

**Hochschule für Technik und Wirtschaft Mittweida (FH)**  
**Fachbereich Maschinenbau/ Feinwerktechnik**

09648 Mittweida  
Technikumplatz 17

04741 Roßwein  
Döbelner Straße 58

***Diplomarbeit***

Björnstjerne Zindler  
Am Hainberg 2  
04680 Zschadraß  
geb. 13. 11. 1966 in Görlitz

*„Untersuchung der Besonderheiten beim Rollennahtschweißen großer Längen“*

- Untersuchung der Veränderung des Schweißstromes beim Schweißen großer Längen
- Erarbeitung von Lösungsvorschlägen zur Stromkonstanthaltung
- Erarbeitung von Lösungsvorschlägen zur Minimierung der Wärmeentwicklung außerhalb der Schweißstelle

*Im Auftrag von:*  
**ASET- Schweißtechnik GmbH**  
**Clara- Zetkin- Straße 12**  
08280 Aue

Betreuer: Prof. Dr.- Ing. Pfütze  
Prof. Dr.- Ing. Wißuwa

**Roßwein, den 23. März 1996**

Björnsterne Zindler, Am Hainberg 2, 04680 Zschadraß

## *„Untersuchung der Besonderheiten beim Rollennahtschweißen großer Längen“*

- Untersuchung der Veränderung des Schweißstromes beim Schweißen großer Längen
- Erarbeitung von Lösungsvorschlägen zur Stromkonstanthaltung
- Erarbeitung von Lösungsvorschlägen zur Minimierung der Wärmeentwicklung außerhalb der Schweißstelle

Hochschule für Technik und Wirtschaft Mittweida (FH), Fachbereich Maschinenbau/ Feinwerktechnik, 09648 Mittweida, Technikumplatz 17; 04741 Roßwein, Döbelner Straße 58, Diplomarbeit 1996

### **Referat:**

Die hier vorliegende Bearbeitung befaßt sich mit den physikalischen Besonderheiten - *Strom* und *Wärme* - bei dem Fügeverfahren „Widerstandsschweißen - Rollennahtschweißen“.

Aus dem physikalischen Gebiet „*Elektrik*“ - Untersuchungen zu den Veränderungen des Schweißstromes beim Schweißen großer Längen und eben Möglichkeiten um solche unerwünschten Änderungen durch technische Möglichkeiten (*Stromkonstanter*) auszuschließen.

Im Gebiet „*Wärme*“ werden Möglichkeiten erfragt, um Wärme außerhalb der aktuellen Schweißposition in der Schweißrichtung zu minimieren, da diese erhebliche Stromverluste darstellen.

Aus Gründen der Übersichtlichkeit wird die Arbeit in 3 Teile gegliedert:

- ***Elektrik, Elektronik***
- ***Wärme***
- ***Anhang***

Die Abschnitte physikalische Grundlagen und Elektronik sind ausführlich beschrieben, mit anschließenden praktischen Versuchen zu diesem Thema. Der Abschnitt Wärme befaßt sich mit vorhandenen Erkenntnissen anderer Arbeiten und dem nochmaligen Überprüfen dieser.

# **Vorwort**

Die hier vorliegende Bearbeitung befaßt sich mit den physikalischen Besonderheiten - *Strom* und *Wärme* - bei dem Fügeverfahren „Widerstandsschweißen - *Rollennahtschweißen*“.

Vom Auftraggeber dieser Arbeit, eine anwendende Firma dieses Schweißverfahren, wurde zwecks Optimierung des Produktionsprozesses für Sie interessante Teilthemen festgelegt.

Aus dem physikalischen Gebiet „*Elektrik*“ - Untersuchungen zu den Veränderungen des Schweißstromes beim Schweißen großer Längen und eben Möglichkeiten um solche unerwünschten Änderungen durch technische Möglichkeiten (*Stromkonstanter*) auszuschließen.

Im Gebiet „*Wärme*“ werden Möglichkeiten erfragt um Wärme außerhalb der aktuellen Schweißposition in der Schweißmaschine zu minimieren, da diese erhebliche Verluste darstellen.

Aus Gründen der Übersichtlichkeit wird die Arbeit in 3 Teile gegliedert:

## **1)**

Elektrik mit:

- Umriß um das Fertigungsverfahren
- physikalische Grundlagen als Längsschnitt zur Schweißnaht (2D- Basis)
- physikalische Grundlagen als räumliches Werkstückes (3D- Basis)
  - dabei werden lediglich die systematischen Komponenten (Stoff- const. Kontaktwiderstand) und nicht zufällige (sporadische Öl-Fettschichten, Inhomogenitäten etc.) betrachtet

Elektronik mit:

- regel- und steuerbare Elemente der Elektronik (Bauelemente)
- Geräte die die Möglichkeiten der Steuerung des Stromes eröffnen (Überblick)
- Praxis mit der Untersuchung eines Transformators
  - unter den Modi:
    - unregelt
    - geregelt
      - spannungsgeregelt
      - stromgeregelt
  - unter der Zeitbasis
    - statisch
    - dynamisch

Praxisbericht mit:

- Hersteller
- Nutzer

2)

Wärme mit:

- allgemeines zum Begriff Wärme unter dem Gesichtspunkt Verluste
- Möglichkeiten der Beeinflussung des Wärmehaushaltes in der Maschine
- Überprüfung dieser Möglichkeiten

Praxisbericht mit:

- Hersteller

3)

Anhang mit:

- Prospekte
- Gerätebeschreibungen
- Adressen
- Tabellen
- Literatur- und Bildquellen
- Europäisches Normenwerk zu den Eckpunkten
  - „Widerstandsschweißen“
  - „Rollennahtschweißen“
- Literaturverzeichnis

Die Abschnitte physikalische Grundlagen und Elektronik sind ausführlich beschrieben, um die anschließenden praktischen Versuche und Ausführungen in den Praxisberichten richtig interpretieren zu können.

Grundlagenwissen ist jedoch für diese Teilgebiete nötig und wird vorausgesetzt.

Die in dieser Arbeit vorkommenden Formeln sind in der Basis aus den zuständigen Werken entnommen und dann nach mathematischen Regeln in entsprechend gebrauchte Gleichungen umgeformt worden.

Dabei wurde einerseits verzichtet auf die Aufgliederung der Zwischenschritte, andererseits konnten so detailspezifische Formeln individuell angepaßt werden.

Trotzalledem kann die hier vorliegende Arbeit nur Vorschläge aufführen. Erst die Produktionspraxis wird dann die Wirksamkeit der vorliegenden Lösungen bestätigen, unterstützen oder widersprechen.



# **Inhaltsverzeichnis**

|            |                                                                  | Seite     |
|------------|------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>0.</b>  | <b>Vorwort</b>                                                   | <b>3</b>  |
| <b>1.</b>  | <b>Das Widerstandsrollnahtschweißprinzip</b>                     | <b>9</b>  |
| 1. 1       | Einführung in das Punkt-, Buckel- und Nahtschweißen              | 9         |
| 1. 1. 1    | Grundlagen der Widerstandserwärmung -<br>Joulesche Wärmeleichung | 10        |
| 1. 1. 2    | Einflußgrößen der Widerstandserwärmung                           | 11        |
| 1. 1. 3    | Zusammenfassung für Punkt-, Buckel- und Nahtschweißen            | 14        |
| 1. 2       | Wirkprinzip des Rollennahtschweißens                             | 14        |
| 1. 2. 1    | Nahtarten                                                        | 15        |
| 1. 2. 2    | Arbeitstechnik                                                   | 16        |
| 1. 2. 3    | Rollenelektroden                                                 | 17        |
| 1. 2. 4    | Fertigungsmittelüberblick                                        | 17        |
| 1. 2. 4. 1 | Nahtschweißgeräte                                                | 17        |
| 1. 2. 4. 2 | Nahtschweißmaschinen                                             | 17        |
| 1. 2. 5    | Werkstoffe und Schweißparameter                                  | 20        |
| 1. 2. 6    | Anwendungsgebiete                                                | 20        |
| <b>2.</b>  | <b>Elektrotechnische Grundlagen</b>                              | <b>21</b> |
| 2. 1       | 2D- Basis                                                        | 21        |
| 2. 1. 1    | Allgemeine Randbedingungen                                       | 21        |
| 2. 1. 2    | Gesamtwiderstand im Bereich II                                   | 21        |
| 2. 1. 3    | Gesamtwiderstand im Bereich I                                    | 22        |
| 2. 1. 4    | Stromflußänderung zwischen den Bereichen I und II                | 23        |
| 2. 1. 5    | Die Slew- Rate des Stromflusses                                  | 23        |
| 2. 1. 6    | Stromverteilung über die Naht - 2D                               | 23        |
| 2. 1. 7    | Spannungsverteilung über die Naht - 2D                           | 24        |
| 2. 1. 8    | Elektrische Leistungen                                           | 24        |
| 2. 1. 9    | Der Korrekturfaktor $\mu$                                        | 26        |
| 2. 1. 10   | Der Korrekturfaktor $\mu^*$                                      | 26        |
| 2. 1. 11   | Der Verteilungsfaktor $\varphi$                                  | 27        |
| 2. 1. 12   | Wirksamer Kontaktwiderstand $R_2$                                | 28        |
| 2. 1. 13   | Wirksamer Widerstand $R_1$ bei Stepnaht                          | 29        |
| 2. 1. 14   | Die Temperaturabhängigkeit des Widerstandes $R_1$                | 30        |
| 2. 2       | 3D- Basis                                                        | 31        |
| 2. 2. 1    | Allgemeines                                                      | 31        |
| 2. 2. 2    | Berechnung der Vergleichsschweißstromstärke                      | 32        |
| 2. 2. 3    | Der Verteilfaktor $\varepsilon_s$                                | 33        |
| 2. 2. 4    | Berechnung der Schweißstromstärke                                | 34        |
| 2. 2. 5    | Schweißleistung                                                  | 34        |
| 2. 2. 6    | Stromflußänderung zwischen den Bereichen I - II                  | 34        |
| 2. 2. 7    | Die Slew- Rate des Stromflusses                                  | 35        |
| 2. 2. 8    | Der Korrekturfaktor $m^*$                                        | 35        |

|              |                                                                           |           |
|--------------|---------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>3.</b>    | <b>Steuer- und regelbare Elemente</b>                                     | <b>36</b> |
| 3. 1         | Einstellbare Getriebe                                                     | 36        |
| 3. 2         | Potentiometersteuerung                                                    | 36        |
| <b>3. 3</b>  | <b>Relais, Auslöser und Schütze</b>                                       | <b>37</b> |
| 3. 3. 1      | Ausführungen von Relais und Auslösern                                     | 37        |
| 3. 3. 2      | Elektrotechnische Angaben zu Relais                                       | 38        |
| 3. 3. 3      | Schütze                                                                   | 38        |
| 3. 3. 4      | Elektronische Relais                                                      | 39        |
| <b>3. 4</b>  | <b>Thyratron (Stromrichterröhre)</b>                                      | <b>40</b> |
| <b>3. 5</b>  | <b>Ignitron (Relaisröhre)</b>                                             | <b>42</b> |
| <b>3. 6</b>  | <b>Transduktoren</b>                                                      | <b>44</b> |
| 3. 6. 1      | Aufbau                                                                    | 44        |
| 3. 6. 2      | Anwendung                                                                 | 45        |
| <b>3. 7</b>  | <b>Transistoren</b>                                                       | <b>46</b> |
| 3. 7. 1      | Bipolare Transistoren                                                     | 46        |
| 3. 7. 1. 1   | Bipolare Transistoren als Schalter                                        | 46        |
| 3. 7. 1. 2   | Die Arbeitspunkte im Kennlinienfeld                                       | 47        |
| 3. 7. 2      | Feldeffekttransistoren                                                    | 48        |
| 3. 7. 2. 1   | Feldeffekttransistoren als Schalter                                       | 48        |
| 3. 7. 2. 2   | Schaltstufen mit n- oder p- Kanal- MOS-FET                                | 48        |
| 3. 7. 2. 3   | Schaltstufen in CMOS-Technologie                                          | 49        |
| 3. 7. 2. 4   | Schaltstufen mit VMOS-Leistungstransistoren                               | 51        |
| <b>3. 8</b>  | <b>Thyristoren</b>                                                        | <b>51</b> |
| 3. 8. 1      | Rückwärtsperrende Thyristortriode (Thyristor)                             | 52        |
| 3. 8. 2      | GTO- Thyristor (Abschaltthyristortriode)                                  | 53        |
| 3. 8. 3      | PUT- Thyristor (Thyristortetrode)                                         | 54        |
| 3. 8. 4      | Vierschichtdiode (rückwärtssperrende Thyristordiode)                      | 54        |
| <b>3. 9</b>  | <b>Triac (Zweirichtungs- Thyristortriode)</b>                             | <b>56</b> |
| <b>3. 10</b> | <b>Diac (Zweirichtungs- Thyristordiode)</b>                               | <b>57</b> |
| <b>3. 11</b> | <b>Vergleich der steuer- und regelbaren Elemente</b>                      | <b>58</b> |
| <br>         |                                                                           |           |
| <b>4.</b>    | <b>Steuer- und Regelgeräte</b>                                            | <b>59</b> |
| <b>4. 1</b>  | <b>Analogschalter mit Feldeffekttransistoren</b>                          | <b>59</b> |
| <b>4. 2</b>  | <b>Thyristoren</b>                                                        | <b>60</b> |
| 4. 2. 1      | Prinzip der Gleichstromzündung                                            | 60        |
| 4. 2. 2      | Prinzip der Wechselstromzündung                                           | 61        |
| 4. 2. 3      | Prinzip der Impulszündung                                                 | 61        |
| 4. 2. 4      | Phasenanschnittsteuerung                                                  | 62        |
| 4. 2. 5. 1   | Thyristor mit vorgeschalteter Diodenbrücke - Last an Wechselstrom         | 63        |
| 4. 2. 5. 2   | Thyristor mit vorgeschalteter Diodenbrücke - Last an Gleichstrom          | 63        |
| 4. 2. 5. 3   | Antiparallelschaltung                                                     | 64        |
| <b>4. 3</b>  | <b>Triacs - Anwendung von Diac und Triac als Phasenanschnittsteuerung</b> | <b>66</b> |
| 4. 3. 1      | Wirkungsweise                                                             | 66        |
| 4. 3. 2      | Hystereseeffekt                                                           | 66        |

