

Die Technologie des Kondensatorentladungsschweißens

Das Kondensatorentladungsschweißen (KE-Schweißen) verfügt nicht über Parameter, mit denen der Verlauf des Schweißstroms direkt eingestellt werden kann – konstruktive Merkmale des elektrischen Leistungskreises bestimmen den zeitlichen Verlauf der Energiezufuhr. Deshalb wird eine Methode aufgezeigt, um das elektrische Betriebsverhalten analytisch zu beschreiben und die elektrischen Grundgrößen einer KE-Maschine messtechnisch zu ermitteln. Analogien zum mechanischen Kraftsystem, insbesondere zum Wirkmechanismus einer Nachsetzeinheit, lassen sich nutzen, um einen ähnlichen Komplex an Gleichungen aufzustellen, mit dessen Hilfe eine sichere Kalkulation der für den Schweißvorgang notwendigen Anpresskraft möglich wird.

1 Einleitung

Durch das Kondensatorentladungsschweißen (kurz KE-Schweißen) ausgeführte Fügeaufgaben werden grundsätzlich als Einzelprojekte behandelt. Die Dimensionierung der KE-Schweißmaschinen (und insbesondere deren elektrischer Leistungskreis) erfolgt über Erfahrungswerte der Hersteller und Anwender. Auf einer KE-Maschine ermittelte Schweißparameter lassen sich kaum auf andere (selbst solche mit gleichen Leistungsdaten) übertragen. Allgemeingültige Richtwerte als Ausgangspunkt für die Suche nach Schweißparametern existieren nicht.

Mit diesem hohen Grad der „Individualisierung“ von KE-Schweißmaschinen gelangt das Verfahren mehr und mehr an seine Grenzen. In Zeiten steigender Anforderungen an die Fügetechnik und wachsender ökonomischer Zwänge findet der zu treibende Aufwand für die Einführung und Betreuung von Serienproduktionen keine Akzeptanz mehr. Die im Folgenden vorgestellten Methoden sind geeignet, dem KE-Schweißen, vor allem der dazu notwendigen Technik, eine wissenschaftliche Grundlage zu geben. Das analytische Beschreiben des Betriebsverhaltens schafft die Voraussetzungen, um allgemeingültige Regeln für die Dimensionierung der KE-Maschinen und Auswahl von Schweißparametern aufzustellen.

2 Forderung nach einer qualitätsgerechten Schweißverbindung

Die Bearbeitung einer neuen Schweißaufgabe beginnt mit der Auswahl des Schweißverfahrens. Oftmals wird diese Entscheidung bereits in einer frühen Planungsphase des Projekts getroffen. Sind die (beiden) Fügepartner über eine Buckelschweißung zu verbinden, wird in den meisten Fällen zuerst eine 50-Hz-Wechselstrom- bzw. Inverter-

Tabelle 1 • Vergleich der charakteristischen Merkmale von 50-Hz-Inverterschweißen und KE-Schweißen ⁽¹⁾ Die Konstantstromregelung ist die mit Abstand am weitesten verbreitete Regelart).

	50-Hz- bzw. Inverterschweißen	Kondensatorentladungsschweißen
Prozess	Widerstandsbuckelschweißen	Widerstandsbuckelschweißen
Schweißzeit	lang; 200 bis 500 ms	kurz; 10 bis 20 ms
zugeführte elektrische Energie	geregelter Gleichstrom ¹⁾	exponentieller Stoßstrom
Kraftwirkung	Schwingung mit abnehmender Amplitude	eine Schwingung mit hoher Amplitude, geprägt durch Kraftreduzierung

DIE AUTOREN



Prof. Dr.-Ing. habil. Uwe Füssel
Leiter der Professur für Fügetechnik und Montage des Instituts für Oberflächen- und Fertigungstechnik IOF der TU Dresden
uwe.fuessel@tu-dresden.de
www.schweissenundschneiden.de/?id=200870



Dipl.-Ing. Hans-Jürgen Rusch
Leiter Strategisches Produktmanagement bei der Harms & Wende GmbH & Co. KG, Hamburg
hans-juergen.rusch@harms-wende.de
www.schweissenundschneiden.de/?id=201063



