

7. Wärme im Sekundärkreis

/9/

7.1 Entstehung

Wärme in der Maschine, speziell in unserem betrachteten Fall im Sekundärkreis, stellt immer ein Verlust dar, der durch vermehrte Energiezuführung im Primärstromkreis ausgeführt werden muß.

Grundsätzlich müssen zwei „Verbraucher“ in der Sekundären betrachtet werden:

- ohmsche Lasten „R“
- induktive Lasten „X_L“

Die ohmschen Lasten setzen sich aus Stoff- und Kontaktwiderstände zusammen, lassen sich in dessen Größenordnungen gut beherrschen, jedoch nicht auf Null bringen.

Die induktiven Lasten stellen einen unerwünschten Nebeneffekt dar, die schlecht zu beherrschen und in deren Größenordnungen schwer zu beschreiben sind. Im allgemeinen stellt der Sekundärstromkreis eine Spule mit einer Windung aber enormer induktiver Fläche dar. Die Ströme und Frequenzen, die beim Widerstandsschweißen gewöhnlich auftreten, tragen dann zu den Verlusten bei, die nicht mehr vernachlässigbar 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 obig beschriebenen Lasten an. Daher ist es sinnvoll diese zu betrachten.

Summiert man alle rein ohmschen und induktiven Lasten und bildet das Ersatzschaltbild, so ergibt sich eine Reihenschaltung beider Lasten.

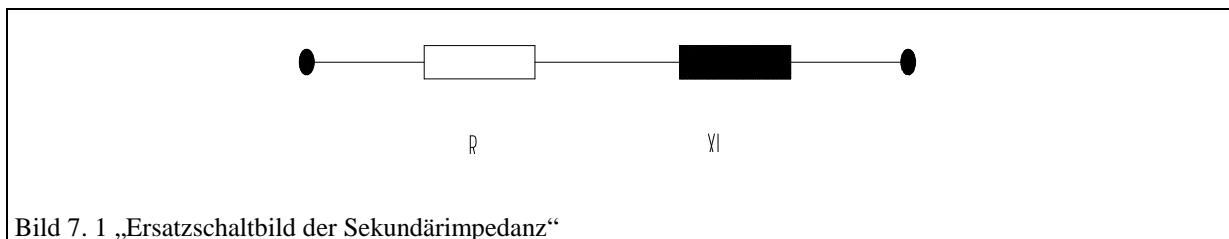


Bild 7.1 „Ersatzschaltbild der Sekundärimpedanz“

Die Berechnungsgrundlage für den effektiv wirksamen Widerstand ergibt sich:

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}$$

⇒

$$Z^2 = R^2 + X_L^2$$

X_L^2 kann ersetzt werden:

$$Z^2 = R^2 + [\omega L]^2$$

ω bildet den Ausdruck:

$$Z^2 = R^2 + [2\pi f L]^2$$

Da L unbekannt ist, dessen Ermittlung unter praktischen Bedingungen schwierig ist, soll dieser Wert ebenfalls ersetzt werden. Grundlage bildet die Berechnung der Induktionsspannung in einer Spule:

$$U_{\text{Ind}} = L * \frac{dI}{dt}$$

Umgestellt ergibt sich:

$$L = U_{\text{Ind}} * \frac{dt}{dI}$$

Es werden beide Gleichungen verknüpft:

$$Z^2 = R^2 + \left[2\pi f U_{\text{Ind}} \frac{dt}{dI} \right]^2$$

Dieser Ausdruck soll nun als Arbeitsgleichung dienen.

7.3 *Elimination der induktiven Last*

7.3.1 *Theoretische Bedingungen*

Ziel bei der Verringerung der Verluste und somit letztendlich der Wärme, ist es die induktive Last auszuschalten.