|              |                                                                                          |            |
|--------------|------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>5.</b>    | <b>Praktische Austestung eines Transformators</b>                                        | <b>68</b>  |
| <b>5. 1.</b> | <b>Allgemeine Angaben zum Transformator</b>                                              | <b>68</b>  |
| <b>5. 2</b>  | <b>Versuche</b>                                                                          | <b>69</b>  |
| 5. 2. 1      | Versuch 1                                                                                | 69         |
| 5. 2. 2      | Versuch 2                                                                                | 72         |
| 5. 2. 3      | Versuch 3                                                                                | 74         |
| 5. 2. 4      | Versuch 4                                                                                | 76         |
| 5. 2. 5      | Versuch 5                                                                                | 78         |
| 5. 2. 6      | Versuch 6                                                                                | 80         |
| 5. 2. 7      | Gesamtauswertung                                                                         | 82         |
| <b>6.</b>    | <b>Technischer Stand von Konstantstromreglern für Widerstandsschweißmaschinen</b>        | <b>83</b>  |
| <b>6. 1</b>  | <b>Gütesicherung bei Widerstandsschweißverbindungen mit Hilfe der Stromregelung</b>      | <b>83</b>  |
| 6. 1. 1      | Allgemeines                                                                              | 83         |
| 6. 1. 2      | Betriebszustände der Stromkonstantregelung                                               | 91         |
| 6. 1. 3      | Regelung mit anderen Größen                                                              | 93         |
| 6. 1. 4      | Anhang zum Gliederungspunkt                                                              | 94         |
| <b>6. 2</b>  | <b>Beispiel eines Stromreglers für das Widerstandsschweißverfahren von Harms + Wende</b> | <b>98</b>  |
| 6. 2. 1      | Schweißsteuerungen mit Regelung und Grenzwertübertwachung                                | 98         |
| 6. 2. 2      | Beschreibung der Steuerstufe für Widerstandsschweißen MPS15043                           | 98         |
| <b>7.</b>    | <b>Wärme im Sekundärkreis</b>                                                            | <b>99</b>  |
| 7. 1.        | Entstehung                                                                               | 99         |
| 7. 2.        | Physikalische Struktur der Sekundärimpedanz                                              | 99         |
| 7. 3         | Elimination der induktiven Last                                                          | 100        |
| 7. 3. 1      | Theoretische Bedingungen                                                                 | 100        |
| 7. 3. 2      | Praktische Bedeutung                                                                     | 101        |
| 7. 3. 2. 1   | Sinusförmige Wellenform                                                                  | 101        |
| 7. 3. 2. 2   | Rechteckförmige Wellenform                                                               | 102        |
| 7. 3. 3      | Leistungsbilanz                                                                          | 103        |
| <b>7. 4</b>  | <b>Schweißstromquellen unter dem Gesichtspunkt der Verlusteminimierung</b>               | <b>104</b> |
| 7. 4. 1      | Stromart                                                                                 | 104        |
| 7. 4. 1. 1   | Gleichstrom                                                                              | 104        |
| 7. 4. 1. 2   | Mischstrom                                                                               | 104        |
| 7. 4. 1. 3   | Mittelfrequenter Wechselstrom                                                            | 104        |
| 7. 4. 1. 4   | Hochfrequenter Wechselstrom                                                              | 105        |
| 7. 4. 1. 5   | Rechteckförmiger Wechselstrom                                                            | 105        |
| <b>7. 5</b>  | <b>Wirbelstromverluste - Untersuchung der Minimierung</b>                                | <b>105</b> |
| <b>7. 6</b>  | <b>Verifizierung des Verhältnisses <math>P_{wMF} / P_{wLF}</math> mittels Versuch</b>    | <b>107</b> |
| 7. 6. 1      | Versuche                                                                                 | 107        |
| 7. 6. 1. 1   | Versuch 1                                                                                | 107        |
| 7. 6. 1. 2   | Versuch 2                                                                                | 109        |
| 7. 6. 2      | Gesamtauswertung                                                                         | 110        |

|                |                                                                                  |            |
|----------------|----------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>8.</b>      | <b>Schweißstromquellen mit Rechteckstromcharakteristik von Harms &amp; Wende</b> | <b>111</b> |
| <b>9.</b>      | <b>Anhang</b>                                                                    | <b>112</b> |
| <b>9. 1</b>    | <b>Literatur zum Thema</b>                                                       | <b>112</b> |
| <b>9. 2</b>    | <b>Europäisches Normenwerk</b>                                                   | <b>119</b> |
| <b>9. 2. 1</b> | <b>„Rollennahtschweißen“</b>                                                     | <b>119</b> |
| <b>9. 2. 2</b> | <b>„Widerstandsschweißen“</b>                                                    | <b>122</b> |
| <b>9. 3</b>    | <b>Verwendete Formelzeichen</b>                                                  | <b>152</b> |
| <b>9. 4</b>    | <b>Adressen von Hersteller und Lieferanten</b>                                   | <b>153</b> |
| <b>9. 5</b>    | <b>Tabellen zum im Text auftretende mathematischer Funktionen</b>                | <b>156</b> |
| <b>9. 5. 1</b> | <b>Funktion:</b>                                                                 | <b>156</b> |
| <b>9. 5. 2</b> | <b>Funktion:</b>                                                                 | <b>158</b> |
| <b>9. 5. 3</b> | <b>Funktion:</b>                                                                 | <b>160</b> |
| <b>9. 5. 4</b> | <b>Funktion:</b>                                                                 | <b>163</b> |
| <b>9. 6</b>    | <b>Verzeichnis zitierter Literatur</b>                                           | <b>166</b> |
| <b>9. 7</b>    | <b>Bildquellenverzeichnis</b>                                                    | <b>168</b> |
| <b>10.</b>     | <b>Selbständigkeitsverzeichnis</b>                                               | <b>171</b> |
| <b>11.</b>     | <b>Prospektmaterial</b>                                                          | <b>172</b> |

# Untersuchung der Besonderheiten beim Rollennahtschweißen großer Längen

## 2D- Elektro – Teil I

Dipl.- Ing. Björnsterne Zindler, M.Sc.

[www.Zenithpoint.de](http://www.Zenithpoint.de)

Erstellt: 23. März 1996 – Letzte Revision: 27. Oktober 2017

### **Inhaltsverzeichnis**

|          |                                |          |
|----------|--------------------------------|----------|
| <b>1</b> | <b>2D- Modell - I , Auszug</b> | <b>2</b> |
|----------|--------------------------------|----------|

---

### **Literatur**

- [002] Dipl.- Ing. Björnsterne Zindler, M.Sc., Untersuchung der Besonderheiten beim Rollennahtschweißen großer Längen, Diplomarbeit, 1996.
-

## 1 2D- Modell - I , Auszug

### Allgemeine Randbedingungen

[002]

Zugrunde liegendes Modell:

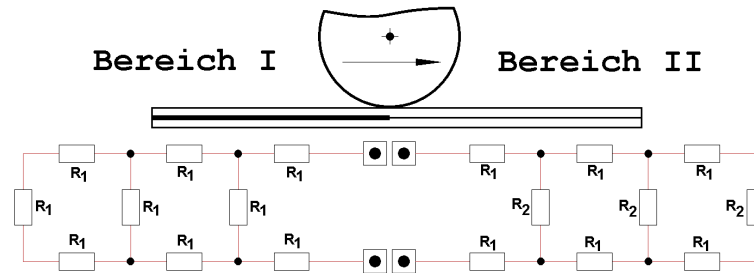


Bild 2.1: Bereichseinteilung beim Rollnahtschweißen.

Randbedingungen:

$$U = \text{const.} \quad R_1 = \text{const.} \quad R_2 = \text{const.}$$

Dabei sind:

$$R_1 = \text{Stoffwiderstand}$$

$$R_2 = \text{Kontaktwiderstand}$$

**Bereich I:** Naht ist gesetzt als sehr lange durchgehende Naht, betrachtet als Einzelwiderstände sehr groß, aber begrenzter Anzahl.

**Bereich II:** Stoff- und Kontaktwiderstand als langer durchgehender Streifen, betrachtet als Einzelwiderstände sehr groß, aber begrenzter Anzahl.

**Gesamtwiderstand im Bereich II**

- einstufiges Ersatzschaltbild:

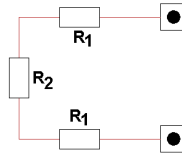


Bild 2.2: Ersatzschaltbild 1. Ordnung

⇒

$$\sum R_{II}^{(1)} = 2 \cdot R_1 + R_2$$

- zweistufiges Ersatzschaltbild:

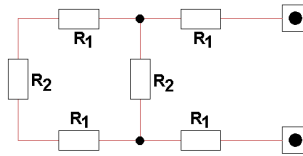


Bild 2.3: Ersatzschaltbild 3. Ordnung

⇒

$$\sum R_{II}^{(3)} = 2 \cdot R_1 + (2 \cdot R_1 + R_2) \parallel R_2$$

⇒

$$\sum R_{II}^{(3)} = 2 \cdot R_1 + \sum R_{II}^{(1)} \parallel R_2$$

- dreistufiges Ersatzschaltbild:

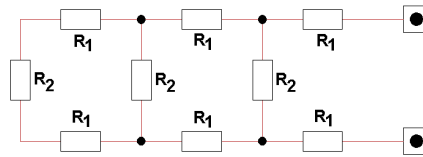


Bild 2.4: Ersatzschaltbild 5. Ordnung

⇒

$$\sum R_{II}^{(5)} = (2 \cdot R_1 + (2 \cdot R_1 + R_2) \parallel R_2) \parallel R_2 + 2 \cdot R_1$$

⇒

$$\sum R_{II}^{(5)} = 2 \cdot R_1 + \sum R_{II}^{(3)} \parallel R_2$$

- n- stufiges Ersatzschaltbild

$$\sum R_{II}^{(2 \cdot n + 1)} = 2 \cdot R_1 + \sum R_{II}^{(2 \cdot n - 1)} \parallel R_2$$

Für große  $n$  gilt ansatzweise  $2 \cdot n + 1 \rightarrow 2n \leftarrow 2n - 1$ . Das entspricht einem Abbruch der Reihenentwicklung:

$$\sum R_{II}^{(2 \cdot n)} = 2 \cdot R_1 + \sum R_{II}^{(2 \cdot n)} \parallel R_2$$

Dieser Ausdruck ist dann analytisch für  $\sum R_{II}^{(2 \cdot n)}$  darstellbar.

$$\sum R_{II}^{(2 \cdot n)} = 2 \cdot R_1 + \frac{1}{\frac{1}{\sum R_{II}^{(2 \cdot n)}} + \frac{1}{R_2}} = 2 \cdot R_1 + \frac{R_2 \cdot \sum R_{II}^{(2 \cdot n)}}{R_2 + \sum R_{II}^{(2 \cdot n)}}$$

⇒

$$\sum R_{II}^{(2 \cdot n)} \cdot \left( R_2 + \sum R_{II}^{(2 \cdot n)} \right) = 2 \cdot R_1 \cdot \left( R_2 + \sum R_{II}^{(2 \cdot n)} \right) + R_2 \cdot \sum R_{II}^{(2 \cdot n)}$$

⇒

$$\sum R_{II}^{(2 \cdot n)} \cdot \sum R_{II}^{(2 \cdot n)} - 2 \cdot R_1 \cdot \sum R_{II}^{(2 \cdot n)} - 2 \cdot R_1 \cdot R_2 = 0$$

⇒

$$\sum R_{II}^{(2 \cdot n)} = R_{II} = R_1 \cdot \left( 1 + \sqrt{1 + 2 \cdot \frac{R_2}{R_1}} \right)$$

**Gesamtwiderstand im Bereich I**

Da hier  $R_1 = R_2$  gilt, kann vereinfacht werden:

$$\sum R_I^{(2 \cdot n)} = R_I = R_1 \cdot (1 + \sqrt{3})$$



### Widerstand in der Schweißlinse

Der resultierende Widerstand der gesamten Schweißnaht großer Länge  $L$  und vernachlässigbarer Breite  $t$  mit  $L \gg t$  und  $t \rightarrow 0$  setzt sich zusammen aus  $R_I$  und  $R_{II}$ . Ergebnis ist der Widerstand  $R_{III}$  direkt in der Schweißlinse.

$$R_{III} = \frac{1}{\frac{1}{R_I} + \frac{1}{R_{II}}} = \frac{R_I \cdot R_{II}}{R_I + R_{II}}$$

$\Rightarrow$

$$R_{III} = R_I \cdot \mu$$

Mit:

$$\mu = \frac{(1 + \sqrt{3}) \cdot (1 + \sqrt{1 + 2 \cdot \psi})}{2 + \sqrt{3} + \sqrt{1 + 2 \cdot \psi}}$$

Wobei für  $\psi = R_2/R_1$  gilt und  $\mu$  einen Korrekturfaktor darstellt. Dieser soll grafisch dargestellt werden.