Dipl.-Ing. Max-Martin Ketzler
Wissenschaftlicher Mitarbeiter der Professur für Fügetechnik und Montage des Instituts für Oberflächen- und Fertigungstechnik IOF der TU Dresden
max-martin.ketzler@tu-dresden.de
www.schweissenundschneiden.de/?id=307146



Dipl.-Ing. Nicolas Stocks
Entwickler Fügetechnik bei Harms & Wende GmbH & Co. KG, Hamburg
www.schweissenundschneiden.de/?id=307398

STICHWÖRTER

Schweißgeräte, Widerstandspressschweißen

Gleichstrom-Schweißung ausgewählt. Als Alternative und besonders für spezielle Anwendungen (Schweißen großer Ringbuckel, Schweißen von Mischverbindungen Stahl/Messing [1]) steht das KE-Schweißen zur Verfügung. Für eine fundierte Auswahl einer der beiden Alternativen, sind die wesentlichen Unterschiede in der Energiebereitstellung zu vergleichen, **Tabelle 1**.

Ein erster Unterschied zwischen 50-Hz-Schweißen/Inverterschweißen und KE-Schweißen ergibt sich durch die unterschiedlichen Prozesszeiten und Stromstärken.

Bild 1 gibt einen prinzipiellen Überblick über die Strom- und Kraftverläufe (wobei dem KE-Schweißstrom nur ein Inverterschweißstrom gegenübergestellt ist und ausschließlich die ersten 12 ms abgebildet sind). Am Ende der KE-Schweißzeit (der Strom ist auf 50% des Maximalwerts abgeklungen) ist

der Inverterschweißprozess gerade am Anfang – der Anstieg des Stroms ist beendet und dessen Wert wird konstant gehalten.

Besonders große Unterschiede zwischen beiden Verfahren ergeben sich im elektrischen System, das die Schweißenergie in der Fügestelle bereitstellt. Beim Inverterschweißen werden über die Parameter Schweißstrom und -zeit die Intensität sowie die Dauer der Energieeinbringung eingestellt. Durch den konstanten Strom ist die Stromdichte während der gesamten Schweißzeit annähernd konstant. Der Regler gewährleistet eine präzise Einhaltung der gewählten Parameter. Die Konstruktion der Schweißmaschine bzw. -zange hat keinerlei Einfluss auf die elektrischen Schweißparameter – dass sie den Stromanstieg in seiner Steilheit begrenzt, sei einmal vernachlässigt.

3 Der elektrische Leistungskreis

3.1 Die KE-Maschine als Reihenschwingkreis

Völlig anders sind die Bedingungen beim KE-Schweißen. Es gibt keinen Parameter, der direkt den Verlauf des Schweißstroms einstellt. Stattdessen lässt sich nur die Ladenspannung der Kondensatoren variieren, die in Abhängigkeit von der Kapazität die auf der Primärseite eingespeiste elektrische Energie bestimmt. Der sich ergebende Stromverlauf $i_{\text{sec}}(t)$ wird wesentlich von den Grundgrößen Maschinenwiderstand R_{MA} und Maschineninduktivität L_{MA} sowie der Kapazität der installierten Kondensatorbank C_{BK} bestimmt. Obwohl es sich stets um einen exponentiellen Stoßstrom handelt (eine Sinushalbschwingung, die von einer Exponentialfunktion überlagert ist), werden die Stromhöhe und der zeitliche Verlauf wesentlich von der konstruktiven Ausführung des Leistungskreises, von den technischen Daten des Schweißtransformators und von den Abmessungen des sekundären Stromfensters bestimmt.

Die genaue Kenntnis der beiden bestimmenden Prozessparameter $i(t)$ und $U_c(t)$ ist entscheidend für die Abschätzung des Schweißverhaltens der KE-Maschine, da der Strom eine hohe Dynamik entwickelt und die sich ergebenden Stromänderungen – also nicht nur der Wert des Stroms – den Schweißverlauf mitbestimmt. Dieser Zusammenhang erklärt sich besonders vor dem Hintergrund des Prozessverständnisses, das in [2] dargestellt wird. Danach entscheidet die zu Beginn des Schweißvorgangs

