpfungen sind theoretisch in unendlichen Dimensionen möglich und sind ausschließlich durch die Leistung der Hardware beschränkt. Im entwickelten Programm wurde die maximale Anzahl der Dimensionen auf zehn beschränkt, was sich als ausreichend erwiesen hat.

Zur Bestimmung der Grenzen können Werte aus den Berechnungen der Gaußschen Verteilung (für jede beliebige vorgegebene Wahrscheinlichkeit) herangezogen werden, womit man sich bis zu einem gewissen Grad auf das Gebiet unscharfer Grenzen bzw. der Fuzzy-Logik begeben würde. Hierbei wäre es möglich, die Grenzen derart zu optimieren, dass ein möglichst geringer Teil der guten Schweißpunkte außerhalb der Parametergrenzen und ein möglichst geringer Teil der unzureichenden Schweißpunkte innerhalb der für gute Schweißpunkte definierten Parametergrenzen liegen würden.

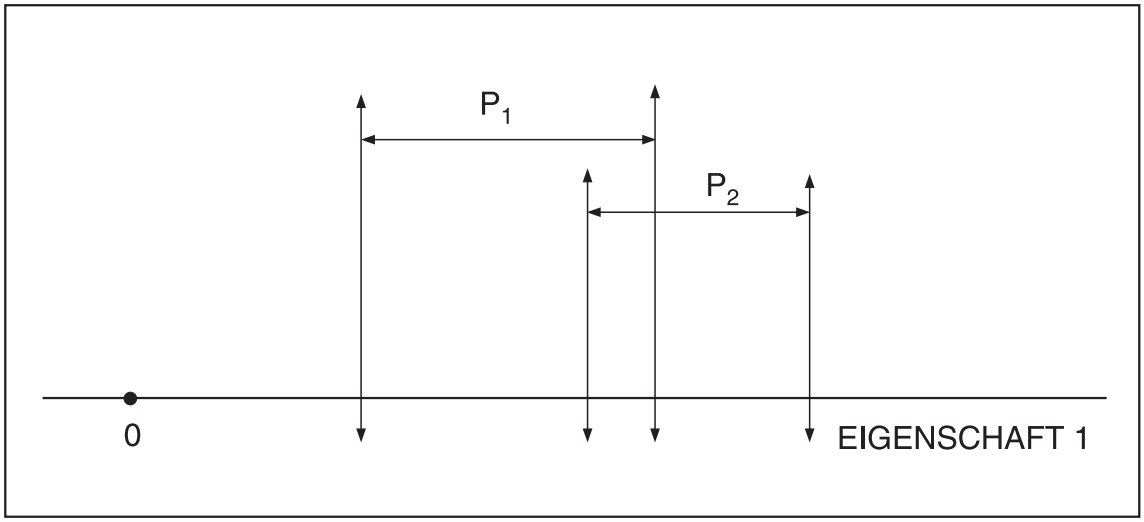

Bild 5.36: Bestimmung der scharfen Parametergrenzen der Eigenschaft 1 in Abhängigkeit vom Ausknöpfbruchdurchmesser.

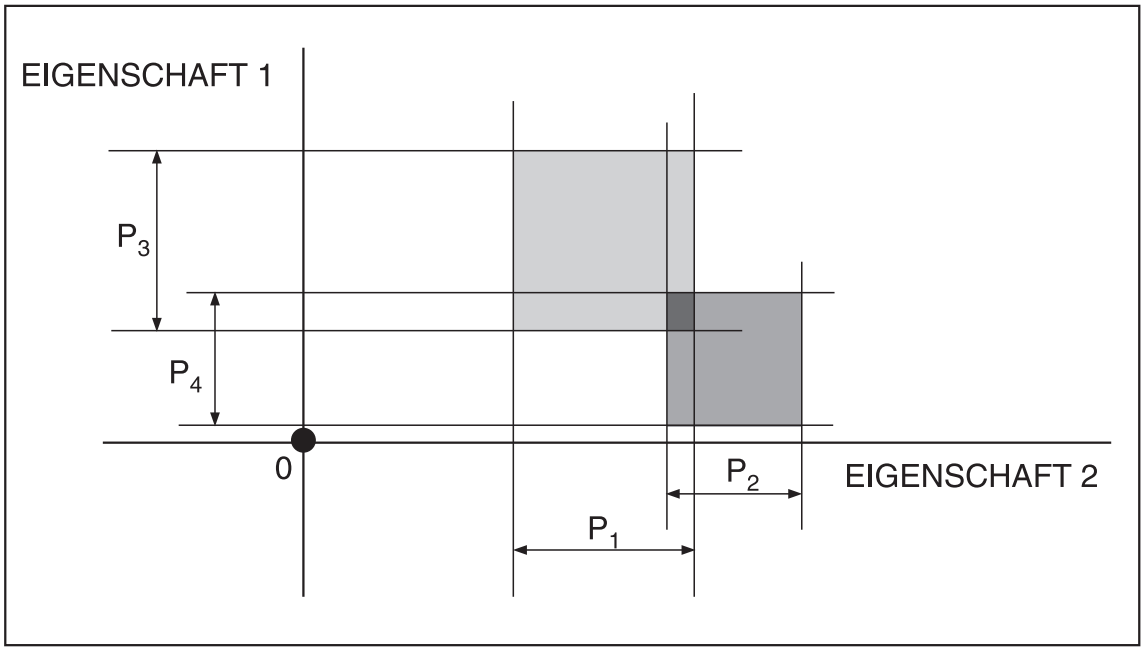

Bild 5.37: Bestimmung der Parametergrenzen durch eine nichtkorrelierende Verknüpfung zu Rechtecken in Abhängigkeit vom Ausknöpfbruchdurchmesser.

Alle durchgeführten Messungen wurden mittels einer rechteckigen nichtkorrelierenden Verknüpfung im Merkmalsraum bei bis zu 20 Dimensionen einer Analyse unterzogen. Zur Festlegung der Grenzen der einzelnen Merkmalsraumachsen (Eigenschaften) wurden die einzelnen Eingänge, wie in Kapitel 5 beschrieben, vor der Verknüpfung im Merkmalsraum optimiert. Diese Methode hat im Vergleich zu den zuvor beschriebenen eine Verringerung der Wahrscheinlichkeit um einige Prozente (in der Regel bis zu 2,0

Prozentpunkten) zur Folge. Dafür sind aber die Ergebnisse leichter überprüfbar und sowohl aus physikalischer als auch praktischer Sicht verständlicher.

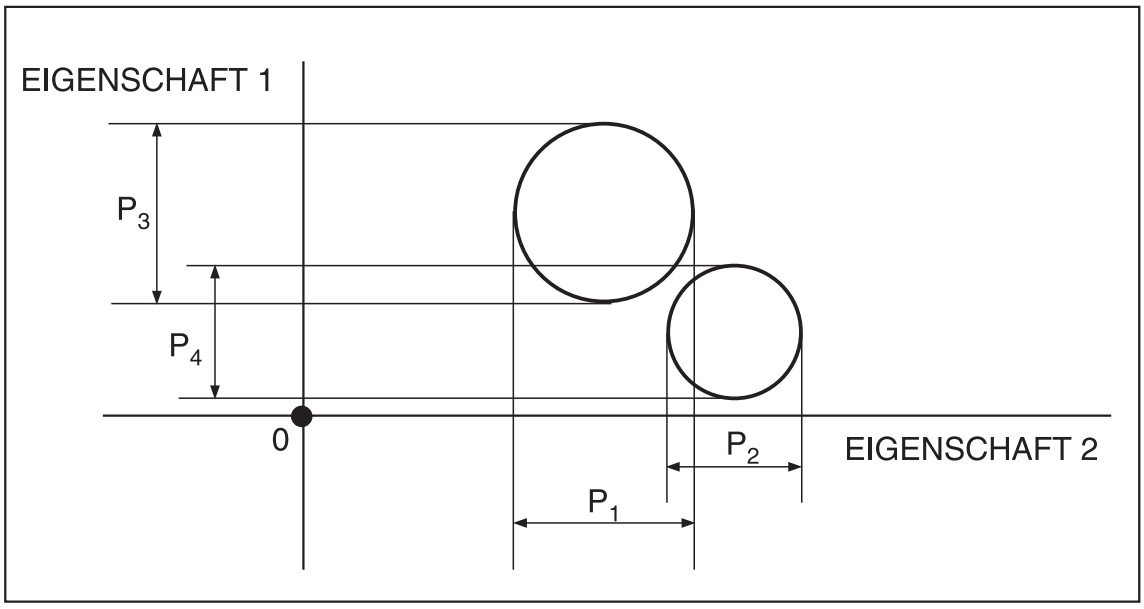

Bild 5.38: Bestimmung der ellipsoiden Parametergrenzen durch eine nichtkorrelierende Verknüpfung von Eigenschaften in Abhängigkeit vom Ausknöpfbruchdurchmesser.

Diese Verknüpfungsmethode ist mit einem starken Anstieg der Wahrscheinlichkeit verbunden, dass sich bestimmte Eigenschaften innerhalb bestimmter Parametergrenzen befinden. Gleichzeitig nimmt mit dieser Methode aber auch die Anzahl der Punkte zu, die bei bestimmten Eigenschaften aus den Parametergrenzen ausscheiden. Da sowohl die Punkte, die sich innerhalb der „falschen" Parametergrenzen befinden, als auch jene, die aus den „richtigen" ausscheiden, statistisch gleich gewichtet sind, ist ab einer bestimmten Anzahl von Merkmalen eine Vergrößerung der Anzahl von Merkmalsraumdimensionen nicht zielführend.

