Feintechnische Schweissverfahren mit kurzzeitiger Energie

Autor(en): **Früngel, F. / Kuper, G. / Hartung, R.**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins : gemeinsames Publikationsorgan des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins (SEV) und des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätswerke (VSE)**

Band (Jahr): **64 (1973)**

Heft 16

PDF erstellt am: **29.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-915584

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Feintechnische Schweissverfahren mit kurzzeitiger Energie

Von *F. Früngel, G. Kuper* und *R. Hartung*

621.791.72

1. Einleitung

In der Feintechnik ist die Anwendung von Schweissverfahren mit kurzzeitigen Energiestössen wesentlich, damit ein Verziehen der Werkstücke vermieden wird und sehr enge Toleranzen gewährleistet werden können. Als kurzzeitig sind hierbei Energiestösse zu verstehen, die nur wenige Millisekunden dauern. Je nach Form und Metall der zu verschweissenden Werkstücke kommen drei Verfahren in Betracht, nämlich:

a) Ultrapulsschweissen mittels transformierter Kondensatorentladung bei genau festgelegter Energie;
b) Laser-Impulsschweissen mit Injektion der Wärme auf dem Strahlwege;
c) Induktive Erhitzungsimpulse, wobei auch an induktive Impulshartlötung gedacht werden kann.

Jedes der drei Verfahren erfordert eine spezifische konstruktive Formgebung. Auch wirtschaftlich unterscheiden sich die Verfahren erheblich, wobei das Ultrapulsschweissen mit Abstand am wirtschaftlichsten ist.

Tabelle I zeigt vergleichend die kalkulatorische Preisübersicht dreier Maschinen, in der 1. Spalte eine kleine Ultrapuls-Schweissmaschine mit Investitionskosten von sFr. 10 000.– bei etwa 500 J Impulsenergie und 60/min Impulsfolge. In Spalte 2 eine grosse Maschine mit max. 12 000 J und einer Impulsfolge von 30/min bei etwa sFr. 100 000.– und schliesslich in Spalte 3 eine Laser-Impulsschweissmaschine mit 50 J Strahlimpulsenergie und Impulsfolge von 120/min bei sFr. 144 000.– Investition. Wie ersichtlich, leistet letztere Maschine bei ca. 15fachem Investitionskapital nur $^1/_{10}$ der Energie der kleinen Ultrapuls-Schweissmaschine, woraus hervorgeht, dass Laser-Impulsschweissmaschinen nur dann in Betracht zu ziehen sind, wenn billigere Verfahren versagen.

Bei wertvollen Komponenten kann das Laser-Impulsschweissverfahren dann in Betracht kommen, wenn Druckanwendung und Berührung nicht statthaft sind. Bei Niedrigpreis-Komponenten ist das Ultrapulsschweissen gebräuch-

Kalkulationsschema

Tabelle I

	Impulsschweiss-gerät IPH 500/FF101 sFr.	Ultrapulsschweiss-maschine Vitessa 12000 Ws sFr.	Laser-impulsschweiss-maschine LSB 10 sFr.
1. *Maschinenbedingte Kosten:*			
Anschaffungskosten der Maschine (inkl. werkstückunabhängige Einrichtungen)	10 000,00	100 000,00	144 300,00
Abschreibung: 10% pro Jahr	1 000,00	10 000,00	14 430,00
Verzinsung (50% von 8%) 4%/Jahr	400,00	4 000,00	5 772,00
Platzkosten: 100 sFr./m²/Jahr	100,00	400,00	380,00
Unterhaltskosten pro Jahr	–,—	350,00	39 000,00[1])
Total Kosten pro Jahr	1 500,00	14 750,00	59 582,00
Nutzungsdauer der Maschine:			
Annahme 1500 h/Jahr			
Maschinenkostensatz pro h	1,00/h	9,83/h	39,70/h
Betriebskosten pro h (el. Energie, Gas, Wasser usw.	–,—	1,60/h	2,20/h
Total maschinenbedingte Kosten/h	1,00/h	10,43/h	41,90/h
2. *Lohnkosten:*			
Stundenlohn inkl. Sozialleistungen:			
sFr. 15,00/h			
Präsenzzeit des Arbeiters für Bedienung, Überwachung, Kontrolle usw. in % der Nutzungsdauer: 100%			
Total Lohnkosten pro h	15,00/h	15,00/h	15,00/h
3. *In 1. + 2. nicht erfasste Werkstatt-Gemeinkosten:*			
Annahme: 30% von 1 + 2	4,80/h	7,63/h	17,00/h[2])
4. *Gesamtkostensatz:* 1 + 2 + 3	20,80/h	33,06/h	73,90/h
5. *Werkstückbedingte Kosten:*			
Werkstückbedingte Werkzeuge und Einrichtungen für eine Seriengrösse von 10000 Stück	100,00	350,00	160,00
6. *Stückkosten:*			
Stückzeit (Boden zu Boden):	1/1200 h/St.	1/1200 h/St.	1/1000 h/St.
Maschinen- und lohnbedingte Kosten	0,017/St.	0,0275/St.	0,074/St.
Werkstückbedingte Kosten (für Seriengrösse von 10000 Stück)	0,010/St.	0,0350/St.	0,016/St.
7. *Notwendige Stückzahl:*			
für 1500 h Nutzungsdauer der Maschine (1500 h : Stückzeit)	1,8 Mill. St./Jahr	1,8 Mill. St./Jahr	1,5 Mill. St./Jahr

[1]) Bei 1,5 Mill. Impulsen/Jahr und einer Blitzlampenlebensdauer von 30000 Impulsen.
[2]) Im allgemeinen niedriger.

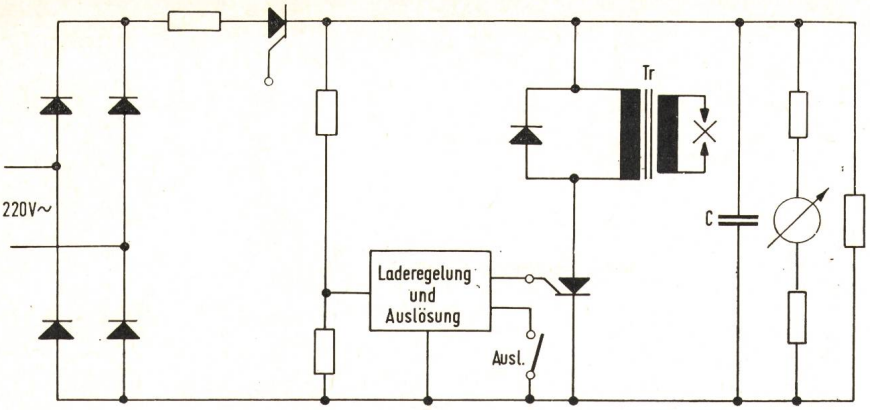


Fig. 1
Prinzipschema einer modernen Impulsschweissmaschine mit kurzschliessendem Hochstromgleichrichter parallel zur Primärwicklung des Impulstransformators

lich, sofern nicht andere Schweissmethoden eine ökonomischere Lösung ermöglichen.

Typisch für die Anwendung der Laser-Impulsschweissung ist die Fertigung von Magnet-Tonbandköpfen aus Konstantan oder Mu-Metall. Typische Anwendungen des Ultrapulsschweissens sind u. a. feinwerktechnische Teile der Büromaschinenfertigung, Aufschweissen von Lagerbuchsen auf Montageplatten mit sehr engen Toleranzen und ohne Verzug, Edelmetallkontakte unter Vermeidung des Materialverlustes des Schaftes gegenüber dem Nieten, stark auf Dauerbiegung beanspruchte federnde Komponenten, vakuumdichtes Aufschweissen von Schutzkappen (Transistoren, Thyristoren).

Das induktive Schweissverfahren eröffnet ein weites Anwendungsfeld, erfordert jedoch fast die Hälfte der Investition eines Laser-Impulsschweissgerätes. Es hat sich auf Grund seiner Neuheit noch kein breites Einsatzgebiet der Praxis erobert. Es wird jetzt vorwiegend für die Durchführung von hochwertigen Impulshärtungen vielerorts bereits verwendet. Eine Wirtschaftlichkeitsberechnung ist hier noch verfrüht, sie dürfte etwa zwischen denen der beiden Ultrapulsschweissmaschinen liegen.

2. Ultrapulsschweissen mit Hochstrom-Impulsen [1] [1])

2.1 Prinzip

Das Ultrapulsschweissverfahren ist eine Fügetechnik mit extrem kurzen Schweisszeiten, welche grundsätzlich im Millisekundenbereich liegen. Die erforderliche Schweissenergie wird hierbei innerhalb weniger Millisekunden einem Kondensator bzw. einer Kondensatorbatterie entnommen, welche die Funktion eines Energiespeichers ausübt. Ältere Kondensatorentladungs-Schweissmaschinen arbeiten mit konventionellen Transformatoren und demgemäss langsamen Entladungen, die bei höheren Energien bis zu $^1/_{10}$ s dauerten. Diese Technik ist heute überholt. Eine alte Impulsschweissmaschine (Hersteller «R») und zwei neue Ultrapulsschweissmaschinen (Hersteller IPH) haben vergleichsweise folgende Daten:

Hersteller	Kapazität	Ladespannung	Spitzenstrom	Schweisszeit	Taktfolge
IPH 2000 Ws	400 µF	100...3000 V	90 kA	1,5 ms	30/min
«R» 2700 Ws	600 µF	900...3000 V	22 kA	10,0 ms	25/min
IPH 12000 Ws	2400 µF	100...3000 V	200 kA	1,5 ms	30/min

Die konventionelle Maschine hat einen Strom von nur 22 kA bei 10 ms Schweissdauer gegenüber 90 kA der gleich energetischen Ultrapulsmaschine. Da der Schweißstrom quadratisch wirkt, ergibt sich bei dem 4,5fachen Strom eine etwa 20fache lokale Energie/ms bei $^1/_7$ der Schweisszeit immer noch eine 3fache Schweissenergie. Infolge der Kürze des Impulses ist der Wärmeableitungsverlust vernachlässigbar, die erzeugten thermischen Spannungen stark verringert.

Beim Ultrapulsschweissen wird eine Kondensatorbatterie spannungsstabilisiert aufgeladen, womit dem Schweissgut eine vorgegebene Energie entsprechend $\frac{1}{2}\ CU^2$ [2]) konstant zur Verfügung gestellt wird. Netzspannungsschwankungen vergrössern oder verkleinern lediglich die Aufladezeit der Kondensatorbatterie, nicht aber die Energie. Die Ladezeitänderungen liegen im $^1/_{10}$ s-Bereich und sind für die Produktions-Taktfolge kaum von Einfluss. Da die Ladung bei Erreichen der eingestellten Energie (Spannung) automatisch unterbrochen wird, ist der Einfluss der Netzspannung völlig eliminiert.

Beim Schweissvorgang erfolgt die Entladung des Kondensators C gemäss Fig. 1 über einen Impulstransformator Tr mit geometrisch vorgegebener fester Kopplung und mit einem Übersetzungsverhältnis zwischen Primär- und Sekundärwicklung, das durch die Ladespannung des Kondensators und die Schweißspannung festgelegt ist. Die Aufladezeit der Kondensatorbatterie C ist abhängig von der gewünschten Energiegrösse in J[3]) einerseits und der Kapazität des Kondensators analog andererseits. Sie beträgt bei Klein-Schweissgeräten unter 100 J Zehntelsekunden und bis zu 2 s bei Schweissenergien von 12 000 J und darüber. Da ein idealer Schweisstransformator nicht möglich ist, entsteht in den Wicklungen induktiv gespeicherte Energie, die durch den sehr niederohmigen Gleichrichter parallel zur Primärwicklung nutzbringend dem Schweissgut zugeführt wird. Die Schweisszeiten liegen gemäss Fig. 2 im Millisekundenbereich, wobei vornehmlich zwischen 3 und 15 ms gearbeitet wird. Das Oszillogramm *a* zeigt die Entladungsform ohne, *b* mit Kurzschlussgleichrichter, einer heutigen Maschine entsprechend. Man sieht die drastische Kürzung der Impulsdauer.