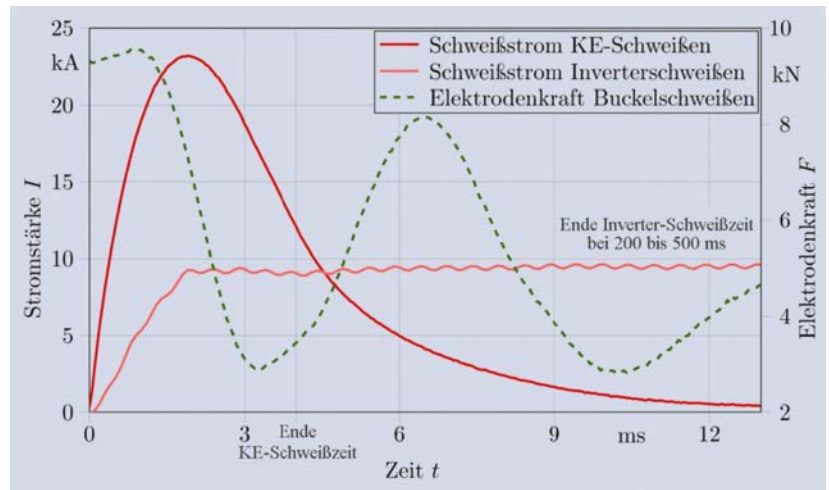


Bild 1 • Strom- und Kraftverlauf beim Buckelschweißen mit Inverter- und KE-Stromquelle.

(Phase Stromfluss I) erreichte Stromdichte über die Ausprägung des Fügeverfahrens: bei „sehr hoher Stromdichte“ kommt es zu einer Metallverdampfung und es läuft die Verfahrensvariante des „Metaldampfpressschweißens“ ab, in deren Ergebnis eine Stoffverbindung ohne Vermischung der Grundwerkstoffe in der flüssigen Phase entsteht. Nur beim Schweißen mit „ausreichend hoher Stromdichte“ kommt es zum Widerstandspressschweißen, das zum Ausprägen einer Linse führt.

Wenn der Stromanstieg einen so entscheidenden Einfluss auf das Schweißergebnis nimmt, muss das elektrische Betriebsverhalten der Maschine bekannt sein. Um eine wissenschaftliche Grundlage zu schaffen, sind die Abläufe im Leistungskreis auf ein Modell zurückzuführen und die bestimmenden Randbedingungen zu beachten.

In seinem Standardwerk [3] über das Widerstandsschweißen führte Brunst 1952 die Theorie einer KE-Maschine auf einen Reihenschwingkreis zurück. Die damals genutzten Leistungskreise unterscheiden sich in zwei wesentlichen Punkten von der heutigen Technik: Die Kondensatorenergie wurde über ein Schütz auf den Schweißkreis geschaltet – bei einem schwingenden Stromverlauf konnte dieser seine Richtung ändern. Darüber hinaus fehlte der heute übliche Freilaufkreis.

Im Jahr 1960 entwickelte Früngel in seinem Buch über die Impulstechnik [4] die Theorie des Reihenschwingkreises weiter. Als Schaltelemente wurden mittlerweile Ignitrons in den Leistungskreisen der KE-Maschinen ein-

ABSTRACT

The technology of capacitor discharge welding

Not only does capacitor discharge (CD) welding have parameters with which the course of the welding current can be set directly but design-related characteristics of the electrical power circuit also determine the course of the energy supply over time. Therefore, the article highlights a method in order to describe the electrical operating behaviour analytically and to establish the basic electrical variables of a CD machine by means of measuring technology. Analogies to the mecha-

nical force system, particularly to the effective mechanism of a resetting unit, can be used in order to elaborate a similar complex of equations with the aid of which it becomes possible to make a reliable calculation of the pressing-on force necessary for the welding operation.