Die optimale Anzahl der Dimensionen bewegte sich in den vorliegenden Analysen zwischen zwei und drei. Nur selten tritt ein vierdimensionaler Raum in Erscheinung, was sich wie folgt erklären lässt: Die Messungen erfolgten über vier verschiedene Sensoren, und alle Eingabeparameter verfügen über eine gewisse physikalische Korrelation. Obwohl die Parameter im Merkmalsraum als nichtkorrelierende behandelt werden, stehen sich ähnelnde Parameter, wie z. B. R_{k11}, R_{k12}, R_{k16}, bei der Eingabe in den Merkmalsraum in großer Abhängigkeit zueinander, sodass es bei deren Verknüpfung auch keinen Grund für einen Anstieg der Korrelation gibt.

Bei Schweißungen mit äußerst hoher Korrelation erscheint eine Verknüpfung ebenfalls nicht sinnvoll. So wurden zu Versuchszwecken zwei Beispiele mit 100-prozentiger Wahrscheinlichkeit ausgewählt (wobei die Punkte mit den größten Abweichungen ausgesondert wurden). Nach der Verknüpfung der beiden Parameter betrug die höchste

erzielte Wahrscheinlichkeit nur noch 97,4 %, obwohl sie theoretisch 100,0 % betragen müsste. In der Praxis indes schwankt die Wahrscheinlichkeit in Abhängigkeit von der Verknüpfung der Eingabeparameter zwischen 92,9 % und 96,8 %. Trotz einer leichten Abnahme der Korrelation hat sich die Verknüpfung von Kenngrößen als vorteilhaft erwiesen, die aus verschiedenen Messungen (Sensoren) hervorgehen und deren Eingabeparameter in geringer Korrelation zueinander stehen. Dies hat zwar einen größeren Ausfall von Punkten aus den definierten Parametergrenzen zur Folge, dafür ist aber die Korrelation der innerhalb der Parametergrenzen verbleibenden Punkte äußerst hoch.

In Bezug auf die Ergebnisanalyse der mehrparametrischen Analyse von mit einem nichtkonstanten Strom geschweißten Prüfstücken (siehe Bild 5.39) ist vorab Folgendes zu sagen: Die Versuchsreihen 1, 3 und 5 wurden mit der Schweißmaschine OFS und die übrigen Versuchsreihen mit der Schweißmaschine CRS durchgeführt. Die Versuchsreihen 1 und 2 wurden am Werkstoff UBS, die Versuchsreihen 3 und 4 am Werkstoff EVS und die übrigen Versuchsreihen am Werkstoff FVS durchgeführt. Die Reihe 1 stellt die Ergebnisse der mehrparametrischen Analyse und die Reihe 2 das Ergebnis des besten Einzelparameters dar. Bei den Versuchsreihen 1, 2 und 3 wurden die besten Ergebnisse bei einem zweidimensionalen Merkmalsraum erzielt, während bei der Versuchsreihe 4, bei der die Wahrscheinlichkeit der Kenngröße S_{Pmax} 98,8 % betrug, eine Verknüpfung nicht sinnvoll erschien. Bei den Versuchsreihen 5 und 6 wurde indes vom Programm ein dreidimensionaler Raum ($S_{Srms} + I_{1max} + \beta_{R57}$ und $I_{16} + I_{1max} + S_{Srms}$) ausgewählt.

An dieser Stelle soll darauf hingewiesen werden, dass die beschriebenen Versuchsreihen zur Bestimmung der optimalen Anzahl der Dimensionen nicht optimal sind. Die aus den Strommessungen gewonnenen Analyseparameterwerte korrelieren unmittelbar mit der Schweißpunktqualität und sind sich auch untereinander äußerst ähnlich und stehen in einem engen Korrelationsverhältnis zueinander. Eine Ausnahme stellt die Versuchsreihe 3 dar, bei der neben den angeführten Parametern in der zweiten Dimension auch die Kenngröße X_1 berücksichtigt wurde. Durch die Verknüpfung ist die durchschnittliche Wahrscheinlichkeit um 1,2 Prozentpunkte von 94,5 % auf 95,7 % angestiegen.

In Bild 5.40 sind die Schweißungen unter nichtkonstanten Elektrodenbedingungen als Eingabeparameter dargestellt. Die Versuchsreihen 1, 3 und 5 wurden mit der Schweißmaschine OFS und die übrigen Versuchsreihen mit der Schweißmaschine CRS durchgeführt. Alle Schweißungen wurden am Werkstoff EVS durchgeführt. Bei den Versuchsreihen 3 und 4 wurden Messungen bei verschiedenen Schweißstromwerten (Stepper-Stufen) durchgeführt, wobei bei jeder einzelnen Stufe die Anzahl der analysierten Prüfstücke 200 betrug. Die übrigen Versuchsreihen wurden bei einem konstanten Schweißstrom durchgeführt. Reihe 1 stellt die Analyse im Merkmalsraum und Reihe 2 die Wahrscheinlichkeit des besten Einzelparameters mit der Schweißpunktqualität dar. Berechnet man den Mittelwert aller sieben Versuchsreihen, steigt die Wahrscheinlichkeit um 1,7 Prozentpunkte von 89,8 % auf 91,5 % an, während bei einzelnen Versuchsreihen die Wahrscheinlichkeit bis zu 4,0 Prozentpunkte angestiegen ist.

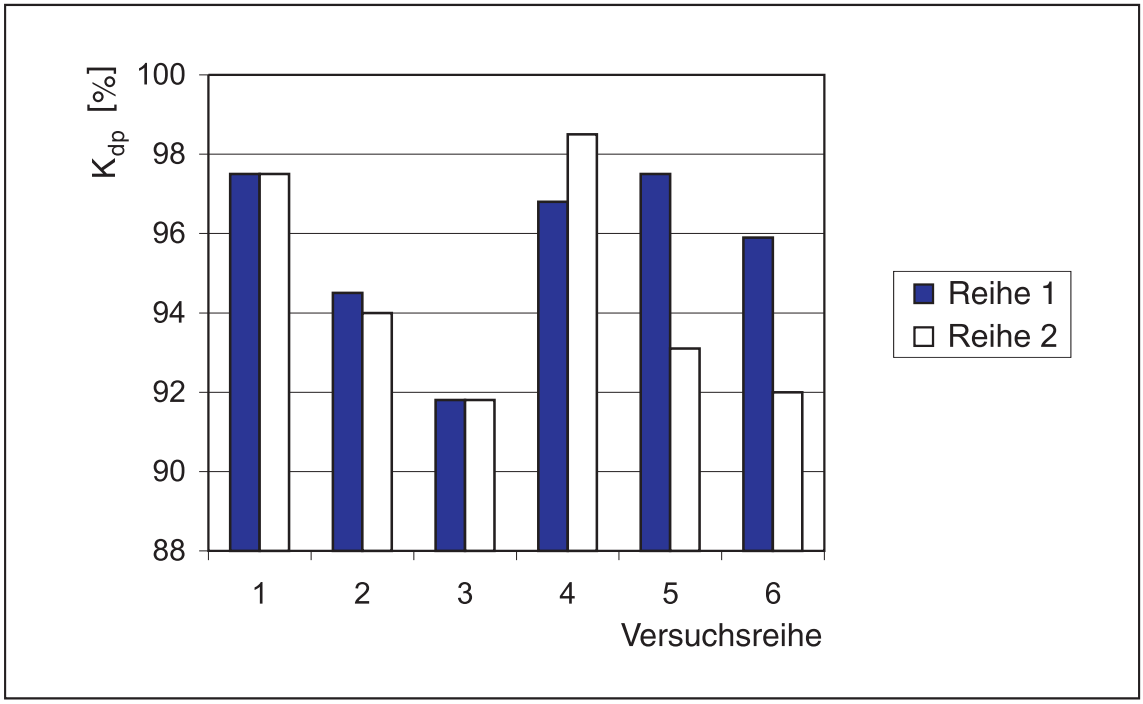

Bild 5.39: Wahrscheinlichkeit K_{dp}. Reihe 1 stellt die Wahrscheinlichkeit im besten mehrdimensionalen Merkmalsraum und Reihe 2 die Wahrscheinlichkeit des besten Einzelparameters dar. Eingabeparameter ist ein nichtkonstanter Schweißstrom.

Die Zahl der optimal ausgewählten Dimensionen ist auch bei den in Bild 5.40 dargestellten Versuchsreihen niedrig. So verfügen die Versuchsreihen 1 und 5 über drei Dimensionen. Bei der Versuchsreihe 7 stellt der Parameter R_{k11} den besten Einzelparameter dar, während bei den übrigen Versuchsreihen die beste Wahrscheinlichkeit stets durch die Verknüpfung zweier Parameter erzielt wurde.

Für die erste Versuchsreihe wurden nachfolgende Wahrscheinlichkeitswerte berechnet:

- eine Dimension: Rmax = 93,0 %,
- zwei Dimensionen: $S_{Pmax} + R_{max}$ = 96,8 %,
- drei Dimensionen: $R_{k16} + R_{max} + S_{Pmax}$ = 96,8 %,
- vier Dimensionen: $R_{k16} + S_{Srms} + R_{k12} + R_{max}$ = 94,2 % und
- fünf Dimensionen: $R_{k12} + S_{Srms} + X_1 + R_{k12} + S_{Pmax}$ = 92,9 %.

Mit einer weiter zunehmenden Anzahl von Dimensionen nimmt die Wahrscheinlichkeit weiterhin leicht ab, sodass das Programm QP 2.0 einen Raum mit größerer Wahrscheinlichkeit bei einer niedrigeren Anzahl von Dimensionen bevorzugt. Dies erklärt auch, weshalb es oft einen zweidimensionalen Raum bestimmt, obwohl dieser im Vergleich zu einem Raum mit mehreren Dimensionen über die gleiche oder um einige Zehntel Prozentpunkte geringere Wahrscheinlichkeit verfügt.