2.2 Netzbelastung

Die Gegenüberstellung zwischen Ladezeit der Kondensatorbatterie und der effektiven Schweisszeit veranschaulicht, dass für das Aufladen der Kondensatorbatterie eine relativ lange Zeit erforderlich ist. Die grösste Netzbelastung während der Aufladung der Kondensatorbatterie einer Ultra-

[1]) Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

[2]) C Kapazität in µF, U Ladespannung in kV.

[3]) 1 Joule entspricht etwa ¼ cal. 1 Kilojoule vermag bei 100 % Wirkungsgrad etwa $^1/_{10}$ cm³ Fe zu schmelzen.

puls-Schweissmaschine liegt bei den Großschweisspressen mit einer Schweissenergie von 12 000 bis 24 000 Ws zwischen 25 und 50 kVA. Bei den bekannten Widerstands-Schweissmaschinen, die nach dem Phasenanschnittprinzip arbeiten, wird die Schweissleistung von z. B. 650 kVA für die Erzeugung des Energieimpulses direkt dem Netz entnommen. Die Schweisszeit einer Ultrapuls-Schweissmaschine ist jedoch noch etwa eine Zehnerpotenz kürzer als die einer Phasenanschnitt-Widerstandsschweissmaschine und würde bei direkter Impulsentnahme aus dem Stromnetz zu unerträglichen Belastungsspitzen führen.

Ein Beispiel aus der Praxis möge diesen Punkt näher veranschaulichen: Ein Werkstück aus 3 mm Stahlblech mit eingeprägtem Buckel der Dimensionen 20 mm lang, 6 mm breit und ca. 1,5 mm hoch ist mit einem ungeprägten Gegenstück ebenfalls aus 3 mm dickem Stahlblech zu verschweissen. Eine Ultrapuls-Schweisspresse mit einer Kapazität der Kondensatorbatterie von 1200 µF, einer Ladespannung von ca. 3 kV erfordert eine Ladezeit von 1000 ms bzw. 1 s. Die Schweisszeit bei dieser Maschine liegt bei 10 ms. Im Phasenanschnitt ist für die gleiche Aufgabe eine Maschine mit 250 kVA Elektrodenleistung erforderlich, welche das Netz für die Zeitdauer von 360 ms direkt belastete. Bei Vorgabe von 10 ms Schweissdauer sind einige MVA erforderlich.

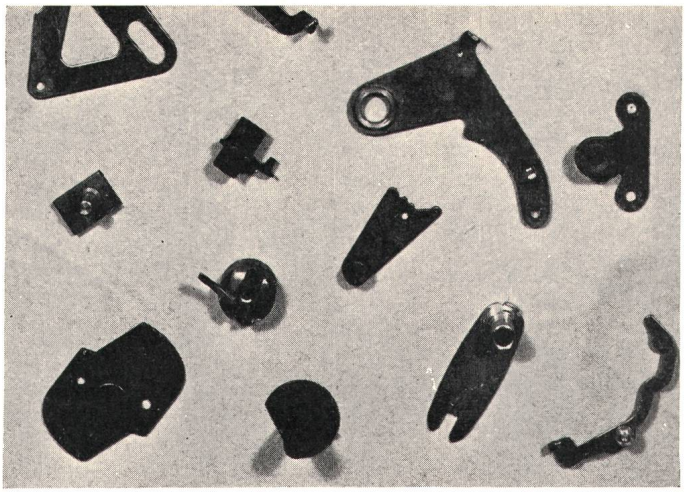


Fig. 3
Typische Schweissmuster,
die ohne Verzug mit hoher Toleranz geschweisst sind.
Impulsdauer etwa 3...6 ms

Dieser Vergleich zeigt, dass die Schweisszeiten im Verhältnis 1 : 36 kürzer sind, die Netzbelastung nahezu beliebig geringer, da die Aufladung zwischen den Schweissungen ohne Stoss erfolgt. Infolge interner Stabilisierung sind nahezu beliebig grosse Netzspannungsschwankungen ohne Einfluss.

2.3 Charakteristische Kennzeichen des Ultrapuls-Schweissverfahrens

Das Ultrapuls-Schweissverfahren ist gekennzeichnet durch:

a) Geringe Netzbelastung, damit kleinere Anschlusswerte und Kabelquerschnitte zwischen Maschine und Speisenetz;
b) Konzentration der Energie auf die Schweisszone, bedingt durch die extrem kurze Schweisszeit und damit minimaler Wäremeeinfluss über die Schweisszone hinaus;
c) Die Werkstücke kommen infolge Selbstabschreckung durch ihre eigene Masse praktisch kalt nach der Verschweissung aus der Maschine, bleiben formbeständig und zeigen keine Neigung zu Verzug oder Formänderung, so dass die zu fügenden Werkstücke nacharbeitungsfrei in den ISA-Qualitäten 8 – 10 – also in Montagequalität – vorbearbeitet werden können und nach der Verschweissung fertig sind.

Es ist möglich, in unmittelbarer Nähe thermisch empfindlicher Zonen Werkstücke durch Ultrapulsschweissen miteinander zu verbinden (Fig. 3).

d) Durch die spannungsstabilisierte Aufladung der Kondensatorbatterie wirken sich Spannungsschwankungen im Speisenetz im Schweissergebnis nicht aus, und die einmal ermittelten Maschineneinstellwerte sind voll reproduzierbar;
e) Bedingt durch die extrem kurze Schweisszeit werden die Schweisselektroden thermisch so gering belastet, dass eine Elektrodenkühlung nicht erforderlich ist;
f) Auch das Verschweissen von zwei Stanzteilen auf Distanzsäulen im Durchmesser-Längen-Verhältnis 1 : 10 ist möglich ohne Deformation der Werkstücke und ohne Nacharbeit (s. Fig. 4, wo vornehmlich Werkstücke zu sehen sind, die in einer Operation verschweisst wurden, bestehend aus Distanzsäulen und zwei Hebeln bzw. Formstanzteilen);
g) Darüber hinaus lässt die extrem kurze Schweisszeit im Millisekundenbereich die einwandfreie Verbindung von Metallen hoher elektrischer und thermischer Leitfähigkeit (einschliesslich Stählen mit einem Kohlenstoffgehalt von 0,3 %) zu.

Bei höherem Kohlenstoffgehalt ist zu berücksichtigen, dass der Selbstabschreckungsprozses nach dem Schweissvor-

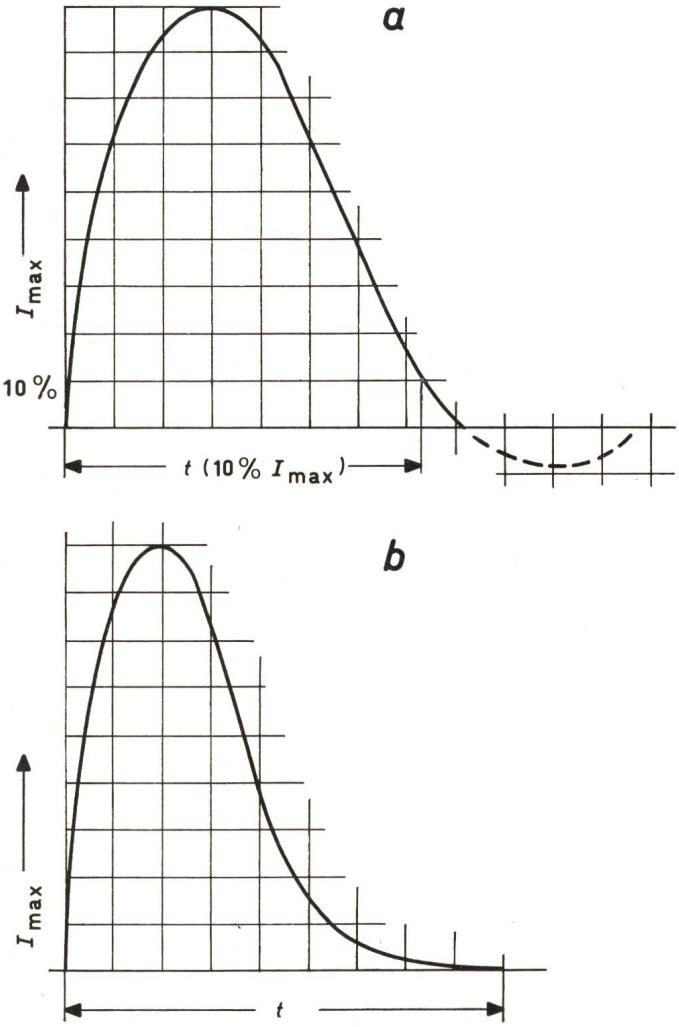


Fig. 2
Zeitlicher (*t*) Energieverlauf (*I*) der Ultrapuls-Schweissmaschine IPH (*b*) gegenüber japanischen, englischen und USA-Schweissmaschinen älterer Technik (*a*)
Die Maschinen in *a* schwingen durch, was Energieverlust am Werkstück und Lebensdauerverminderung an den Kondensatoren bedeutet, während beim IPH-Ultrapulsschweissen (*b*) ein Impuls hoher Leistung ohne Oszillation erzeugt wird (nahezu Gleichstrom-Verhalten).

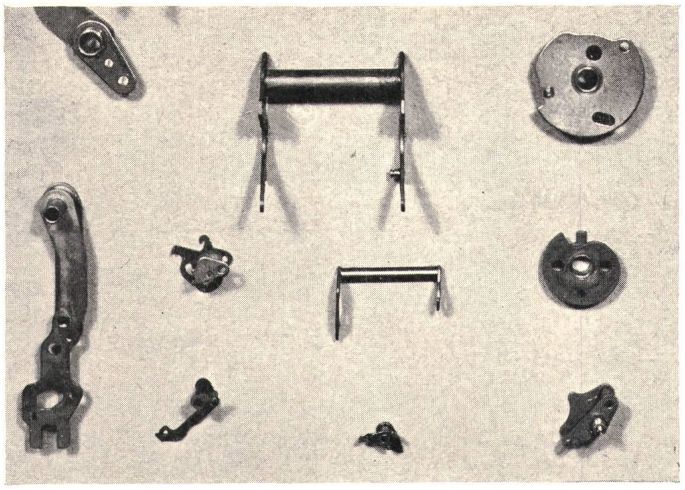


Fig. 4
Ultrapuls-geschweisste Stücke mit eng tolerierten Distanzsäulen, wobei elektrisch mehrere Schweisszonen in Serie liegen

gang zu Martensitbildung führt, so dass Werkstücke mit höherem Kohlenstoffgehalt nach der Verschweissung oft einer Wärmebehandlung wie beim Vergüten unterworfen werden müssen.

2.4 Beispiele Feinwerktechnik

Fig. 5 zeigt typische Ultrapuls-Schweissverbindungen aus der elektrischen Feintechnik, bei denen die Werkstücke in den Qualitäten 8 – 10 entsprechend den montagemässigen Toleranzen vorgefertigt waren und nach dem Verschweissen unter Fortfall der üblichen Operationen wie Richten, Reiben, Entgraten, Distanz senken usw. der Montage zugeleitet werden konnten.

In der Elektrotechnik wird das Ultrapuls-Schweissverfahren speziell für gut leitende Werkstoffverbindungen der Paarungen Kupfer/Aluminium, Kupfer/Bronze, Kupfer/Kupfer, Kupfer/Messung, Kupfer/Silber, Kupfer/Stahl, Messing/Silber, Nickel/Platin, Tantal/Nickel, Stahl/Silber, Stahl/Messing, Chrom/Nickel/Silber, Chrom/Nickel/Kupfer und Neusilber/Silber eingesetzt.

2.5 Energie, Druck und Schweisszeit als Parameter

Beim Ultrapulsschweissen sind Druckeinstellung und Energie sowie die Schweissimpulsdauer die wesentlichen Parameter zur Erreichung positiver Schweissergebnisse. Der Schweissdruck muss dem schmelzenden Material der Schweisszone schneller folgen können als die elektrische Impulsanstiegszeit. Fig. 6 zeigt rechts den hierfür zwischen Elektrodenpresse und Elektrode erforderlichen sog. Accellerator mit hoher Federkraft und kleiner Elektrodenmasse, links seine Ausführung. Die Nachführung der Kraft erfolgt schneller als 1 ms. Aus Fig. 7 ist ersichtlich, dass eine eindeutige Zuordnung von Elektrodendruck, Schweissenergie und Schweisszeit zu einem bestimmten Schweissvolumen hergestellt werden kann. Dieses Diagramm wurde empirisch ermittelt bei Schweissverbindungen von Naben bzw. Buchsen auf Stanzteile. Das Verhältnis der Nabendurchmesser und der Nabenlängen sowie die Dicke der Stanzteile gehen in den Energiebedarf ein, da mit zunehmender Nabenlänge bei gleichem Durchmesser sich entsprechend der Ohmsche Widerstand vergrössert und analog einen grösseren Energiebedarf erfordert bei gleichem Schweissvolumen und auch bei gleichem Elektrodendruck. Aus diesem Grunde wurde dem Diagramm auch ein Gültigkeitsbereich zugeordnet, der ausserdem die Form des Schweissvolumens berücksichtigt.