KEYWORDS

welding equipment, resistance pressure welding

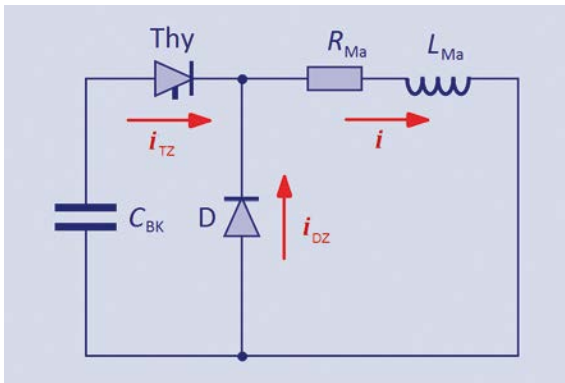


Bild 2 • Ersatzschaltbild des Leistungskreises einer KE-Schweißmaschine (Thy – Thyristor; D – Diode; R_{MA} – Maschinenwiderstand; L_{MA} – Maschineninduktivität; C_{BK} – Kapazität der installierten Kondensatorenbank; i – Gesamtstrom; i_{TZ} – Strom im Thyristorzweig; i_{DZ} – Strom im Diodenzweig).

gesetzt, deren Gleichrichtungswirkung eine Stromumkehr verhinderte. Mit der Einführung des Freilaufkreises 1981 ergab sich eine weitere wesentliche Änderung des elektrischen Betriebsverhaltens, die in den zurückliegenden Jahrzehnten aber in keiner Theorie beschrieben wurde. Solche Schaltungen kommen gegenwärtig noch zum Einsatz. Das Ersatzschaltbild in **Bild 2** (in dem R_{MA} alle Widerstände (einschließlich dem der Fügestelle) und L_{MA} alle Induktivitäten des Leistungskreises zusammenfassen und C_{BK} die installierte Kapazität darstellt) dient als Grundlage für die Entwicklung eines Gleichungssystems.

Bei einer Rückführung des Betriebsverhaltens auf einen Reihenschwingkreis, diese Theorie ist auch auf Maschinen mit Freilaufzweig anwendbar, sind die drei praktisch möglichen Betriebsfälle – die Gedämpfte Schwingung, der Aperiodische Grenzfall und der Kriechfall, gegebenenfalls ergänzt durch die Ungedämpfte Schwingung – zu betrachten.

Der kontinuierlich verlaufende Hauptstrom i (Stoßstrom), den die KE-Maschine erzeugt, täuscht einen kontinuierlichen Prozess vor. Werden aber zusätzlich die Ströme im Thyristorzweig i_{TZ} und im Diodenzweig i_{DZ} beachtet, wie sie das Diagramm in **Bild 3** zeigt, sind deutlich drei Phasen zu unterscheiden:

- die Hauptphase (HP) in der der Kondensator entladen wird,
- die Kommutierung (KV) in der der Strom vom Thyristor auf die Diode übergeht und
- der Stromnachlauf (NL) mit der Annäherung des Stroms an die Nulllinie.

Die drei Phasen sind gesondert zu untersuchen, da sie wegen ihrer Spezifik jeweils eigenen Gesetzmäßigkeiten folgen. Um die Funktionen $i = f(t)$ und $u_c = f(t)$ aufzustellen, sind Differentialgleichungen zweiter und erster Ordnung zu lösen. Darüber hinaus sind Gleichungen für Schlüsselparameter zu entwickeln, die in besonderer Weise das Verhalten einer KE-Maschine beschreiben. Als solche Schlüsselparameter sind der Spitzenstrom I_p , die Stromanstiegszeit t_p und das Strom-Zeit-Integral Q_{it}

zu klassifizieren, die in [1] definiert sind. Zu ergänzen sind die Kondensatorentladezeit t_{Un} als jene Zeitspanne, in der der Kondensator vollständig bis $u_c = 0$ entladen wird, und den zugehörigen Strom I_{Un} sowie die spezifische Fügeenergie ϵ_f als Integral des Quadrats des Stroms über ein entsprechendes Zeitintervall.

3.2 Typisieren von KE-Maschinen

Um die Gleichungen für das Betriebsverhalten auf reale KE-Maschinen anwenden zu können, müssen die Grundgrößen – Maschinenwiderstand R_{MA} und Maschineninduktivität L_{MA} sowie Kapazität der Kondensatorenbank C_{BK} – bekannt sein. Keine der drei Größen lässt sich mit einfachen Mitteln messen. Selbst die Kapazität C_{BK} kann nicht aus den Nenndaten abgeleitet und somit als bekannt vorausgesetzt werden, da die Kondensatoren mit großen Toleranzen ([5], $\pm 20\%$) ausgeliefert werden. Also ist zusätzlich ein messtechnisches Verfahren zu entwickeln, das über einfache Messmittel, die aber der hohen Dynamik des KE-Prozesses Rechnung tragen, Hilfsgrößen erfasst, um über diese die gesuchten Grundgrößen zu berechnen.