Es ergibt sich dann der Optimalfall:

$$X_L^2 = 0$$

⇒

$$Z = R$$

Das bedeutet, daß der Ausdruck $2\pi f U_{\text{Ind}} \frac{dt}{dI} = 0$ sein soll. Möglichkeiten um dies zu erreichen sind:

$f = 0$	Bedeutet Nutzung von Gleichstrom.
$U_{\text{Ind}} = 0$	Praktisch nicht realisierbar.
$\frac{dt}{dI} = 0$	Hier liegt der Ansatz für die Bedingung $Z = R$.

Mit dem Ausdruck $\frac{dt}{dI} = 0$ lässt sich keine Aussage erreichen, jedoch mit:

$$\frac{dI}{dt} \rightarrow \pm\infty$$

⇒

$$dI \rightarrow \pm\infty$$

7.3.2 *Praktische Bedeutung*

Die Bedingung $dI \rightarrow \pm\infty$ lässt sich praktisch nur als Annäherung $dI < \pm\infty$ erreichen. Da dI und dt für unseren Anwendungsfall durch andere Bedingungen obige und untere Grenzen gesetzt sind, fallen die Mehrzahl der Wellenformen, die diese Bedingung erfüllen heraus (Spikes; Noise, Triangle- Wellenformen). Desweiteren wäre deren Erzeugung mit den benötigten Leistungen technisch aufwendiger.

Grundsätzlich technologisch bleiben zwei Wellenformen interessant.

- sinusförmige Wellenform
- rechteckförmige Wellenform

7.3.2.1 *Sinusförmige Wellenform*

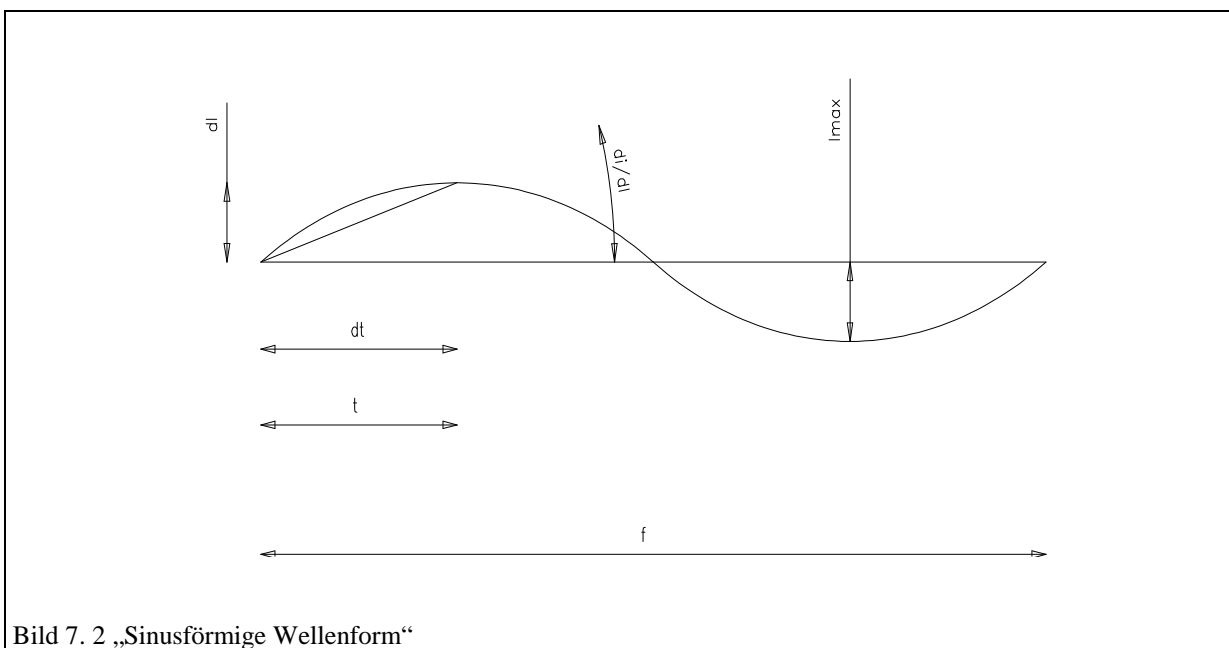


Bild 7.2 „Sinusförmige Wellenform“

Vereinfacht kann für den Strom in Abhängigkeit von der Zeit geschrieben werden:

$$I = I_{max} \sin(\omega t)$$

⇒

$$dI = I_{max} \cos(\omega t) \rightarrow \pm\infty$$

⇒

$$\sin(\omega t) = 0$$

⇒

$$t = n\pi \text{ mit: } n \in N_0$$

Bedeutet, dass die Forderung nach $dI < \pm\infty$ besonders gut in den Nullspannungsdurchgängen erfüllt wird. Der Erhöhung der Frequenz jedoch (Erhöhung der Anzahl der Durchgänge) steht der Forderung $f = 0$ entgegen. Ein Kompromiss ist die Nutzung von rechteckförmigen Strom, bei diesem wird $dI \rightarrow \pm\infty$ besonders gut erfüllt.

7. 3. 2. 2 *Rechteckförmige Wellenform*

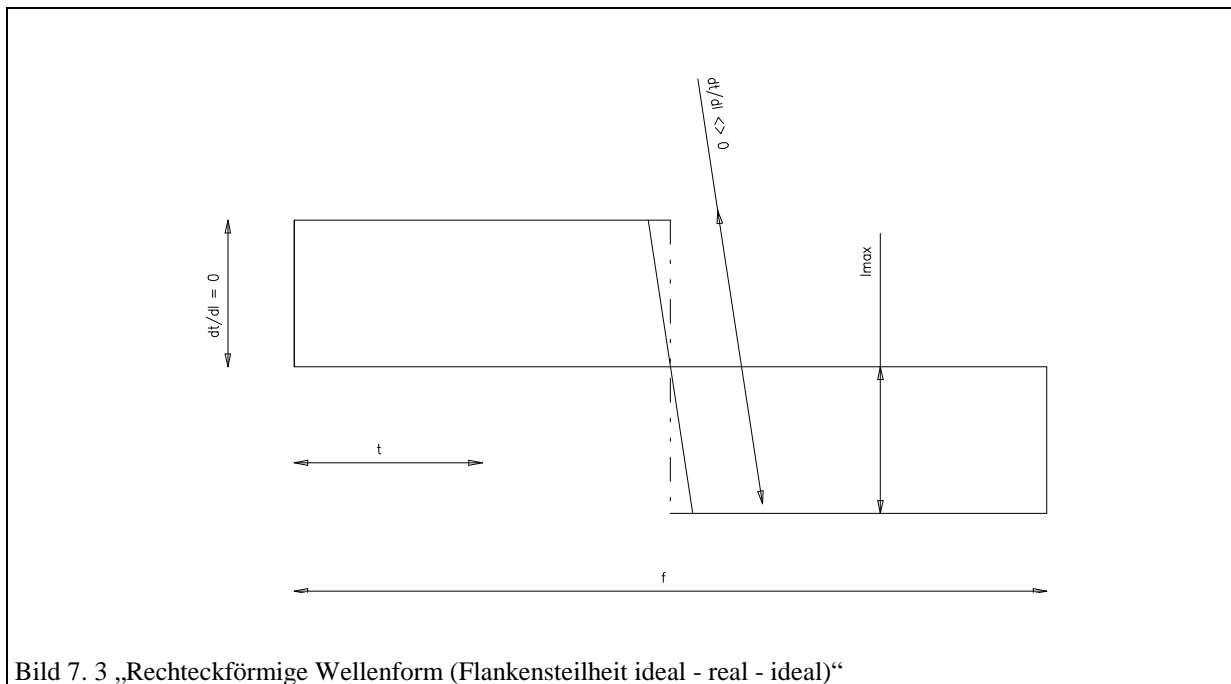


Bild 7. 3 „Rechteckförmige Wellenform (Flankensteilheit ideal - real - ideal)“

Die rechteckförmige Wellenform hat theoretisch den Wert $dI \rightarrow \pm\infty$. In der Praxis sind dem jedoch Grenzen gesetzt, so daß auch nur $dI < \pm\infty$ erreichbar ist, jedoch um Größenordnungen besser als bei der Sinuswelle. Die Gründe sind vielseitig, hauptsächlich dürfte jedoch die Slew-Rate der angewandten elektronischen Bauelemente im Generatorbaustein schuld sein, welcher die Flanken der Rechteckfrequenz mit zunehmender Frequenz neigt, im Extremfall bis zur Triangle-(Dreieck)Form.

7.4 *Schweißstromquellen unter dem Gesichtspunkt der Impedanzverlusteminimierung*

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

Aus dem internationalen Schrifttum sind viele Rollenschweißmaschinen mit unterschiedlichen Schweißstromquellen unter Verwendung verschiedener Stromarten bekannt. Im einzelnen sind dies:

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

7.4.1 *Gleichstrom*

Vorteile:

- praktisch keine Wirbelstrom- und Hysteresisverluste in der Schweißmaschine

Nachteile:

- Gefahr der Lichtbogenbildung
- hohe Ventilverluste
- technologische Schwierigkeiten bezüglich der erzielbaren Nahtqualität

7.4.2 *Mischstrom*