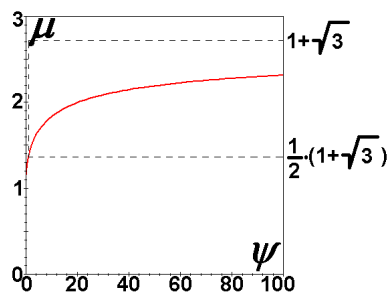


Bild 2.5: Der Korrekturfaktor  $\mu$  grafisch dargestellt.

Die Grenzwerte  $\lim_{\psi \rightarrow +1} \mu = \frac{1}{2} \cdot (1 + \sqrt{3}) \approx 1,366$  und  $\lim_{\psi \rightarrow +\infty} \mu = 1 + \sqrt{3} \approx 2,732$  sowie  $\psi > 1$  schränken den praktisch nutzbaren Bereich ein.



# Untersuchung der Besonderheiten beim Rollennahtschweißen großer Längen 2D- Elektro – Teil II

Dipl.- Ing. Björnsterne Zindler, M.Sc.

[www.Zenithpoint.de](http://www.Zenithpoint.de)

Erstellt: 23. März 1996 – Letzte Revision: 27. Oktober 2017

## Inhaltsverzeichnis

|   |                          |   |
|---|--------------------------|---|
| 1 | 2D- Modell - II , Auszug | 2 |
|---|--------------------------|---|

---

## Literatur

- [002] Dipl.- Ing. Björnsterne Zindler, M.Sc., Untersuchung der Besonderheiten beim Rollennahtschweißen großer Längen, Diplomarbeit, 1996.
-

[002]

## 1 2D- Modell - II , Auszug

### Stromflussänderung zwischen den Bereichen I und II

Der Stromfluss ändert sich während des Schweißvorganges zwischen den Randwerten „Bleche vollständig Bereich I“ und „Bleche vollständig Bereich II“.

$$\Delta I = \frac{U}{R_I} - \frac{U}{R_{II}}$$

 $\Rightarrow$ 

$$\Delta I = U \cdot \frac{R_{II} - R_I}{R_I \cdot R_{II}}$$

Eingesetzt und aufgelöst ergibt sich:

$$\Delta I = \frac{U}{R_1} \cdot \mu^\bullet$$

Mit:

$$\mu^\bullet = \frac{\sqrt{1+2 \cdot \psi} - \sqrt{3}}{(1+\sqrt{3}) \cdot (1+\sqrt{1+2 \cdot \psi})}$$

Wobei  $\mu^\bullet$  einen Korrekturfaktor darstellt, welcher im folgenden Abschnitt betrachtet wird.

**Der Korrekturfaktor  $\mu^\bullet$** 

Dieser Wert besitzt den Ausdruck:

$$\mu^\bullet = \frac{\sqrt{1 + 2 \cdot \psi} - \sqrt{3}}{(1 + \sqrt{3}) \cdot (1 + \sqrt{1 + 2 \cdot \psi})}$$

Grafisch veranschaulicht erkennt man, dass das Verhältnis  $R_2/R_1$  wesentlich den Wert  $\Delta I$  beeinflusst.

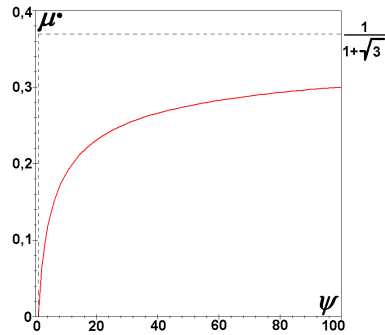


Bild 2.7: Der Korrekturfaktor  $\mu^\bullet$ .

Die Grenzwerte  $\lim_{\psi \rightarrow +1} \mu^\bullet = 0$  und  $\lim_{\psi \rightarrow +\infty} \mu^\bullet = \frac{1}{1+\sqrt{3}} \approx 0,366$  sowie  $\psi > 1$  schränken den praktisch nutzbaren Bereich ein.



# Untersuchung der Besonderheiten beim Rollennahtschweißen großer Längen

## 2D- Leistung

Dipl.- Ing. Björnsterne Zindler, M.Sc.

[www.Zenithpoint.de](http://www.Zenithpoint.de)

Erstellt: 23. März 1996 – Letzte Revision: 25. November 2017

### Inhaltsverzeichnis

|          |                             |          |
|----------|-----------------------------|----------|
| <b>1</b> | <b>2D- Leistung, Auszug</b> | <b>2</b> |
|----------|-----------------------------|----------|

---

### Literatur

- [002] Dipl.- Ing. Björnsterne Zindler, M.Sc., Untersuchung der Besonderheiten beim Rollennahtschweißen großer Längen, Diplomarbeit, 1996.
-

## 1 2D- Leistung, Auszug

### Berechnung der Schweißleistung, 2D

[002]

Wird vorerst im Bereich II durchgeführt.

- einstufiges Ersatzschaltbild:

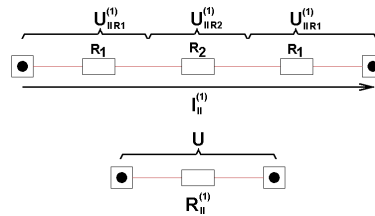


Bild X.X: Ersatzschaltbild 1. Ordnung

Strom durch  $R_{II}^{(1)}$ :

$$I_{II}^{(1)} = \frac{1}{R_{II}^{(1)}} \cdot U$$

Spannung an  $R_2$ :

$$U_{II;R_2}^{(1)} = \frac{R_2}{R_{II}^{(1)}} \cdot U$$

Leistung an  $R_2$ :

$$P_{II;R_2}^{(1)} = \frac{R_2}{R_{II}^{(1)^2}} \cdot U^2$$



- zweistufiges Ersatzschaltbild:

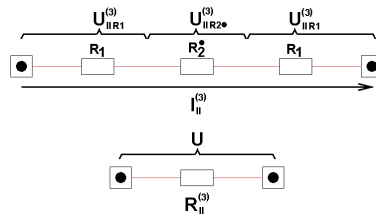


Bild X.X: Ersatzschaltbild 3. Ordnung

Strom durch  $R_{II}^{(3)}$ :

$$I_{II}^{(3)} = \frac{1}{R_{II}^{(3)}} \cdot U$$

Spannung an  $R_2^*$ :

$$U_{II;R_2}^{(3)} = \frac{R_2^*}{R_{II}^{(3)}} \cdot U$$

Leistung an  $R_2^*$ :

$$P_{II;R_2}^{(3)} = \frac{R_2^*}{R_{II}^{(3)^2}} \cdot U^2$$

Mit:

$$R_2^* = (R_2 + 2 \cdot R_1) \parallel R_2 = R_{II}^{(3)} - 2 \cdot R_1$$

- dreistufiges Ersatzschaltbild:

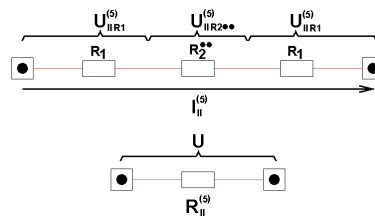


Bild X.X: Ersatzschaltbild 5. Ordnung

Strom durch  $R_{II}^{(5)}$ :

$$I_{II}^{(5)} = \frac{1}{R_{II}^{(5)}} \cdot U$$

Spannung an  $R_2^{\bullet\bullet}$ :

$$U_{II; R_2}^{(5)} = \frac{R_2^{\bullet\bullet}}{R_{II}^{(5)}} \cdot U$$

Leistung an  $R_2^{\bullet\bullet}$ :

$$P_{II; R_2}^{(5)} = \frac{R_2^{\bullet\bullet}}{R_{II}^{(5)2}} \cdot U^2$$

Mit:

$$R_2^{\bullet\bullet} = (2 \cdot R_1 + (2 \cdot R_1 + R_2) \parallel R_2) \parallel R_2 = R_{II}^{(5)} - 2 \cdot R_1$$

- n- stufiges Ersatzschaltbild

Strom durch  $R_{II}^{(n)}$ :

$$I_{II}^{(n)} = \frac{1}{R_{II}^{(n)}} \cdot U$$

$\Rightarrow$

$$I_{II} = \frac{1}{R_{II}} \cdot U$$

Spannung an  $R_2^{\bullet \cdots \bullet}$ :

$$U_{II;R_2}^{(n)} = \frac{R_{II}^{(n)} - 2 \cdot R_1}{R_{II}^{(n)}} \cdot U$$

$\Rightarrow$

$$U_{II;R_2} = \left(1 - 2 \cdot \frac{R_1}{R_{II}}\right) \cdot U$$

Leistung an  $R_2^{\bullet \cdots \bullet}$ :

$$P_{II;R_2}^{(n)} = P_S = \frac{R_{II}^{(n)} - 2 \cdot R_1}{R_{II}^{(n)^2}} \cdot U^2$$

$\Rightarrow$

$$P_{II;R_2} = P_S = \frac{R_{II} - 2 \cdot R_1}{R_{II}^2} \cdot U^2$$

**Bilanzen in  $R_{II}$** 

Die Schweißleistung  $P_S$  setzt sich zusammen aus der Gesamtleistung  $P_G$

$$P_G = \frac{1}{R_{II}} \cdot U^2$$

abzüglich der Verlustleistung  $P_V$  infolge ohmscher Lasten im Grundwerkstoff.

$$P_V = 2 \cdot \frac{R_1}{R_{II}^2} \cdot U^2$$

Für  $R_{II}$  ist eine Berechnungsgrundlage vorhanden.

$$R_{II} = R_1 \cdot \left(1 + \sqrt{1 + 2 \cdot \psi}\right)$$

Die Leistungen grafisch dargestellt mit  $R_1 = U = 1$ :

$$P_G \propto \frac{1}{\sqrt{1 + 2 \cdot \psi} + 1}$$

$$P_S \propto \frac{\sqrt{1 + 2 \cdot \psi} - 1}{(\sqrt{1 + 2 \cdot \psi} + 1)^2}$$

$$P_V \propto \frac{2}{(\sqrt{1 + 2 \cdot \psi} + 1)^2}$$

$\Rightarrow$

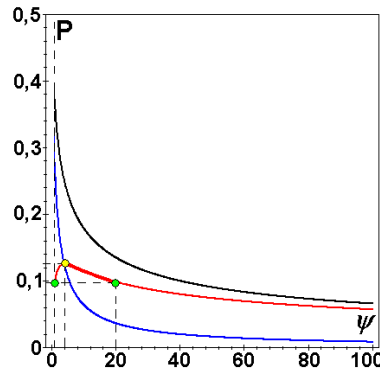


Bild X.X: Leistungsbilanz des Schweißvorganges in  $R_{II}$ .

Der untere Wert von  $\psi$  mit  $\psi \geq 1$  begrenzt den praktisch nutzbaren Bereich.

Der Ausdruck für die Schweißleistung  $P_S$  besitzt ein Maximum bei  $\psi = 4$  abszissenunabhängig von allen physikalischen Größen. Der Betrag des Maximum selbst ist gleich mit der Verlustleistung  $P_V$  und beträgt:

$$P_{S,MAX} = P_{S;\psi=4} = P_{V;\psi=4} = \frac{1}{8} \cdot \frac{U^2}{R_1}$$

Für ein  $\psi = 1$  treten folgende Werte auf.

$$P_{S;\psi=1} = \frac{\sqrt{3} - 1}{(\sqrt{3} + 1)^2} \cdot \frac{U^2}{R_1} \approx 0,0981 \cdot \frac{U^2}{R_1} \quad P_{V;\psi=1} = \frac{2}{(\sqrt{3} + 1)^2} \cdot \frac{U^2}{R_1} \approx 0,2679 \cdot \frac{U^2}{R_1}$$

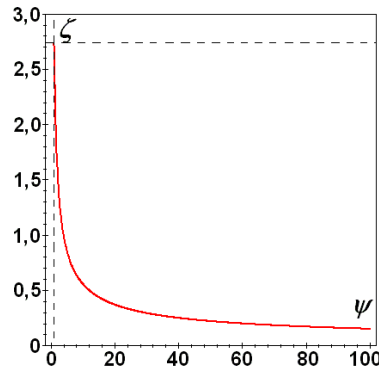
Ein Verhältnis  $\zeta_{II}$  ist definierbar.

$$\zeta_{II;\psi=1} = \frac{P_{V;\psi=1}}{P_{S;\psi=1}} = \frac{2}{\sqrt{3} - 1} \approx 2,732$$

Die allgemeine Darstellung von  $\zeta_{II}$  ist berechenbar mit:

$$\zeta_{II} = \frac{2}{\sqrt{1 + 2 \cdot \psi} - 1}$$

Der Ausdruck  $\zeta_{II}$  ist ein Bilanz- und weiterer Korrekturfaktor.

Bild X.X: Der Korrekturfaktor  $\zeta_{II}$  grafisch dargestellt.