Sind diese bekannt, lässt sich das Betriebsverhalten mit den zeitlichen Verläufen der bestimmenden Prozessgrößen $i = f(t)$ und $u_c = f(t)$ sowie über die zuvor genannten Schlüsselparameter beschreiben. Daraus Rückschlüsse auf das Schweißverhalten zu ziehen, ist nur über eine entsprechende Abstraktion und mit einem umfangreichen Erfahrungsschatz möglich. Deshalb empfiehlt es sich, aus den Betriebsparametern eine (elektrische) Typbeschreibung – die Typisierung – abzuleiten. Um die sich so ergebende Standardisierung der KE-Maschinen möglichst einfach zu gestalten, ist eine Beschränkung auf zwei Parameter notwendig, sodass die Darstellung in einem zweidimensionalen Diagramm möglich wird. Abzuleiten sind diese beiden Größen aus dem Prozessverständnis nach [2]: Und so repräsentieren die Stromanstiegs geschwindigkeit V_{ip} als Quotient aus Spitzenstrom und Stromanstiegszeit die Anfangsstromdichte, die wesentlich über die Variante des Verfahrens entscheidet, und das Strom-Zeit-Integral die Energie, die zum Erreichen der gewünschten Fügequalität notwendig ist.

3.3 Weiterentwicklung des KE-Schweißens

Wenn es seit 1981 keine Weiterentwicklung in der Technik des KE-Schweißens gegeben hat, lässt sich dieser Umstand sicherlich auch auf die fehlenden theoretischen Grundlagen zurückführen. Somit drängt sich zum Beispiel auch nicht die Frage auf, ob der „Sonderfall“ mit dem Anfangswert des Stromverlaufs $I_0 = 0$ gesetzmäßig der einzig mögliche Betriebsfall sein kann. Diese Frage wurde über viele Jahrzehnte bejaht, weil das Abschalten eines Stroms von 100 kA technisch für problematisch bis unmöglich gehalten wurde. Dabei wurde aber die Technik des Löschens eines Thyristors, in der Leistungselektronik ein sehr lange bekanntes Verfahren, außer Acht gelassen. Demnach ist es sehr wohl möglich, über einen Kommutierungsvorgang den Strom von einem Thyristor auf einen anderen zu übertragen. Über diesen Weg eröffnet sich die

Möglichkeit, KE-Mehr-Impuls-Schweißungen auszuführen, die Abschnitte mit der Anfangsbedingung $I_0 \neq 0$ im Stromverlauf enthalten. Das entsprechende Beispiel in **Bild 4** stellt die Entladung eines Kondensators der von vier Kondensatoren gegenüber. Mit dieser Gestaltung des Stromverlaufs wird als eine mögliche Anwendung die Reduzierung der Abkühlgeschwindigkeit angestrebt, um übermäßige Aufhärtungen der Fügezone zu vermeiden.

Die Mehr-Kondensatoren-Technik stellt noch einmal deutlich höhere Anforderungen an das analytische Beschreiben des Betriebsverhaltens. Allein die Anfangsbedingung $I_0 \neq 0$ erhöht die Komplexität der Gleichungen. Aber ohne eine theoretische Grundlage ist die wirkungsvolle Nutzung und Weiterentwicklung dieser aufwändigen Technologie undenkbar. Einerseits ist es unumgänglich, die zeitliche Dosierung der Energiezuführung zuverlässig zu kalkulieren. Andererseits muss der Zündeneinsatz der unterschiedlichen Thyristoren zuverlässig aufeinander abgestimmt sein, um die gewünschten Temperaturprofile und metallurgischen Prozesse in der Fügezone zu erreichen.

