

## Metall-Aktivgasschweißen MAG / Metall-Inertgasschweißen MIG

Dr.-Ing. Stefan Trube, Cloos Innovations-GmbH, Herborn  
Dipl.-Ing. Erst Miklos, Linde Gas AG, Unterschleißheim

### 1. Definitionen und Begriffe

Dem Metallschutzgasschweißen MSG wird in der ISO 857 die Kennziffer 2430 zugeordnet. Die erste Kennziffer -2- besagt, daß es sich um ein Schmelzschiessen handelt, bei dem die Fügeflächen angeschmolzen werden müssen. Die zweite Kennziffer -4- beschreibt den Energieträger: elektrische Gasentladung (Lichtbogen). Der Unterschied zu anderen Schmelzschiessprozessen mit Lichtbogen als Energieträger -z.B. Stabelektrode oder UP- besteht in dem Schutz des Lichtbogens und der Schweißzone gegenüber der Atmosphäre durch einen Mantel aus Gas, das von einer äußeren Quelle zugeführt wird. Die Abgrenzung gegenüber anderen Schutzgasprozessen mit Lichtbogen -z.B. WIG oder Plasma- erfolgt durch das Abschmelzen der Elektrode welche zugleich auch Zusatzwerkstoff ist.

Das Abschmelzen des Zusatzwerkstoffes im Lichtbogen macht den MSG-Prozess besonders wirtschaftlich, da gegenüber WIG oder WP wesentlich höhere Abschmelzleistungen erreicht werden.

Das Prinzip des MSG Schweißens beruht also auf dem Aufschmelzen des Grundwerkstoffes, Abschmelzen des Zusatzwerkstoffes mit anschließendem Übergang in das Schmelzbad, wobei als Energiequelle ein Lichtbogen dient und der ganze Vorgang unter Schutzgas stattfindet, **Bild 1**.

Je nach Schutzgasauswahl wird das MSG-Schweißen in das:

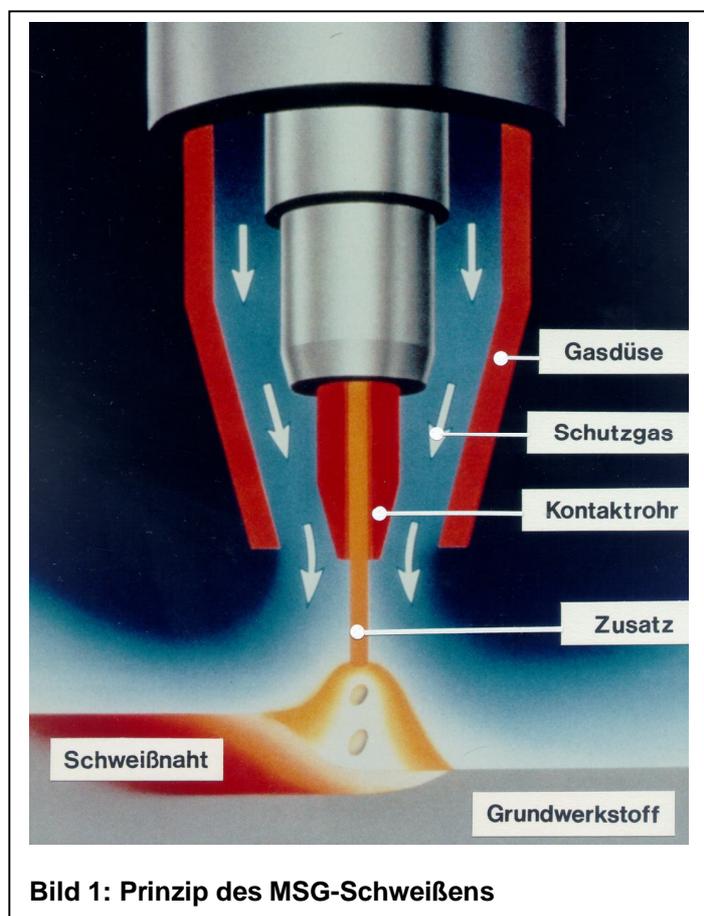
- **Metall-Inertgasschweißen (MIG)**, bei dem der Schutz durch ein **inertes** Gas, z.B. Argon oder Helium erfolgt, oder in das
- **Metall-Aktivgasschweißen (MAG)**, bei dem der Schutz durch ein chemisch **aktives** Gas erfolgt, unterteilt.

Der zu verschweißende Grundwerkstoff bestimmt nicht nur die Auswahl des Zusatzwerkstoffes (abschmelzende Elektrode), sondern auch das Schutzgas (inert oder aktiv) und somit den Prozeß (MIG oder MAG). Das MIG-Schweißen kommt immer dann zum Einsatz, wenn keine Reaktion zwischen Werkstoff und Schutzgas erwünscht ist, z.B. bei Aluminiumlegierungen. Das MAG-Schweißen wird an Werkstoffen eingesetzt die eine Reaktion (überwiegend Oxidation) mit dem Schutzgas zulassen und bei denen der Aktivgasanteil entscheidend zur Prozeßstabilisierung beiträgt, z.B. bei allen Stahlsorten. Der zulässige Oxidationsgrad des Schweißgutes bestimmt auch die Menge der aktiven Komponente(n) in dem Schutzgas.

Eine erste Einteilung nach dem Schutzgas erfolgt beim MAG-Prozeß gemäß DIN 1910 Teil4 in:

- **MAGC** = Schutzgasschweißen unter reinem  $\text{CO}_2$
- **MAGM** = Schutzgasschweißen unter **Mischgas** (= inerte und aktive Komponente(n))

Aus Sicht des Mechanisierungsgrades sind beide Prozesse, MIG und MAG, in folgenden Varianten einsetzbar:

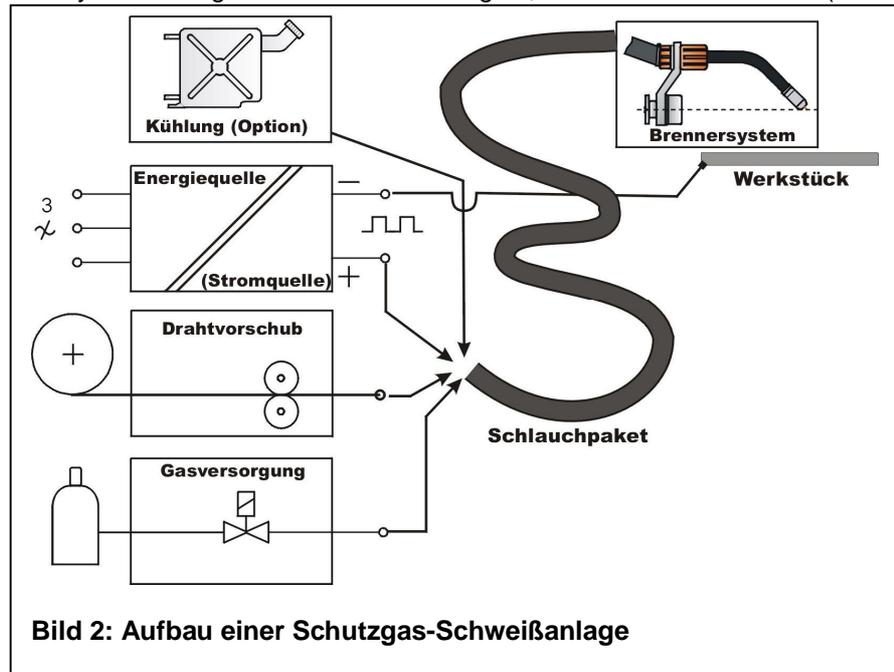


- teilmechanisch;  
(Zusatzvorschub mechanisch, Brennerführung und Werkstückhandhabung manuell)
- vollmechanisch;  
(Zusatzvorschub und Brennerführung mechanisch, Werkstückhandhabung manuell)
- automatisch;  
(Zusatzvorschub, Brennerführung und Werkstückhandhabung mechanisch).