Die Grenzwerte  $\lim_{\psi \rightarrow +1} \zeta_{II} = \frac{2}{\sqrt{3}-1} = 2,732$  und  $\lim_{\psi \rightarrow +\infty} \zeta_{II} = 0$  begrenzen den praktisch nutzbaren Bereich.

Der Wert  $P_S = \frac{\sqrt{3}-1}{(\sqrt{3}+1)^2} \approx 0,0981$  tritt zweimal auf der Schweißleistungsfunktion auf, so bei :

$$\psi = 1 \quad \text{und} \quad \psi = 10 + 6 \cdot \sqrt{3} \approx 20,392$$

$\Rightarrow$

$$\zeta_{II;\psi=1} = 2,732 = \zeta_{II;\psi=10+6\cdot\sqrt{3}}^{-1} \quad \zeta_{II;\psi=10+6\cdot\sqrt{3}} = 0,366 = \zeta_{II;\psi=1}^{-1}$$

Der Bereich

$$4 \leq \psi \leq 10 + 6 \cdot \sqrt{3} \approx 20,392$$

ist für das Schweißen besonders ökonomisch, da die Verlustleistung  $P_V$  kleiner als die Schweißleistung  $P_S$ , gleichzeitig größer als  $P_{S;\psi=1}$  ist.

**Bilanzen in  $R_{III}$** 

Für das n- stufiges Ersatzschaltbild gilt:

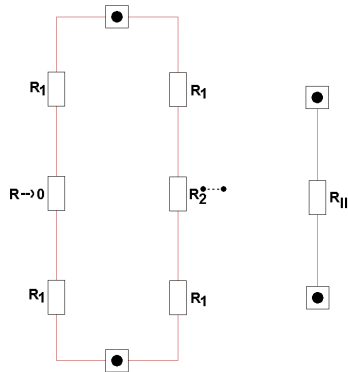


Bild X.X: Ersatzschaltbild als Zusammenhang von  $R_{III}$  und  $R_{II}$ .

Für  $R_{III}$  gilt dementsprechend:

$$R_{III} = \frac{1}{\frac{1}{2 \cdot R_1} + \frac{1}{2 \cdot R_1 + R_2 \dots}}$$

$\Rightarrow$

$$R_{III} = R_1 \cdot \frac{4 \cdot R_1 + 2 \cdot R_2 \dots}{4 \cdot R_1 + R_2 \dots}$$

Mit  $R_2 \dots = R_{II} - 2 \cdot R_1$  ergibt sich für obigen Ausdruck:

$$R_{III} = R_1 \cdot \frac{2 \cdot R_{II}}{2 \cdot R_1 + R_{II}}$$

Der Term  $R_{III}$  ist substituierbar:

$$R_{III} = R_1 \cdot \mu$$

$\Rightarrow$

$$\mu = \frac{2 \cdot R_{II}}{2 \cdot R_1 + R_{II}}$$

$\Rightarrow$

$$R_{III} = R_{II} \cdot \frac{2 - \mu}{2}$$

Für die praktische Grenze von  $R_{III} > 0$  ist ein  $\mu < 2$  erforderlich. Dieser Wert impliziert für  $\psi$  ein:

$$\psi < 10 + 6 \cdot \sqrt{3} \approx 20,392$$

Oberhalb dieses Wertes, ist kein Schweißen (mehr) möglich.

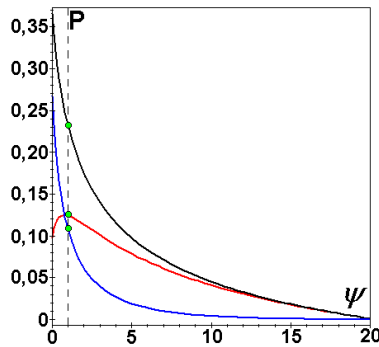
Die Leistungen ändern sich entsprechend.

$$P_G = \frac{2 - \mu}{2 \cdot \mu} \cdot U^2 \quad P_S = \frac{(2 - \mu) \cdot (\mu + \mu \cdot R_1 - 2 \cdot R_1)}{2 \cdot \mu^2} \cdot U^2 \quad P_V = R_1 \cdot \frac{(2 - \mu)^2}{2 \cdot \mu^2} \cdot U^2$$

Mit  $R_1 = U = 1$ :

$$P_G \propto \frac{2 - \mu}{2 \cdot \mu} \quad P_S \propto \frac{(2 - \mu) \cdot (\mu - 1)}{\mu^2} \quad P_V \propto \frac{(2 - \mu)^2}{2 \cdot \mu^2}$$

Der Korrekturfaktor  $\mu$  kann substituiert werden. Damit sind die Leistungen grafisch darstellbar.

Bild X.X: Leistungsbilanz des Schweißvorganges in  $R_{III}$ .

Der Wert von  $\psi$  mit  $1 \leq \psi \leq 10 + 6 \cdot \sqrt{3} \approx 20,4$  begrenzt den praktisch nutzbaren Bereich. Außerhalb dessen liegt für diesen Fall das Maximum von  $P_S$ .

$$\psi^* = \frac{4}{169} \cdot (14 \cdot \sqrt{3} + 9) \approx 0,787$$

$\Rightarrow$

$$P_{G;\psi^*} = \frac{1}{4} \cdot \frac{U^2}{R_1} \quad P_{S;MAX} = P_{S;\psi^*} = \frac{1}{8} \cdot \frac{U^2}{R_1} \quad P_{V;\psi^*} = \frac{1}{8} \cdot \frac{U^2}{R_1}$$

Für ein  $\psi = 1$  ergeben sich folgende Werte:

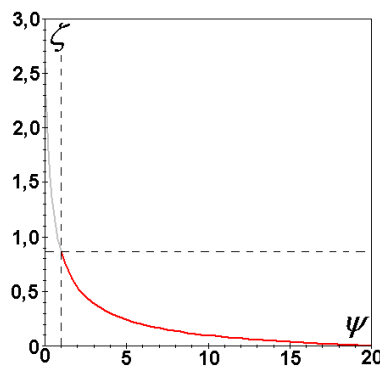
$$P_{G;\psi=1} = 0,232 \cdot \frac{U^2}{R_1} \quad P_{S;\psi=1} = 0,124 \cdot \frac{U^2}{R_1} \quad P_{V;\psi=1} = 0,108 \cdot \frac{U^2}{R_1}$$

Für  $\zeta_{III}$  dann:

$$\zeta_{III} = \frac{1}{2} \cdot \frac{2-\mu}{\mu-1}$$

$\Rightarrow$

$$\zeta_{III;\psi=1} = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{3} \approx 0,866 \quad \zeta_{III;\psi=10+6\cdot\sqrt{3}} = 0$$

Bild X.X: Der Korrekturfaktor  $\zeta_{III}$  grafisch dargestellt.





# Untersuchung der Besonderheiten beim Rollennahtschweißen großer Längen 3D- Elektro – Teil I

Dipl.- Ing. Björnsterne Zindler, M.Sc.

[www.Zenithpoint.de](http://www.Zenithpoint.de)

Erstellt: 23. März 1996 – Letzte Revision: 24. November 2017

## Inhaltsverzeichnis

|   |                       |   |
|---|-----------------------|---|
| 1 | 3DElektro - I, Auszug | 2 |
|---|-----------------------|---|

---

## Literatur

- [002] Dipl.- Ing. Björnsterne Zindler, M.Sc., Untersuchung der Besonderheiten beim Rollennahtschweißen großer Längen, Diplomarbeit, 1996.
-

[002]

# 1 3DElektro - I, Auszug

## Transformation

Für die Transformation des 2D- Modells in 3D wird folgende Grundlage angewandt.

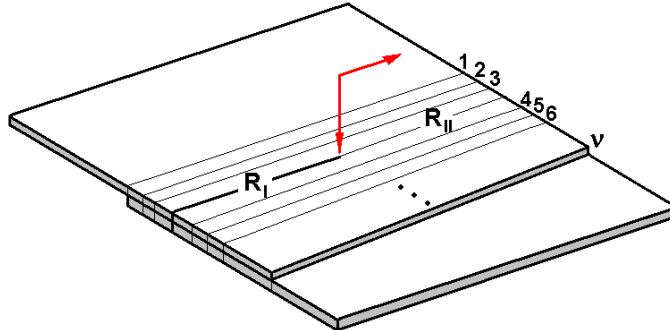


Bild X.X: Zur Transformation von 2D zu 3D.

⇒

$$R_{III}^{(3D)} \begin{cases} = R_I \parallel R_{II} \parallel R_{II}^{(1)} \parallel R_{II}^{(2)} \parallel \dots \parallel R_{II}^{[\nu]} \\ = R_{III} \parallel R_{II}^{(1)} \parallel R_{II}^{(2)} \parallel \dots \parallel R_{II}^{[\nu]} \end{cases}$$

⇒

$$R_{III}^{(3D)} = \frac{1}{\frac{1}{R_I} + \frac{\nu+1}{R_{II}}} = \frac{1}{\frac{1}{R_{III}} + \frac{\nu}{R_{II}}}$$

⇒

$$R_{III}^{(3D)} = \frac{R_{II} \cdot R_{III}}{R_{II} + \nu \cdot R_{III}} = \frac{R_I \cdot R_{II}}{(\nu + 1) \cdot R_I + R_{II}}$$

Mit:

$$\begin{aligned} R_I &= R_1 \cdot (1 + \sqrt{3}) \\ R_{II} &= R_1 \cdot (1 + \sqrt{1 + 2 \cdot \psi}) \\ R_{III} &= R_1 \cdot \mu \end{aligned}$$

Mit:

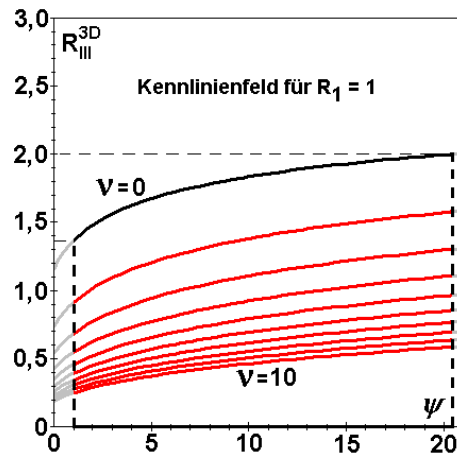
$$\mu = \frac{(1 + \sqrt{3}) \cdot (1 + \sqrt{1 + 2 \cdot \psi})}{2 + \sqrt{3} + \sqrt{1 + 2 \cdot \psi}}$$

Ergibt sich:

$$R_{III}^{(3D)} = R_1 \cdot \frac{(1 + \sqrt{3}) \cdot (1 + \sqrt{1 + 2 \cdot \psi})}{(1 + \nu) \cdot (1 + \sqrt{3}) + 1 + \sqrt{1 + 2 \cdot \psi}}$$

Damit ist ein Kennlinienfeld grafisch darstellbar.

## Grafische Darstellung des Kennlinienfeldes

Bild X.X: Das Kennlinienfeld für  $R_{III}^{(3D)}$ .

Mit den praktischen Grenzen:

$$1 \leq \psi < 10 + 6 \cdot \sqrt{3} \approx 20,4$$

Und:

$$R_1 \cdot \lim_{\nu \rightarrow \infty} \frac{(1 + \sqrt{3}) \cdot (1 + \sqrt{1 + 2 \cdot \psi})}{(1 + \nu) \cdot (1 + \sqrt{3}) + 1 + \sqrt{1 + 2 \cdot \psi}} < R_{III}^{(3D)} \leq$$

$$R_1 \cdot \lim_{\nu \rightarrow 0} \frac{(1 + \sqrt{3}) \cdot (1 + \sqrt{1 + 2 \cdot \psi})}{(1 + \nu) \cdot (1 + \sqrt{3}) + 1 + \sqrt{1 + 2 \cdot \psi}}$$

$\Rightarrow$

$$0 < R_{III}^{(3D)} \leq R_1 \cdot \frac{(1 + \sqrt{3}) \cdot (1 + \sqrt{1 + 2 \cdot \psi})}{2 + \sqrt{3} + \sqrt{1 + 2 \cdot \psi}}$$

$\Rightarrow$

$$0 < R_{III}^{(3D)} \leq R_1 \cdot \mu$$

$\Rightarrow$

$$0 < R_{III}^{(3D)} \leq R_1 \cdot \begin{cases} \lim_{\psi \rightarrow +1} \mu \\ \lim_{\psi \rightarrow 10 + 6 \cdot \sqrt{3}} \mu \end{cases}$$

$\Rightarrow$

$$0 < R_{III}^{(3D)} \leq R_1 \cdot \begin{cases} \approx 1,366 \\ \approx 2,000 \end{cases}$$



# Untersuchung der Besonderheiten beim Rollennahtschweißen großer Längen 3D- Elektro – Teil II

Dipl.- Ing. Björnsterne Zindler, M.Sc.