Nach 13 analysierten Versuchsreihen kann festgestellt werden, dass sich Räume bis zu maximal sechs Dimensionen als zweckmäßig erwiesen haben und dass bei n Sensoren der optimale Raum über max. $n + 1$ Dimensionen verfügt. Bei den durchgeführten

Versuchen korrelierten die Messergebnisse der Elektrodenkraft und der Elektrodenbeschleunigung nur unzureichend. Im Gegensatz dazu erwiesen sich der Spannungs- und Stromsensor und gelegentlich auch der Wegsensor als geeignet, weshalb die Anzahl der Dimensionen zwischen eins und vier variiert.

Der ausgewählte optimale Raum beinhaltet nicht unbedingt den statistisch besten Parameter. Mit der Zunahme der Dimensionen im Merkmalsraum scheiden bestimmte Parameter aus den optimalen Kombinationen aus, worauf sie bei einer höheren Dimension erneut berücksichtigt werden.

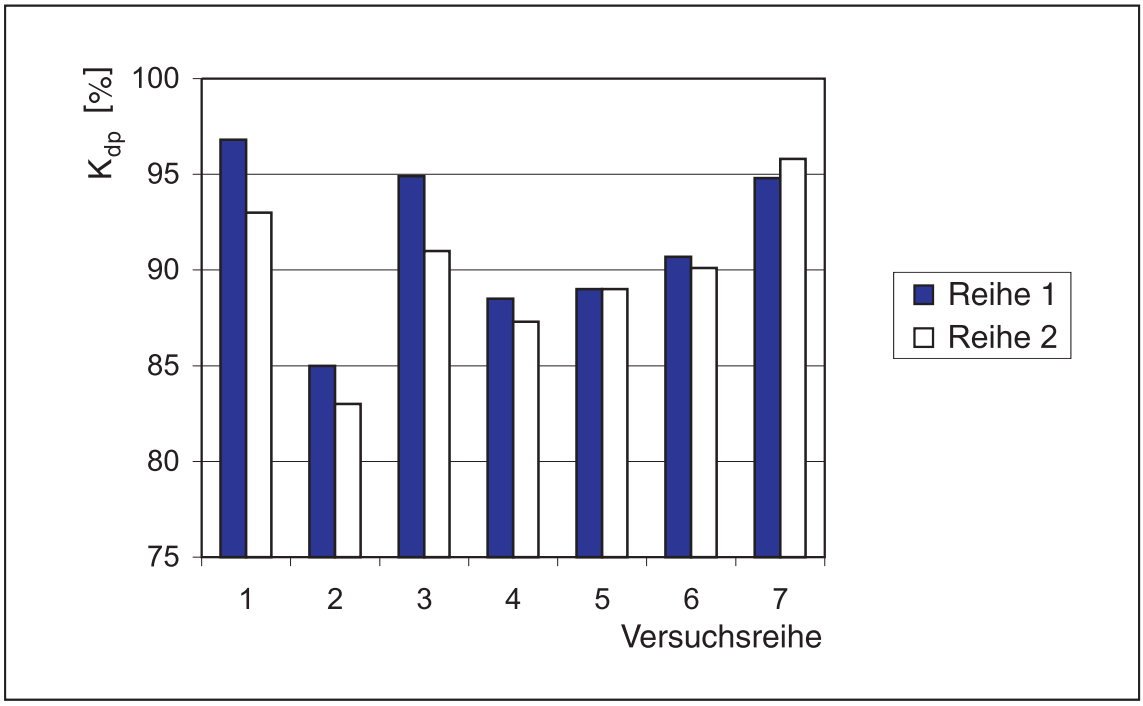

Bild 5.40: Wahrscheinlichkeit K_{dp}. Reihe 1 stellt die Wahrscheinlichkeit im besten mehrdimensionalen Merkmalsraum und Reihe 2 die Wahrscheinlichkeit des besten Einzelparameters dar. Eingabeparameter ist ein nichtkonstanter Elektrodenzustand.

In einigen seltenen Fällen von Parameterkombinationen tritt ein aus dem Wegsensor gewonnener Parameter auf (X_1 und/oder X_2), der in einem geringeren Korrelationsverhältnis zu den anderen direkt von den Strommessungen abhängigen Parametern steht. Dieser Parameter zählt zu jenen Parametern, die in der Regel auch bei einer höheren Anzahl der Dimensionen berücksichtigt werden.

5.4 Aussichten der Übertragung der Methode in die Praxis

Für die Definition des Merkmalsraums sind 100 bis 200 Schweißpunkte mit gemessenem Qualitätsparameter und durchgeführter Parameteranalyse und -messung erforderlich. Als Qualitätsparameter kann der durch einen Abrollversuch bestimmte

Schweißpunktdurchmesser verwendet werden. Etwa die Hälfte der Schweißpunkte sollte von unzureichender Qualität sein, wobei die Höhe der gestellten Anforderungen an die im Grenzbereich liegende Qualität des Schweißpunktes nicht von Bedeutung ist. Bei einer hohen Anzahl von gemessenen Punkten, die in der Nähe des Grenzbereichs liegen, ist die Korrelation stets niedriger. Bei einer Analyse von 50 guten und 50 unzureichenden Schweißpunkten erhält man indes zufrieden stellende Grenzen, die durch eine größere Anzahl von Schweißpunkten (weiteres Lernen) nur noch geringfügig optimiert werden.

Wird eine größere Verlässlichkeit des Schweißprozesses verlangt, ist eine stufenweise Schweißstromerhöhung und die Ausarbeitung eines Modells für jede einzelne Stromerhöhung erforderlich. Die Versuchsdurchführung nimmt mehrere Stunden in Anspruch, wobei für die zusätzliche Bestimmung der Qualitätsparameter weitere zwei Stunden zu veranschlagen sind. Die Definition des mathematischen Modells, dessen Berechnung nur einige Minuten dauert, ist im großen Maß von der Abstimmung der Messvorrichtungen und des Datenverarbeitungsprogramms abhängig. Mittels einer entsprechenden Ausstattung ist es möglich, die Kriterien für eine Online-Analyse der Schweißpunktqualität binnen eines Tages auszuarbeiten. Eine Online-Analyse ist nur bei einer im Voraus bestimmten Schweißarbeit möglich, und bei einer grundlegenden Änderung der Schweißparameter ist der Merkmalsraum erneut zu definieren. Die Ausarbeitung des Merkmalsraums ist in Bezug auf den Arbeitsaufwand und den Lernvorgang mit der Analyse mittels Künstlicher Neuronaler Netze oder der Klassifizierung mittels Fuzzy-Logik vergleichbar. Auf Grund des damit verbundenen relativ hohen Arbeitsaufwandes eignen sie sich in erster Linie für die Großserienproduktion, in der die Anforderungen an die Schweißpunktqualität hoch sind und sich der Aufwand auf Grund des erzielten Mehrwerts rentiert.

Die Parameterklassifizierung im zuvor berechneten Merkmalsraum ist in einigen Millisekunden möglich. Die vor Beendigung des Schweißprozesses gemessenen Parameter können innerhalb einiger Halbwellen berechnet und in der Endphase des Schweißprozesses zur Veränderung der Schweißparameter herangezogen werden. Die übrigen, über den gesamten Schweißprozess gemessenen Parameter können indes nur Auskunft darüber geben, dass der Schweißpunkt mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit von bestimmter Qualität ist.

Das Programm QP 2.0 verfügt über die Option zur Überwachung der Qualitätstendenz über die letzten gemessenen Punktschweißungen, auf deren Grundlage die statistische Wahrscheinlichkeit der Schweißpunktqualität berechnet wird. Bei sich wiederholender unzureichender Schweißpunktqualität wird bei ausgewählter Option ein Alarm ausgelöst, wobei die Anzahl der voraussichtlich aufeinander folgenden unzureichenden Schweißpunkte manuell eingegeben wird. Die Option zur Überwachung der Qualitätstendenz der zuletzt gemessenen Punktschweißungen erhöht die Möglichkeiten für einen praktischen Einsatz des Programms.

6. Zusammenfassung

Trotz der umfangreichen Forschungen auf dem Gebiet der Analyse des Widerstandspunktschweißprozesses ist es nicht möglich, eine allgemein gültige Lösung für die Prognose der Schweißpunktqualität auszuarbeiten.

Im ersten Kapitel wurde der Hintergrund dieses Problems erarbeitet, dem seitens einiger Autoren über 70 Einflussgrößen zugeordnet werden, und es wurden die bedeutendsten Schweißparameter beschrieben, für die gesagt werden kann, dass sie nicht unlösbar komplex sind. Auf Grund der großen Wechselwirkungen und Korrelationen zwischen den einzelnen Schweißparametern erscheint deren Darstellung in einer klaren mathematischen Form z. Zt. nicht möglich.

Bei den in der Dissertation durchgeführten Versuchen kamen zwei verschiedene Methoden zur Anwendung. Bei der ersten handelt es sich um die Analyse der Schweißpunktqualität in Abhängigkeit von einem nichtkonstanten Schweißstrom, während bei der zweiten die Veränderung der Schweißpunktqualität in Abhängigkeit von der Elektrodenabnutzung analysiert wurde. Bei den ersten drei Versuchsreihen stand der theoretische Teil im Vordergrund, da die bei diesen Versuchsreihen verwendeten Parameterschwankungen in der Praxis nur bei einem Fehlbetrieb der Steuerung oder bei starken Schwankungen der Anschlussspannung auftreten. Bei den darauf folgenden drei Versuchsreihen wurde indes ein praxisnahes Problem untersucht. Um möglichst praxisnahe Schweißbedingungen zu gewährleisten, wurden die Versuche an drei der meistverwendeten Stahlblechsorten und mit drei häufig verwendeten Schweißmaschinen durchgeführt.