## 2. Schweißanlagen

### 2.1 Aufbau von MSG-Anlagen

Der prinzipielle Aufbau einer Schutzgas-Schweißanlage ist in **Bild 2** dargestellt. Die einzelnen Systemkomponenten wie Drahtvorschub, Schutzgasversorgung, u. s. w. können in einem Gehäuse eingebaut oder auch als separate Systeme aufgebaut werden. Wichtig ist, dass sowohl der Draht (richtiger die Drahtelektrode), der Schutzgasschlauch, als auch ein Pol der Stromzuführung in einem Schlauchpaket zum Brenner geführt werden. Je nach Schweißleistung ist sogar eine zusätzliche Wasserkühlung des Brenners erforderlich, deren Schläuche ebenfalls durch das Schlauchpaket geführt werden müssen (Hin- und Rücklauf). Ist ein Brenner nicht wassergekühlt, so übernimmt das Schweißschutzgas die kühlende Wirkung, aufgrund der geringeren Wärmeabfuhr des Schutzgases kann aber nur mit geringeren Leistungen geschweißt werden. Vorteile der Gaskühlung ergeben sich bei manueller Brennerführung (teilmechanischem MSG-Schweißen), da diese Brennersysteme in der Regel leichter als wassergekühlte Varianten sind.



### 2.2 Stromquellen (Energiequellen)

Die Qualität einer Schutzgasschweißung hängt neben vielen anderen Dingen wie Handfertigkeit des Schweißers, Schutzgasauswahl u. s. w. von der Qualität der Schweißstromquelle (richtiger Energiequelle) ab. Es haben sich in den vergangenen 50 Jahren seit der Erfindung des MSG-Schweißprozesses folgende wesentlichen Stromquellentypen in der Praxis durchgesetzt:

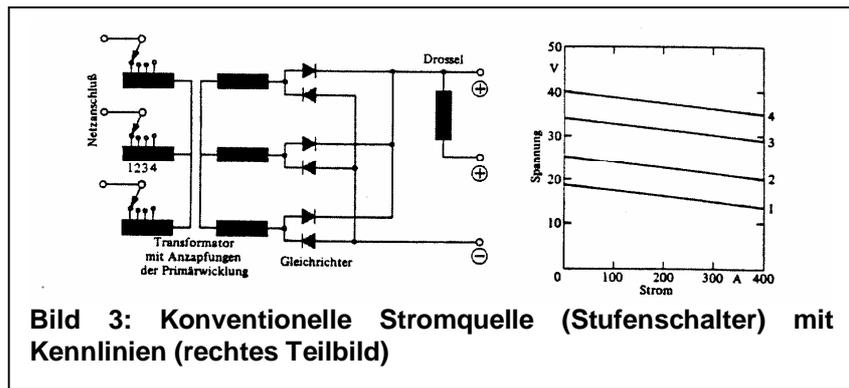
- konventionelle,
- thyristorisierte oder Triac-gesteuerte,
- analoge, transistorisierte,
- elektronische (primär, sekundär, hybrid)

Stromquellen. Für Stromquellen beim MSG-Schweißen wird auch häufig der Begriff „Schweißgleichrichter“ verwendet, da zum MSG-Schweißen ein konstanter bzw. gepulster (modulierter) Gleichstrom erforderlich ist. Bei einer Belastung des Leistungsteils (höhere Stromentnahme) sinkt die Spannung nur geringfügig (etwa 0 – 5 V / 100 A). Man spricht von einer Konstantspannungs- oder CP-Stromquelle (CP = Constant Potential). Diese nur leicht fallende statische Strom-Spannungskennlinie ist notwendig, um in allen Betriebszuständen eine konstante Lichtbogenlänge zu gewährleisten.

#### 2.2.1 Konventionelle Schweißgleichrichter

Bei konventionellen Anlagen besteht das Leistungsteil aus einem Transformator mit Anzapfungen auf der Primär- und Sekundärseite, einem nachgeschalteten Gleichrichter und bei Bedarf einer Drossel (Induktivität), siehe **Bild 3**. Die Spannung, die das Leistungsteil abgibt, ist z. B. durch Stufenschalter

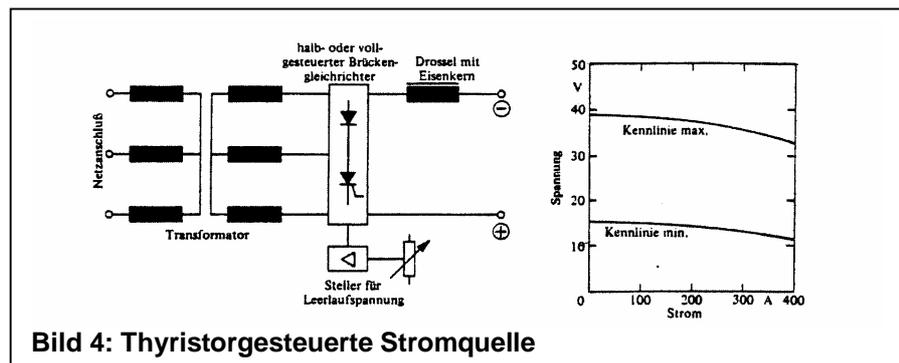
einstellbar. Diese Anlagen sind robust und für das teilmechanische Schweißen gut geeignet. Sie sind von außen, z. B. durch einen Roboter, nicht in ihrer Leistung steuerbar. Nachteilig ist ebenfalls, dass die eingestellte Lichtbogenspannung nicht während des Schweißvorgangs verändert werden kann. Güte Merkmale einer konventionellen Stromquelle sind die Anzahl der einstellbaren Spannungsstufen (mind. 20 bei einer 300 A Stromquelle) und die Wirksamkeit der Drossel (nachgeschaltete Induktivität (Spule) im Schweißstromkreis) im Kurzlichtbogenbereich.



**Bild 3: Konventionelle Stromquelle (Stufenschalter) mit Kennlinien (rechtes Teilbild)**

### 2.2.2 Thyristorgesteuerte / Triac Schweißgleichrichter

Bei thyristorgesteuerten Leistungsteilen fallen die Anzapfungen am Transformator weg. Ein Thyristorsteller (Phasenschnitt) auf der Primärseite oder ein halb- oder vollgesteuerter Brückengleichrichter auf der Sekundärseite des Transformators ermöglichen eine stufenlose Spannungseinstellung, **Bild 4**. Diese Bauart ist preiswert, da keine Anzapfungen am Trafo erforderlich sind. Sie wird in der Regel für Standardschweißaufgaben in der Klein- und Großserie eingesetzt. Werden diese Anlagen im unteren Leistungsbereich betrieben, so kann durch den Phasenanschnitt die Welligkeit des Schweißstroms zu groß werden und den Schweißvorgang negativ beeinflussen. Eine ausreichend große Drossel reduziert die Welligkeit. Besser ist, die Stromquelle für die entsprechende Schweißaufgabe auszuwählen und nicht z. B. eine 500 A Stromquelle mit nur 200 A Schweißstrom zu belasten. Durch die stufenlose Spannungseinstellung ist diese Bauart auch für vollmechanische Anwendungen geeignet. Dieser Stromquellentyp war der erste Schritt in Richtung der vollelektronischen Stromquellen.