Wenn das analytische Beschreiben des Betriebsverhaltens so wichtig ist, warum wurde dieser offensichtlichen Notwendigkeit nicht schon früher Rechnung getragen? Um die entsprechenden Gleichungssysteme abzuleiten, sind breite Kenntnisse der Elektrotechnik notwendig, die für die eher von Themen des Maschinenbaus und der Werkstoffwissenschaften bestimmten Schweißtechnik wesensfremd sind. Erst die steigenden Anforderungen an Widerstandsschweißverfahren durch neue Stahlwerkstoffe, die sich mehr und mehr durchsetzende Leichtbauweise in der Automobilfertigung und der zunehmende Trend zur Mischbauweise haben den notwendigen Druck erzeugt, die ungenutzten Möglichkeiten der KE-Schweißtechnik zu erschließen.

4 Das mechanische System

Die Aussagen zu der zuvor hervorgehobenen großen Bedeutung des elektrischen Systems gelten nur unter der Bedingung einer exakt eingestellten Anpresskraft der Elektroden. Zu große Kräfte reduzieren die Übergangswiderstände über Gebühr, und der fließende Strom ist nicht in der Lage, eine ausreichende Wärmeenergie in der Fügezone zu erzeugen. Außerdem wird der Buckel oder das Gegenstück unzulässig stark verformt. Umgekehrt zieht eine zu kleine Anpresskraft eine zu hohe Energieumsetzung nach sich, die die Gefahr von explosionsartigem Materialauswurf (Spritzer) erhöht. In beiden Fällen leiden die Festigkeit der Fügeverbindung und damit die Qualität der Schweißung. Da das KE-Schweißen durch sehr kurze Prozesszeiten gekennzeichnet ist, muss das dynamische Verhalten des Kraftsystems besonders betrachtet werden.

Beim KE-Schweißen mit sehr hoher Stromdichte kommt es zur Metaldampfbildung in der Fügezone und zu einem deutlichen Abfall der Anpresskraft. In dem angeführten Beispiel wird durch den schlagartigen Abfall der Kraft das Feder-Masse-System der Nachsetzeinheit in Schwingung versetzt. Im Gegensatz dazu tritt beim Inverterschweißen und beim KE-Schweißen mit ausreichender

Stromdichte kaum Metallverdampfung in der Fügezone auf. Die Erwärmung erfolgt deutlich langsamer, der Buckel verliert langsamer seine Festigkeit, wodurch die Kraftänderung weniger ausgeprägt ist und das mechanische Schwingssystem weniger stark angeregt wird.

In **Bild 1** ist ein kritischer Kraftverlauf dargestellt. Ausgehend von der mit $F_s = 9,5$ kN eingestellten Kraft kommt es binnen $t = 3$ ms zu einem erheblichen Rückgang auf $F_s = 3,0$ kN. Die in der Maschine installierten Kraftsysteme reagieren zu träge und sind nicht in der Lage, den durch das Verformen des Buckels verursachten Rückgang der Anpresskraft zu beschränken, weshalb eine zusätzliche Nachsetzeinheit zum Einsatz kommt. Leider ist oftmals zu beobachten – wie das Beispiel in **Bild 1** zeigt – dass die Nachsetzeinheit die geforderten Anforderungen nicht erfüllt. Als Ursache hebt [6] hervor: „Die Auslegung der Nachsetzeinheiten erfolgt fast immer auf der Grundlage von Erfahrungswerten und nicht nach maschinendynamischen Gesichtspunkten.“ Damit ergibt sich für das mechanische System einer KE-Maschine in dieser Hinsicht eine identische Situation wie für das elektrische System.

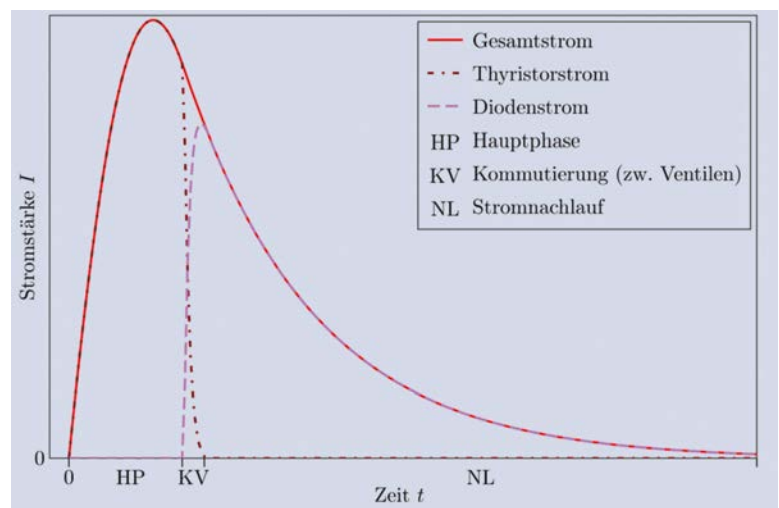


Bild 3 • Phasen einer KE-Schweißung anhand der drei Primärströme.