Während des Schweißprozesses eines jeden einzelnen Schweißpunktes wurden die Schweißspannung, der Schweißstrom, die Elektrodenkraft, die Elektroden-beschleunigung und der Elektrodenhub gemessen. Die Messungen erfolgten bei einer Auflösung von 12 Bit und bei einer Abtastrate von 10.000 Hz. Für alle in der Analyse durchgeführten Messungen wurde die Schweißpunktqualität durch Messungen des Ausknöpfbruchdurchmessers nach der ISO-Norm 10447 bestimmt.

Für die parametrische Korrelationsanalyse mit der Schweißpunktqualität wurden 20 Analyseparameter verwendet.

Da die mathematischen Modelle der einzelnen Parameter unbekannt sind, ist eine Verknüpfung der Eigenschaften im Merkmalsraum nur auf Grundlage einer statistischen Analyse möglich. Hierfür wurde das Prinzip der nichtkorrelierenden Verknüpfung der Eingangsparameter im Zustandsraum mit 71 Zuständen gewählt. Auf Grundlage der festgestellten Wahrscheinlichkeitsverteilung wurden die Klassengrenzen einzelner Parametergruppen zu mehrdimensionalen rechteckigen Räumen verknüpft. Die gegenseitige Verknüpfung der gewonnenen Parameterwerte im mehrdimensionalen Merkmalsraum hat eine geringe Überschneidung der Parametergrenzen zwischen guten und schlechten Schweißpunkten zur Folge. Indes führt die Verknüpfung in einem Merkmalsraum mit einer zu hohen Anzahl von Dimensionen dazu, dass immer mehr gute Punkte auf einer der Achsen aus den Parametergrenzen ausscheiden, innerhalb derer die Schweißpunkte sonst liegen würden. Aus diesem Grund ist es erforderlich, für jede einzelne Versuchsreihe sowohl die optimalen Grenzen als auch die optimale Anzahl der Dimensionen des Raums zu definieren. Die Bestimmung der Grenzen erfolgt durch deren Optimierung, sodass möglichst wenig Punkte mit ausreichender Qualität außerhalb der Parametergrenzen und gleichzeitig möglichst wenig Punkte mit unzureichender Qualität innerhalb der für gute Schweißpunkte definierten Parametergrenzen liegen.

Das Programm QP 2.0 wurde entwickelt, das als Eingabeparameter die durch die Messvorrichtung RWS 2008 erfassten Kenndaten verwendet. Darüber hinaus ist es in der Lage, bereits gespeicherte Kenndaten von vorangegangenen Messungen von der Festplatte zu lesen. Der Qualitätsparameter wird für jeden Schweißpunkt manuell eingegeben, worauf durch das Programm auf Grundlage der gelesenen physikalischen Kenngrößen 20 Parameter berechnet werden. Im nachfolgenden Schritt werden die Ergebnisse statistisch bearbeitet, und das Programm definiert in Abhängigkeit von der Korrelation mit dem Qualitätsparameter die optimalen Parametergrenzen einer Versuchsreihe, bildet die Ergebnisse graphisch ab und speichert diese auf Befehl auf Festplatte. Hierauf stellt das Programm für die Analyse im Merkmalsraum zwei bis 20 Parameter zur Auswahl und berechnet nach getroffener Auswahl deren Kombination, die in größter Korrelation mit der gemessenen Schweißpunktqualität steht. Der zweite Teil des Programms dient der Überprüfung der ermittelten Modelle im Merkmalsraum. Das Programm verfügt über die Optionen zur Überwachung der statistischen Wahrscheinlichkeit der Qualität des neu gemessenen Schweißpunktes, der Tendenz der Schweißpunktqualität über die zuletzt durchgeführten Punktschweißungen sowie zur Auslösung eines Alarms bei sich wiederholender unzureichender Schweißpunktqualität. Die Option zur Überwachung der Qualitätstendenz der zuletzt gemessenen Punktschweißungen erhöht die Möglichkeiten für einen praktischen Einsatz des Programms.

Aus den Ergebnissen der parametrischen Analyse geht hervor, dass bei einem nichtkonstanten Schweißstrom mit der Schweißpunktqualität im größten Maß die Parameter korrelieren, die in der letzten Phase des Schweißprozesses erfasst werden. Bei Schweißungen, bei denen die Elektrodenabnutzung als Eingabevariable gewählt wurde, korrelieren vor allem die aus dem Kennlinienverlauf des dynamischen Widerstandes gewonnenen Parameter mit der Schweißpunktqualität. Die besten Korrelationen wurden bei Messungen im zweiten Drittel des Schweißprozesses erzielt. Ähnlich gute

Ergebnisse werden auch von Parametern der dem Schweißpunkt zugeführten Energie erreicht, wohingegen die auf Grundlage von Messungen der Elektrodenbeschleunigung ermittelten Parameter und die zu Beginn des Schweißprozesses gemessenen Kennwerte über konstant unzureichende Korrelationen verfügen.

Bei der Verknüpfung verschiedener Parameter im Merkmalsraum ist im Vergleich zur Auswahl eines einzelnen optimalen Parameters die Wahrscheinlichkeit größer, dass die Schweißpunktqualität richtig prognostiziert wird. Bei Versuchsreihen mit einer niedrigen Wahrscheinlichkeit (60,0–70,0 %) erhöht sich diese um durchschnittlich 5,0 bis 10,0 Prozentpunkte, während bei einer hohen Wahrscheinlichkeit diese nur geringfügig zunimmt. Bei den mit der in der Praxis häufig zur Anwendung kommenden Schweißmaschine OFS am Werkstoff EFS durchgeführten Versuchsreihen beträgt die Wahrscheinlichkeit des besten Einzelparameters 93,0 %, während diese bei einer Analyse von drei Parametern in einem dreidimensionalen Raum 96,8 % beträgt.

Schlussfolgernd kann gesagt werden, dass es nicht möglich ist, einen idealen Parameter oder gar eine ideale Parameterkombination zu bestimmen, mittels derer der Widerstandspunktschweißprozess überwacht werden könnte. Selbst bei einer durch die Elektrodenabnutzung bedingten Stromerhöhung ist es erforderlich, für jede einzelne Stufe ein eigenes Modell zu definieren, wobei der hierfür notwendige Arbeitsaufwand im großen Maß von der Abstimmung der Messvorrichtung und dem Programm zur Datenverarbeitung abhängig ist. Generell gilt, dass bei einer grundlegenden Änderung der Schweißparameter der Merkmalsraum erneut zu definieren ist.

Verzeichnis der Abbildungen und Tabellen

Bild 2.1: *Zulässige Schweißstromabweichungen* ... 14
Bild 2.2: *Abhängigkeit des Schweißpunktdurchmessers von der Schweißzeit beim Schweißen eines niedriglegierten Stahlblechs* ... 15
Bild 2.3: *Abhängigkeit des Schweißpunktdurchmessers von der Elektrodenkraft.* ... 17
Bild 2.4: *An einer Widerstandspunktschweißmaschine angebrachte Sensoren.* ... 20
Bild 2.5: *Funktionsweise der Schweißprozesssteuerung Weltouch CY-220B der Unitek Miyachi Corporation (Japan)* ... 22
Bild 2.6: *Widerstände beim Widerstandspunktschweißen* ... 24
Bild 2.7: *Verteilung der Spitzentemperaturen T_m beim Widerstandspunktschweißen.* ... 25
Bild 2.8: *Kompensation der induktiven Komponente aus Messungen der Sekundärspannung* ... 29
Bild 2.9: *Strom-Spannungs-Kennlinien über fünf Halbwellen* ... 29
Bild 2.10: *Dynamische Strom-Spannungs-Charakteristiken beim Widerstandspunktschweißen von elektrolytisch verzinktem Stahlblech.* ... 30
Bild 2.11: *3D-Strom-Spannungs-Zyklogramm des dynamischen Strom-Spannungs-Verhaltens für feuerverzinktes Blech mit einer Dicke von 0,7 mm.* ... 30
Bild 2.12: *Kennlinie des dynamischen Widerstands bei niedriglegierten Stählen* ... 32
Bild 2.13: *Wärmebilanz an einer Verbindungszone beim Widerstandspunktschweißen.* ... 36
Bild 2.14: *Schematische Darstellung des Energiezufuhrmodells* ... 41
Bild 2.15: *Aufbau eines Künstlichen Neurons.* ... 45
Bild 2.16: *Darstellung eines Künstlichen Neuronalen Netzes mit einer verborgenen Schicht* ... 47
Bild 2.17: *Bestimmung der Verbindungsfunktionen in einem Zustandsraum (Lernen) mittels einer Feed-forward- und Feed-back-Suche* ... 50
Bild 3.1: *Schematische Darstellung einer Einphasen-Wechselstrom-Widerstandsschweißmaschine.* ... 53
Tabelle 3.1: *Technischen Eigenschaften der Schweißmaschinen CRS, VST und OFS.* ... 54
Bild 3.2: *Nichtlineare Abhängigkeit der zugeführten Wärmemenge Q_{zu} vom Zündwinkel α bei gleich bleibendem Widerstand R.*
Bild 3.3: *C-Roboterschweißzange* ... 54
Bild 3.4: *Ortsfeste Punktschweißmaschine* ... 56
Tabelle 3.2: *Chemische Zusammensetzung der Versuchswerkstoffe UBS, FVS und EVS.* ... 57
Tabelle 3.3: *Physikalische Eigenschaften der Werkstoffe UBS, FVS und EVS.* ... 57
Tabelle 3.4: *Oberflächenzustand der Versuchswerkstoffe UBS, FVS und EVS beim Schweißen.* ... 57
Tabelle 3.5: *Versuchsparameter und -bedingungen.* ... 58
Tabelle 3.6: *Technische Daten über die durchgeführten Messungen* ... 59
Bild 3.5: *Schematische Darstellung der Abhängigkeit der Schweißpunktqualität von der Anzahl der mit einem Elektrodenpaar durchgeführten Schweißungen* ... 63
Tabelle 3.6: *Chemische Werkstoffzusammensetzung.* ... 64
Bild 3.7: *Abrollversuchprüfvorrichtung* ... 64
Bild 3.8: *Darstellung der Kraft-Ausdehnungs-Kennlinie* ... 65
Bild 3.9: *Diagramm der Abrollkraft F in Abhängigkeit vom durchschnittlichen Schweißpunktdurchmesser* ... 66
Bild 3.10: *Diagramm der Abrollkraft F in Abhängigkeit vom Schweißpunktdurchmesser d_2.* ... 67
Bild 3.11: *Diagramm der Abrollkraft F in Abhängigkeit vom Schweißpunktdurchmesser d_1.* ... 68
Bild 3.12: *Darstellung zweier bogenförmiger Ausknöpfbrüche. Punkt a hält trotz identischem Schweißpunktdurchmesser* ... 69
Bild 3.13: *Grundschaltbild des Integrators mit Betriebsverstärker.* ... 71
Bild 3.14: *Schaltbild des in der Dissertation verwendeten Integrators.* ... 72
Bild 3.15: *Verlauf des Schweißstroms mit den dazugehörigen Analyseparametern.* ... 73
Bild 3.16: *Verlauf der Schweißspannung mit dem dazugehörigen Analyseparameter* ... 74
Bild 3.17: *Verlauf des dynamischen Widerstands mit den dazugehörigen Analyseparametern.* ... 76
Bild 3.19: *Verlauf der Elektrodenbeschleunigungsrampe mit den dazugehörigen Analyseparametern.* ... 78
Bild 3.20: *Räumliche Darstellung der Grenzen dreier Eingabeparameter.* ... 81
Bild 3.21: *Selbstlernvorgang des Merkmalsraums – Schritt 1.* ... 82
Bild 3.22: *Selbstlernvorgang des Merkmalsraums – Schritt 2.* ... 82
Bild 3.23: *Schematische Darstellung des Arbeitsprinzips nach abgeschlossenem Selbstlernvorgang.* ... 83