**Bild 4: Thyristorgesteuerte Stromquelle**

Anmerkung zur Drossel:

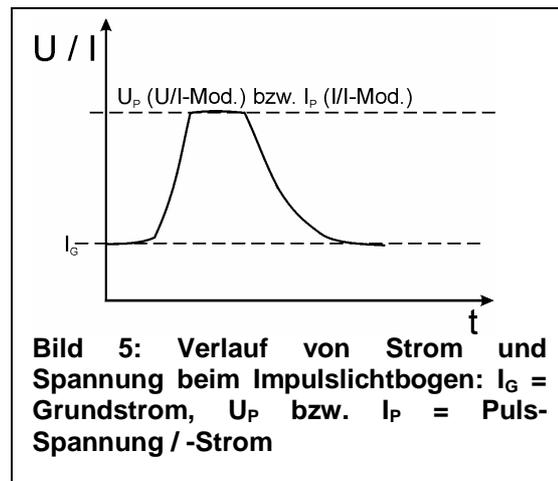
MIG/MAG-Leistungsteile haben in der Regel eine verstellbare Drossel (Induktivität). Diese ist bei konventionellen und thyristorgesteuerten Stromquellen real, als Eisenkern mit Wicklung vorhanden und bei transistorgesteuerten Leistungsteilen z. T. elektronisch nachgebildet. Eine Drossel glättet den Schweißstrom und verändert die Stromanstiegsgeschwindigkeit. Z. B. ist für den Zündvorgang ein schneller Stromanstieg vorteilhaft, während für das Kurzlichtbogenschweißen in der Kurzschlussphase eine geringe Stromanstiegsgeschwindigkeit weniger Schweißspritzer ergibt.

### 2.2.3 Transistorisierte Schweißgleichrichter

Transistorgesteuerte Schweißgleichrichter sind seit mehr als 20 Jahren im praktischen Einsatz. Sie werden heute nicht mehr nur für vollmechanische Anwendungen und für anspruchsvolle Schweißaufgaben (z. B. Impulslichtbogen) eingesetzt. Der günstige Preis dieser Anlagen, die sehr guten Schweißigenschaften und die meistens einfache Bedienung dieser Anlagen (Schweißdatenprogramme) ergeben bei fast allen MIG/MAG-Schweißaufgaben Vorteile gegenüber konventionellen Anlagen. Transistorgesteuerte Leistungsteile ermöglichen eine stufenlose Einstellung der Spannung, der Induktivität und allen anderen Einstellgrößen. Die statische Strom-Spannungskennlinie, die bei konventionellen Stromquellen fest durch die Bauart des Transformators und weiterer Bauteile vorgegeben ist, kann hier in der Regel von 0 V/100 A Spannungsabfall bis 5 V/100 A verändert werden. Dies erlaubt zusammen mit einer in weiten Grenzen einstellbaren Drossel ein spritzerarmes Schweißen auch

unter ungünstigen Randbedingungen. Schweißprogramme am Nahtanfang und Nahtende verbessern den Zündvorgang und verringern die Gefahr von Bindefehlern und Endkraterrissen.

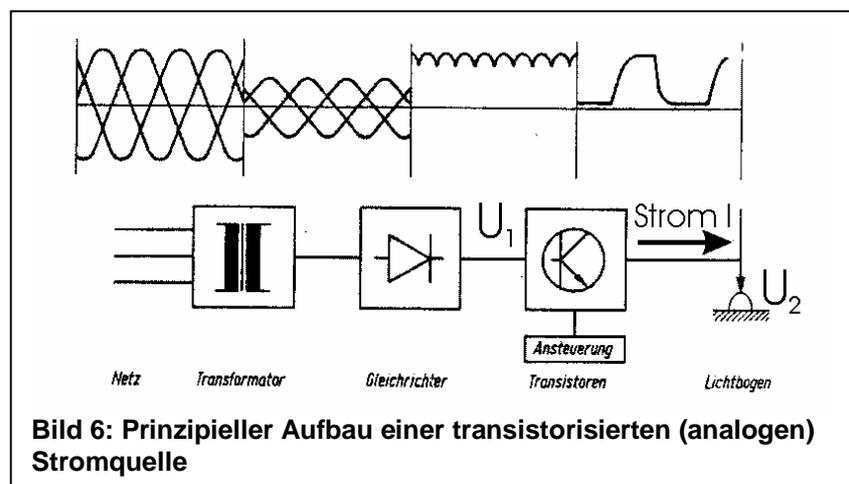
Der Werkstoffübergang im Impulslichtbogen, der für Aluminiumwerkstoffe und CrNi-Stähle zu empfehlen ist und auch bei Baustählen häufig eingesetzt wird, kann nur mit transistorisierten Stromquellen durchgeführt werden (die früher eingesetzten thyristorgesteuerten Stromquellen haben nur sehr begrenzte Einstellmöglichkeiten). Im Impulsbetrieb wird häufig mit einer **Konstant-Spannungskennlinie** während der **Impulsphase** (notwendig für die Lichtbogenlängenregelung, auch bekannt als innerer Selbstausgleich, siehe Kapitel 3.4) und einer **Konstant-Stromkennlinie** während der **Grundstromphase** gearbeitet (**U / I-Modulation**). Eine weitere Variante des Impulslichtbogens ist die **I / I – Modulation**, bei der sowohl in der **Puls-** als auch in der **Grundphase** der **Strom** von der Stromquelle **konstant** gehalten wird. Da bei der I / I-Modulation in der Impulsphase der Strom- und nicht die Spannung konstant gehalten wird, muß die Lichtbogenlänge durch eine äußere Regelung (wechselnde Impulsfrequenzen, veränderlichen Impulsbreiten oder variabler Drahtgeschwindigkeit) konstant gehalten werden. Den grundsätzlichen Strom- (Spannungs-) Verlauf beim Impulsbetrieb einer transistorisierten Stromquelle zeigt **Bild 5**.



#### 2.2.4 Transistorisierte „analoge“ Stromquelle

Diese Stromquellen waren die ersten transistorisierten Impulsstromquellen am Markt (etwa 1980). Sie sind wegen neuer Entwicklungen in der Leistungselektronik weitgehend durch getaktete Stromquellen ersetzt worden, da sie teuer in der Herstellung sind und hohe thermische Verluste haben.

Über einen Transformator und einer Gleichrichterbrücke können Gleichspannungen um ca. 60 Volt ( $U_1$ ) mit geringer Welligkeit erzeugt werden, **Bild 6**. Diese hohe Spannung wird nur selten für den Schweißlichtbogen benötigt. Die nachgeschalteten Transistoren reduzieren die Spannung auf den eingestellten Wert. Die Differenz zwischen maximaler Spannung und benötigter Spannung muss von den Transistoren als Verlustwärme abgeführt werden. Die Transistoren arbeiten in diesem Fall wie regelbare Widerstände, die die nicht benötigte Leistung  $((U_1 - U_2) \times I)$ , siehe **Bild 6** an die Kühlung abgeben müssen, der Wirkungsgrad einer solchen Stromquelle ist entsprechend schlecht.