Die Schweissenergie wird beim Ultrapuls-Schweissverfahren in Wattsekunden ausgedrückt. Das Oszillogramm ergibt eine Kurve mit steilem Anstieg bis zur maximalen Stromstärke, einen relativ flachen Abfall nach Überschreiten des Maximums und ein asymptotisches Abklingen in e-Funktion gegen die Null-Linie. Durch die übliche Angabe der Schweissenergie in Ws ergibt daher ein Schweissimpuls mit kleinem I_{max} und langer Schweisszeit die gleiche Ws-Angabe wie ein Schweissimpuls mit sehr grossem I_{max} und kurzer Schweissimpulsdauer. Ausschlaggebend für den erforderlichen Energiebedarf für ein bestimmtes Schweissvolumen ist jedoch das Quadrat der max. Stromstärke multipliziert mit der Schweisszeit (Fig. 8).

Fig. 8 zeigt drei übereinanderliegende Energiekurven, die jeweils unter Verdoppelung der Schweissimpulsdauer für ein bestimmtes Schweissvolumen erforderlich waren. Die unterste Kurve bezieht sich auf eine einwandfreie Verschweissung eines bestimmten Volumens bei einer Schweisszeit von 6 ms und hohem I_{max}. Die mittlere Kurve bezieht sich auf die gleichen Schweissvolumina bei verdoppelter Schweissimpulsdauer, d. h. bei 12 ms, und die oberste Kurve zeigt den Energiebedarf des gleichen Schweissvolumens, allerdings bei einer Schweisszeit von 25 ms Impulsdauer. Es zeigt sich hierbei, dass bei Verdoppelung der Schweisszeit infolge Wärmeleitungsverlust ca. 30 % mehr an Energie in Ws zuzuführen sind, um die gleichen Schweissergebnisse zu erzielen. Aus diesem Grunde ist für die Ultrapuls-Schweisstechnik die Angabe der Wattsekunden-Energie allein völlig unzureichend, wenn die Impulsschweissdauer und die maximale Stromstärke nicht definiert sind. Es ist unerlässlich, neben der Ws-Angabe die Schweissimpulsdauer und maximale Stromstärke in A anzugeben. Da der Schweissdruck den Wirkwiderstand in der Schweißstelle vorgibt, ist er wesentlicher Faktor für ein positives Schweissergebnis. Daher wird beim Ultrapuls-Schweissverfahren die Auslösung der Schweissenergie druckabhängig vorgenommen, so dass der Schweissprozess erst einsetzen kann, nachdem der erforderliche Elektrodendruck aufgebaut ist.

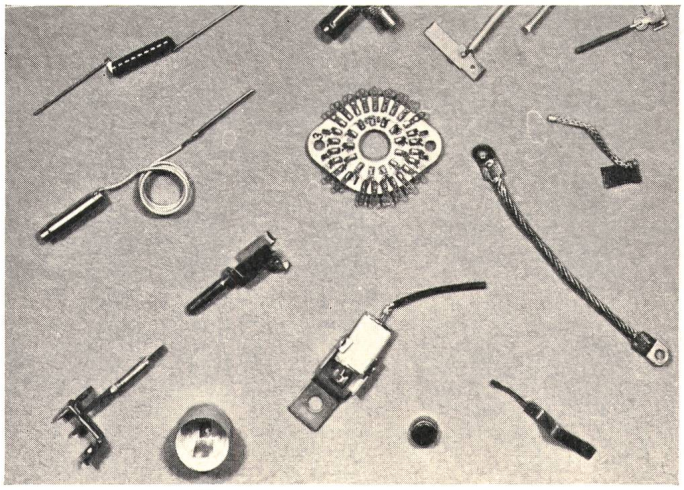


Fig. 5
Feintechnische Schweissungen aus dem elektrotechnischen Sektor

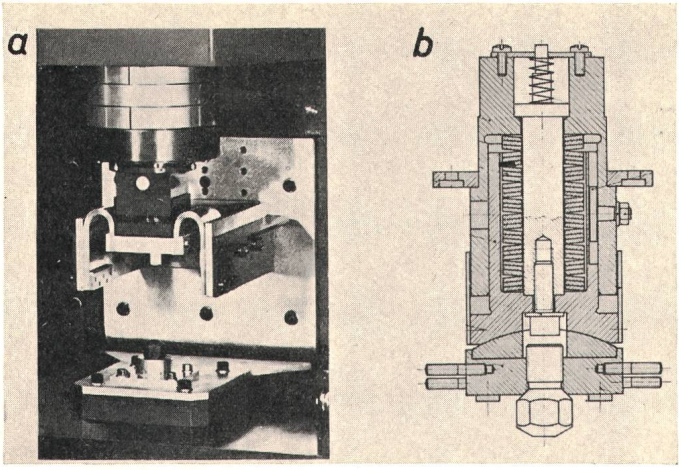


Fig. 6
Schweisspresse

a Ausführung
b Schnitt durch das Federpaket zur Elektrodenbeschleunigung

2.6 Werkstückgestaltung

Die hohe Energiekonzentration auf die Schweisszone erfordert eine besondere geometrische Gestaltung der Werkstücke. Nach Festlegung der gewünschten Festigkeit wird einem Werkstück auf spanabhebendem bzw. spanlosem Wege das erforderliche Schweissvolumen entsprechend der aus Festigkeitsgründen festgelegten Verbindungsfläche gegeben. Aus Fig. 9 sind einige charakteristische Schweissvolumina erkennbar, die durch Drehen auf dem Automaten bzw. durch Prägen der Werkstücke erzielt werden. Es handelt sich hierbei um Grundformen für die Ausbildung der Schweissvolumina, die sich in der Praxis bewährt haben und die selbstverständlich in mannigfaltiger Form variiert werden können. Welcher Grundform man den Vorzug in der Konstruktion gibt, ist abhängig von Gesichtspunkten der rationellsten Herstellung. Bei Vielfachverbindungen mit einem Schweissimpuls ist jedoch peinlichst darauf zu achten, dass alle Schweissvolumina der Teilstücke bei engsten Toleranzen schmelzflussmässig identisch sind und vor Auslösung des Schweissimpulses im elastischen bzw. auch plastischen Verformungsbereich elektrisch gleiche Übergangswiderstände haben, um gleichmässige Wärmeerzeugung und Verschweissung zu gewährleisten.

Bei den Drehteilen gibt man den Innenschultern bzw. Ringbuckeln einen Winkelbereich zwischen 90° und 150°, die sich unmittelbar an einen Zentrierzapfen zur Lageorientierung anschliessen. Bei Werkstücken mit höheren Biegebeanspruchungen wird man dem aussenliegenden Ringbuckel den Vorzug geben, obwohl diese Ausführungsform – bedingt durch die komplizierte Schneidengeometrie am Drehmeissel – mit höherem Aufwand herzustellen ist. Die Fertigungstoleranzen für die Schweissvolumina mit ca. 0,05 mm stellen keine überhöhten Anforderungen an die Dreherei.

Bei den spanlos hergestellten Buckelprägungen erhält der Prägestempel einen Winkel zwischen 50° und 60°, was sich als günstigste Form in bezug auf Zurückverformung der Prägung während des Schweissvorganges einerseits und Standzeit des Prägestempels andererseits herausgestellt hat.

Fig. 10 zeigt die benötigten Elektrodenformgebungen und -Materialien beim Schweissen von Feindrähten.

2.7 Geräteabstufungen

Bedingt durch den grossen Arbeitsbereich, der von der Ultrapuls-Schweisstechnik bestrichen wird, ist es erforderlich, die Schweissgeräte vom Leistungsbereich und von der Wirtschaftlichkeit der zu investierenden Mittel her sinnvoll abzustufen.

Bis 1000 Ws wird der Energiebereich in mehrere Geräte-Grundtypen aufgeteilt, an welche dann die fertigungsgerechten Schweisselemente wie Pinzetten, Schweisszangen und Schweissköpfe angeschlossen werden. Im Zuge der Rationalisierungsbestrebungen wurden inzwischen die rein manuell betätigten Schweissgeräte für den Sektor bis 1000 Ws Schweissenergie durch pneumatisch betätigte Schweisszangen und Schweissköpfe ergänzt.

Die schweren Ultrapuls-Schweissgeräte werden als hydraulisch betätigte Schweisspressen in C-Konstruktion standardmässig ausgeführt. Der Pressenständer ist üblicherweise eine Schweisskonstruktion und enthält die Arbeitshydraulik, Impulstransformator und Schweisskopfsteuerung sowie Kondensatorbatterie und Stromversorgungsteil. Da oft vakuumdichte Ringschweissungen anliegen, werden an die Formstarrheit der C-Presse und an die Toleranzen der Führungslager sehr hohe Anforderungen gestellt. Bei Großschweisspressen werden Kondensatorbatterie und Stromversorgungsteil – bedingt durch die entsprechenden Dimensionen – als separate Einheiten der Schweisspresse beigeordnet (Fig. 11). Der Abstand der Einheiten untereinander ist unkritisch.

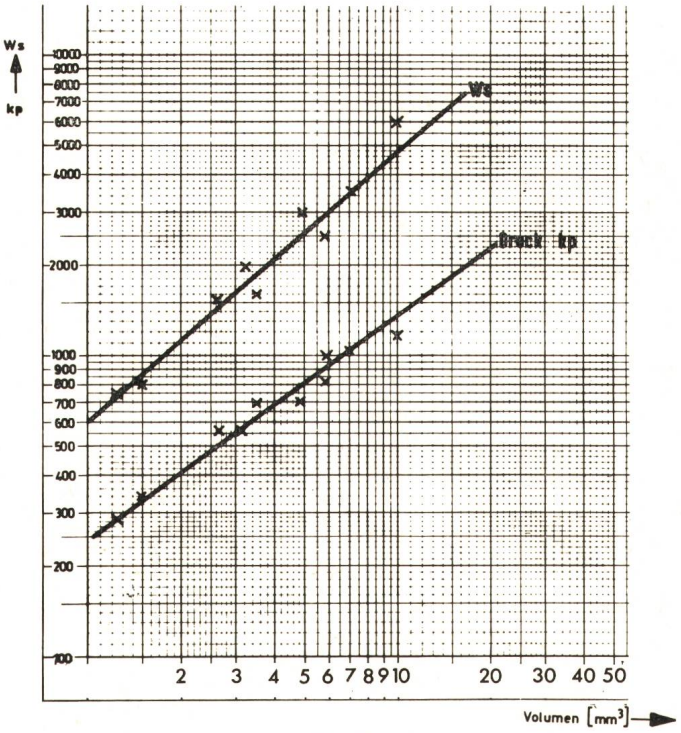


Fig. 7
Richtwerte für Energie und Druck

Werkstoffpaarung: Automatenstahl St 9 S20 K
Bandstahl St 2 K40
Schweissvolumen: Gemäss Fig. 1
Gültigkeitsbereich: D : H ≙ 1 : 0,5...1 : 1,5
($D : H > 2$ Energie reduzieren)
($D : H < 0{,}66$ Energie erhöhen)