[www.Zenithpoint.de](http://www.Zenithpoint.de)

Erstellt: 23. März 1996 – Letzte Revision: 2. November 2017

## Inhaltsverzeichnis

|          |                               |          |
|----------|-------------------------------|----------|
| <b>1</b> | <b>3DElektro - II, Auszug</b> | <b>2</b> |
|----------|-------------------------------|----------|

---

## Literatur

- [002] Dipl.- Ing. Björnsterne Zindler, M.Sc., Untersuchung der Besonderheiten beim Rollennahtschweißen großer Längen, Diplomarbeit, 1996.
-

[002]

## 1 3DElektro - II, Auszug

### Anfangswiderstand

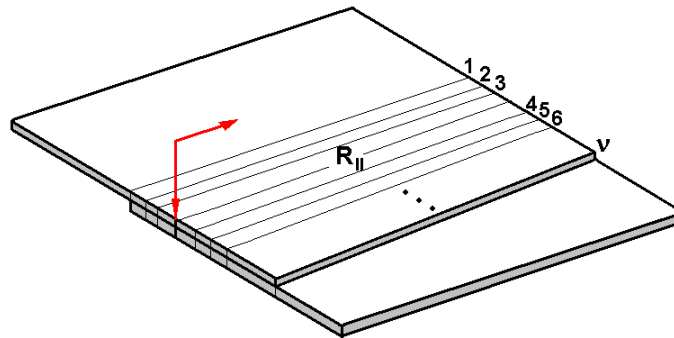


Bild X.X: Modellzustand am Anfang des Schweißvorganges.

Für den wirksamen Widerstand  $R_{III;A}^{(3D)}$  am Anfang des Schweißprozesses gibt es folgende Berechnungsgrundlage.

$$R_{III;A}^{(3D)} = R_{II} \parallel R_{II;1} \parallel R_{II;2} \parallel R_{II;3} \parallel \dots \parallel R_{II;\nu}$$

$\Rightarrow$

$$R_{III;A}^{(3D)} = \frac{1}{\frac{1}{R_{II}} + \frac{\nu}{R_{II}}}$$

$\Rightarrow$

$$R_{III;A}^{(3D)} = \frac{R_{II}}{\nu + 1}$$

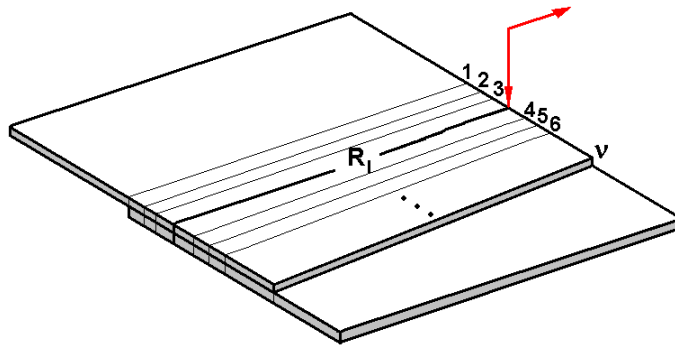
**Endwiderstand**

Bild X.X: Modellzustand am Ende des Schweißvorganges.

Der wirksamen Widerstand  $R_{III;E}^{(3D)}$  am Ende des Schweißprozesses ist definiert über:

$$R_{III;E}^{(3D)} = R_I \parallel R_{II;1} \parallel R_{II;2} \parallel R_{II;3} \parallel \dots \parallel R_{II;\nu}$$

$\Rightarrow$

$$R_{III;E}^{(3D)} = \frac{1}{\frac{1}{R_I} + \frac{\nu}{R_{II}}}$$

$\Rightarrow$

$$R_{III;E}^{(3D)} = \frac{R_I \cdot R_{II}}{\nu \cdot R_I + R_{II}}$$

**Stromflussänderung**

Ist berechenbar durch:

$$\Delta I = \frac{U}{R_{III;E}^{(3D)}} - \frac{U}{R_{III;A}^{(3D)}}$$

$\Rightarrow$

$$\Delta I = U \cdot \frac{R_{II} - R_I}{R_{II} \cdot R_I}$$

$\Rightarrow$

$$\Delta I = \frac{U}{R_1} \cdot \mu^\bullet$$

Dieser Ausdruck ist gleich der Stromflussänderung aus dem 2D- Modell. Beide Modelle sind für  $\Delta I$  qualitativ gleich.

L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X 2<sub>ε</sub>



# Untersuchung der Besonderheiten beim Rollennahtschweißen großer Längen 3D- Leistung

Dipl.- Ing. Björnsterne Zindler, M.Sc.

[www.Zenithpoint.de](http://www.Zenithpoint.de)

Erstellt: 23. März 1996 – Letzte Revision: 10. November 2017

## Inhaltsverzeichnis

|          |                   |          |
|----------|-------------------|----------|
| <b>1</b> | <b>3DLeistung</b> | <b>2</b> |
|----------|-------------------|----------|

---

## Literatur

- [002] Dipl.- Ing. Björnsterne Zindler, M.Sc., Untersuchung der Besonderheiten beim Rollennahtschweißen großer Längen, Diplomarbeit, 1996.
-

## 1 3DLeistung

### Die Basis $\xi$

[002]

Aus vorangegangenen Kapiteln ist die Berechnungsgrundlage für  $R_{III}^{(3D)}$  bekannt.

$$R_{III}^{(3D)}(\nu; \psi) = R_1 \cdot \frac{(1 + \sqrt{3}) \cdot (1 + \sqrt{1 + 2 \cdot \psi})}{(1 + \nu) \cdot (1 + \sqrt{3}) + 1 + \sqrt{1 + 2 \cdot \psi}}$$

Damit lassen sich zwei benachbarte Werte für  $\nu$  darstellen.

$$R_{III}^{(3D)}(\nu; \psi) = R_1 \cdot \frac{(1 + \sqrt{3}) \cdot (1 + \sqrt{1 + 2 \cdot \psi})}{(1 + \nu) \cdot (1 + \sqrt{3}) + 1 + \sqrt{1 + 2 \cdot \psi}}$$

$$R_{III}^{(3D)}(\nu + 1; \psi) = R_1 \cdot \frac{(1 + \sqrt{3}) \cdot (1 + \sqrt{1 + 2 \cdot \psi})}{(2 + \nu) \cdot (1 + \sqrt{3}) + 1 + \sqrt{1 + 2 \cdot \psi}}$$

Ein Verhältnis  $\xi$  ist definiert.

$$\xi = \frac{R_{III}^{(3D)}(\nu; \psi)}{R_{III}^{(3D)}(\nu + 1; \psi)}$$

$\Rightarrow$

$$\xi = \frac{(2 + \nu) \cdot (1 + \sqrt{3}) + 1 + \sqrt{1 + 2 \cdot \psi}}{(1 + \nu) \cdot (1 + \sqrt{3}) + 1 + \sqrt{1 + 2 \cdot \psi}}$$

Für  $\psi$  ist bekannt:

$$1 \leq \psi \leq 10 + 6 \cdot \sqrt{3} \approx 20,392$$

Für  $\nu$  ebenfalls:

$$\nu \geq 0$$

Damit besitzt  $\xi$  Grenzwerte.

$$\frac{3}{2} \leq \xi \leq 1$$

### Die Leistungsverteilung im Blech

Für den Anfang wird eine einfache Berechnungsgrundlage für die Leistungsverteilung  $P_S^{(3D)}$  im Blech ohne weiteren Beweis angenommen.

$$P_S^{(3D)}(n; \nu, \psi) = P_S \cdot \frac{1}{\xi^{2n}}$$

Dem gegenüber steht eine allgemein anerkannte Gleichung aus der Wärmeleitung zur Verfügung, welche  $P_S^{(3D)}$  entlang eines Bleches mit der Hilfe von hyperbolischen Funktionen beschreibt.

$$\tilde{P}_S^{(3D)}(\chi; n; n_{MAX}) = P_S \cdot \frac{\cosh(\chi \cdot (n_{MAX} - n))}{\cosh(\chi \cdot n_{MAX})}$$

Nachteil ist, dass dieser Ausdruck eine endliche (Blech)Länge  $n_{MAX}$  a-priori verlangt und ein Korrekturfaktor  $\chi$ . Für diesen steht eine Proportionalität zur Verfügung.

$$\chi \propto \frac{U}{A}$$

Dabei ist  $U$  der Umfang senkrecht auf die Ebene der Schweißnaht und  $A$  die Stirnfläche der Blechs.

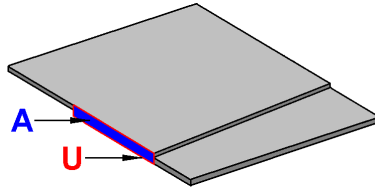


Bild X.X: Zur Verdeutlichung von Umfang und Fläche.

⇒

$$\chi \propto 2 \cdot \frac{D + H}{D \cdot H} = \frac{2}{H} + \frac{2}{D}$$

Wobei für  $H$  die Überlappungsbreite steht und für  $D$  die Gesamtdicke der sich überlappenden Bleche.

Für den Fall, dass  $H \gg D$  gilt  $\frac{2}{H} \ll \frac{2}{D}$  und damit kann  $H$  vernachlässigt werden.

$$\chi_{H \gg D} \propto \frac{2}{D}$$

| $D$ | $\chi_{H \gg D}$ | $D$ | $\chi_{H \gg D}$ |
|-----|------------------|-----|------------------|
| 1   | 2,000            | 6   | 0,333            |
| 2   | 1,000            | 7   | 0,286            |
| 3   | 0,667            | 8   | 0,250            |
| 4   | 0,500            | 9   | 0,223            |
| 5   | 0,400            | 10  | 0,200            |

Tabelle X.X: Ausgewählte Werte für  $\chi_{H \gg D}$  in Abhängigkeit von  $D$ .

Aus seiner Definition wird die Einheit des Korrekturfaktors  $\chi$  mit  $\text{mm}^{-1}$  angegeben.

Verbleibt der Term  $\chi \cdot n_{MAX}$ . Dieser gibt die Lokalisierbarkeit der Schweißlinse  $R_{III}$  an. Kleine Werte von  $\chi \cdot n_{MAX}$  ergeben eine breiten Wärmeeintrag. Große Werte einen „scharfen“ Punkt für  $R_{III}$ .

Die Einheit von  $\chi \cdot n_{MAX}$ . Da dieser Ausdruck das Argument einer Hyperbelfunktion von  $\tilde{P}_S^{(3D)}$  ist, muss gelten:

$$[\chi] \cdot [n_{MAX}] = [1]$$

⇒

$$[\text{mm}^{-1}] \cdot [\text{mm}] = [1]$$

Damit ist die Einheit von  $n_{MAX}$  mit mm festgelegt.

**Bestimmung des Korrekturfaktors  $\nu$** 

Es stehen zwei Berechnungsgrundlagen für den Leistungseintrag beim Schweißen zur Verfügung.

$$P_S^{(3D)}(n; \nu, \psi) \propto \frac{1}{\xi^{2n}} \quad \text{und} \quad \tilde{P}_S^{(3D)}(\chi; n; n_{MAX}) \propto \frac{\cosh(\chi \cdot (n_{MAX} - n))}{\cosh(\chi \cdot n_{MAX})}$$

Mit:

$$\xi = \frac{(2 + \nu) \cdot (1 + \sqrt{3}) + 1 + \sqrt{1 + 2 \cdot \psi}}{(1 + \nu) \cdot (1 + \sqrt{3}) + 1 + \sqrt{1 + 2 \cdot \psi}}$$

Zur Verdeutlichung des weiteren Vorgehens, werden Werte frei gewählt.

$$\nu_{FREI} = 10 \quad \psi_{MESSUNG} = 10 \quad n_{MAX} = 20 \text{ mm} \quad \chi_{D=4\text{mm}} = 0,5 \text{ mm}^{-1}$$

$\Rightarrow$

$$\xi = 1,077$$

Diese Werte werden grafisch veranschaulicht.

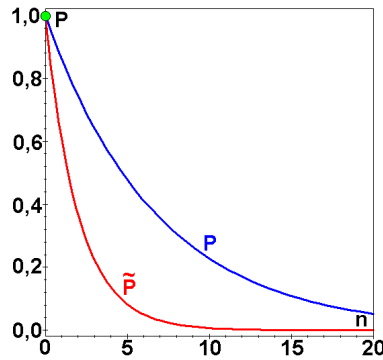


Bild X.X: Die Grafen von  $P_S^{(3D)}$  und  $\tilde{P}_S^{(3D)}$  mit freien Werten veranschaulicht.

Damit beide Grafen minimale Abweichungen voneinander darstellen können, wird folgendes Vorgehen festgelegt:

- Feststellen des Wertes  $n_{MAX}$  an welcher der Leistungseintrag einen bestimmten Wert unterschreiten soll.

$$\tilde{P}_{S;MIN}^{(3D)} = P_S \cdot \frac{\cosh(\chi \cdot (n_{MAX} - n_{MAX}))}{\cosh(\chi \cdot n_{MAX})} = P_S \cdot \frac{1}{\cosh(\chi \cdot n_{MAX})}$$

$\Rightarrow$

$$n_{MAX} = \frac{1}{\chi} \cdot \operatorname{arccosh} \frac{P_S}{\tilde{P}_{S;MIN}^{(3D)}}$$

Für den Wert  $P_S / \tilde{P}_{S;MIN}^{(3D)} = 11.000$ , das heißt, es sind an der Stelle  $n_{MAX}$  nur noch  $> 0,01\%$  Schweißleistung angängig und einem  $\chi = 0,5 \text{ mm}^{-1}$  bei  $D = 4 \text{ mm}$  ergibt sich ein  $n_{MAX}$  von 20 mm.

- Berechnen des Flächenintegrals von  $\tilde{P}_S^{(3D)}$

$$\int \tilde{P}_S^{(3D)} \propto \int_0^1 \frac{\cosh(\chi \cdot (n_{MAX} - n))}{\cosh(\chi \cdot n_{MAX})} \cdot dn$$

Da  $n_{MAX}$  und  $\chi$  bekannt sind, ist das Ergebnis eine konkreter Wert.