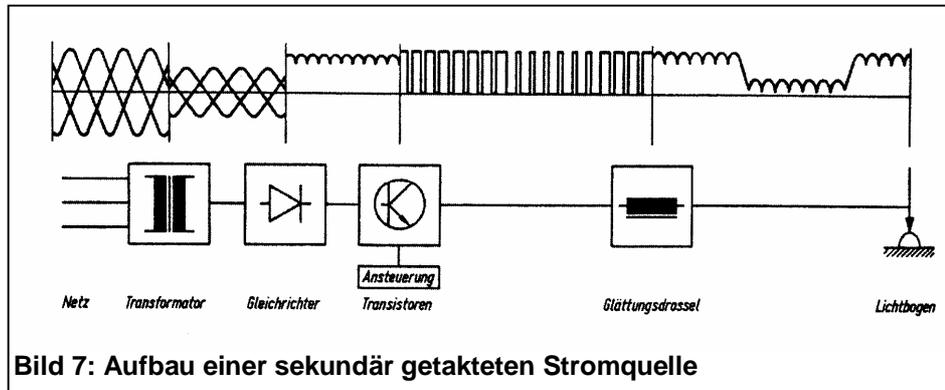
Anlagen mit analog arbeitenden Transistoren besitzen hervorragende Schweißeigenschaften. Wenn zum Beispiel die Steuerung einen bestimmten Puls an die Steuereingänge des Leistungsteils liefert, so ist der Verstärker ideal, der diesen Impuls ohne Verformung und Zeitverzögerung an die Leistungsklemmen (Lichtbogen) weiterleitet. Diesem Ideal kommt der Analogverstärker ohne jeden Zweifel am nächsten.

#### 2.2.5 Transistorisierte „sekundär-getaktete“ Stromquelle

Sekundär-getaktete MIG/MAG-Stromquellen sind z. Zt. die am meisten eingesetzten transistorisierten Geräte. Der Aufbau ist einfach und robust. Durch den Einsatz von Schalttransistoren, die wie ein Lichtschalter im gesperrten Zustand keine und im eingeschalteten Zustand nur geringe Verluste ha-

ben, kann auf eine aufwendige Kühlung der Transistoren verzichtet werden, der Wirkungsgrad dieser Stromquellen liegt auf gleichem Niveau wie der von primär getakteten Stromquellen.

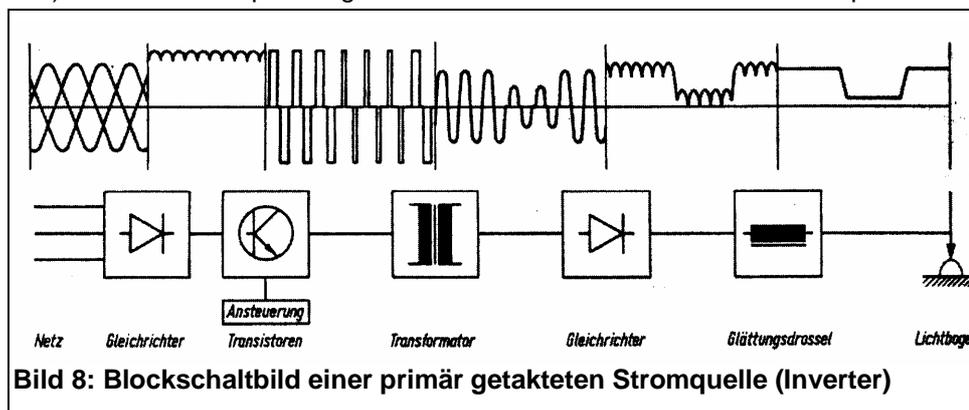
Wie bei analogen Stromquellen wird der Drehstrom reduziert und anschließend gleichgerichtet, **Bild 7**. Die Schalttransistoren haben wie ein Lichtschalter nur zwei Zustände – Ein oder Aus. Die Schaltfrequenz kann aber sehr hoch sein (20 – 100 kHz). Wird am Schweißlichtbogen ein hoher Strom benötigt, so werden die Schalttransistoren eine lange Zeit eingeschaltet und nur für eine kurze Zeit ausgeschaltet. Der mittlere Strom, der sich durch eine nachgeschaltete Induktivität bildet, ist hoch. Wird niedriger Schweißstrom benötigt, so wird dementsprechend das Tastverhältnis geändert (kurze Einschaltzeit und lange Ausschaltzeit). Die Zeit für das



Ändern des Schweißstroms als Antwort auf Einstellgrößen, Regelvorgänge oder Lichtbogeneinflüsse ist sehr schnell und vorzugsweise von der Taktfrequenz und der Induktivität im Schweißstromkreis abhängig. Bei einer Taktfrequenz von 100 kHz kann der Schweißstrom nach 1  $\mu$ s (nur Taktfrequenz, ohne andere Einflüsse) geändert werden. Auch wenn die Vorgänge im Lichtbogen sehr schnell sind, können die Stromquellen darauf reagieren. Sekundär getaktete Leistungsteile besitzen sehr gute dynamische Leistungsreserven und eignen sich daher besonders gut für eine vollmechanische Fertigung. Aufgrund ihres großen (schweren) Transformators sind sie schlecht zu transportieren.

### 2.2.6 Transistorisierte „primär-getaktete“ Stromquelle (Inverter)

Der Drehstrom von 400 V aus dem Netz wird gleichgerichtet. Dies ergibt einen leicht welligen Gleichstrom von fast 600 V, **Bild 8**. Diese Gleichspannung wird von z. B. 2 Transistorblöcken in positive und negative Rechteckimpulse umgeformt. Auch hier ergibt sich je nach Tastverhältnis (Zeitdauer von Einschaltzeit zur Auszeit) eine mittlere Spannung. Die unterschiedlich breiten Rechteckimpulse von 600 V werden im nachfolgenden Transformator auf eine brauchbare Spannung reduziert. Dabei hat der Transformator bei diesen höheren Frequenzen (20 – 100 kHz) anstelle des Eisenkerns einen Ferritkern. Die Baugröße und das Gewicht reduzieren sich deutlich. Durch die Induktivität der Trafowicklungen verformen sich die eingegebenen Rechteckimpulse zu einem fast sinusförmigen Verlauf auf der Sekundärseite des Trafos. Der nachfolgende Gleichrichter erzeugt einen Gleichstrom, der von einer Drossel weiter geglättet wird.



Der etwas komplexere Aufbau dieser Anlagen ergibt beim Hersteller keine Mehrkosten, da bei Transformator und Drossel aufgrund hoher Taktfrequenzen kleine Bauteile und somit Gewicht und Kosten reduziert werden. Die sehr kleine Bauweise, das geringe Gewicht und der hohe Wirkungsgrad sind die größten technischen Vorteile dieses Stromquellentyps.

Der etwas komplexere Aufbau dieser Anlagen ergibt beim Hersteller keine Mehrkosten, da bei Transformator und Drossel aufgrund hoher Taktfrequenzen kleine Bauteile und somit Gewicht und Kosten reduziert werden. Die sehr kleine Bauweise, das geringe Gewicht und der hohe Wirkungsgrad sind die größten technischen Vorteile dieses Stromquellentyps.

Nachteilig ist der komplexere elektronische Aufbau eines Inverters, der eine Reparatur/Wartung durch den Kunden in vielen Fällen unmöglich macht. Des weiteren belasten Inverter das Versorgungsnetz extrem hoch mit Oberwellen. Ab 2001 können die Stromversorger (EVU) den Anschluß dieser Geräte an ihr Stromnetz gemäß Norm EN 61000-3-2/-3-12 ablehnen. Abhilfe schaffen in diesen Fällen nur

eigene Trafo-Stationen oder aktive Filter (PFC = Power Factor Correction), wodurch aber die Gewichts- und/oder Kostenvorteile der Invertertechnologie aufgehoben werden. Während sekundär getaktete Stromquellen für alle Netzspannungen von 200 bis 575 Volt lieferbar sind, ist dies für Inverter nicht möglich. Von entscheidender Bedeutung kann die geringe Leistungsreserve von Invertern oberhalb ca. 450 A / 60% ED sein.