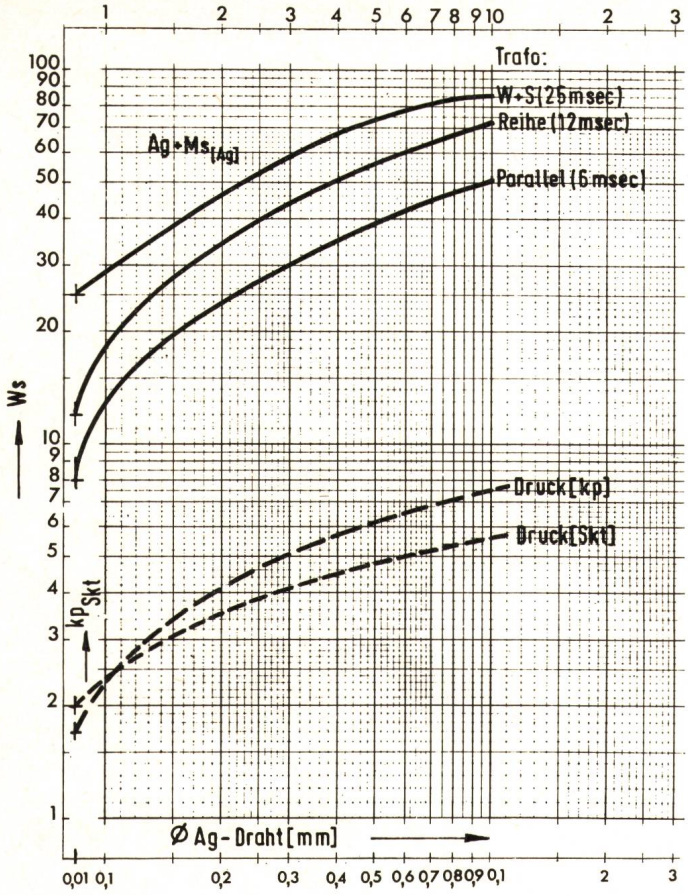


Fig. 8
Richtwerte Druck — Energie für die IPH FF 101

2.8 Schlussbetrachtung

Obwohl die Ultrapuls-Schweisstechnik bei alleiniger Betrachtung der aufzuwendenden Investitionsmittel für die Maschine aufwendiger ist als eine Widerstandsschweissmaschine nach dem Phasenanschnittverfahren, hat sich diese Technologie in zunehmendem Masse in der Serienfertigung und Massenproduktion der Präzisionsteilefertigung durchgesetzt. Durch die Einsparung von Arbeitsplätzen, bedingt durch den Fortfall von Nacharbeit, wird die Wirtschaftlichkeit bereits bei einjährigem Betrieb erreicht und andererseits ein Sektor von Fertigungsarbeiten der Fügetechnik problemlos beherrscht, der von anderen Fügeverfahren nicht oder nur bedingt erfasst wird.

3. Laser-Impulsschweissungen

Der Laserstrahl und der Elektronenstrahl gestatten eine Aufheizung, d. h. auch Schweissung ohne Druckanwendung und Berührung, mithin ohne Verunreinigung der Oberfläche durch das Elektrodenmaterial. Bei anderen thermischen Bearbeitungsverfahren liegt als Werkzeug eine Wärmequelle vor, die eine bestimmte Temperatur hat, z. B. ein Schweissbrenner, eine Halogenlampe usw. Dadurch fusst die Bearbeitung auf einem Wärmeübergangsproblem: Das Werkstück kann nicht wärmer als das Werkzeug werden; bei steigender Temperatur verläuft die Aufheizung langsamer.

Im Gegensatz dazu stellt der Laserstrahl – ähnlich wie der Elektronenstrahl – ein Werkzeug dar, das keine konstante Temperatur hat, sondern eine konstante Leistung auf dem Werkstück absetzt (das gilt auch für den Impulslaser, solange der Impuls andauert). Deshalb ist es auch unsinnig zu sagen, mit dem Laser wäre irgendeine bestimmte Temperatur zu erreichen, denn der Laser kann theoretisch jedes Werkstück auf jede beliebige Temperatur aufheizen, sofern er nur lange genug einwirkt und die Leistungsdichte (W/cm²) hoch genug ist.

Die Laserfertigung wird stets einen Kompromiss schliessen müssen zwischen sehr kurzen Impulsen und dem anderen Extremfall – einer zu geringen zugeführten Leistung – bei der die Wärmeableitung einen Effekt des Strahles auf das Werkstück verhindert, selbst wenn der Impuls sehr lang ist. Das bedeutet aber, dass die Laserbearbeitung alle Probleme der Wärmetechnik zu berücksichtigen hat und eine Vernachlässigung irgendwelcher Grössen nicht zulässig ist.

Wenn man die Leistungsdichte auf dem Werkstück verringert, z. B. durch Strahl-Defokussierung und Impulsverlängerung, wie es z. B. beim Impulsschweissen üblich ist, wo der Werkstoff nur erschmolzen und nicht abgetragen werden soll, so ist bereits eine deutliche Abhängigkeit des erschmolzenen Schweissvolumens von der Oberflächenreflektion des Werkstückes feststellbar. Ganz grob kann man sagen, dass beim Schweissen die Strahlreflektion an der Werkstoffoberfläche eine Rolle spielt, beim Abtragen kaum.

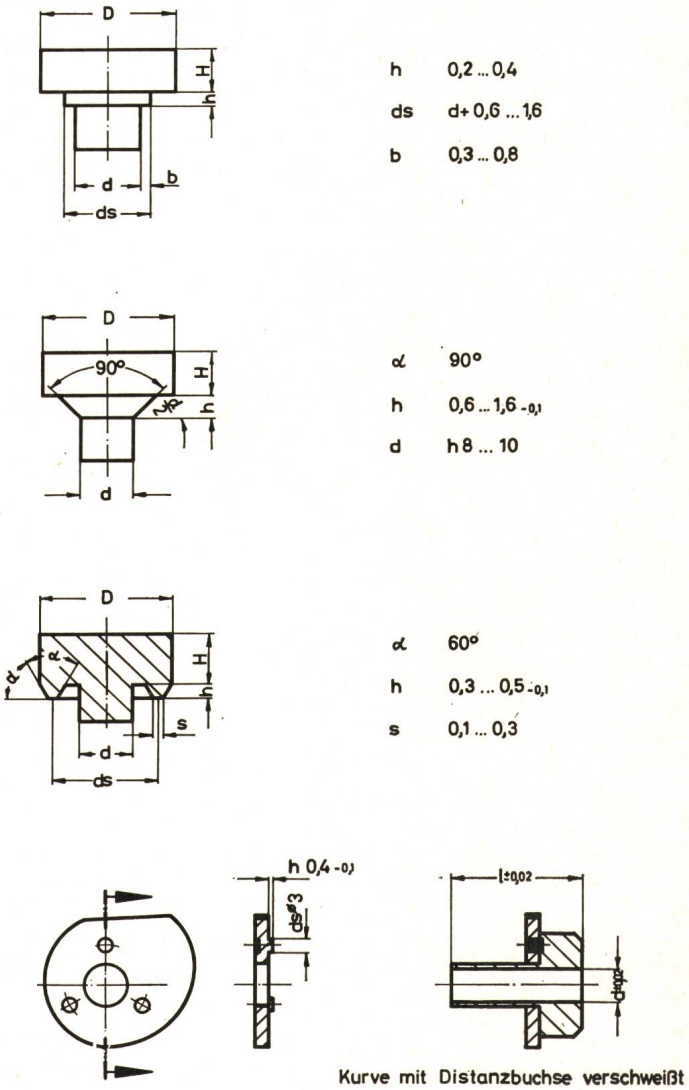


Fig. 9
Empfehlenswerte Formgebungen für Ultrapulsschweisslinge
mittels Drehautomaten oder Stanzen herstellbar

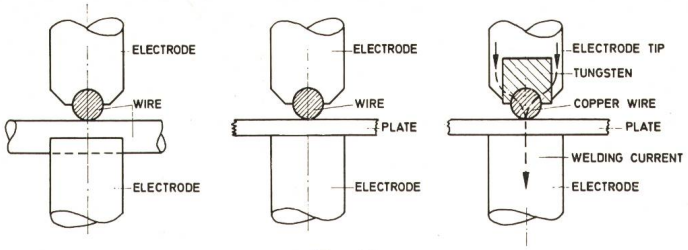


Fig. 10
Elektrodenform und -Metall für Feindrahtschweissungen

Der Laserstrahl ist ein Lichtstrahl, der auf Grund seines Entstehungsmechanismus aus kohärentem, monochromatischem Licht besteht. Diese Eigenschaften unterscheiden ihn von Licht, das aus thermischen Lichtquellen entsteht: Während beim Fokussieren eines normalen Lichtstrahles in einem Brennfleck in diesem Leistungsdichten entstehen, die immer kleiner als die der Strahlquellen sind (Sonne zum Beispiel $5 \cdot 10^2$ W/cm²), erreicht der Laserstrahl im Brennfleck wesentlich höhere Werte (10^{10} W/cm² und mehr). Der Brennfleckdurchmesser liegt im allgemeinen bei 5 bis 500 µm, die Lichtwellenlänge im sichtbaren oder nahen infraroten Bereich [3].

Der Strahl kann mit allen Werkstoffen, die das Licht der jeweiligen Laserwellenlänge absorbieren, in Wechselwirkung treten, zum Beispiel heizt ein roter Laserstrahl alle Metalle auf, nicht jedoch Glas und andere durchsichtigen Werkstoffe. Ein infraroter CO_2-Laser dagegen heizt auch die meisten Glassorten auf, nicht jedoch die Halbleiter Germanium und Silizium, weil diese für infrarotes Licht durchlässig sind. Auch wird er an vielen Metallen, z. B. Edelstahl, fast völlig reflektiert.

Heute haben zwei Arten von Lasern für das Schweissen Bedeutung erlangt:

1. Der Gas- (besonders CO_2-) Laser, der kontinuierlich mit einer Wellenlänge von etwa 10 µm arbeitet, in Normalausführung 0...1 kW erreicht (in Sonderfällen 10 kW), und einen Wirkungsgrad von über 10 % aufweist. Bei grossem Leistungsvermögen wird das Strahlerzeugungssystem sehr voluminös.
2. Der Festkörper – besonders Rubin, YAG und Neodymglas –, der wegen seines geringen Wirkungsgrades im Impulsbetrieb arbeitet mit einer Wellenlänge zwischen 0,6 und 1,1 µm, je Impuls in Normalausführung 1...100 Ws Energie aussendet bei einem Wirkungsgrad unter 1 %.

Die Impulsdauer ist mit 1...8 ms relativ lang, weil der Strahl nicht in den Werkstoff eindringt, kommt es darauf an, dass die benötigte Schmelzwärme aus der vom Strahl getroffenen Oberfläche in den tieferen Werkstoff eindringt, und zwar so, dass an der Oberfläche des entstehenden Schmelzbades die Verdampfungstemperatur noch nicht überschritten wird. Dies ist bei vielen Metallen möglich, bei Kunststoffen wegen geringer Wärmeleitfähigkeit jedoch nicht innerhalb der verfügbaren Impulsdauer von etwa 10^{-2} s. Daher muss bei nichtleitenden Werkstoffen mit kontinuierlich strahlenden Laserquellen gearbeitet werden.

Infolge guter Wärmeleitung und Kühlbarkeit werden Impulsenergien im Bereich von 20...100 J mit grossen Rubin-Lasern erzeugt. Neodym als aktives Material und einen Kristall als Wirt weist der Neodym-YAG-Laser auf (YAG-Yttrium-Aluminium-Granat). Da der YAG höher mit Neodym dotiert ist (höherer Prozentsatz Neodym im Kristall), ist der Wirkungsgrad besser. Zusammen mit der guten Wärmeleitfähigkeit gibt das die Möglichkeit, den Nd-YAG-Laser im «Dauerstrich» und quasi stationär zu betreiben (z. B. 50 Hz bei relativ niedriger Impulsenergie). Für kleinere Impulsenergien von einigen Joule ist heute der YAG-Laser dem Rubin-Laser überlegen, während oberhalb von etwa 12 J aus Kostengründen zurzeit der Rubin ökonomischer ist.

3.1 Wechselwirkung Strahl–Werkstoff

Eines der wichtigsten Forschungsergebnisse ist für die Strahlbearbeitung die Erkenntnis, dass der Laserstrahl bereits in der Werkstoffoberfläche absorbiert wird [2]. In dem sehr kleinen Volumen, das aus Brennfleckfläche und Eindringtiefe gebildet wird, setzt der Strahl seine Impulsenergie ab. Auf der anderen Seite beginnt bereits bei sehr kurzen Impulszeiten (10 ns) der Wärmetransport in den umgebenden Werkstoff. Über die Wirkung des Laserimpulses auf den Werkstoff entscheiden die Impulsenergie und der Wärmetransport; der letztere wiederum ist abhängig von Wärmeleitfähigkeit, Temperaturdifferenz und Strahleinwirkdauer.