- Berechnen des Flächenintegrals von  $P_S^{(3D)}$

$$\int P_S^{(3D)} \propto \int_0^1 \frac{1}{\xi^{2n}} \cdot dn$$

Da der Wert von  $\nu$  noch unbekannt ist, ergibt sich hier ein analytischer Ausdruck.

- Beide Flächenintegrale sind gleichzusetzen und nach  $\psi$  umzustellen.

$$\int \tilde{P}_S^{(3D)} = \int P_S^{(3D)}$$

$\Rightarrow$

$$\psi = A + B \cdot \nu + C \cdot \nu^2$$

Das Ergebnis ist ein Polynom 2. Grades was gelöst werden kann.

$$0 = \frac{A - \psi}{C} + \frac{B}{C} \cdot \nu + \nu^2$$

$\Rightarrow$

$$\nu_{1,2} = -\frac{B}{2 \cdot C} \pm \frac{1}{2 \cdot C} \cdot \sqrt{B^2 - 4 \cdot A \cdot C + 4 \cdot \psi \cdot C}$$

Damit ist  $\nu$  errechnet.

Für vorliegendes Beispiel ergibt sich:

$$\int \tilde{P}_S^{(3D)} \propto \int_0^1 \frac{\cosh(0,5 \cdot (100 - n))}{\cosh(0,5 \cdot 100)} \cdot dn = 0,787$$

Sowie:

$$10 = \psi = 16,828 - 16,084 \cdot \nu + 3,732 \cdot \nu^2$$

$\Rightarrow$

$$0 = 1,830 - 4,310 \cdot \nu + \nu^2$$

$\Rightarrow$

$$\nu_1 = 0,477 \quad \nu_2 = 3,832$$

Die grafische Darstellung des Berechnungsergebnisses von  $\nu$  ergibt die Wahl für  $\nu = 0,477$ .

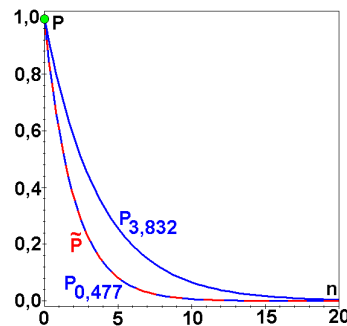


Bild X.X: Das Ergebnis der Berechnung von  $\nu$ .

Mittels geeigneter Technik kann nun das 3D- Abbild generiert und somit der Leistungs- bzw. Wärmeeintrag sichtbar gemacht werden.

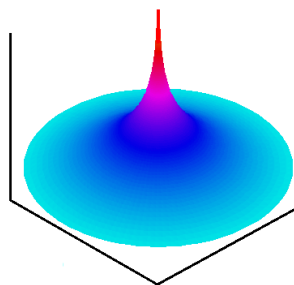


Bild X.X: Die Leistungsverteilung im Schweißpunkt.

Weiterhin kann das vorangehend entwickelte Kennlinienfeld vervollständigt werden für vorliegendes Beispiel.

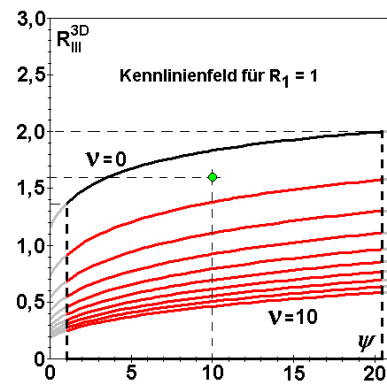


Bild X.X: Das vervollständigte Kennlinienfeld für vorliegendes Beispiel.

$\LaTeX 2_{\epsilon}$

# Untersuchung der Besonderheiten beim Rollennahtschweißen großer Längen 3D- Leistung – Wunsch

Dipl.- Ing. Björnsterne Zindler, M.Sc.

[www.Zenithpoint.de](http://www.Zenithpoint.de)

Erstellt: 23. März 1996 – Letzte Revision: 24. November 2017

## Inhaltsverzeichnis

|          |                                                        |          |
|----------|--------------------------------------------------------|----------|
| <b>1</b> | <b>Ersatzfunktion für <math>P_S</math> nach Wunsch</b> | <b>2</b> |
|----------|--------------------------------------------------------|----------|

---

## Literatur

- [002] Dipl.- Ing. Björnsterne Zindler, M.Sc., Untersuchung der Besonderheiten beim Rollennahtschweißen großer Längen, Diplomarbeit, 1996.
-

[002]

## 1 Ersatzfunktion für $P_S$ nach Wunsch

Professor Gerhard Wunsch beschreibt in Band 2 „Feldtheorie - Elektromagnetische Felder“ eine Funktion  $F$ , welche die Ermittlung von  $n_{MAX}$  für  $P_S$  unnötig macht. Die Beschreibung zur Berechnung der Verlustleistung, respektive der Wärmeentwicklung in dünnen Blechen lässt sich für vorliegende Aufgabenstellung nutzen unter der Annahme, dass sich nicht die Blechdicke ändert, sondern der betrachtete Abstand zum Schweißpunkt.

$$\tilde{P}_S^{(3D)}(n; \chi) \propto F(n; \chi)$$

Mit:

$$F(n; \chi) = 3 \cdot \frac{\chi^2}{n^2} \cdot \frac{\sinh \frac{n^2}{\chi^2} - \sin \frac{n^2}{\chi^2}}{\cosh \frac{n^2}{\chi^2} - \cos \frac{n^2}{\chi^2}}$$

Für eine Abschätzung der Leistungsverteilung ist diese Berechnungsgrundlage ausreichend, sie besitzt jedoch in  $n = 0$  eine nichtdefinierte Stelle und für Werte von  $n < 1$  ein ungünstiges Abstiegsverhalten. Bei schon im vornherein kleinen Beträgen von  $\nu$  verschiebt sich daher dann  $\nu$  in negative Werte.

Folgendes Vorgehen wird festgelegt.

- Berechnung des ersten Flächenintegrals nach Wunsch für ein beliebiges aber genügend großes  $n$ .

$$\int \tilde{P}_S^{(3D)} \propto 3 \cdot \chi^2 \cdot \int_0^{100} \frac{1}{n^2} \cdot \frac{\sinh \frac{n^2}{\chi^2} - \sin \frac{n^2}{\chi^2}}{\cosh \frac{n^2}{\chi^2} - \cos \frac{n^2}{\chi^2}} \cdot dn$$

Da  $\chi$  bekannt ist, wird das Ergebnis ein konkreter Wert sein.

- Berechnung des Flächenintegrals von  $P_S^{(3D)}$  mit den gleichen, obigen Grenzen.

$$\int P_S^{(3D)} \propto \int_0^{100} \frac{1}{\xi^{2n}} \cdot dn$$

Da der Wert von  $\xi$  noch unbekannt ist, wird ein analytischer Wert erwartet.

- Beide Flächenintegrale werden gleichgesetzt und nach  $\xi$  aufgelöst. Der zu erwartende Ausdruck ist eine LambertW- Funktion. Diese ist mit geeigneten Mitteln zu lösen.
- Ein weiterer Schritt wäre das (Neu)Ermitteln von  $\nu$ . Jedoch ist das aus genannten Gründen nicht immer sinnvoll. Die Funktion  $F$  nach Wunsch ist nur als Näherung und für die Elimination von  $n_{MAX}$  gedacht.

Für vorliegendes Beispiel ergibt sich:

$$\nu = 0,477 \quad \psi_{\text{MESSUNG}} = 10 \quad \chi_{D=4\text{mm}} = 0,5\text{mm}^{-1}$$

$\Rightarrow$

$$\xi_{\text{ERWARTET}} = 1,284$$

Das erste Flächenintegral:

$$\int_0^{100} \tilde{P}_S^{(3D)} = 1,585$$

Das andere Flächenintegral:

$$\int_0^{100} P_S^{(3D)} = \frac{1 - \xi^{-200}}{2 \cdot \ln \xi}$$

Beides gleichgesetzt und nach  $\xi$  aufgelöst ergibt:

$$\xi = 1,371$$



Mit

$$\xi = \frac{(2 + \nu) \cdot (1 + \sqrt{3}) + 1 + \sqrt{1 + 2 \cdot \psi}}{(1 + \nu) \cdot (1 + \sqrt{3}) + 1 + \sqrt{1 + 2 \cdot \psi}}$$

kann der Wert von  $\nu$  neu ermittelt werden. Für ein  $\psi = 10$  ergibt sich:

$$\nu = -0,348$$

Der Wert ist negativ und so<sup>1</sup> nicht brauchbar. Es wird daher<sup>2</sup> festgelegt:

$$\nu = 0$$

Zum Schluss die grafische Darstellung beider Grafen.

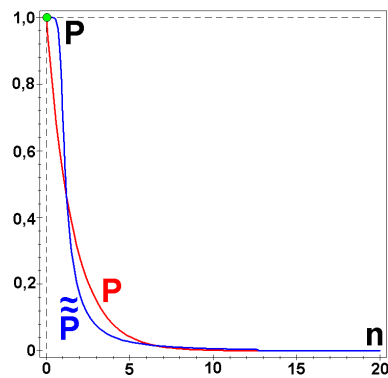


Bild X.X: Die Leistungsverteilungen  $P_S^{(3D)}$  und  $\tilde{P}_S^{(3D)}$  grafisch dargestellt.

Das Kennlinienfeld für die neuen Parameter.

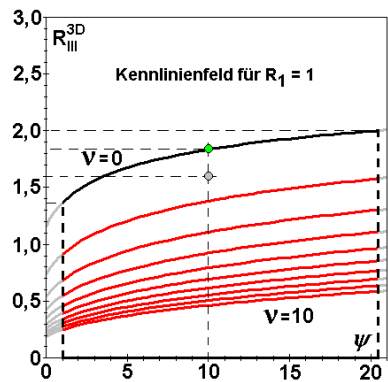


Bild X.X: Das Kennlinienfeld mit den neuen Parametern.

L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X 2<sub>ε</sub>

---

<sup>1</sup> ... hier noch ...

<sup>2</sup> ... hier noch ...



# Untersuchung der Besonderheiten beim Rollennahtschweißen großer Längen Impedanz

Dipl.- Ing. Björnsterne Zindler, M.Sc.

[www.Zenithpoint.de](http://www.Zenithpoint.de)

Erstellt: 23. März 1996 – Letzte Revision: 16. November 2017

## Inhaltsverzeichnis

|          |                 |          |
|----------|-----------------|----------|
| <b>1</b> | <b>Impedanz</b> | <b>2</b> |
|----------|-----------------|----------|

---

## Literatur

- [002] Dipl.- Ing. Björnsterne Zindler, M.Sc., Untersuchung der Besonderheiten beim Rollennahtschweißen großer Längen, Diplomarbeit, 1996.
-

[002]

# 1 Impedanz

## 7. Wärme im Sekundärkreis

### 7.1 Entstehung

Wärme in der Maschine, speziell im Sekundärkreis, stellt ein Verlust dar, welcher durch vermehrte Energiezufuhr im Primärstromkreis kompensiert werden muss.

Grundsätzlich müssen zwei „Verbraucher“ auf der Sekundärseite betrachtet werden:

- Ohmsche Lasten  $R$
- Induktive Lasten  $X_L$

Die ohmsche Last setzt sich aus Stoff- und Kontaktwiderstand zusammen und lassen sich in Größenordnungen gut beherrschen.

Die induktiven Lasten stellen einen unerwünschten Nebeneffekt dar, der schlecht zu beherrschen und zu beschreiben ist. Im Allgemeinen stellt der Sekundärstromkreis eine Spule mit einer Windung, jedoch enormer induktiv wirksamer Fläche dar. Die Ströme und Frequenzen, welche beim Widerstandsschweißen gewöhnlich auftreten, tragen dann zu den Verlusten bei, die nicht mehr zu vernachlässigen sind. Einerseits durch den Mehrverbrauch an elektrischer Energie, andererseits durch die Maßnahmen für die Kühlung bis hin zu Produktionsstillständen in erzwungenen Abkühlpausen der Maschine.

## 7. 2 Physikalische Struktur der Sekundärimpedanz

Letztendlich fallen die Wärmeverluste an den oben beschriebenen Lasten an. Daher ist es sinnvoll diese kurz physikalisch zu betrachten.

Will man alle relevanten ohmschen und induktiven Lasten zusammenfassen und ein Ersatzschaltbild nutzen, so ergibt sich eine Reihenschaltung beider Lasten.



Bild 7.1: Ersatzschaltbild der Sekundärimpedanz.

Die Berechnungsgrundlage für den effektiv wirksamen Widerstand  $Z$ :

$$\underline{Z} = R + j \cdot X_L = R + j \cdot \omega \cdot L$$

$\Rightarrow$

$$Z = \sqrt{R^2 + (\omega \cdot L)^2}$$

Da der Wert für  $L$  hier unbekannt ist, wird er ersetzt.

$$U = L \cdot \frac{dI}{dt}$$

$\Rightarrow$

$$Z = \sqrt{R^2 + \left( \omega \cdot U \cdot \frac{dt}{dI} \right)^2}$$

Ziel ist es, die Impedanz  $Z$  rein ohmsch  $Z = R$  werden zu lassen.