### Zusammenfassung der Eigenschaften von unterschiedlichen Stromquellen

Die Kriterien zum Kauf eines bestimmten Stromquellentypes sind in **Tabelle 1** zusammengefasst. Tendenziell lassen sich folgende Einsatzgebiete abgrenzen:

- Stufenschalter: Geringe Anforderungen an Schweißnahtqualität, manuelle Brennerführung, bevorzugt für kleine Stückzahlen.
- Thyristor: ähnlich Stufenschalter, jedoch bessere Nahtqualität, mittlere Stückzahlen.
- Transistor (analog): hervorragende Schweißereigenschaften und Nahtqualität, Konzept abgelöst von prim. und sek. getakteten Stromquellen wg. zu schlechtem elektrischen Wirkungsgrad.
- Inverter: Gute Nahtqualität bei mittleren bis großen Stückzahlen, bei guten Leistungsreserven bis ca. 450 A. Besonders für den mobilen Einsatz geeignet (leicht, klein).
- Sek. getaktet: Sehr gute Nahtqualität bei großen Stückzahlen und hervorragenden Leistungsreserven auch oberhalb 450 A. Prädestiniert für den vollmechanischen Betrieb (z. B. Roboter).

Kriterium	Konventionelle Stromquelle (Stufenschalter)	Thyristorgest. Stromquelle	Primär getaktete Stromquelle (Inverter)	Sekundär getaktete Stromquelle
Anschaffungskosten	Niedrig	Niedrig	Hoch	Hoch
Automatisierbarkeit	Nein	Ja	Ja	Ja
Regelgeschwindigkeit	—	Niedrig	Hoch* bis Sehr hoch*	Hoch* bis Sehr hoch*
Impuls-Betrieb (Impulslichtbogen)	Nein	Nein	Ja	Ja
Wirkungsgrad	Mittel	Mittel	Hoch	Hoch
Servicefreundlichkeit	Sehr gut	Gut	Mäßig	Gut
Gewicht / Volumen (transportabel)	Hoch	Hoch	Niedrig transportabel	Hoch
Prinzipbedingte Netzurückwirkung (Oberwellen) EN 61000	Nein	Ja **	Ja **	Nein
Dynamische Leistungsreserven > 400 A / 60 % ED	Hoch	Hoch	Gering	Hoch

\* abhängig von der Taktfrequenz

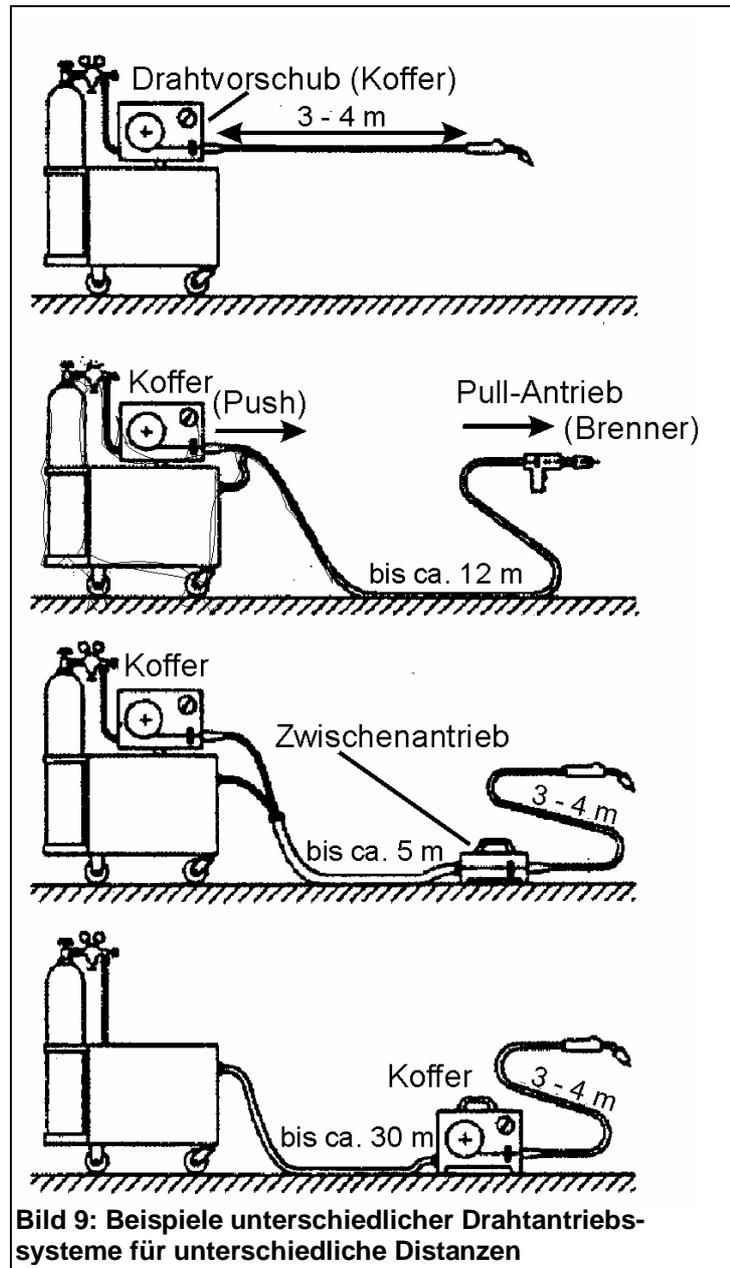
\*\* Gegenmaßnahmen möglich

**Tabelle 1: Auswahlkriterien für MIG/MAG-Schweißanlagen**

### 2.3 Drahtförderung

Beim MIG/MAG-Schweißen wird die Drahtelektrode von der Spule abgerollt und von einer Drahtvorschubeinheit durch ein mehrere Meter langes Schlauchpaket bis zum Stromkontaktrohr im Brenner

geschoben. Aus dem Kontaktrohr muss die Drahtelektrode mit absolut gleichmäßiger Geschwindigkeit austreten, um ein gutes Schweißergebnis zu erreichen. Ein Abbremsen des Drahtes verlängert den Lichtbogen und kann im Extremfall zu einem Zurückbrennen bis zum Stromkontaktrohr führen. Ein ungleichmäßiger Drahtvorschub (Stottern) führt zu Kurzschlüssen beim Schweißen und damit zu einer verstärkten Spritzerbildung. Die Drahtförderereinheit verwendet in der Regel gehärtete Rollen, in die eine keilförmige oder bei weichen Drähten eine dem Drahtdurchmesser angepasste Nut eingearbeitet ist. Dabei kann eine Rolle oder auch mehrere Rollen angetrieben werden. Am meisten verbreitet, für einfache Anlagen, sind Drahtvorschubgeräte mit einer angetriebenen Rolle. Bei mechanisiertem Einsatz haben sich bis zu vier angetriebene Rollen bewährt. Werden sehr weiche Drähte gefördert oder sehr lange Schlauchpakete eingesetzt (hoher Reibungswiderstand!), so ist es oftmals nicht möglich den Draht mit Hilfe des Vorschubsystems bis zum Brennersystem zu schieben (Push-System), die Drähte würden ausknicken. In solchen Fällen gibt es zusätzliche Drahtvorschubsysteme die direkt am Brenner befestigt sind und den Draht aus dem Schlauchpaket ziehen, während der hintere Vorschubmotor den Draht in das Schlauchpaket schiebt (Push-Pull-Systeme). Bei längeren Distanzen, die mit einem Schlauchpaket überbrückt werden müssen, ist es auch möglich mit Hilfe von Zwischenantrieben eine konstante Drahtförderung zu gewährleisten. Einen kleinen Überblick über die unterschiedlichen Systeme zeigt **Bild 9**.