Für den Dauerstrichlaser gilt ähnliches; für ihn ergibt sich die Einwirkdauer aus der Relativgeschwindigkeit zwischen Werkstück und Laserstrahl. Ein normaler Laserimpuls von 1...8 ms Länge und 2...50 Ws Energie besteht bei 2...50 kW Leistung aus mehreren hundert Einzelimpulsen (Spikes) von etwa 1 µs Dauer. Diese Spikes sind schon relativ lang gegenüber der Wärmetransportgeschwindigkeit, d. h., jeder einzelne Spike erhitzt ein bestimmtes Werkstoffvolumen auf

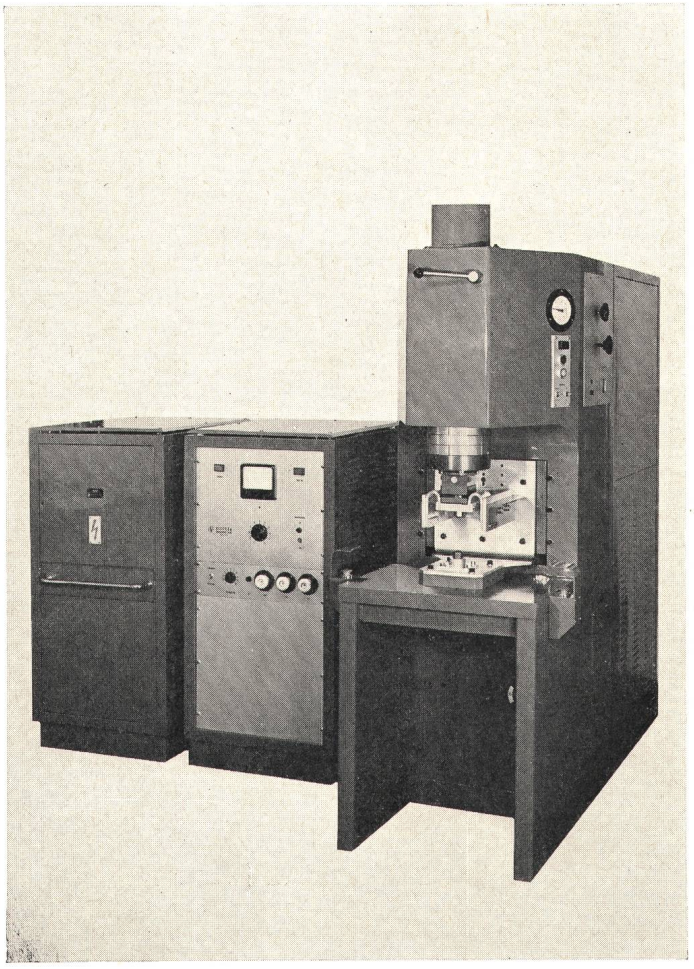
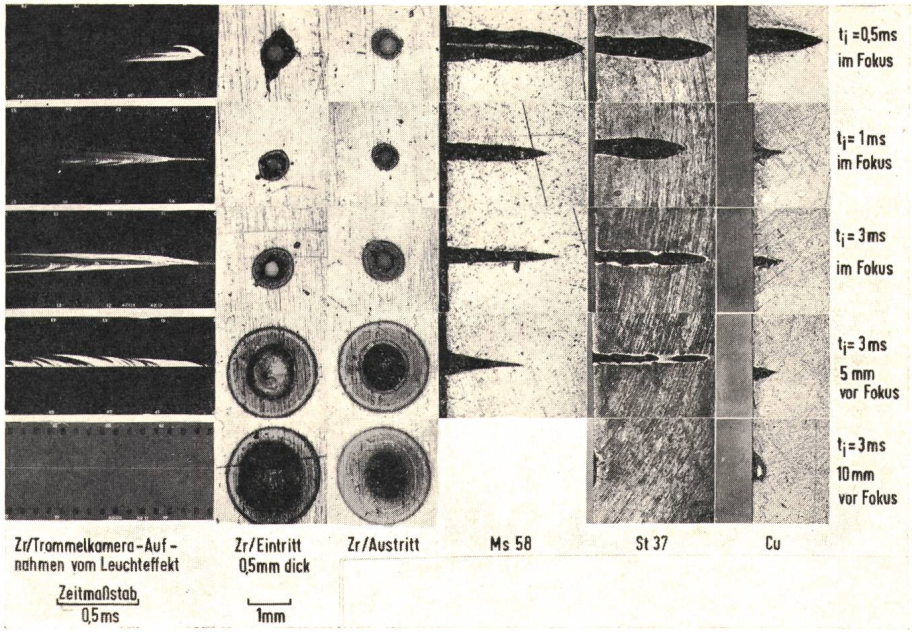


Fig. 11
Ultrapuls-Großschweissmaschine für 12 000 Ws
Der Ladeteil und die Kondensatorbatterie können entfernt von der Maschine stehen.

Fig. 12
Seitlich fotografierte Schmieraufnahme von Laserabtrag an Zirkon

links: Impulsenergie 8,2 Ws, Werkstückdichte 0,5 mm; oben bei 0,5 ms und unten bei 3 ms Impulsdauer

rechts: Übergang zwischen Abtragen (*oben*) und Schweissen (*unten*) mit Laserstrahlen durch Variation von Impulsdauer und Fokuslage, Impulsenergie 8,2 Ws



Temperaturen über dem Verdampfungspunkt und trägt es ab in Form einer mässig überhitzten Plasmafackel, die den eintretenden Strahl praktisch ungehindert passieren lässt. In den Pausen zwischen den Spikes findet kein Abtrag statt.

Das dampfflüssige Plasma reisst schmelzflüssige Werkstoffteilchen aus der Strahlauftreffstelle mit heraus. Aus der Neigung der Plasmafackeln und der Bahnen der Werkstofftröpfchen gegenüber der Senkrechten in den Schmieraufnahmen der Fig. 12 lässt sich z. B. die Geschwindigkeit der Teilchen, die Temperatur und der Druck an der Arbeitsstelle abschätzen.

Der Einfluss von Impulsdauer und Defokussierung lässt sich aus der Fig. 12 rechts ersehen (Optik: hochwertiger Luft-Achromat): Bei 0,5 ms Impulsdauer erhält man in dem guten Wärmeleiter Kupfer das Loch mit der besten Zylindrizität, in Eisen und Messing erst bei 3 ms. Ein Schweisspunkt ergibt sich für alle drei Werkstoffe – besonders aber für St 37 – erst, wenn sich die Werkstückoberfläche 10 mm vor dem Fokuspunkt befindet. Ist sie dichter davor, findet Abtrag statt; es entsteht ein Loch.

Für Nichtmetalle gelten die gleichen Überlegungen wie für Metalle, jedoch ist bei diesen die Wärmeleitfähigkeit im allgemeinen um zwei bis drei Zehnerpotenzen kleiner. Das führt dazu, dass die Wärme aus der entstandenen Kunststoffschmelze zum grossen Teil erst nach dem Impuls in den umliegenden Werkstoff abgeführt wird. Selbstverständlich muss auch bedacht werden, dass viele Kunststoffe keine flüssige Phase beim Erwärmen bilden und schon deshalb nicht für ein Verschweissen geeignet sind.

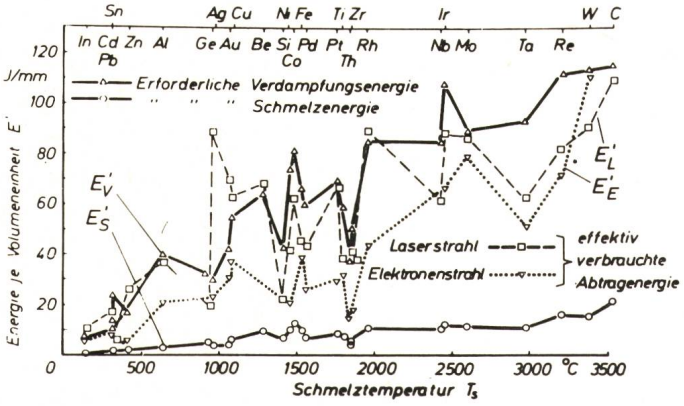


Fig. 13
Zur Wirkweise des Werkstoffabtrages mit Elektronen- und Photonenstrahlen
(II. Intern. Kolloquium «Strahltechnik», 19./20. Januar 1968, S. 173...214, von Dr.-Ing. A. Visser, Braunschweig)
Erklärungen siehe im Text

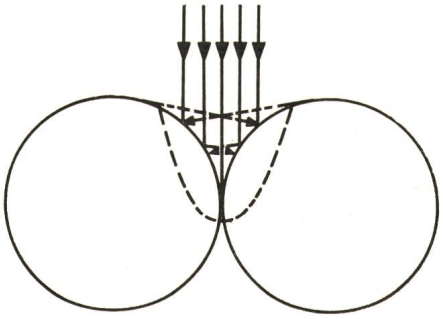


Fig. 14
Laserschweissung paralleler Drähte
Erklärungen siehe im Text

Im Gegensatz zum Ultrapulsschweissen ist bei allen Strahlschweissverfahren – hier sind sich Laser- und Elektronenstrahl ähnlich – Schmelz- und Verdampfungsenergie bzw. -temperatur der zu verbindenden Metalle bedeutsam. Fig. 13 zeigt [4] für 27 Metalle die pro Volumeneinheit benötigte Strahlungsenergie und die Schmelztemperatur. Hilfsweise ist noch die effektiv verbrauchte Abtragenergie für Laser- und Elektronenstrahl eingetragen.

Grundsätzlich arbeitet man gemäss Fig. 14 bei Laser-Impulsschweissung mit einem in Normalrichtung auf den gewünschten Schweisspunkt gerichteten schwach divergenten oder konvergenten Strahl, hier vereinfachend parallel skizziert. Durch Aufheizung, Wärmeleitung und Schmelzenbildung während der Strahleinwirkzeit geschieht die Erzeugung eines kleinen, meist runden Schmelzbades, wobei Wärmeleitung und Durchmeser die Impulsdauer zwischen etwa 1...8 ms ergeben. Mittels einer Zahl von 50...100 Probeschweissungen unter jeweiliger Prüfung des Schweissgutes im Querschnitts-Schliffbild und auf Festigkeit wird Energie,

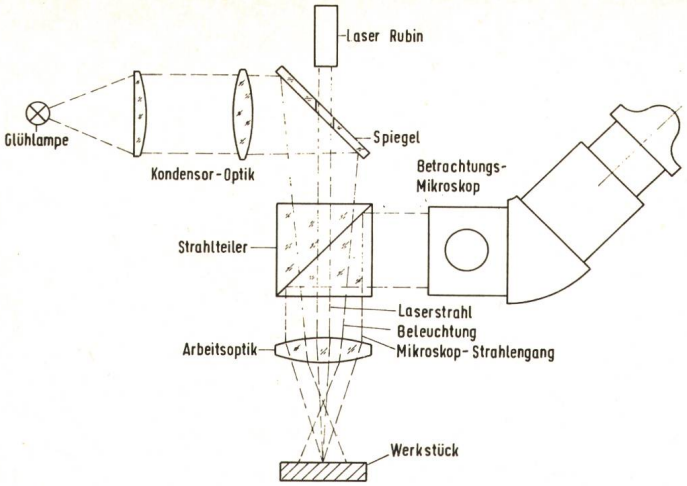


Fig. 15
Schema der Laseroptik
Beobachtungen der Schweisszone während Justierung und Schweissung
Erklärungen siehe im Text

Impulsdauer und Strahlführung optimiert. Das gefundene Ergebnis ist dann für das betreffende Werkstück und Werkstoffpaar gültig.

Laserimpulsschweissmaschinen arbeiten nach dem Prinzip gemäss Fig. 15, wobei durch eine Hilfsoptik mit Beleuchtung – das Auge ist durch ein Laser-Sperrfilter am Beobachtungsmikroskop geschützt – die ständige Kontrolle erfolgt. Wie stark Justierungen des Brennflecks auf das Resultat eingehen, zeigen die Figuren 16...18 mit ihren Unterschriften.