### 7.3 Elimination der induktiven Last

#### 7.3.1 Theoretische Bedingungen

Das Ziel, die Verringerung der Verluste und somit letztendlich der Wärme erfolgt über das Eliminieren der induktiven Last.

Im Optimalfall muss dann gelten:

$$X_L = j \cdot \omega \cdot L = 0$$

$\Rightarrow$

$$\omega \cdot U \cdot \frac{dt}{dI} = 2\pi \cdot f \cdot U \cdot \frac{dt}{dI} = 0$$

| Physikalische Größe | Praktische Bedeutung | Realisierbarkeit         |
|---------------------|----------------------|--------------------------|
| $f = 0$             | Schweißfrequenz      | Gleichspannungsschweißen |
| $U = 0$             | Schweißspannung      | nicht möglich            |
| $dt = 0$            | Wellenform           | gut beeinflussbar        |
| $dI \approx \infty$ | Schweißstrom         | begrenzt möglich         |

#### 7.3.2 Praktische Bedeutung

Für die physikalischen Größen  $dt$  und  $dI$  sind enge technologische Grenzen gesetzt. Dadurch fällt die Mehrzahl der interessanten Wellenformen als Möglichkeit heraus. Grundsätzlich technologisch bleiben nur zwei Wellenformen als Option:

- sinusähnliche Wellenformen
- rechteckähnliche Wellenformen

#### 7. 4 Schweißstromquellen unter dem Gesichtspunkt der Impedanzverlustminimierung

In diesem Abschnitt werden die wichtigsten Schweißstromquellen für das Rollennahtschweißen kurz beschrieben.

Aus der ingenieurwissenschaftlichen Literatur sind Rollenschweißmaschinen mit unterschiedlichen Schweißstromquellen unter Verwendung verschiedener Stromarten bekannt.

- Gleichstrom (DC)
- Mischstrom (DC + AC)
- Mittelfrequenter Wechselstrom (MF)
- Hochfrequenter Wechselstrom (HF)
- Niederfrequenter, rechteckförmiger Wechselstrom (LF)

##### 7. 4. 1 Gleichstrom

- Vorteile:
  - praktisch keine Wirbelstrom- und Hysteresisverluste in der Schweißmaschine
- Nachteile:
  - erhöhte Gefahr der Lichtbogenbildung
  - hohe Stromventilverluste
  - technologische Schwierigkeiten der Nahtqualität

##### 7. 4. 2 Mischstrom

Der Grundgedanke besteht darin, einen Gleichstrom über die Elektroden zu leiten, der das Schweißgut bis unterhalb seines Schmelzpunktes erhitzt. Dem Gleichstrom wird ein Wechselstrom überlagert, dieser kann rechteck- oder sinusförmig sein. Wesentlich dabei ist, dass der AC- Effektivwert maximal 30% vom Gesamteffektivwert des Schweißstroms beträgt.

##### 7. 4. 3 Mittelfrequenter Wechselstrom

Ausgangspunkt für die Entwicklung der Schweißstromquellen war die Forderung nach höheren Schweißgeschwindigkeiten. Mit netzfrequentem Wechselstrom sind je nach Qualitätsansprüchen an die Schweißnaht nur maximal 6 bis 10 m/Minute erreichbar. Hauptnachteil der Verwendung von MF- Strom sind die hohen Wirbelstromverluste in der Maschine.

Weitere Eigenschaften lassen sich nur unter der Berücksichtigung der konkreten MF- Stromquelle ableiten. Entsprechend der praktischen Bedeutung kommen rotatorische bzw. statische Umrichter in Frage. Frequenzvervielfacher auf magnetischem Funktionsprinzip spielen heute keine Rolle mehr.

##### 7. 4. 4 Hochfrequenter Wechselstrom

Der HF- Strom hat für das Rollennahtschweißen (noch) keine praktische Bedeutung.

Die obere nutzbare Frequenz des Schweißstromes wird von folgenden Faktoren bestimmt:

- Wirbelstrom- und Hysteresisverluste in der Schweißmaschine
- Blindleistungsbedarf im Lastkreis
- Gesamtwirkungsgrad der Schweißmaschine

Durch den Einsatz von speziellen Schweißtransformatoren, welche unmittelbar auf der Elektrodenwelle angeordnet sind und mit dieser rotieren, lässt sich die obere Frequenzgrenze erhöhen. Praktisch sind mit dieser Maßnahme Frequenzen bis 5kHz beherrschbar. Näheres ist unter Patentnummer (BRD) 2406693 , Anmeldetag 13.02.1974 zu finden.

Der Einsatz dieser Technik bringt Nachteile mit sich:

- teurer Spezialtransformator mit hohem Übersetzungsverhältnis
- Verwendung geteilter, einseitiger Rollenelektroden.

#### **7. 4. 5 Rechteckförmiger Wechselstrom**

Der Hauptnachteil des MF- Schweißstromes besteht in der Erzeugung hoher  $dI/dt$ - Werte während der Reversierphase des Stromes in der induktiven Last. Die induktive Zeitkonstante praktisch realisierter Rollennahtschweißanlagen liegt bei etwa 0,7 bis 1,5ms. Für die maximale Schweißgeschwindigkeit von 60m/Minute muss die Zeitdauer für einen Reversiervorgang deutlich unter 1ms liegen, damit keine Wärmeeinbrüche im Nahtverlauf entstehen.

In der Literatur sind viele Veröffentlichungen zu diesem Problem zu finden. Leider sind die meisten der aufgezeigten Lösungsvorschläge nicht praktikabel. Für weitergehende Informationen sei auf die Dissertation von Thomas Klärner „Mittel- und Niederfrequenztechnik für das Rollennahtschweißen bei dünnen Blechen“ hingewiesen, sowie die dort enthaltenen Literaturempfehlungen.

L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X 2<sub>ε</sub>



# Untersuchung der Besonderheiten beim Rollennahtschweißen großer Längen Impedanz – Wunsch

Dipl.- Ing. Björnsterne Zindler, M.Sc.

[www.Zenithpoint.de](http://www.Zenithpoint.de)

Erstellt: 23. März 1996 – Letzte Revision: 24. November 2017

## Inhaltsverzeichnis

|          |                                                    |          |
|----------|----------------------------------------------------|----------|
| <b>1</b> | <b>Ersatzfunktion für die Impedanz nach Wunsch</b> | <b>2</b> |
|----------|----------------------------------------------------|----------|

---

## Literatur

- [002] Dipl.- Ing. Björnsterne Zindler, M.Sc., Untersuchung der Besonderheiten beim Rollennahtschweißen großer Längen, Diplomarbeit, 1996.
-

[002]

## 1 Ersatzfunktion für die Impedanz nach Wunsch

Professor Gerhard Wunsch beschreibt in Band 2 „Feldtheorie – Elektromagnetische Felder“ zwei Funktionen  $F_1$  und  $F_2$ , welche die Ermittlung der Leistungsverteilung unter Einfluss der Impedanz ohne die Ermittlung von  $n_{MAX}$  ermöglicht. Die Beschreibung zur Berechnung der Verlustleistung, respektive der Wärmeentwicklung in dünnen Blechen lässt sich für vorliegende Aufgabenstellung nutzen unter der Annahme, dass sich nicht die Blechdicke ändert, sondern der betrachtete Abstand zum Schweißpunkt.

$$\tilde{P}_S^{(3D)}(n; \chi) \propto F_1(n; \chi) \quad Q_S^{(3D)}(n; \chi) \propto F_2(n; \chi)$$

Mit:

$$F_1(n; \chi) = \frac{\chi^2}{n^2} \cdot \frac{\sinh \frac{n^2}{\chi^2} - \sin \frac{n^2}{\chi^2}}{\cosh \frac{n^2}{\chi^2} + \cos \frac{n^2}{\chi^2}} \quad F_2(n; \chi) = \frac{1}{2} \cdot \frac{\chi^2}{n^2} \cdot \frac{\sinh \frac{n^2}{\chi^2} + \sin \frac{n^2}{\chi^2}}{\cosh \frac{n^2}{\chi^2}}$$

Wobei die Wirkleistung  $P$  der Realteil und die Blindleistung  $Q$  der Imaginärteil der komplexen Scheinleistung  $S$  ist.

Daher gilt für den Betrag der Scheinleistung  $S$ :

$$S^{(3D)} = \sqrt{\tilde{P}_S^{(3D)^2} + Q_S^{(3D)^2}}$$

Die folgende grafische Abbildung beinhaltet die Grafen von  $S^{(3D)}$  und  $\tilde{P}_S^{(3D)}$ , sowie von  $P_S^{(3D)}$  mit dem Wert  $\xi = 1,371$ .

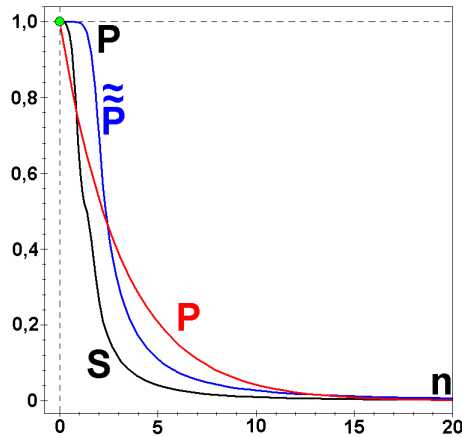


Bild X.X: Die ermittelten Leistungen  $S^{(3D)}$ ,  $\tilde{P}_S^{(3D)}$ ,  $P_S^{(3D)}$  grafisch dargestellt.

Eine Neuberechnung von  $\xi$  für eine minimale Abweichung zwischen  $P_S^{(3D)}$  und  $S^{(3D)}$  kann nach der Festlegung „3D- Leistung - Wunsch“ erfolgen. Der dann ermittelte Wert für  $\xi$ :

$$\xi = 1,713$$

Dieser Wert liegt jedoch außerhalb der Festlegung des Definitionsbereiches für  $\xi$  von:

$$\frac{3}{2} \leq \xi \leq 1$$

Der Grund ist, dass diese Festlegung auf der Annahme beruht, dass  $\xi$  in einem verlustfreien System wirkt. Für den Fall, dass ein Verlust infolge einer Induktivität vorliegt, gilt für  $\tilde{\xi}$ :

$$\tilde{\xi} > \frac{3}{2}$$

Für diese Werte wird  $\nu$  negativ. Der minimal zulässige negative Wert ist dann erreicht, wenn die Funktion  $\nu$  eine Polstelle erreicht und somit keine praktisch nutzbaren Werte mehr darstellt.

Dieser Fall wäre dann, wenn:

$$(1 + \nu) \cdot (1 + \sqrt{3}) + 1 + \sqrt{1 + 2 \cdot \psi} = 0$$

$\Rightarrow$

$$\nu = -\frac{2 + \sqrt{3} + \sqrt{1 + 2 \cdot \psi}}{1 + \sqrt{3}}$$

Für gegebenes Intervall von  $\psi$  ist berechenbar:

$$1 \leq \psi \leq 10 + 6 \cdot \sqrt{3} \approx 20,392$$

$\Rightarrow$

$$-2 \leq \nu_{MIN} \leq -\frac{5 + 3 \cdot \sqrt{3}}{1 + \sqrt{3}} \approx -3,732$$

Das Ziel des Schweißvorganges ist es, den Kontaktwiderstand durch einen Stoffwiderstand zu ersetzen. Bedeutet hier die Forderung, dass der Graf von  $\nu$  den von  $\psi = 1$  schneiden muss. Damit ist  $\nu_{MIN}$  definiert.

$$\nu_{MIN} > -2$$

Jetzt kann vorliegendes Kennlinienfeld vervollständigt werden.

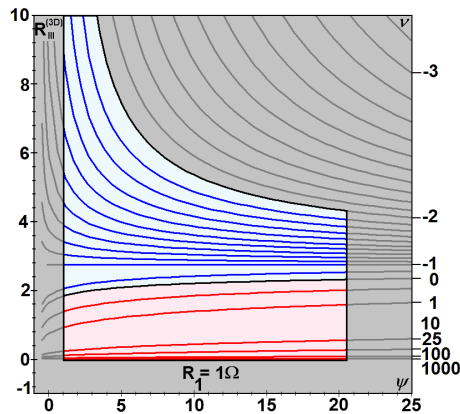


Bild X.X: Erweitertes Kennlinienfeld.

**Rot** = rein ohmsch, **Blau** = zusätzlich induktivitätsbelastet.



# Untersuchung der Besonderheiten beim Rollennahtschweißen großer Längen

## Anhang

Dipl.- Ing. Björnsterne Zindler, M.Sc.

[www.Zenithpoint.de](http://www.Zenithpoint.de)

Erstellt: 23. März 1996 – Letzte Revision: 25. November 2017

### Inhaltsverzeichnis

|          |                                                                                                                   |          |
|----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|
| <b>1</b> | <b>Zusammenfassung der wichtigsten Faktoren zur Ermittlung des <math>R_{III}^{(3D)}</math> - Kennlinienfeldes</b> | <b>2</b> |
| 1.1      | $\psi$ . . . . .                                                                                                  | 2        |
| 1.2      | $\mu$ . . . . .                                                                                                   | 2        |
| 1.3      | $\mu^\bullet$ . . . . .                                                                                           | 2        |
| 1.4      | $\mu^{\bullet\bullet}$ . . . . .                                                                                  | 2        |
| 1.5      | $\varsigma_{II}$ . . . . .                                                                                        | 2        |
| 1.6      | $\varsigma_{III}$ . . . . .                                                                                       | 3        |
| 1.7      | $\nu$ . . . . .                                                                                                   | 3        |
| 1.8      | $\xi$ . . . . .                                                                                                   | 3        |
| <b>2</b> | <b>Das <math>R_{III}^{(3D)}</math> - Kennlinienfeld und deren Derivate</b>                                        | <b>4</b> |
| 2.1      | $R$ . . . . .                                                                                                     | 4        |
| 2.2      | $I$ und $P$ . . . . .                                                                                             | 5        |
| 2.3      | $\Delta I$ . . . . .                                                                                              | 6        |

---

### Literatur

[002] Dipl.- Ing. Björnsterne Zindler, M.Sc., Untersuchung der Besonderheiten beim Rollennahtschweißen großer Längen, Diplomarbeit, 1996.