Im unteren Teilbild von **Bild 9** ist eine Stromzuführung zum Koffer von bis zu 30 m eingetragen. Es ist darauf zu achten, dass die Leitung einen elektrischen Widerstand darstellt und die Schweißspannung entsprechend angepasst werden muß, wenn vorher eine kurze Zuleitung angeschlossen war. Werden die 30 Meter Kabel anschließend nicht mehr benötigt, sind die Stromzuführungen wieder gegen kürzere auszutauschen. Keinesfalls sind die 30 m Kabel in Schlaufen aufzuwickeln, dies wäre dann eine Spule (Induktivität!) die beim Schweißen z. B. mit einem Impulslichtbogen zu katastrophalen Schweißverhalten führen würde. Die Induktivität verringert den Stromanstieg, was dazu führen kann, dass keine Tropfenablösung durch den Impuls mehr möglich ist.

### 2.4 Bedienungs- und Einstellelemente

Für das Einstellen des Lichtbogens und des Werkstoffübergangs sind nur zwei bzw. drei Einstellgrößen bei reinem Gleichstrom (nicht bei Impulsbetrieb!) notwendig. Dies sind die Spannung und die Drahtelektrodevorschubgeschwindigkeit, wobei über die Spannung die Lichtbogenlänge bei konstantem Drahtvorschub geändert werden kann. Mit steigender Drahtgeschwindigkeit erhöht sich der

Strom und umgekehrt, d. h. die Drahtgeschwindigkeit ist in erster Näherung proportional zum Schweißstrom. Dabei sollten die Werte für die Spannungseinstellung in Volt und die Drahtvorschubgeschwindigkeit in z. B. Meter pro Minute kalibriert sein. Oft übliche Skalenwerte von 1 – 10, die keine Zuordnung zu den wirklichen Werten erlauben, sollten nur noch bei sehr einfachen Geräten akzeptiert werden.

Die bei hochwertigen Schweißanlagen vorhandene dritte Einstellgröße, die auch über den Werkstoffübergang entscheidet, ist die Drossel (Induktivität im Schweißstromkreis). Die Drossel ist nur im Kurzschluß aktiv, d. h. wenn zwischen Drahtelektrode und Werkstück ein Kontakt besteht, und folglich der Lichtbogen nicht brennt. Aufgrund der Induktivität der Drossel wird die Stromanstiegsgeschwindigkeit im Kurzschlussfall reduziert und somit auch der Maximalwert des Stromes bis zur Aufhebung des Kurzschlusses. Ohne Drossel würde der Strom im Kurzschluß sehr schnell ansteigen bis zur maximalen Leistungsgrenze der Stromquelle und durch die extreme Widerstandserwärmung an der Kurzschlussstelle zu Schweißspritzern führen.

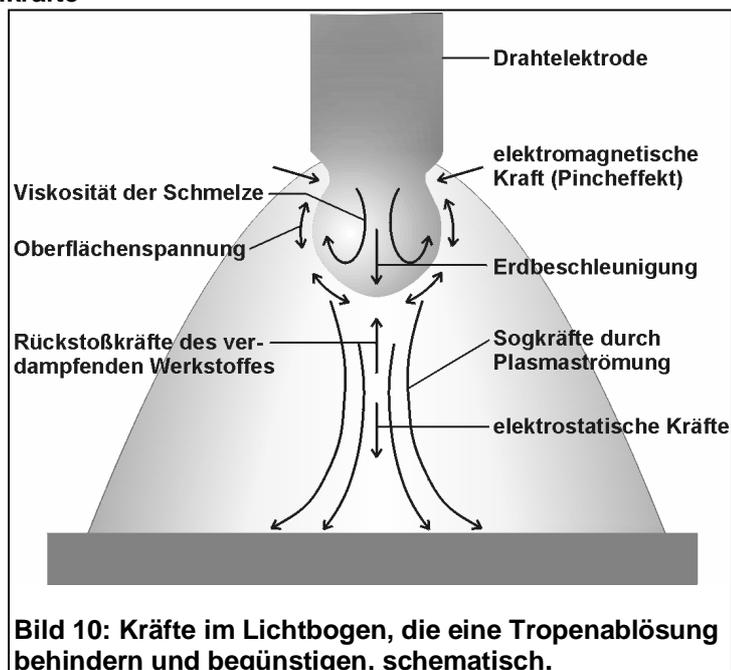
Zur besseren Erklärung des Regelverhaltens von unterschiedlichen Stromquellen ist das Wissen um die unterschiedlichen Werkstoffübergänge bzw. Lichtbogenarten erforderlich. Nachfolgend werden die Lichtbogenarten beschrieben und auf die daraus resultierenden Einstellparameter und das Regelverhalten eingegangen.

### 3. Prozessbeschreibung

#### 3.1 Pinch-Effekt und Lichtbogenkräfte

Ein für die Schutzgasschweißung und den Werkstoffübergang unverzichtbarer Effekt ist der Pinch-Effekt. Diese Kraft wirkt radial auf das untere, angeschmolzene Drahtende und bewirkt bei hohen Stromstärken ein Abschnüren des Tropfens. Dabei wird der Tropfen zusätzlich beschleunigt. Die Pinchkraft ist proportional zu  $I^2$ , d. h. die radiale Kraft, die den Tropfen abschnürt nimmt quadratisch mit der Stromstärke zu. Zur Ablösung eines Tropfens vom Drahtende ist also ein Mindeststrom erforderlich.

Die Kräfte und Strömungen die in einem Lichtbogen herrschen sind schematisch in **Bild 10** dargestellt. Besonders wichtig für einen wirksamen Eingriff der Pinchkraft ist das Umschließen des Tropfens/unteren Drahtendes durch den Lichtbogen. Nur in diesem Bereich kann die Pinchkraft ihre tropfenabschnürende Wirkung entfalten. Der Ansatzpunkt des Lichtbogens am Drahtende ist entscheidend für das Verständnis der Tropfenablösung bei den unterschiedlichen Werkstoffübergängen.