3.2 Steuerung der Schmelzbadtiefe durch Impulsdauer und Brennfleckdurchmesser

Eine Verkürzung der Impuls-(spike-)dauer unter 1 µs führt zu einer zunehmenden Überhitzung des austretenden Werkstoffes; das Plasma ist so hoch angeregt, dass es den einfallenden Strahl absorbiert. Deshalb findet bei einem sog. Q-switch-Impuls von 20 ns Dauer (2 Ws, 100 MW) nur noch ein sehr geringfügiger Abtrag statt. Gemäss dem Prinzipschaltbild Fig. 19 arbeiten mit gesteuerten Q-switch-Impulsen feintechnische Auswuchtmaschinen.

Da der Strahl nur die eigentliche Werkstoffoberfläche erwärmt, kann ein Schweissvorgang nur erreicht werden, wenn die Energiedichte so klein gewählt wird, dass gerade kein Abtrag stattfindet, der Impuls aber so lange dauert, dass eine nennenswerte Wärmemenge in den umliegenden Werkstoff fliessen kann und diesen erschmilzt. Dadurch entstehen halbkugelförmige Schmelzzonen. Während also der Werkstoff an der Oberfläche nicht verdampfen darf, sollte ein möglichst grosses Werkstoffvolumen erschmolzen werden. In der Praxis werden Impulszeiten bis zu 8 ms verwendet, die zu Schmelzbadtiefen von etwa 0,5 mm bei 1 mm Baddurchmesser an der Oberfläche führen. Eine weitere Verbesserung lässt sich durch entsprechende geometrische Formgebung des Werkstückes an der Schweißstelle erreichen.

Aus den kleinen Abmessungen ergibt sich die Feststellung, dass das Laserschweissen nach dem heutigen Stand der Technik nur in der Feinwerktechnik sinnvoll einzusetzen ist, besonders wenn berücksichtigt wird, dass die Impulsfrequenz bei Energiewerten von 20 Ws wegen des schlechten Wirkungsgrades und der deshalb notwendigen Kühlung des Laserkopfes nicht über 1/s liegt und es deshalb nicht wirtschaftlich vertretbar erscheint, längere Nähte durch Punkt-

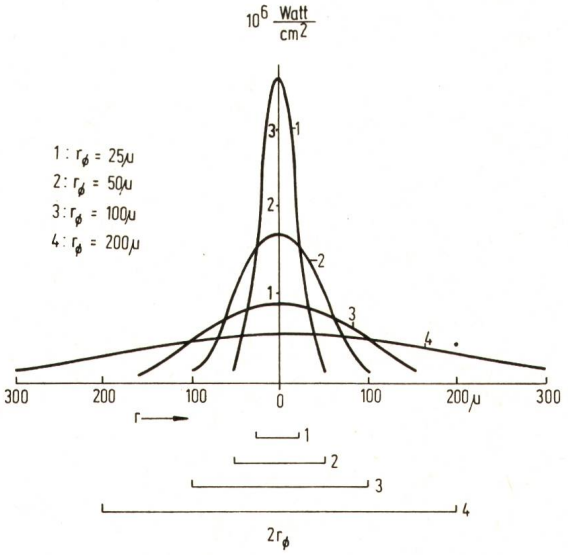


Fig. 17
Verteilung des spezifischen Wärmestroms über den Radius des Aufheizungsfleckes an der Oberfläche eines dicken Kupferbleches
Erklärungen siehe im Text

an-Punkt-Schweissung zu fertigen. Bei kleinen Energien sind naturgemäss analog höhere Taktfolgen möglich.

Fig. 20 zeigt, wie der Schmelzzonenradius z (Schmelztemperatur T_s) mit wachsender Einwirkzeit t zunimmt, wenn die Strahlauftreffstelle punktförmig gedacht ist und durch den Strahl auf der Verdampfungstemperatur T_F gehalten wird. Durch eine Verbreiterung des Brennfleckes ist eine weitere Vertiefung der Schmelze möglich, jedoch ist ein Tiefschweisseffekt wie beim Elektronenstrahl beim Laserstrahl nicht zu erwarten. Ausser durch eine Verlängerung des Impulses bei konstanter Impulsenergie lässt sich die Energiedichte an der Werkstückoberfläche durch entsprechendes Defokussieren des Brennfleckes verringern. Da sich bei minderwertigen Optiken eine Brennfleckaufweitung durch die Linsenfehler von selbst ergibt, ist es häufig möglich, in Laserschweissmaschinen einfache Optiken zu verwenden, im Gegensatz zu Laserbohrmaschinen, die hochwertige Optiken benötigen [6].

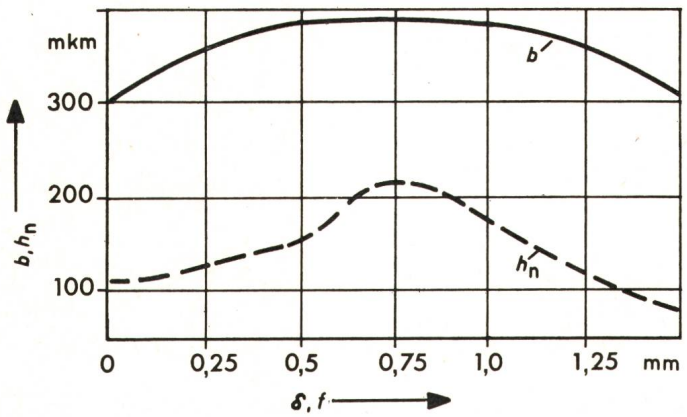


Fig. 16
Änderung der Tiefe und Breite des Schmelzflusses in Abhängigkeit vom Grade der Defokussierung «nach oben» für Stahl U8A
b Breite des Schmelzflusses
h_n Tiefe des Schmelzflusses
Weitere Erklärungen siehe im Text

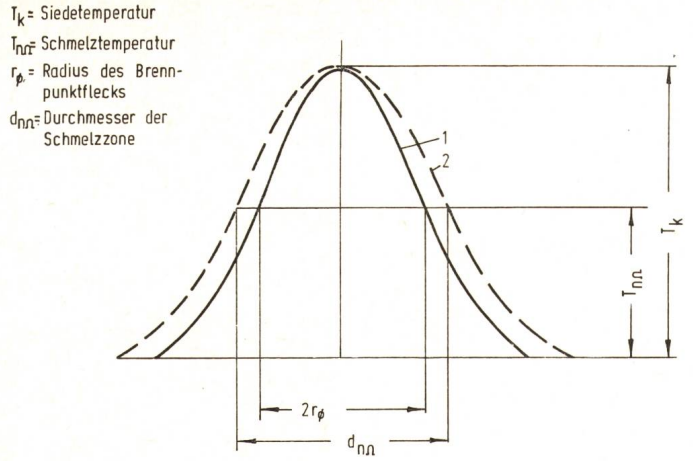


Fig. 18
Temperaturverteilung auf der aufzuheizenden Fläche (1) und im Endstadium des Aufheizungsvorganges (2)

3.3 Werkstoffbeeinflussung

Neben Formfehlern tritt bei der thermischen Strahlbearbeitung mittels Laser oder Elektroden eine Werkstoffbeeinflussung auf. Auch diese lässt sich pauschal in mehrere Gruppen einteilen:

a) Bei härtbaren Metallen kann die Wärme in der Lochumgebung durch Selbstabschreckung so schnell in den umgebenden kalten Werkstoff abgeführt werden, dass hier ein harter Feinkorn-Martensit entsteht, der nur schwer anätzbar ist. Im Anschluss an diese Schicht findet man ein Gebiet mit üblicher martensitischer Struktur. Erst darunter kommt das Grundgefüge. Die Breite dieser Zonen ist im erheblichen Masse von den Werkstoffparametern und von den Strahlkenngrössen – insbesondere von der Leistungsdichteverteilung – abhängig.

b) Bei spröden Werkstoffen – Rubin, Diamant, Keramik, Glas – kann es zu feinen Rissen im Werkstoff kommen, weil diese Werkstoffe die nach der Bearbeitung in der Randzone entstehenden Zugspannungen nicht aufnehmen können. Teilweise kann das erwünscht sein (Ritzen von Substraten!). Auch wenn diese Rissbildung beim Laser nicht so stark auftritt wie beim Elektronenstrahl, weil der Laser den Werkstoff «der Reihe nach» abträgt, während der Elektronenstrahl in ein grösseres Volumen eindringt und dieses «langsam» aufheizt und abträgt, so muss jedoch bisweilen Abhilfe geschaffen werden. Das geschieht z. B. in der Uhrenstein-Fertigung durch Aufheizen der Werkstücke vor der Bearbeitung. Hierdurch wird der Temperaturgradient im Werkstück, der allein für die Spannungen massgebend ist, abgebaut.

c) Einige Werkstoffe wandeln sich unter Einfluss hoher Temperaturen um. Der bekannteste Vertreter dieser Gruppe ist der Diamant, der bei Überschreitung der Graphitierungstemperatur von ca. 1300...1800 °C zu Graphit wird. Da das Diamantgitter metastabil ist, benötigt der Vorgang keine Umwandlungsenergie, d. h., dass am Bearbeitungsrand eines Diamanten immer eine mehr oder weniger dicke Graphitschicht eintritt, weil in dieser Zone ja immer Temperaturen bis zur Verdampfungstemperatur des Diamanten (3700 °C) angelegen haben.

d) Durch chemische Veränderungen – insbesondere Verdampfen einzelner Werkstoffkomponenten – kann es in der Randzone zu Änderungen im Aufbau, aber auch zu Formfehlern kommen. So weisen einige Kunststoffe eine schwarze Schicht am Rande der Bearbeitungszone auf, weil von dem Werkstoffkomponenten nur noch der Kohlenstoff übrig blieb. In anderen Werkstoffen, z. B. einigen Glasarten, kommt es zum Schaumigwerden durch Abspaltung von Sauerstoff aus der Legierungskomponente Na_2O.

Trotz der geschilderten Einschränkung stellt das Laserstrahlverfahren heute unter anderem ein voll einsetzbares Fertigungsverfahren dar, das sich nicht nur technisch, sondern auch wirtschaftlich gegen ältere Verfahren durchsetzt. Zehn Jahre nachdem es erstmals gelang, den Lasereffekt nachzuweisen, stehen heute viele Lasermaschinen in der Serienfertigung, wie etwa der Abtraglaser für das Durchbohren von Uhrenlagersteinen oder Laserschweissmaschinen für das Verschweissen von Tonkopfhälften, bei denen es auf Vermeidung jeder Druckanwendung und Verunreinigung durch Elektrodenmetall ankommt.

4. Induktive Impulsschweissung

Ergänzend zum im vorigen Absatz behandelten Strahlschweissen mittels Laser oder Elektroden ist neuerlich ein weiteres berührungsloses Schweissverfahren realisiert worden, das mit induktiv erzeugter Wärme arbeitet. Das Verfahren entstand quasi beiläufig bei der Entwicklung der sog. Impulshärtung. Während bei der Härtung nur martensitische Stähle benutzt werden und die Erhitzung nur auf Temperaturen unterhalb des Schmelzpunktes erfolgt, meist auf 1100...1300 °C, wird beim induktiven Impulsschweissen (oder auch Hartlöten) die Schmelztemperatur überschritten. Wie beim Impulsschweissen, ist auch hier eine hochstabilisierte Energie (Spannung und Impulsdauer $\pm$ ½ %) vorgegeben, die mittels des dem Werkstück angepassten Induktors auf das zu verbindende Werkstückpaar übertragen wird. Fast beliebige, auch 3dimensional ausgebildete Formgebungen sind prinzipiell möglich. Eine Schwierigkeit liegt in der leistungsmässig umgekehrt quadratisch eingehenden Distanz zwischen Induktor und Werkstück, eine andere in der ähnlich dem Impulsschweissen vorzusehenden raschen druckmässigen Nachführung der beiden Werkstücke aufeinander zu während der Ausbildung der oberflächlichen flüssigen Phase, die man sich wie eine flüssige Haut vorstellen kann. Es wird mit der Arbeitsfrequenz von 27,12 MHz gearbeitet. Die Wärme wird im Gegensatz zum Laser nicht auf einer nahezu unendlich dünnen Oberfläche, sondern bis zu $^1/_{10}$ mm in die Tiefe gehend entsprechend dem Skineffekt der Hochfrequenz erzeugt. Um das Prinzip mehr zu verdeutlichen, sei die Impulshärtung nachfolgend beschrieben, die heute bereits bei der technischen Serienfertigung von Kameraverschlussteilen, Sägezähnen und im Textilverarbeitungssektor eingesetzt wird.