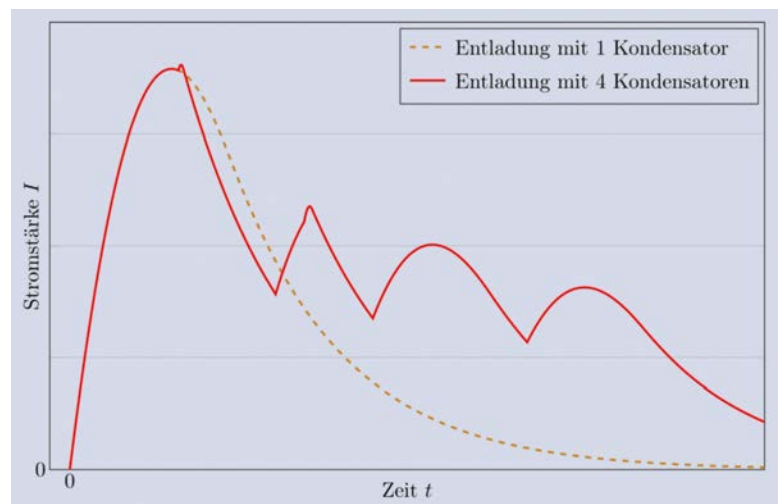


Bild 4 • Verlauf eines Mehr-Kondensatoren-Schweißstroms im Vergleich zu einer Einkondensator-Entladung.

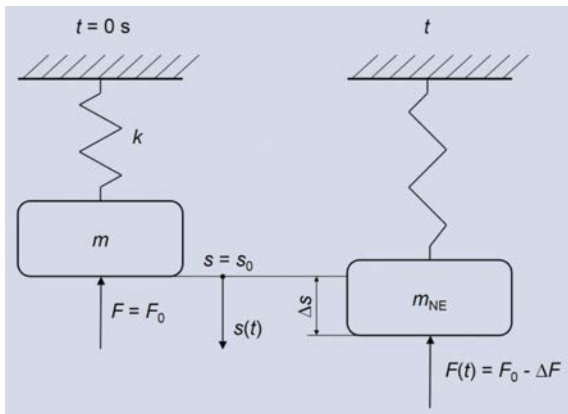


Bild 5 • Mechanisches Schwingungssystem einer Nachsetzeinheit.

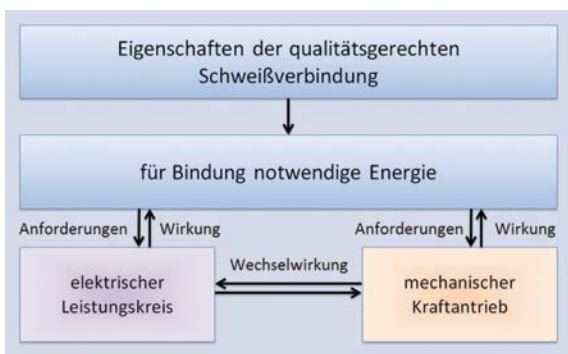


Bild 6 • Geforderte Eigenschaften einer qualitätsgerechten Schweißverbindung.

Neben dieser Übereinstimmung lässt sich auch eine Analogie für deren Wirkungsweise erkennen. Während der Schweißstrom den Gesetzmäßigkeiten eines Reihenschwingkreises folgt, gelten analoge Beziehungen für die linear gedämpfte Schwingung der Nachsetzeinheit, deren grundsätzliche Zusammenhänge **Bild 5** zeigt. Die Äquivalenz beider Systeme bestätigt sich auch in den Differentialgleichungen, die die Vorgänge beschreiben:

$$(d^2i/dt^2) + 2\delta(di/dt) + \omega_0^2i = 0$$

mit der Abklingkonstante $\delta = (R/2L)$ und der Resonanzkreisfrequenz $\omega_0 = (1/LC)^{1/2}$ und

$$(d^2s/dt^2) + 2\delta(ds/dt) + \omega_0^2s = 0$$

mit der Abklingkonstante $\delta = (d/2m)$ und der Resonanzkreisfrequenz $\omega_0 = (k/m)^{1/2}$.