---

## 1 Zusammenfassung der wichtigsten Faktoren zur Ermittlung des $R_{III}^{(3D)}$ - Kennlinienfeldes

[002]

### 1.1 $\psi$

Der Verhältnissfaktor  $\psi$  beschreibt den Quotienten aus Kontakt-  $R_2$  und Stoffwiderstand  $R_1$  der zu verschweißenden Bleche an der Bearbeitungsstelle.

$$\psi = \frac{R_2}{R_1}$$

$\Rightarrow$

$$0 \leq \psi \leq 10 + 6 \cdot \sqrt{3} \approx 20,4$$

### 1.2 $\mu$

Der Korrekturfaktor  $\mu$  beschreibt das Verhältnis des Widerstandes  $R_{III}^{(2D)}$  in der Schweißlinse zum Stoffwiderstand  $R_1$  im 2D- Modell.

$$\mu = \frac{R_{III}^{(2D)}}{R_1}$$

$\Rightarrow$

$$\mu = \frac{(1 + \sqrt{3}) \cdot (1 + \sqrt{1 + 2 \cdot \psi})}{2 + \sqrt{3} + \sqrt{1 + 2 \cdot \psi}}$$

$\Rightarrow$

$$1,366 \approx \frac{1}{2} \cdot (1 + \sqrt{3}) \leq \mu \leq 1 + \sqrt{3} \approx 2,732$$

### 1.3 $\mu^\bullet$

Beschreibt als Korrekturfaktor die Stromflussänderung während des Schweißprozesses von „vollständig unverschweißt“ zu „vollständig verbunden“.

$$\mu^\bullet = \frac{\sqrt{1 + 2 \cdot \psi} - \sqrt{3}}{(1 + \sqrt{3}) \cdot (1 + \sqrt{1 + 2 \cdot \psi})}$$

$\Rightarrow$

$$0 \leq \mu^\bullet < \frac{1}{1 + \sqrt{3}} \approx 0,366$$

### 1.4 $\mu^{\bullet\bullet}$

Der Korrekturfaktor  $\mu^{\bullet\bullet}$  beschreibt das Verhältnis des Widerstandes  $R_{III}^{(3D)}$  in der Schweißlinse zum Stoffwiderstand  $R_1$  im 3D- Modell.

$$\mu^{\bullet\bullet} = \frac{R_{III}^{(3D)}}{R_1}$$

$\Rightarrow$

$$1,366 \approx \frac{1}{2} \cdot (1 + \sqrt{3}) \leq \mu \leq 2$$

### 1.5 $\varsigma_{II}$

Der Bilanzfaktor  $\varsigma_{II}$  beschreibt das Verhältnis von Verlust-  $P_V$  und Schweißleistung  $P_S$  für das 2D- Modell.

$$\varsigma_{II} = \frac{P_V^{(2D)}}{P_S^{(2D)}}$$

$\Rightarrow$

$$\varsigma_{II} = \frac{2}{\sqrt{1 + 2 \cdot \psi} - 1}$$

$\Rightarrow$

$$0 < \varsigma_{II} \leq \frac{2}{\sqrt{3} - 1} \approx 2,732$$

## 1.6 $\varsigma_{III}$

Der Bilanzfaktor  $\varsigma_{III}$  beschreibt das Verhältnis von Verlust-  $P_V$  und Schweißleistung  $P_S$  für das 3D- Modell.

$$\varsigma_{III} = \frac{P_V^{(3D)}}{P_S^{(3D)}}$$

$\Rightarrow$

$$\varsigma_{III} = \frac{1}{2} \cdot \frac{2 - \mu}{\mu - 1}$$

$\Rightarrow$

$$0 < \varsigma_{III} \leq \frac{1}{2} \cdot \sqrt{3} \approx 0,866$$

## 1.7 $\nu$

Anzahl der Widerstandsmatten parallel zur Schweißnaht im 3D- Modell

$$0 \leq \nu \quad \rightarrow \quad \text{rein ohmsche Last}$$

$$-2 < \nu < 0 \quad \rightarrow \quad \text{zusätzlich induktive Last}$$

## 1.8 $\xi$

Der Leistungsfaktor beschreibt das Verhältnis der Leistungsverteilung zweier benachbarter Widerstandsmatten. Sie ist Basis der Leistungsbeschreibung in der Schweißlinse.

$$\xi = \frac{(2 + \nu) \cdot (1 + \sqrt{3}) + 1 + \sqrt{1 + 2 \cdot \psi}}{(1 + \nu) \cdot (1 + \sqrt{3}) + 1 + \sqrt{1 + 2 \cdot \psi}}$$

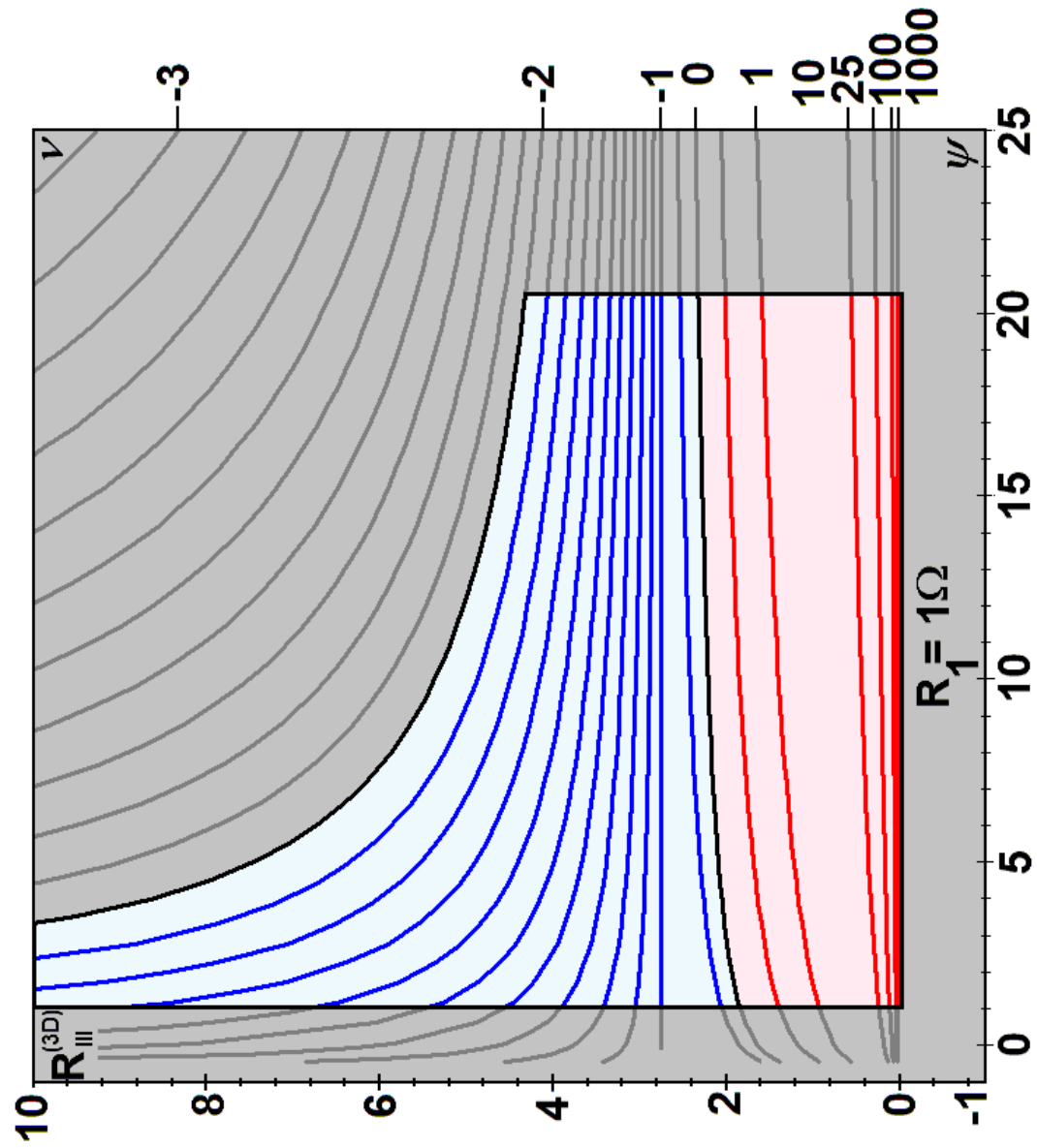
$\Rightarrow$

$$1,5 \geq \xi \geq 1 \quad \rightarrow \quad \text{rein ohmsche Last}$$

$$1,5 < \xi \quad \rightarrow \quad \text{zusätzlich induktive Last}$$

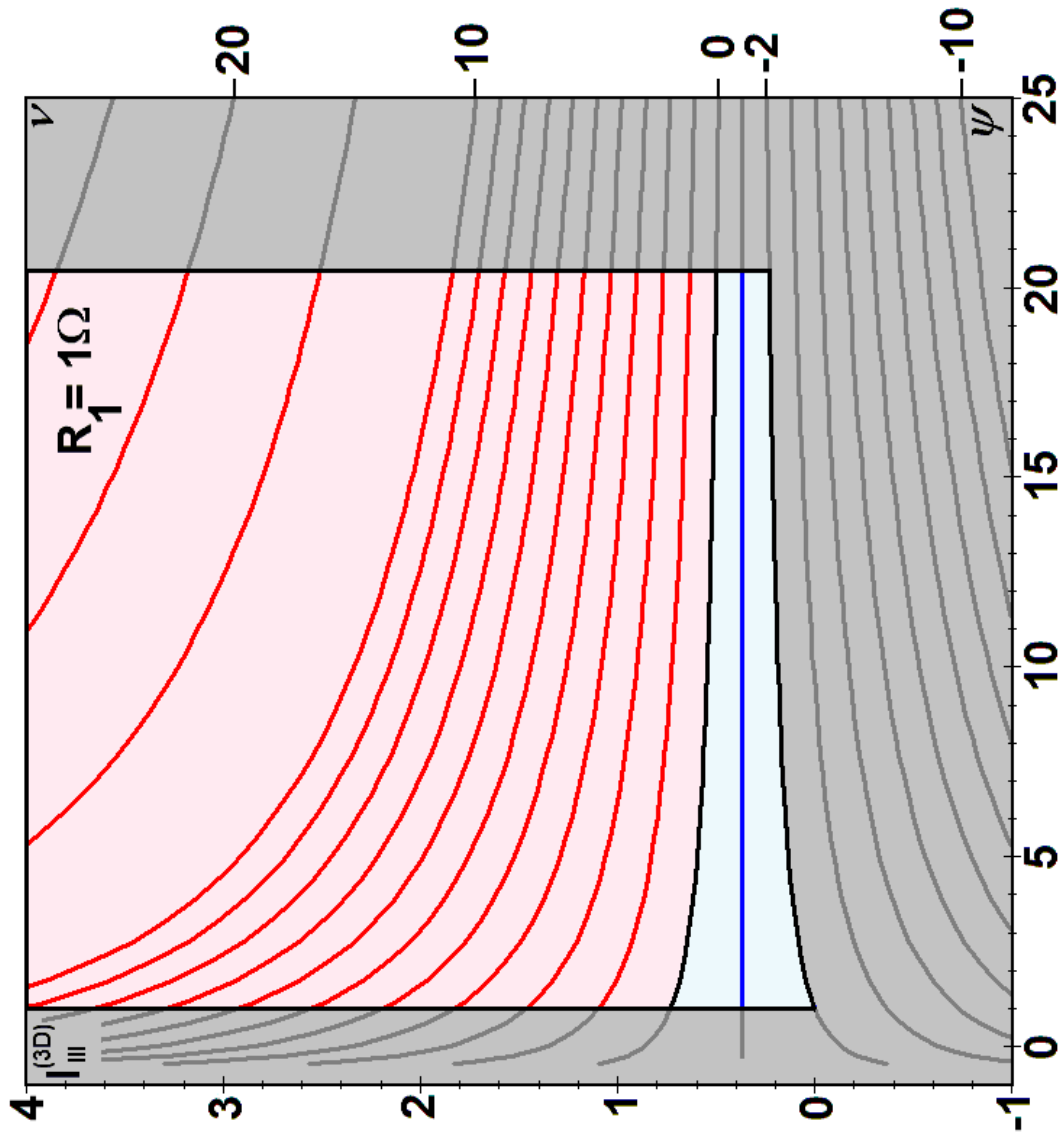
## 2 Das $R_{III}^{(3D)}$ - Kennlinienfeld und deren Derivate

### 2.1 $R$





## 2.2 $I$ und $P$



### 2.3 $\Delta I$