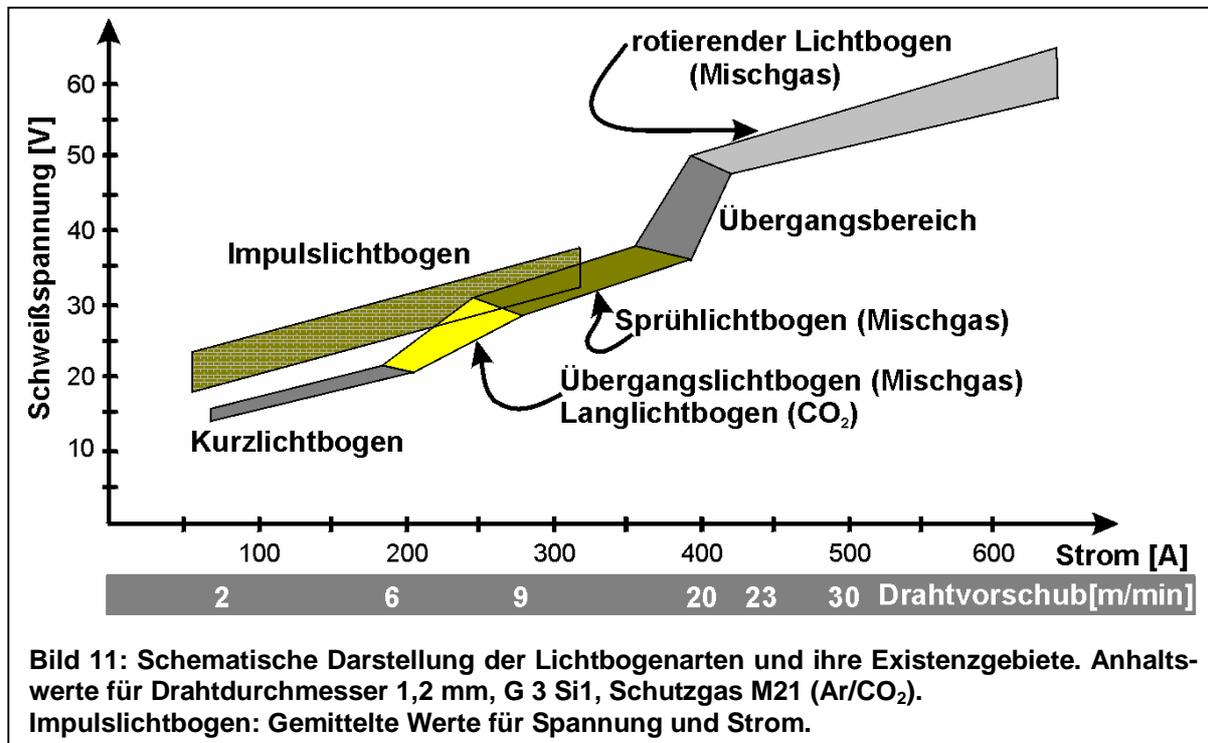
#### 3.2 Lichtbogenarten

Grund- und Zusatzwerkstoff, Stromart und Stromstärke, Drahtvorschub und Schutzgas bestimmen maßgebend den Werkstoffübergang beim MSG-Schweißen. Die Werkstoffübergänge sind charakteristisch für die verschiedenen Lichtbogenarten. Die bekannten Lichtbogenarten sind in der DIN 1910-4 mit folgenden Abkürzungen genormt:

- k = Kurzlichtbogen    MAGk, MIGk
- l = Langlichtbogen    MAGl
- s = Sprühlichtbogen    MAGs, MIGs
- p = Impulslichtbogen    MAGp, MIGp

Die Existenzgebiete der Lichtbogenarten können werkstoff- und gasabhängig größer oder kleiner werden. Außerhalb der Existenzgebiete arbeiten die Lichtbogenarten nicht stabil. Bei zu hoher Lichtbo-

gen-(Schweiß-)Spannung wird der Lichtbogen zu lang, der Werkstoffübergang ist nicht mehr axial, der Lichtbogenansatzpunkt springt auf dem Grundwerkstoff hin und her. Zusätzlich erzeugt ein zu langer Lichtbogen keinen Druck mehr auf das Schmelzbad, der Einbrand in den Grundwerkstoff wird reduziert. Ein Lichtbogen mit zu geringer Spannung kann völlig erlöschen oder Spritzer durch Kurzschlüsse verursachen. Bei zu geringer Spannung wird auch der Energieeintrag in den Grundwerkstoff erheblich reduziert, die Folge ist eine sehr starke Nahtüberwölbung. In allen Fällen ist das Ergebnis unzureichend. Die Existenzbereiche der o. g. Lichtbogenarten sind in **Bild 11** dargestellt.

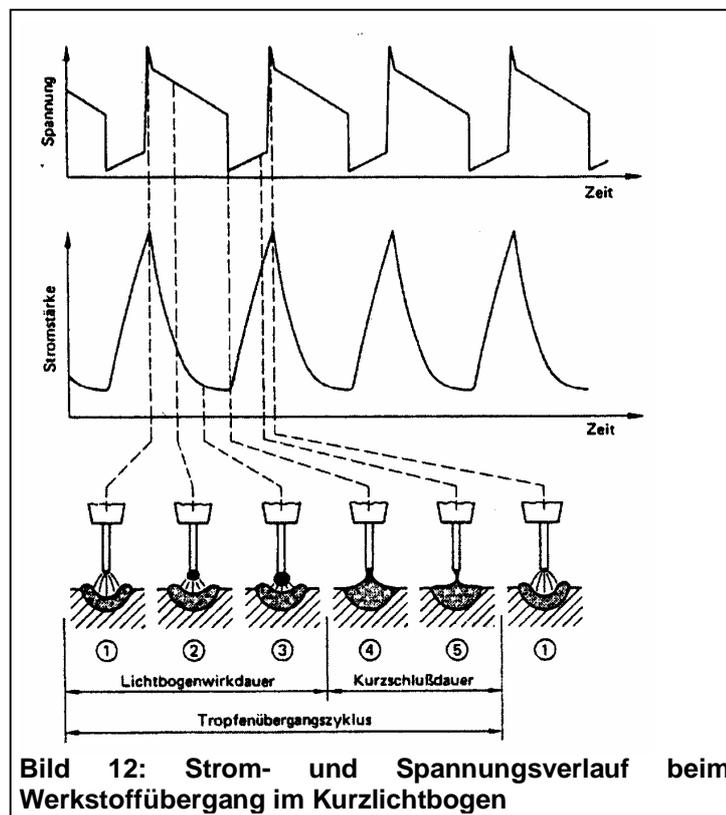


### 3.2.1 Der Kurzlichtbogen

Der Kurzlichtbogen ist gemäß **Bild 11** auf geringe Drahtvorschubwerte (Ströme) und Spannungen angewiesen, und unter Mischgasen und CO<sub>2</sub> einsetzbar (Stahl). Der Werkstoffübergang erfolgt im Kurzschluß (Drahtelektrode-Werkstück). Da der Kurzlichtbogen bei gleicher Schweißgeschwindigkeit die kleinsten Energieeinträge in den Werkstoff besitzt, wird er überwiegend in Zwangslagen, an sehr dünnwandigen Blechen oder bei Wurzelschweißungen eingesetzt.

Er ist sowohl für Stähle (unlegiert und hochlegiert) als auch für Aluminium-Werkstoffe einsetzbar. Für Al-Werkstoffe hat der Kurzlichtbogen heute keine praxisrelevante Bedeutung mehr, er ist in diesem Leistungsgebiet vom Impulslichtbogen abgelöst worden.