Aus den Wünschen der feinwerktechnischen Industrie und der Sägenhersteller heraus ergab sich die Notwendigkeit, Untersuchungen theoretischer und experimenteller Art vor-

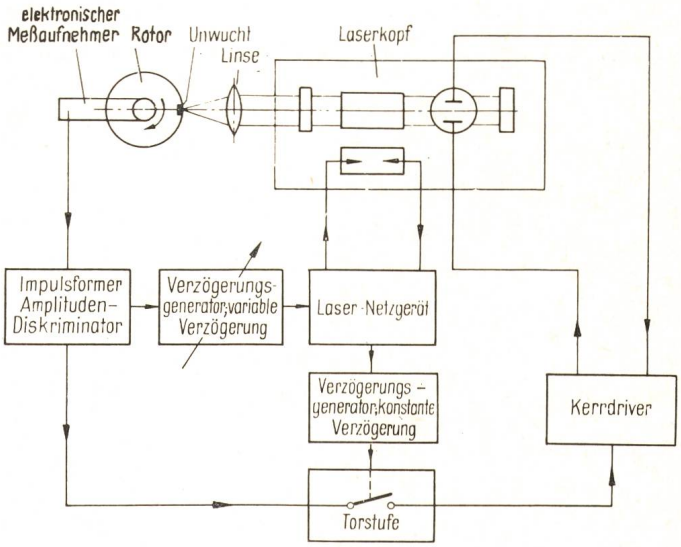


Fig. 19
Prinzipschaltbild der Auswuchtanordnung mit Kerrzellen-Q-switch-Laser
Erklärungen siehe im Text

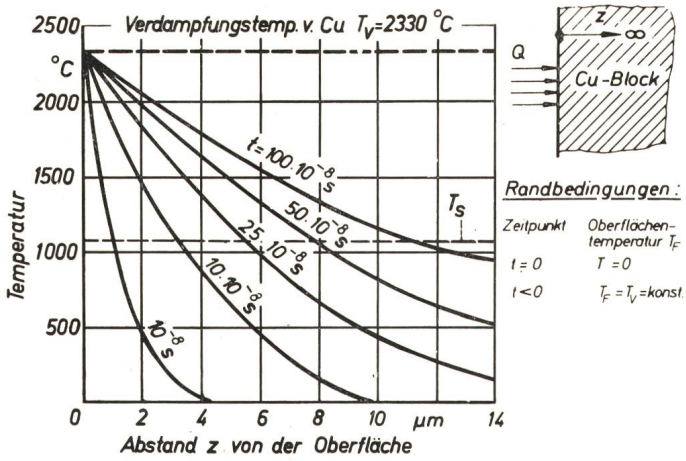


Fig. 20
Temperaturausgleich in einem einseitig unendlich ausgedehnten Kupferkörper nach Visser

zunehmen, ob und inwieweit es gelingt, wesentlich höhere Standzeiten von Werkzeugen und Sägen mittels höherer Härtegrade zu erreichen, als sie nach den bisherigen Härteverfahren möglich sind [5; 6].

Die Impulshärtung ist ein neuartiges Härtungsverfahren, bei dem die Erwärmung auf die Härtetemperatur in Millisekunden durch einen elektrischen Impuls und die für eine Härtung notwendige anschliessende Abschreckung durch Selbstabschreckung ohne ein zusätzliches Kühlmittel erreicht wird. Die erforderliche plötzliche Kühlung leitet man durch ein spontanes Abschalten der Energiequelle (Rechteckimpuls) ein.

Die Impulshärtung ist anwendbar bei unlegierten und einer Reihe von legierten Stählen; eine ausreichende Wärmeleitfähigkeit für die Selbstabschreckung ist die unabdingbare Voraussetzung. Bei höher chromhaltigen Stählen mit schlechter Wärmeleitfähigkeit werden die für die Impulshärtung notwendigen Bedingungen in unzureichendem Mass erfüllt. Das bei der Impulshärtung entstehende harte Gefüge ist ausserordentlich feinkörnig und weist eine hohe Elastizität auf, so dass es zu keiner Versprödung kommt. Der Korrosionswiderstand ist erheblich erhöht. Durch die Impulshärtung wird einfacher Kohlenstoff-Stahl in seinen technologischen Eigenschaften wesentlich verbessert und lässt sich bisweilen anstelle von legierten Stählen einsetzen.

Besondere Vorteile des Impulshärtens sind: Ausführung der Härtung in kürzester Zeit; genaue Festlegung der Härtezone; ausserhalb der Härtezone keine schädliche Erwärmung; keine Formveränderung; Selbstabschreckung ohne Kühlmittel; keine Netzstromstösse durch Speicherprinzip, also stabilisierte Einstellwerte trotz Netzschwankungen; man arbeitet mit einer internationalen Industriefrequenz; die Betriebs- und Wartungskosten sind gering; weiterhin eignet sich das Verfahren gut für einen vollautomatischen Betrieb mit photoelektrischer Impulsauslösung bei stetig bewegtem Werkstück, das im übrigen keinem Verzug unterliegt.

4.1 Physikalische Grundlage

Bereits 1968 trugen *L. Ettenreich* und *F. Früngel* auf der Kurzzeit-Physik-Tagung in Freudenstadt erste Ergebnisse mit dem Impulshärten vor. Bei sich über Jahre erstreckenden eingehenden Untersuchungen wurde festgestellt, dass sich durch eine Verkürzung der Aufheiz- und Abkühldauer in den ms-Bereich sehr hohe Härtegrade erreichen lassen, ohne dass ein nachfolgendes Vergüten mittels thermischer Behandlung erforderlich ist. Die erzielbaren Gewinne an Lebensdauer waren überraschend.

Die für die Härtung sowie Abschreckung beanspruchten Zeiten liegen i. a. wesentlich – bis zu einer Zehnerpotenz und mehr – unter den kürzesten bisher üblichen Beaufschlagungen des Werkstoffs bei Ausführung normaler Induktionshärtungen im Durchlaufprozess. Das Abschrecken von der vergleichsweise weit über dem üblichen liegenden Oberflächentemperatur geschieht grundsätzlich durch Wärmeleitung in den kaltgebliebenen Teil des Werkstoffs.

Diese Selbstabschreckung benötigt daher im Prinzip kein Kühlmittel. Wird ein Kühlmittel trotzdem benutzt (Pressluft oder fliessendes Wasser), so dient dieses nicht der Abschreckung, da die Kühlung durch Wasser zeitlich langsamer vor sich geht als die durch Selbstabschreckung, sondern das Wasser dient in diesem Falle der Isolation gegen den etwaigen Funkenüberschlag von dem Härteinduktor auf das Werkstück.

4.2 Härtegefüge

Das Härtegefüge hat eine gegenüber normal gehärtetem Stahl wesentlich geringere Anätzbarkeit. Während nämlich durch die üblichen metallographischen Ätzmittel das Gefüge des unbehandelten Stahles nach kurzer Zeit sehr stark anätzt, bleibt das Schliffbild im Bereich des nach dem beschriebenen Verfahren behandelten Stahles (z. B. bei einer drei Minuten dauernden Einwirkung 3%iger alkoholischer Salpetersäure) hell und zeigt keine Gefügedetails. Dementsprechend erhält man einen stark erhöhten Korrosionswiderstand.

4.3 Härtung und Schweissung mittels Hochfrequenz- (HF-) Impulsen

Für das Härten oder Schweissen mittels Hochfrequenzimpulsen wird der zu härtende Werkstückteil in oder an eine zweckentsprechende ausgebildete Induktionsspule geschoben, die – resonanzmässig abgestimmt – am HF-Generator angekoppelt ist: Je grösser die Generatorleistung, um so kür-

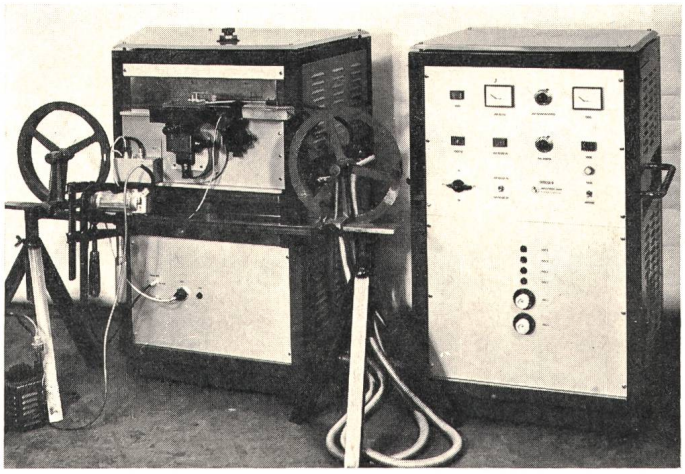


Fig. 21
Impulshärtemaschine IMPULSA H mit einer Vorrichtung zum Versuchshärten einer Bandsäge
Im rechten Gerät wird der Impuls erzeugt. Der linke Geräteteil ist der HF-Oszillator mit einem Schwingkreis sehr hoher Güte, in dem bei 30 kW Wirkleistung bis zu 2000 kVA Blindleistung oszillieren. An diesem ist der Induktor angekoppelt. Er ist gegenüber den zu härtenden Sägezähnen in allen Koordinaten durch Mikrometertriebe verstellbar

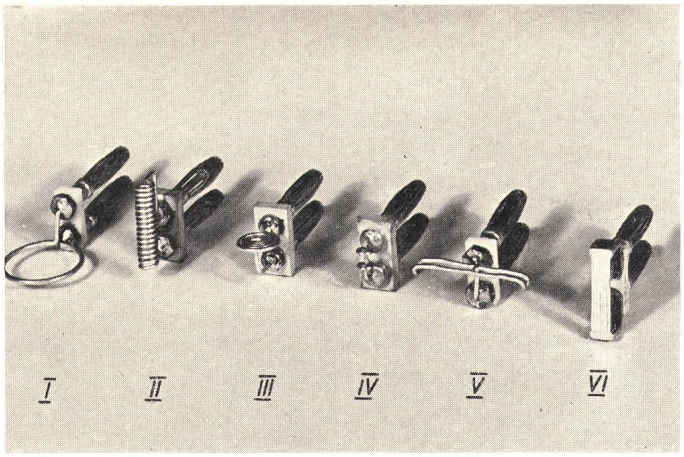


Fig. 22
Typische Impulshärte-Induktoren
Erläuterungen siehe im Text

zer ist die mögliche Impulszeit. Eine Eindringtiefe d bei der HF-Erhitzung ist auch bei beliebig kurzer Impulsdauer durch die Induktionsfrequenz gegeben gemäss

$$d = 503 \sqrt{\frac{\varrho}{f \mu}}$$

mit d als der Eindringtiefe, ϱ als der elektrischen Leitfähigkeit, μ als der magnetischen Permeabilität (NE-Metalle = 1), f ist die Frequenz. Die Schichtdicke ist umgekehrt proportional der Wurzel der Frequenz. Zu hohe Frequenzen ergeben Koppelschwierigkeiten. Man findet bei Fe mit μ = 100 bei Raumtemperatur eine Eindringtiefe von etwa 3 µm; bei Erhitzen über die Curie-Temperatur, z. B. bei 1000 °C eine Tiefe von etwa 0,1 mm bei Anwendung der 27-MHz-Industriefrequenz. Da die Einschaltdauer nur ms beträgt, fliesst die erzeugte Induktionswärme durch Wärmeleitung in den angrenzenden kalt gebliebenen Werkstoff nur geringfügig ab. Infolge der plötzlichen Beendigung der Erhitzung ist eine extrem kurze Abkühldauer gewährleistet.

Fig. 21 zeigt den kommerziell heute bereits erhältlichen Hochfrequenz-Impulsinduktionsgenerator. Der Härteimpuls entsteht, indem kondensatorgespeicherte Energie dem leistungsstarken und frequenzkonstanten Trioden-Oszillator-System zugeführt wird. Das zu härtende Werkstück wird durch den niederohmigen Induktor an einer dünnen Oberflächenschicht im Millisekundenbereich fast zur Schmelztemperatur erhitzt und durch Selbstabkühlung abgeschreckt. Das Gerät ist in der Figur mit einer kleinen Durchlaufvorrichtung zum Härten von Sägen versehen. Die Positionierung gegenüber der Induktorschleife geschieht mit einer 3-Koordinaten-Mikrometereinstellung, da es auf kleinste Toleranzen ankommt. Die auslösende Lichtschranke ist in zwei Ebenen justierbar, mit etwa 2 MVA Blind- und max. 30 kW Wirkleistung.