Bild 4.1: *Blockdiagramm des Programms QP 2.0.* *88*
Bild 4.2: *Benutzeroberfläche des Hauptmenüs.* *91*
Bild 4.3: *Benutzeroberfläche des Fensters zur Dateiauswahl.* *92*
Bild 5.1: *Wahrscheinlichkeit K_{dp} eines jeden einzelnen Parameters beim Punktschweißen des Werkstoffes UBS mit der Schweißmaschine OFS für einen Schweißpunktdurchmesser von über 4,0 mm.* *105*
Bild 5.2: *Wahrscheinlichkeit K_{dp} eines jeden einzelnen Parameters beim Punktschweißen des Werkstoffes EVS mit der Schweißmaschine OFS für einen Schweißpunktdurchmesser von über 4,0 mm.* *105*
..... *106*
Bild 5.3: *Wahrscheinlichkeit K_{dp} eines jeden einzelnen Parameters beim Punktschweißen des Werkstoffes FVS mit der Schweißmaschine OFS für einen Schweißpunktdurchmesser von über 4,0 mm.* *106*
Bild 5.4: *Wahrscheinlichkeit K_{dp} eines jeden einzelnen Parameters beim Punktschweißen des Werkstoffes UBS mit der Schweißmaschine CRS für einen Schweißpunktdurchmesser von über 4,0 mm.* *107*
Bild 5.5: *Wahrscheinlichkeit K_{dp} eines jeden einzelnen Parameters beim Punktschweißen des Werkstoffes EVS mit der Schweißmaschine CRS für einen Schweißpunktdurchmesser von über 4,0 mm.* *107*
Bild 5.6: *Wahrscheinlichkeit K_{dp} eines jeden einzelnen Parameters beim Punktschweißen des Werkstoffes FVS mit der Schweißmaschine CRS für einen Schweißpunktdurchmesser von über 4,0 mm.* *108*
Bild 5.7: *Bei den Versuchen zur Elektrodenabnutzung erhaltene Werkstücke.* *109*
Bild 5.8: *Wahrscheinlichkeit K_{dp} eines jeden einzelnen Parameters beim Punktschweißen des Werkstoffes EVS mit der Schweißmaschine OFS für einen Schweißpunktdurchmesser von über 3,9 mm.* *110*
Bild 5.9: *Wahrscheinlichkeit K_{dp} eines jeden einzelnen Parameters beim Punktschweißen des Werkstoffes EVS mit der Schweißmaschine CRS für einen Schweißpunktdurchmesser von über 3,9 mm.* *110*
Bild 5.10: *Die beim in Bild 5.9 dargestellten Versuch entstandenen und mittels Kopierpapier entnommenen Abdrücke der Elektrodenkontaktoberflächen.* *111*
Bild 5.11: *Abhängigkeit des Schweißpunktdurchmessers von der Anzahl der durchgeführten Punktschweißungen.* *112*
Bild 5.13: *Die beim in Bild 5.14 dargestellten Versuch entstandenen und mittels Kopierpapier entnommenen Abdrücke der Elektrodenkontaktoberflächen von der ersten bis zur 9.245. Punktschweißung.* *113*
Bild 5.14: *Wahrscheinlichkeit K_{dp} eines jeden einzelnen Parameters beim Punktschweißen des Werkstoffes EVS mit der Schweißmaschine OFS für einen Schweißpunktdurchmesser von über 4,3 mm. Eingabevariablen sind der Elektrodenzustand und der in acht Stufen erhöhte Schweißstrom.* *114*
Bild 5.15: *Wahrscheinlichkeit K_{dp} eines jeden einzelnen Parameters beim Punktschweißen des Werkstoffes EVS mit der Schweißmaschine CRS für einen Schweißpunktdurchmesser von über 4,3 mm. Eingabevariablen sind der Elektrodenzustand und der in acht Stufen erhöhte Schweißstrom.* *114*
Bild 5.16: *Auf Grundlage des Schweißstroms ermittelte durchschnittliche Wahrscheinlichkeit K_{dp} eines jeden einzelnen Parameters beim Punktschweißen dreier verschiedener Stahlbleche mit den Schweißmaschinen OFS und CRS für einen Schweißpunktdurchmesser von über 3,8 mm. Eingabevariable ist der Effektivschweißstrom.* *115*
Bild 5.17: *Abhängigkeit des Schweißpunktdurchmessers vom Parameter I_{16} für die ersten 50 mit der Schweißmaschine OFS am Werkstoff FVS durchgeführten Schweißungen.* *116*
Bild 5.18: *Auf Grundlage des Schweißstroms und der Schweißspannung ermittelte durchschnittliche Wahrscheinlichkeit K_{dp} eines jeden einzelnen Parameters beim Punktschweißen dreier verschiedener Stahlbleche mit den Schweißmaschinen OFS und CRS für einen Schweißpunktdurchmesser von über 3,8 mm. Eingabevariable ist der Effektivschweißstrom.* *117*
Bild 5.19: *Abhängigkeit des Schweißpunktdurchmessers vom Parameter R_0 für mit der Schweißmaschine OFS am Werkstoff FVS durchgeführte Schweißungen.* *117*
Bild 5.20: *Auf Grundlage der von den Weg- und Beschleunigungssensoren ermittelten Parameter durchschnittliche Wahrscheinlichkeit K_{dp} eines jeden einzelnen Parameters beim Punktschweißen dreier verschiedener Stahlbleche mit den Schweißmaschinen OFS und CRS für einen Schweißpunktdurchmesser von über 3,8 mm. Eingabevariable ist der Effektivschweißstrom.* *118*
Bild 5.21: *Durchschnittliche Wahrscheinlichkeit K_{dp} für verschiedene Parameter beim Punktschweißen des Werkstoffes EVS mit den Schweißmaschinen OFS und CRS für einen Schweißpunktdurchmesser von über 3,9 mm. Eingabevariable ist der Elektrodenzustand.* *120*
Bild 5.22: *Auf Grundlage des Schweißstroms und der Schweißspannung ermittelte durchschnittliche Wahrscheinlichkeit K_{dp} für verschiedene Parameter beim Punktschweißen des Werkstoffes EVS mit den Schweißmaschinen OFS und CRS für einen Schweißpunktdurchmesser von über 3,9 mm. Eingabevariable ist der Elektrodenzustand.* *121*