Der Grundgedanke besteht darin, einen Gleichstrom über die Elektroden zu leiten, der das Schweißgut bis kurz unterhalb seines Schmelzpunktes erhitzt. Diesem Gleichstrom (DC) wird ein Wechselstrom (AC) überlagert. Der AC-Verlauf kann rechteckförmig oder annähernd sinusförmig sein. Wesentlich dabei ist, dass der AC-Effektivwert nur etwa 30% vom Gesamteffektivwert des Schweißstromes beträgt.

7.4.3 *Mittelfrequenter Wechselstrom*

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

Weitere Eigenschaften lassen sich nur unter 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 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 5 kHz beherrschbar. Näheres ist unter Patentnummer (BRD) 2406693 , Anmeldetag 13. 02. 1974 zu finden.

Der Einsatz dieser Technik bringt folgende Nachteile mit sich;

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

Speziell die Verwendung geteilter Elektroden führt zu technologisch kaum beherrschbaren Problemen innerhalb der Schweißzone. Deshalb wird dieses Verfahren kaum genutzt.

7. 4. 5 *Rechteckförmiger Wechselstrom*

Der Hauptnachteil des MF- Stromes, das Verursachen von hohen Wirbel- und Hysteresisverlusten, führte zur Überlegung, rechteckförmige Stromverläufe niedriger Frequenz einzusetzen.

Das Hauptproblem besteht in der Erzeugung hoher $\frac{dI}{dt}$ - Werte während der Reversierphase des Stromes in der stark induktiven Last. Die induktive Zeitkonstante praktisch realisierter Rollennahtschweißanlagen liegt bei etwa 0.7 bis 1.5 ms. Für die maximale Schweißgeschwindigkeit von 60 m/min muß die Zeitdauer für einen Reversiervorgang deutlich unter 1 ms liegen, damit keine Wärmeeinbrüche im Nahtverlauf entstehen.

In der Literatur sind viele Veröffentlichungen zu diesem Problemkreis zu finden. Leider sind die meisten der aufgezeigten Lösungen nicht praktikabel. Für weitergehende Informationen sei der interessierte Leser auf die Dissertation von Thomas Klärner „Mittel- und Niederfrequenztechnik für das Rollennahtschweißen bei dünnen Blechen“ hingewiesen, sowie die dort enthaltene Literatursammlung. (In der Anlage enthalten)