4.4 Die Induktortechnik beim Impulshärten und -schweissen

Voraussetzung für eine einwandfreie Impulshärtung und -schweissung ist die Verwendung geeigneter Induktoren. In Fig. 22 sind sechs typische Induktoren für folgende Einsatzzwecke dargestellt:

I Dieser Induktor ist zum Härten von Schlitzfräsern und kleinen Kreissägeblättern bis 35 mm Durchmesser geeignet. Die Härtung geschieht bei dieser Ausführung mit einem einzigen Impuls, d. h. ohne Werkstückbewegung.

II Dieser Induktor dient zum Härten von Rundstäben bis 3 mm Durchmesser und 30 mm Länge.

III Dieser spiralförmige Induktor eignet sich zum Härten runder Flächen bis zu 10 mm Durchmesser, z. B. auch zum Impulshärten dünner metallischer Blättchen auf massiven Unterlagen.

IV Dieser Induktor hat eine zum Härten mit kontinuierlichem Vorschub von einzelnen Sägezähnen geeignete Form. Der Induktor muss der jeweiligen Form der Sägezähne angepasst werden. Die Position des Zahnes zum Induktor bestimmt die Härtezone.

V Dieser Induktor dient zum Härten eines Stichsägeblattes mit Wellung. Den Vorschub kann man ebenfalls kontinuierlich vornehmen.

VI Dieser Induktor ist zum Härten rechteckiger Flächen bis etwa 20 mm × 3 mm konstruiert.

Induktoren lassen sich praktisch nicht berechnen, sondern müssen für jeweilige Aufgaben empirisch ermittelt werden. Ein geeigneter Werkstoff für die Induktoren ist Silber- oder platinierter Kupferdraht. Je nach Aufgabe wird Rund- oder Flachmaterial benutzt. Der Querschnitt liegt zwischen 0,2 und 3 mm². Die Kühlung muss der Impulsfrequenz entsprechen. Pressluftkühlung reicht meist bis etwa 4 Impulse/s. Darüber hinaus wird der Induktor aus Silberrohr gefertigt. Eine Umlaufkühlung (destilliertes Wasser mit einem Überdruck von 10 bis 20 bar) sorgt dann für die erforderliche Wärmeabfuhr. Die Fertigung der Induktoren bedarf stets einer besonderen Vorrichtung, die für das betreffende zu härtende Werkstück erstellt wird. Die Fertigungstoleranzen müssen bei etwa ±20 µm liegen. In Entwicklung befindlich sind Induktoren aus geschichtetem Werkstoff, z. B. Silber-Kupfer- oder Silber-Stahl, die es ermöglichen, verhältnismässig grosse Flächen zu beaufschlagen.

Die Positionierung des Gutes gegenüber dem Induktor erfordert eine genaue mechanische Einstellung und dementsprechende Vorrichtung. Fig. 23 zeigt die Einstellvorrichtung einer Lichtschranke für die optisch-elektronische Steuerung bei automatischem Vorschub des Härteguts, z. B. bei Sägen.

Im allgemeinen wird man zum Schweissen Anordnungen gemäss Fig. 24 vorzusehen haben, wobei in Pfeilrichtung ähnlich dem Impulsschweissen der Druck einzuwirken hat, möglichst unter Zwischenschaltung eines isolierenden, z. B. keramischen Zwischengliedes, um die Abwanderung von Induktionsspannungen und Energieverlust durch elektrische Abstrahlung zu verhindern. Die Formgebung von Werk-

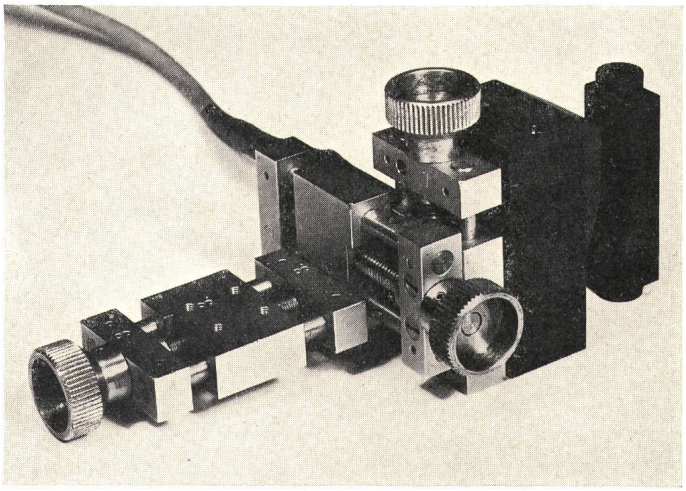


Fig. 23
Support für die Justierung der optisch-elektronischen Steuerung bei automatischem Vorschub des Gutes

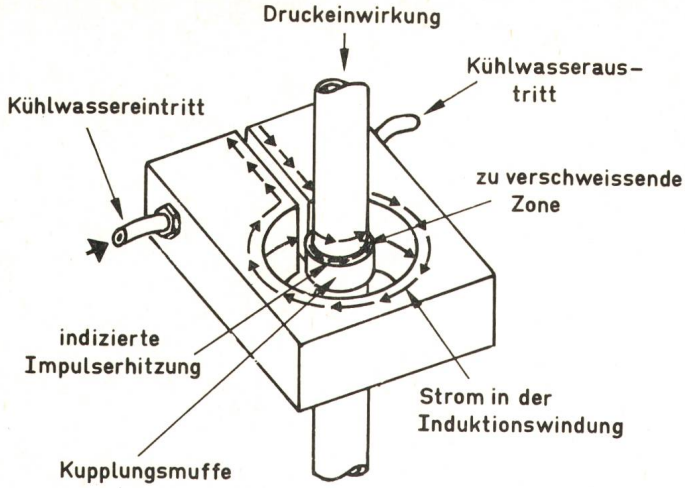


Fig. 24
Druckeinwirkung in Pfeilrichtung oben und induktive Impulserhitzung am Beispiel einer Verschweissung von Rohr mit Muffe

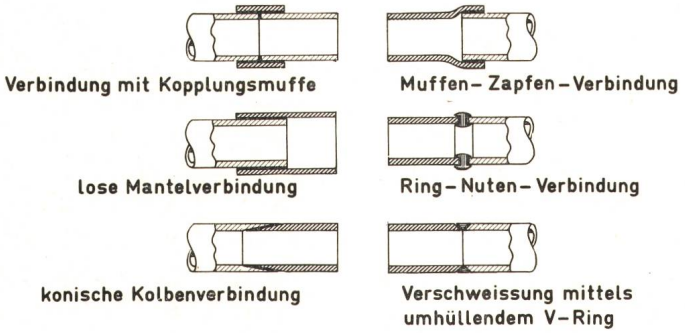


Fig. 25
Formgebung von Werkstücken für Kurzzeit-Induktionsverschweissung
Die Schmelzzone ist schwarz

stücken mit Eignung zur Impuls-Induktionsschweissung zeigt Fig. 25. Zu beachten ist stets, dass bei sehr kleinen Dimensionen, z. B. Durchmessern unter oder um 1 mm herum, die Erwärmung im Zeitbereich von etwa 5...50 ms vollzogen ist und die Drucknachführung entsprechend rasch ausgebildet sein muss. Bei fest neben- oder übereinander angeordneten Werkstücken mit einer automatisch ineinander verfliessenden Schmelzbadzone sind sehr viel längere Impulszeiten notwendig infolge der trägen Wärmeleitung, und die Impuls-Induktionsschweissung geht dann in die konventionelle Induktionserhitzung über, wobei geringe Arbeitsfrequenzen im Gebiet einiger hundert KHz wesentlich preisgünstiger die erforderlichen Leistungen zu erzielen erlauben. Dabei wird die hier vorliegende Thematik der Kurzzeitschweissung jedoch verlassen.

Literatur

[1] *F. B. A. Früngel:* Conversion of capacitively stored energy into heat. In: F. B. A. Früngel: High speed pulse technology. Vol. I, Chapter G. New York/London Academic Press, 1965; p. 338...401.

[2] *G. Kuper:* Überlegungen vor der schweisstechnischen Anwendung des Lasers. Der Praktiker, Schweissen und Schneiden 22(1970)9, S. 206...207.

[3] *R. Hartung*: Kondensatorentladungsschweissen in der Feinwerktechnik und Elektroindustrie. Der Praktiker, Schweissen und Schneiden 23(1971)2, S. 35.

[4] *A. Visser:* Zur Wirkungsweise des Werkstoffabtrages mit Elektronen- und Photonenstrahlen. In: Strahltechnik II. Vorträge des II. internen Kolloquiums «Strahltechnik» in Aachen vom 19. bis 20. Januar 1968. Düsseldorf, Deutscher Verlag für Schweisstechnik GmbH, 1968; S. 173...215.

[5] *F. Früngel, L. Ettenreich* und *K. H. Andre:* Impulshärten von Stahl. VDI-Z 114(1972)14, S. 1073...1078 + Nr. 16, S. 1234...1237.

[6] *F. Früngel:* Impulse härten Stahl. Vortrag auf dem deutschen Härtereikolloquium in Wiesbaden, September 1971. Maschinenmarkt 78(1972)12, S. 219...222.

Adresse des Autors:
Dr.-Ing. *F. Früngel,* International Impulsphysics Association e. V., D-2000 Hamburg 56, Dr.-Ing. *G. Kuper* und Ing. *R. Hartung,* Impulsphysik GmbH, Sülldorfer Landstrasse 400, D-2000 Hamburg 56.

Einsatz des Elektronenstrahlschweissens im Instrumentenbau

Von *E. Mettler*

Der Aufsatz ist auf die Anwendung des Elektronenstrahlschweissens in der Fabrikation von mechanischen Messinstrumenten hoher Genauigkeit ausgerichtet, insbesondere aber auf die Herstellung von sog. Kapselfedermembranen und Aneroiddosen, die als Messfühler das Kernstück dieser Instrumente darstellen. Da die Qualität dieser Instrumente in hohem Masse von der Güte der Membranen oder Dosen abhängig ist, und diese ihrerseits von den Verbindungsverfahren, die zu ihrer Herstellung verfügbar sind, drängte sich die Anwendung dieses Schweissverfahrens aus mehreren Gründen auf. Diese sollen hier aufgezeigt werden.

Obwohl Nichttechniker, habe ich es übernommen, diesem Aufsatz eine kurze Einleitung über die Grundlagen des Elektronenstrahlschweissverfahrens zu geben. Ich bitte um Nachsicht, wenn dabei irgend etwas nicht genügend deutlich dargestellt werden sollte.

In groben Zügen sind die physikalischen Vorgänge dieses Verfahrens die folgenden:

Träger der Schweissenergie ist das Elektron. Dies ist ein Elementarteilchen, das eine Ruhemasse aufweist, eine negative Elementarladung trägt, ein magnetisches Moment und einen Eigendrehimpuls besitzt. Es befindet sich in der Atomhülle der Materie, wo es energetisch festgelegte Zustände einnimmt. Bei Metallen sind die äussersten Elektronen nur sehr schwach an die Atome gebunden. Durch Energiezuführung kann man sie zum Austritt aus der Metalloberfläche bringen. Bei den Elektronenstrahlschweissmaschinen geschieht dies durch Glühemission, erzeugt durch Zuführung elektrischer Energie, unter Verwendung eines meist direkt geheizten Wolframdrahtes.

Der Elektronenstrahl wird grundsätzlich in einem Vakuum von etwa 10^{-4} Torr in einer sog. Kanone erzeugt. Diese besteht in den Hauptgruppen aus einer Wolframkathode und einer ringförmigen Anode. Durch Anlegen einer Hochspannung von beispielsweise 30...200 kV zwischen Kathode und Anode, die, wie das Werkstück, am Massenpotentional liegt, erfolgt die nötige Beschleunigung der Elektronen, die dann mit bis zu ⅔ der Lichtgeschwindigkeit auf das Werkstück auftreffen.

Zwischen der Anode und dem Werkstück befindet sich eine elektromagnetische Fokusierlinse und eine Ablenkspule. So können Brennflecken erzielt werden mit Durchmesser