Bild 5.23: *Auf Grundlage der von den Weg- und Beschleunigungssensoren ermittelten Parameter durchschnittliche Wahrscheinlichkeit K_{dp} eines jeden einzelnen Parameters beim Punktschweißen des Werkstoffes EVS mit den Schweißmaschinen OFS und CRS für einen Schweißpunktdurchmesser von über 3,8 mm. Eingabevariable ist der Elektrodenzustand.* *122*
Bild 5.24: *Verteilung des Parameters I_{16} in Abhängigkeit vom Ausknöpfbruchdurchmesser.* *123*
Bild 5.25: *Strom-Spannungs-Charakteristik des Schweißtransformators der Schweißmaschine OFS.* .. *123*
Bild 5.26: *Verteilung des Parameters S_{Pmax} in Abhängigkeit vom Ausknöpfbruchdurchmesser.* *124*
Bild 5.27: *Verteilung des Parameters S_{Srms} in Abhängigkeit vom Ausknöpfbruchdurchmesser.* *124*
Bild 5.28: *Verteilung des Parameters Q_k in Abhängigkeit vom Ausknöpfbruchdurchmesser.* *125*
Bild 5.29: *Verteilung des Parameters R_{k16} in Abhängigkeit vom Ausknöpfbruchdurchmesser.* *126*
Bild 5.30: *Verteilung des Parameters t_m in Abhängigkeit vom Ausknöpfbruchdurchmesser.* *126*
Bild 5.31: *Verteilung des Parameters A_{Rmax} in Abhängigkeit vom Ausknöpfbruchdurchmesser.* *127*
Bild 5.32: *Verteilung des Parameters R_0 in Abhängigkeit vom Ausknöpfbruchdurchmesser.* *127*
Bild 5.33: *Verteilung des Parameters β_{R46} in Abhängigkeit vom Ausknöpfbruchdurchmesser.* *128*
Bild 5.34: *Verteilung des Parameters F_2 in Abhängigkeit vom Ausknöpfbruchdurchmesser.* *129*
Bild 5.35: *Verteilung des Parameters X_2 in Abhängigkeit vom Ausknöpfbruchdurchmesser.* *129*
Bild 5.36: *Bestimmung der scharfen Parametergrenzen der Eigenschaft 1 in Abhängigkeit vom Ausknöpfbruchdurchmesser.* *131*
Bild 5.37: *Bestimmung der Parametergrenzen durch eine nichtkorrelierende Verknüpfung zu Rechtecken in Abhängigkeit vom Ausknöpfbruchdurchmesser.* *131*
Bild 5.38: *Bestimmung der ellipsoiden Parametergrenzen durch eine nichtkorrelierende Verknüpfung von Eigenschaften in Abhängigkeit vom Ausknöpfbruchdurchmesser.* *132*
Bild 5.39: *Wahrscheinlichkeit K_{dp}. Reihe 1 stellt die Wahrscheinlichkeit im besten mehrdimensionalen Merkmalsraum und Reihe 2 die Wahrscheinlichkeit des besten Einzelparameters dar. Eingabeparameter ist ein nichtkonstanter Schweißstrom.* *134*
Bild 5.40: *Wahrscheinlichkeit K_{dp}. Reihe 1 stellt die Wahrscheinlichkeit im besten mehrdimensionalen Merkmalsraum und Reihe 2 die Wahrscheinlichkeit des besten Einzelparameters dar. Eingabeparameter ist ein nichtkonstanter Elektrodenzustand.* *135*

Schrifttum

[1-1] Kralj, V., Kordić, Z., Köveš, A.:
Točkovno uporovno varjenje,
Ljubljana, Institut za varilstvo, 1991, S. 47–55.

[1-2] Kordić, Z.:
Elektrootporovno zavarivanje,
Zagreb, Društvo za tehniko zavarivanja Hrvatske, 1987, S. 23–15.

[1-3] Lhereux, G. E., Belotte, E. J.:
Le soudage par resistance,
Paris, Dunod, 1965, S. 63–68.

[1-4] Krause H.-J., Preß H.:
Einfluß und Störgrößen beim Widerstandspunktschweißen und ihre Beurteilung,
Berlin, Bericht der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, 1988, S. 10–12, 25–30.

[1-5] Preß, H., Weber, G., Lehmkuhl B., Krause, H.-J.:
Untersuchung zur Korrelation zwischen elektrischen und mechanischen Kenngrößen des Schweißprozesses und der Qualität von Punktschweißungen,
Düsseldorf, Deutscher Verlag für Schweißtechnik, DVS-Berichte 143, 1992, S. 128–133.

[1-6] Dorn, L., Xu, P.:
Influence of the mechanical properties of resistance welding machines on the quality of spot welding,
Schweißen und Schneiden, 1 (1993), S. E2–E14.

[1-7] Krause, H.-J., Berndt, A., Lehmkuhl, B.:
Vergleichende Bewertung des Störgrößeneinflusses auf die Qualität von Punktschweißverbindungen,
Düsseldorf, Deutscher Verlag für Schweißtechnik, DVS-Berichte 189, 1998, S. 57–72.

[1-8] Hirsch, R. B., Leibovitz, R.:
The influence of water temperature & flow on resistance welding electrode life,
Practical Welding Today, USA, 11–12 (1998).

[1-9] Dorn, L., Xu, P.:
Einfluß der mechanischen Maschineneigenschaften auf die Elektrodenstandmenge beim Widerstandspunktschweißen,

Düsseldorf, Deutscher Verlag für Schweißtechnik, DVS-Berichte 143, 1992, S. 139–144.

[1-10] Dorn, L.:
Grenzpunkt- und Zielpunktregelung – Fortschritte in der Gütesicherung beim Widerstandsschweißen,
Düsseldorf, Deutscher Verlag für Schweißtechnik, DVS-Berichte 35, 1975, S. 24–35.

[1-11] Gorkič, A., Diaci, J., Esmail, E. A., Polajnar, I.:
Real-time resistance spot welding process control by using acoustic detection,
IIW Doc. No. III-1194, 2001.

[1-12] N. N.:
MIYACHI: Weltouch CY220B, Multi-Schedule Setting Weld Control,
Japan, Technical Data Information, 1999.

[1-13] Nisida, Y., Fuji, K., Katimari, Y.:
Nugget monitor and its application,
The Autumn Meeting of JWS, Japan, 1995.

[1-14] Suzuki, M.:
Control of Expulsion Spot Welding,
The Autumn Meeting of JWS, Japan, 1995.

[1-15] Suzuki, M., Hasegawa, H.:
Control of Expulsion in Resistance Spot Welding,
IIW-Doc. III-1042, 1995.

[1-16] Matsuyama, K.:
New Monitoring Algorithm for Estimating Weld Temperature in Resistance Welding,
IIW-Doc. III-1182, 2001.

[1-17] Matsuyama, K., Sato, H., Nishiu, Y., Nishiguchi, K.:
Computer-Aided Monitoring System of Nugget Formation Process in Resistance Spot Welding,
Osaka, Osaka University, 1996, S. 577–582.

[1-18] N. N.:
IGEL - Matuschek Industrie-Elektronik: Monitor System,
Deutschland, Tehnical Data Information, 1997.

[1-19] N. N.:
Qualitätssicherung mit WEM 01,
Schlieren CH, H. A. Schlatter AG, S. 1–4.

[1-20] N. N.:
British Federal: Fabric information about central monitoring system, Type CMU2,
England, Technical Data Information, 1997.

[1-21] Bothfeld, R.:
System IQR – ein neues Regelverfahren beim Widerstandspunktschweißen,
Düsseldorf, Verlag für Schweißtechnik, DVS-Berichte 213, 2001, S. 138–142.

[1-22] Schulz, S., Langrock, S.:
Qualitätssicherung von Punktschweißverbindungen – Einsatz hochfrequenter Ultraschalltechnik,
Schweißen und Schneiden, 2 (1998), S. 114–116.

[1-23] Römer, M., Preß, H., Krause, H.-J.:
Experimental Results and Conclusions Regarding Set-up and Follow-up Behaviour of Spotwelding Machines,
IIW-Doc. III-950, 1989.

[1-24] Dorn, L., Habenicht, G., Leichtle, K., Quanz, A., Wanke, R.:
Beitrag zur Qualitätssicherung beim Widerstandspunktschweißen von beidseitig verzinktem Stahlblech in der Automobilindustrie,
Düsseldorf, Verlag für Schweißtechnik, DVS-Berichte 143, 1992, S. 121–126.

[1-25] ISO Draft 1996; N 539:
Welding current sensors for resistance welding – Definitions, calibration, testing – Mounted-on and built-in measuring coils,
Berlin, ISO, 1996, S. 3–13.

[1-26] Krause, H.-J.:
Messen beim Widerstandsschweißen und Mikrofügeverfahren,
Düsseldorf, Deutscher Verlag für Schweißtechnik, 1970, S. 92–122.

[1-27] Quanz, A.:
Prozeßanalyse beim Widerstandspunktschweißen beidseitig feuerverzinkter Stahlbleche,
Düsseldorf, VDI-Verlag, 1995.

[1-28] Weber, G., Preß, H.:
Neue Beschreibungsmöglichkeiten zur Erfassung der elektrischen Vorgänge im Sekundärkreis von Widerstandspunktschweißmaschinen und -zangen,
Düsseldorf, Deutscher Verlag für Schweißtechnik, DVS-Berichte 143, 1992, S. 54–69.

[1-29] Gärtner, U., Winkler, R., Polrolniczak H.:
Neue Elektrodenkraftsysteme zum Widerstandspunkt- und -buckelschweißen – Lärmminderung und schweißtechnische Eigenschaften,
Düsseldorf, Deutscher Verlag für Schweißtechnik, DVS-Berichte 189, 1998, S. 10–21.

[1-30] Böhme, D., Polrolniczak, H.:
Gebrauchseigenschaften und Einsatzgrenzen von Geräten zur Qualitätssicherung beim Widerstandspunktschweißen,
Düsseldorf, Deutscher Verlag für Schweißtechnik, DVS-Berichte 105, 1996, S. 93–109.

[1-31] Lehmkuhl, B., Preß, H., Römer, M., Weber, G.:
Fortschritte in der Prozeßdatenerfassung und Prozeßdatenverarbeitung beim Widerstandspreßschweißen,
Schweißen und Schneiden, 1 (1990), S. 26–29.

[1-32] Krause, H.-J., Preß, H., Römer, M.:
Möglichkeiten und Probleme der Prozeßregelung beim Widerstandspunktschweißen,
Düsseldorf, Deutscher Verlag für Schweißtechnik, DVS-Berichte 124, 1989, S. 93–100.

[1-33] Krause, H.-J., Preß, H.:
Literaturrecherche und Literaturauswertung zum Thema: “Rechnergestütztes Qualitätssicherungssystem zum Punktschweißen – IQS”,
Berlin, Bundesansatalt für Materialforschung und -prüfung, 1987,
S. 10–30.