Während im elektrischen System die bereits zuvor benannten Grundgrößen R, L und C den Prozessablauf bestimmen, sind es im mechanischen System die Dämpfungskonstante d und die Masse m der bewegten Teile sowie die Federkonstante k der Nachsetzeinheit. Auch die Steifigkeit des Maschinengestells (in **Bild 5** nicht dargestellt) hat einen Einfluss auf das mechanische Schwingungssystem.

Über diese Analogie lässt sich für die mechanisch wirkende Nachsetzeinheit ein ähnliches Gleichungssystem

entwickeln wie für den elektrischen Leistungskreis; damit lassen sich die grundsätzlichen Fragen für jede Schweißaufgabe beantworten:

- Welcher Weg muss mit welcher Geschwindigkeit während des Schweißvorgangs nachgesetzt werden?
- Welche Eigenkreisfrequenz muss das schwingende System haben?
- Welche Masse muss die bewegliche Elektrode samt Nachsetzeinheit besitzen, um einen optimalen Kraftverlauf zu erhalten?
- Welcher Krafteinbruch soll bei welcher Ausgangskraft zugelassen werden?

5 Fazit

Der Beitrag hat detailliert die Möglichkeiten aufgezeigt, um dem KE-Schweißen eine wissenschaftlich fundierte Grundlage zu geben. Für den elektrischen Leistungskreis sind die hier vorgeschlagenen Maßnahmen umzusetzen – es sind die Gleichungssysteme aufzustellen, die Verfahren zum Bestimmen der Grundgrößen zu entwickeln und darauf aufbauend die KE-Maschinen zu typisieren. Auf der Grundlage der wissenschaftlichen Beschreibung des Betriebsverhaltens ist die Mehr-Kondensatoren-Technik weiterzuentwickeln. Gleiche Maßnahmen sind für das Kraftsystem umzusetzen, um den insbesondere für das Buckelschweißen notwendigen Kraft- und Wegverlauf durchgängig zu gewährleisten.

Sind die wissenschaftlichen Grundlagen geschaffen, sind in einem weiteren Schritt die Wechselwirkungen zwischen elektrischem Leistungskreis und mechanischem Kraftantrieb zu untersuchen. Letztendlich ist die Wirkung des Gesamtsystems einer KE-Maschine auf die für die Bindung notwendige Energie abzustimmen. Somit wird es möglich, wie in **Bild 6** gezeigt, ausgehend von den geforderten Eigenschaften einer qualitätsgerechten Schweißverbindung die in die Fügestelle einzubringende Energie zu bestimmen und daraus die Anforderungen an das elektrische und mechanische System abzuleiten.

Literatur

- [1] Merkblatt DVS 2911 „Kondensatorentladungsschweißen – Grundlagen, Verfahren und Technik“ (Ausgabe April 2016. DVS Media, Düsseldorf 2016.
- [2] Rusch, H.-J.: Elektrisches Schweissverfahren. Europa-Patent EP 3 138 652 A1, 7 September 2016.
- [3] Brunst, W.: Das elektrische Widerstandsschweißen. Springer-Verlag, Berlin 1952.
- [4] Frügel, F.: Impulstechnik – Erzeugung und Anwendung von Kondensatorentladungen. Akademische Verlagsgesellschaft Geest & Portig, Leipzig 1960.
- [5] N. N.: Firmenschrift FTAP. Fischer & Tausche Capacitors, Husum, 2016.
- [6] Stocks, N., u. a.: Optimierungspotentiale beim Kondensatorentladungsschweißen durch maschinendynamische Auslegung der Nachsetzeinheit. Tagungsbd. DVS Congress – Große Schweißtechnische Tagung – DVS-Studentenkongress, S. 73/77. DVS Media, Düsseldorf 2017.