[1-34] Kimchi, M., Faitel, W. F., Hu, S. J., Zhang, H.:
An Overview of “Intelligent Resistance Welding Consortium“,
IIW-Doc. III-1016, 1998.

[1-35] DVS-Merkblatt 2902 – Teil 4:
Widerstandspunktschweißen von Stählen bis 3 mm Einzeldicke – Vorbereitung und Durchführung,
Düsseldorf, Deutscher Verlag für Schweißtechnik, 1988.

[1-36] Granjon, H.:
Metalurške osnove varjenja,
Ljubljana, ZDVTS, 1994, S. 68–75.

[1-37] Goos, C.:
Relation Between Weld Parameters and Weld Quality in AC Resistance Spot Welding Aluminum, a Novel Approach,
IIW-Doc. III-1122, 1998.

[1-38] Weber, G., Preß, H.:
Dynamische Strom-Spannungs-Kennlinien zur Beschreibung der elektrischen Vorgänge im Sekundärkreis von Widerstandsschweiß-einrichtungen,
Schweißen und Schneiden, 10 (1991), S. 600–604.

[1-39] Weber, G., Preß, H.:
Zur Anwendung des Ohmschen Gesetzes beim Widerstandspreßschweißen mit Wechselstrom,
Schweißen und Schneiden, 1 (1992), S. 104–106.

[1-40] Weber, G.:
Instant related description of the electrical relationship in the secondary circuit of resistance welding equipment,
IIW-Doc. III-1110, 1998.

[1-41] Weber, G., Preß, H.:
Dynamische Strom-Spannungs-Effektivwert-Kennlinien beim Widerstandspunktschweißen,
Schweißen und Schneiden, 3 (1993), S. 153–156.

[1-42] Weber, G., Burmeister, J., Preß, H.:
Fuzzy-Klassifikation – eine Methode zur Qualitätsbewertung beim Widerstandspunktschweißen,
Düsseldorf, Deutscher Verlag für Schweißtechnik, DVS-Berichte 165, 1995, S. 70–75.

[1-43] Weber G.:
Relations between peak value-based and RMS value-based descriptions of electrical processes in resistance forge welding with alternating current,
IIW Doc. III-1109, 1998.

[1-44] Lewis, C., Williams, N. T.:
Dynamic Impedance - A Method with Potential for Feedback Control (Preliminary Statement),
IIW-Doc. III-1119, 1998.

[1-45] DVS-Merkblatt 2902 – Teil 1:
Widerstandspunktschweißen von Stählen bis 3 mm Einzeldicke – Übersicht,
Düsseldorf, Deutscher Verlag für Schweißtechnik, 1987.

[1-46] N. N.:
Messen mechanischer Größen,
Frankfurt, FIZ Technik, 1997, S. 28–36.

[1-47] Matsuyama, K.:

Dynamic electrode force measurements in resistance welding and its calibration,
IIW-Doc. IIIA-6, 2001.

[1-48] Vidav, I.:
Višja matematika,
Ljubljana, Državna založba Slovenije, 1973, S. 206–209.

[1-49] Jamnik, R.:
Verjetnostni račun,
Ljubljana, Društvo matematikov, fizikov in astronomov SRS, Zveza organizacij za tehnično kulturo Slovenije, 1987, S. 222–229.

[1-50] Sudnik, W., Dilthey, U., Bohlmann, H.-C., Erofeew, W., Kudinow, R.:
SPOTSIM: Modellierung und numerische Simulation des Widerstandspunktschweißens mit experimenteller Verifikation,
Düsseldorf, Deutscher Verlag für Schweißtechnik, DVS-Berichte 189, 1998, S. 116–121.

[1-51] Matsuyama, K.:
Numerical Simulation of Nugget Formation Process in Resistance Spot Welding Aluminium Alloys and its Application to the Quality Monitoring of Spot Welds,
IIW-Doc. III-1060, 1996.

[1-52] Ryudou, M., Goto, Y., Fujii, K., Matsuyama, K.:
Development of New Adaptive Control System for Resistance Spot Welding,
IIW Doc. No. III-1115, 1998.

[1-53] Chen, X., Araki, K., Mizuno, T., Ishino, Y.:
A Power Model of Resistance Spot Welding,
Japan, The Spring Meeting of JWS, 1995, IIW-Doc. III-1063, 1996.

[1-54] Ryudo, M., Goto, Y., Fujii, K., Matsuyama, K.:
Effectiveness of the New Procedure to Keep Nugget Size in Resistance Spot Welding,
Japan, The Spring Meeting of JWS, 1995, S. 8.

[1-55] Nisida, Y., Fujii, K., Kamitamari, Y.:
Quality control of resistance welding nugget monitor and its application,
Japan, The Autumn Meeting of JWS, 1995, S. 15.

[1-56] Watanabe, Y., Matsuda, Y.:
Study of weld time for nugget formation in spot welding using numerical calculation,
Japan, The Spring Meeting of JWS, 1995, IIW-Doc. III-1063, 1996.

[1-57] Schwab, R.:
Ein Rechnerprogramm zur numerischen Temperaturfeldberechnung beim Widerstandsschweißen unter besonderer Berücksichtigung von Transformatorkennlinie, Stromflußverteiligung und thermoelektrischen Effekten,
Schweißen und Schneiden, 1 (1986), S. 22–25.

[1-58] Kußmaul, K., et. al.:
Numerische Prozesssimulation von Widerstandsbuckelschweißungen,
Düsseldorf, Deutscher Verlag für Schweißtechnik, DVS-Berichte 142, 1991, S. 143–150.

[1-59] De, A., Gupta, O. P., Dorn. L.:
Numerical Modelling in Resistance Spot Welding Process,
Graz, 4. Int. Seminar „Numerical Analysis Weldability“ TU Graz, 1997.

[1-60] Greitmann, M. J., Rauch, R.:
Rechnerprogramm zur numerische Simulation von Widerstandspreßschweißungen,
Düsseldorf, Der Praktiker, 2 (1997), S. 55–56.

[1-61] Greitmann, M. J., Rother, K.:
Numerical Simulation of Spot Welding Process Using SPOTWELDER,
Graz, 4. Int. Seminar „Numerical Analysis Weldability“ TU Graz, 1997.

[1-62] Greitmann, M. J., Rauch, R.:
SPOTWELDER – Ein Rechnerprogramm zur numerischen Simulation des Widerstandspunktschweißprozesses,
Düsseldorf, Deutscher Verlag für Schweißtechnik, DVS-Berichte 189, 1998, S. 111–115.

[1-63] Zhang, W.:
SORPASS – The Professional Software for Simulation of Resistance Welding,
Aachen, 2nd. Int. Seminar „Advances in Resistance Welding”, 2002.

[1-64] Dorn, L., Jüch, A.:
Statistisches Optimieren der Einstellwerte beim Widerstandsschweißen,
Düsseldorf, Deutscher Verlag für Schweißtechnik, DVS-Berichte 51, 1978, S. 9–15.

[1-65] Krause, H.-J., Berndt, A., Lehmkuhl, B.:
Vergleichende Bewertung des Störgrößeneinflusses auf die Qualität von Punktschweißverbindungen,
Düsseldorf, Deutscher Verlag für Schweißtechnik, DVS-Berichte 189, 1998, S. 57–71.

[1-66] Golob, M., Muškinja, N.:

Osnove snovanja mehkih (fuzzy) regulacij,
Maribor, Univerza v Mariboru, 1994, S. 35–42.

[1-67] Fathi, M., Temme, K. H.:
Parameteroptimierung am Beispiel des Widerstandspunktschweißens durch ein Fuzzy-Expertensystem,
Düsseldorf, VDI-Verlag, VDI-Tagung, 11.–12.2.1993, S. 177–182.

[1-68] Weber, G., Burmeister, J.:
On-line-Prozeßüberwachung durch Fuzzy-Klassifikation beim Widerstandspunktschweißen mit Wechselstrom,
Düsseldorf, Deutscher Verlag für Schweißtechnik, DVS-Berichte 189, 1998, S. 86–95.

[1-69] Weber, G.:
Electrode wear assessment of spot welding by fuzzy classification,
IIW-Doc. III-1110, 1998.

[1-70] Chen, X., Araki, K., Mizuno, T., Ishino, Y.:
The Simulation of the Fuzzy Control of A Resistance Spot Welding System,
Japan, The Spring Meeting of JWS, 1995, IIW-Doc. III-1063, 1996.

[1-71] Straube, A., Winzen, B.:
Fuzzy basierende Überwachungssysteme für Punkt- und Buckelschweißanwendungen,
Düsseldorf, Deutscher Verlag für Schweißtechnik, DVS-Berichte 213, 2001, S.98–104.

[1-72] Dobnikar, A.:
Nevronske mreže - teorija in aplikacije,
Radovljica, Didakta, 1990, S. 10–30.

[1-73] Monari, G., Dieraert, O., Oberle, H., Dreyfus, G.:
Prediction of spot welding diameter using neural networks,
IIW-Doc. III-1108, 1998.

[1-74] Brown, J. D., Jobling, C. P., Williams, N. T.:
Optimisation of Signal Inputs to a Neural Network for Modelling Spot Welding of Zinc Coated Steels,
IIW-Doc. III-1117, 1998.

[1-75] Matsuyama, K., Sakamoto, E.:
Applying of Neural Network Technique to Monitoring of Weld Quality in Resistance Spot Welding,
Japan, The Autumn Meeting of JWS, 1995, S. 9.

[1-76] Dilthey, U., Dickersbach, J.:

Einsatz neuronaler Netze zur Qualitätssicherung beim Widerstandspunktschweißen,
Düsseldorf, Deutscher Verlag für Schweißtechnik, DVS-Berichte 189, 1998, S. 92–99.

[1-77] Đonlagić, D., Zorič, T., Svečko, R.:
Diskretni regulacijski sistemi,
Maribor, Univerza v Mariboru, 1992, S. 347–415.

[1-78] Brown, J. D., Rodd, M. G., Williams, N. T.:
Application of Artificial Intelligence Techniques to Resistance Spot Welding,
IIW-Doc. III-1092, 1997.

[1-79] Bay, J. S.:
Fondaments of Linear State Space Systems,
USA, McGraw-Hill Science, 1998.

[1-80] Aplevich, J. D.:
The Essentials of Linear State-Space Systems,
USA, Wiley Text Books, 1998.

[1-81] Balakrishnan, A. V.:
State Space Theory of Systems,
USA, Optimization Software, Inc., 1988, S. 27–66.

[1-82] Friedland, B.:
Control Systems Design: An Introduction To State-Space Methods,
USA, McGraw-Hill Science, 1985.

[1-83] Hubler, A. W., Martine, C. A.:
A Complex System Perspective to Computer-Assisted Learning,
Internet:
www.nrcce.com:8080/site/gwzl/cspcaa/download, Januar 2004.

[1-84] Randy, A. F., Kokotovic, P. V.:
Robust Nonlinear Control Design: State-Space and Lyapunov Tehniques,
Heidelberg, Springer Verlag, 1985, S. 21–115.

[1-85] Rosenbrock, H. H.:
State-Space and multivariable theory,
USA, Nelson, 1970.

[1-86] Lundbye-Christensen S., et. al.:
Contemporary Inference in State Space Models, Internet:
www.math.auc.dk/~s0ren/state-space.html, Januar 2004.

[1-87] Aoki, M.:

State Space modelling of time series,
Heidelberg, Springer Verlag, 1987, S. 10–143.

[1-88] Moryson, M.:
Testing for Random Walk Coefficients in Regression and State space Models,
Heidelberg, Springer Verlag, 1999, S. 21–115.

[1-89] Xia H.:
State-Space Description, Internet:
ece.gmu.edu/ececourses/ece521/lecturenote/chap1/node1.html,
Januar 2004.

[1-90] Sudhakar, M. P.:
Modal and Spectrum Analysis: Data Dependent Systems in State Space,
USA, John Wiley & Sons, 1991.

[1-91] Matthews M. R.:
Two-component Bose-Einstein Condensation, Internet:
jilawww.colorado.edu/www/sro/thesis/
matthews/matthews_thesis.pdf, Januar 2004.

[1-92] N. N.:
Nonlinear Modelling, Internet:
scg.levels.unisa.edu.au/mass/nonlinear_modelling.html, Januar 2004.

[1-93] Harvey, A., et. al.:
State Space and Unobserved Component Models: Theory and Applications,
UK, Cambridge University Press, 2004.

[1-94] Zhang, W.:
State Space Search: Algorithms, Complexity, Extension and Applications,
Heidelberg, Springer Verlag, 1999.

[1-95] Heylighen F.:
Attractors, Internet:
www.geog.umontreal.ca/syscomplex/cours/geo6341/excerptsfromprincipiacybernetica.pdf, Januar 2004.

[1-96] Jain R. K.:
A state space model-based method of seasonal adjustment, Internet:
www.bls.gov/opub/mlr/2001/07/art4exc.htm, Januar 2004.

[1-97] Garavel, H., Mateescu, R., Smarandache, I.:
RR-4341 - Parallel State Space Construction for Model-Checking, Internet:
www.inria.fr/rrrt/rr-4341.html, Januar 2004.

[1-98] Hyndman, R., et. al.:
A state space framework for automatic forecasting using exponential smoothing methods, Internet:
www-personal.buseco.monash.edu.au/~hyndman/papers/hksg.htm,
Januar 2004.

[1-99] Šurina, T.:
Automatska regulacija,
Zagreb, Školska knjiga, 1991, S. 362–398.

[1-100] Luger, G. F., Stubblefield, W. A.:
Artificial Intelligence, Structures and Strategies for Complex Problem Solving,
Redwood City, CA, The Benjamin/Cummings Publishing Company Inc.,
1993, S. 152–190.

[3-1] Matsuda, H., Matsuca, Y., Kabasawa, M.:
Effects of aluminium in the Zn coating on electrode life in welding galvanized steel sheet,
Welding International, 10 (1996), S. 605–613.

[3-2] Matsuda, H., Matsuda, Y., Kabasawa, M.:
Study of electrode wear mechanism in consecutive spot welding: Spot weldability of Zn-Ni electrogalvanised steed sheet and organic-silicate composite steel sheet,
Welding International, 11 (1997) S. 860–867.

[3-3] Satoh, T., Abe, H., Nakaoka, T., Hayata, Y.:
Summary Paper on the Fatigue Life of the Spot-Welded Joint under Some Kinds of Repeating Loads in Tensile-Shear,
IIW Doc. III-1043, 1995.

[3-4] Glage, W.:
Hypothesen und Fakten beim Punkt- und Buckelschweißen verzinkter Stähle,
Widerstandsschweißen und Mikrofügeverfahren,
Düsseldorf, Deutscher Verlag für Schweißtechnik, 1970, S. 52–68.

[3-5] Becker, H.:
Schweißeignung metallisch beschichteter Bleche beim Widerstandspunktschweißen,
Widerstandsschweißen und Mikrofügeverfahren,
Düsseldorf, Deutscher Verlag für Schweißtechnik, 1970, S. 69–92.

[3-6] Boron, S.:
An investigation into the resistance spot-welding of zinc coated sheet,
Welding International, 12 (1998), S. 932–936.

[3-7] Groten, G.:
Beitrag zum MSG-Impulslichtbogenschweißen von unbeschichteten und verzinkten Feinblechen,
Düsseldorf, Deutscher Verlag für Schweißtechnik, DVS-Berichte 35, 1990.

[3-8] N. N.:
Welding Zinc-Coated Steel,
Miami, American Welding Society, 1983, S. 1–24.

[3-9] N. N.:
Recommended Practices for Resistance Welding Coated Low Carbon Steels,
Miami, American Welding Society, 1970, S. 5–11.

[3-10] Beenken, H.:
Fügeverfahren für oberflächenveredeltes Feinblech,
München, SLV München, Dünnblech-Verarbeitung, Erding, 21. und 22. Mai 1996, S. 16–25.

[3-11] Szinyur, J., et. al.:
Überblick über das Punktschweißverhalten metallisch und organisch beschichteter Feinbleche,
München, SLV München, Dünnblech-Verarbeitung, Erding, 21. und 22. Mai 1996, S. 76–95.

[3-12] N. N.:
Widerstands-Punktschweißen von bandverzinktem Feinblech,
Düsseldorf, Deutscher Verlag für Schweißtechnik, DVS-Berichte 109, 1970, S. 2–25.

[3-13] Howe, P., Kelley, S. C.:
Coating Weight Effect on the Resistance Spot Weldability of Electrogalvanized Sheet Steels,
AWS Welding Journal, 12 (1988), S. 271–280.

[3-14] Pollman, W.:
Widerwstandspunktschweißen verzinkter Stahlbleche – Erprobungen und Erfahrungen im Automobilbau,
Düsseldorf, Deutscher Verlag für Schweißtechnik, DVS-Berichte 105, 1996, S. 179–186.

[3-15] Wiliams, N. T., Hollicay, R. J., Parker, J. D.:
Current Stepping Programmes for Maximising Electrode Campaign Life when Spot Welding Coated Steels,
IIW Doc. III-1163, 1994.

[3-16] Uran, M.:
Testing of Weld Nugget Quality by Means of a New Peeling Device,

IIW-Doc. III-1069, 1996.

[3-17] Uran, M.:
Comparison of Measurements of Weld Size and Tensile Force in Peel Testing in Accordance with ISO 10477,
IIW-Doc. III-1124, 1998.

[3-18] Weber, G.:
Calculating electric power values during resistance forge welding with alternating current,
IIW-Doc. III-1039, 1995.

[3-19] Weber, G.:
Berechnung elektrischer Leistungen beim Widerstandspreßschweißen mit Wechselstrom – Teil 1: Grundlagen und bisherige Beschreibung elektrischer Leistungen,
Schweißen und Schneiden 1 (1994), S. 21–24.

[6-1] Bratkovič, F.:
Programiranje računalnikov,
Ljubljana, FE Ljubljana, 1983.

[6-2] Bratkovič, F.:
Metode programiranja,
Ljubljana, FE Ljubljana, 1978.

[6-3] Rubey, R. J., Dana, J. A. and Biche, P. W.:
Quantitative aspects of software validation,
IEEE Trans. Software Engineering, 1 (1975), S. 150–155.

[6-4] Buchmayr, B.:
Computer in der Werkstoff- und Schweißtechnik,
Düsseldorf, Deutscher Verlag für Schweißtechnik, 1991.

Lebenslauf

Name: Uran

Vorname: Miro

Geboren: 24.02.1963

Nationalität: Slowenisch

Familienstand: Verheiratet

Anschrift: Vrhovnikova 21, 1000 Ljubljana, Slowenien

Schulausbildung

1969–1977	Grundschule in Ljubljana
1977–1981	Staatliches Gymnasium in Ljubljana
1981	Abitur

Universitätsausbildung

1982–1989	Universitätsstudium der Elektrotechnik an der Universität Ljubljana
1991	Abschluss: Dipl.-Ing. Elektrotechnik
1993	Antrag auf Promotionsverfahren an der TU Berlin
1994	Gutachtung von Gleichwertigkeit des Hochschulabschlusses
1996	Nachweis ingenieurwissenschaftlicher Kenntnisse
2004	Promotion an der TU Berlin