Der Zyklus einer Tropfenablösung beim Kurzlichtbogen ist in **Bild 12** dargestellt. Zu einem beliebigen Zeitpunkt brennt der Lichtbogen. Der



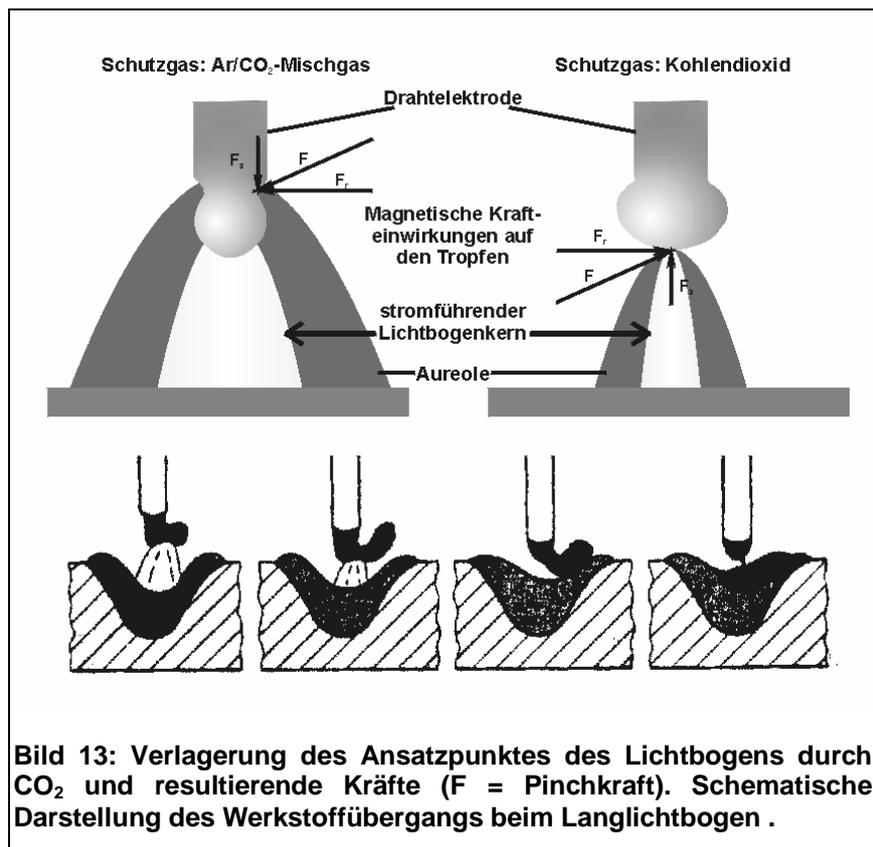
Zusatzwerkstoff wird kontinuierlich nachgeführt und da die Energie des Lichtbogens nicht ausreicht einen Tropfen vom Drahtende abzuschnüren wird das erweichte Drahtende in das Schmelzbad geführt, es entsteht der Kurzschluß. Während dieser Phase geht ein Großteil des flüssigen Drahtendes in das Schmelzbad über. In der Kurzschlussphase strebt die Schweißspannung gegen Null, der Strom steigt jedoch sehr schnell auf sehr hohe Werte an. Ohne Drossel im Stromkreis würde der Strom so hohe Werte erreichen, dass aufgrund der hohen thermischen Belastung das Drahtende „explodiert“, die Folge wären viele Schweißspritzer. Die einstellbare Drossel der Schweißstromquellen verringert die Anstiegsgeschwindigkeit und das Strommaximum, so dass bei richtiger Einstellung ein recht spritzerarmer (Kurz-)Lichtbogen eingestellt werden kann. Die Kurzschlusshäufigkeit beträgt je nach Drahtvorschubgeschwindigkeit zwischen 40-150 Kurzschlüsse pro Sekunde.

### 3.2.2 Überganglichtbogen (Mischlichtbogen)

Der Überganglichtbogen entsteht beim MAGM und MIG-Schweißen im Bereich zwischen Kurz- und Sprühlichtbogen. Im Überganglichtbogen geht ein Teil des geschmolzenen Drahtendes bereits ohne Kurzschlüsse in das Schmelzbad über. Die Tropfenablösung ist grobtropfig, weshalb es auch noch zu Kurzschlüssen beim Schweißen kommt. Aufgrund der höheren Drahtgeschwindigkeit (= höherer Strom), entstehen mehr und größere Spritzer als im Kurzlichtbogen (bis zu 200 Kurzschlüsse/Sek.), die zudem oftmals mit der Werkstoffoberfläche verschweißen. Als sinnvolle Alternative, besonders in diesem Leistungsbereich, empfiehlt sich der Impulslichtbogen.

### 3.2.3 Langlichtbogen

Der Langlichtbogen tritt im gleichen Leistungsbereich wie der Überganglichtbogen auf und erstreckt sich bei noch höheren Drahtgeschwindigkeiten bis in den Sprühlichtbogen. Jedoch tritt der Langlichtbogen **nur unter dem Schutzgas CO<sub>2</sub>** auf, da sich bei diesem Schutzgas der Lichtbogenansatzpunkt zum unteren Drahtende hin verschiebt. Aus **Bild 13** wird der Unterschied bei Einsatz eines Mischgases, z.B. 18% CO<sub>2</sub>/Rest Argon und reinem CO<sub>2</sub> ersichtlich. Der Lichtbogenansatzpunkt wandert mit zunehmendem CO<sub>2</sub> – Gehalt immer tiefer an das untere Ende des Drahtes, die Pinchkraft „greift“ ins Leere. Die ursprünglich in Richtung Schmelzbad

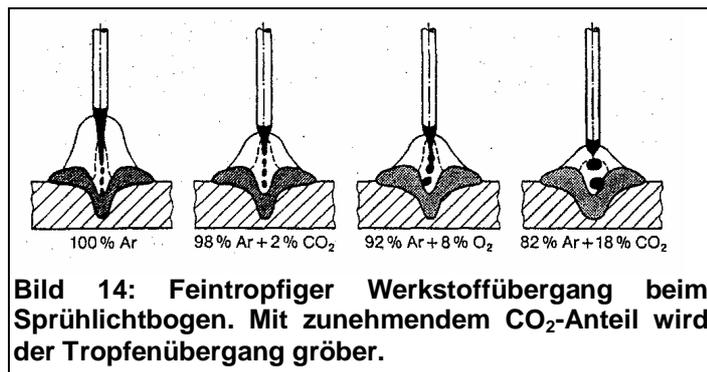


**Bild 13: Verlagerung des Ansatzpunktes des Lichtbogens durch CO<sub>2</sub> und resultierende Kräfte (F = Pinchkraft). Schematische Darstellung des Werkstoffübergangs beim Langlichtbogen .**

beschleunigende Kraft dreht sich sogar noch um und drückt den sich bildenden Tropfen vom Schmelzbad weg. Des weiteren bildet sich hierdurch ein großer Tropfen der zusätzlich Kurzschlüsse verursacht und dementsprechend viele Schweißspritzer hervorruft. Heute ist aufgrund der niedrigen Preise für argonreiche Mischgase der Einsatz des Langlichtbogens nur noch in sehr wenigen Sonderfällen erforderlich. Impuls- oder Sprühlichtbogen unter Mischgasen werden bevorzugt.

### 3.2.4 Sprühlichtbogen

Wird beim MIG/MAG-Schweißen eine kritische Stromstärke überschritten, so wechselt der Werkstofftransfer vom Drahtende in das Schmelzbad in den feinstropfigen, kurzschlussfreien Sprühlichtbogen. Das Drahtende wird aufgrund hoher Strombelastung sehr dünnflüssig und die Pinchkraft wird wirksam. Die kritische Stromstärke ist von der Schutzgaszusammensetzung und dem Drahtdurchmesser abhängig. Der Werkstoffübergang und der Einfluß des Schutzgases auf die Tropfengröße ist **Bild 14** zu entnehmen.



**Bild 14: Feinstropfiger Werkstoffübergang beim Sprühlichtbogen. Mit zunehmendem CO<sub>2</sub>-Anteil wird der Tropfenübergang gröber.**

### 3.2.5 Rotierender Lichtbogen

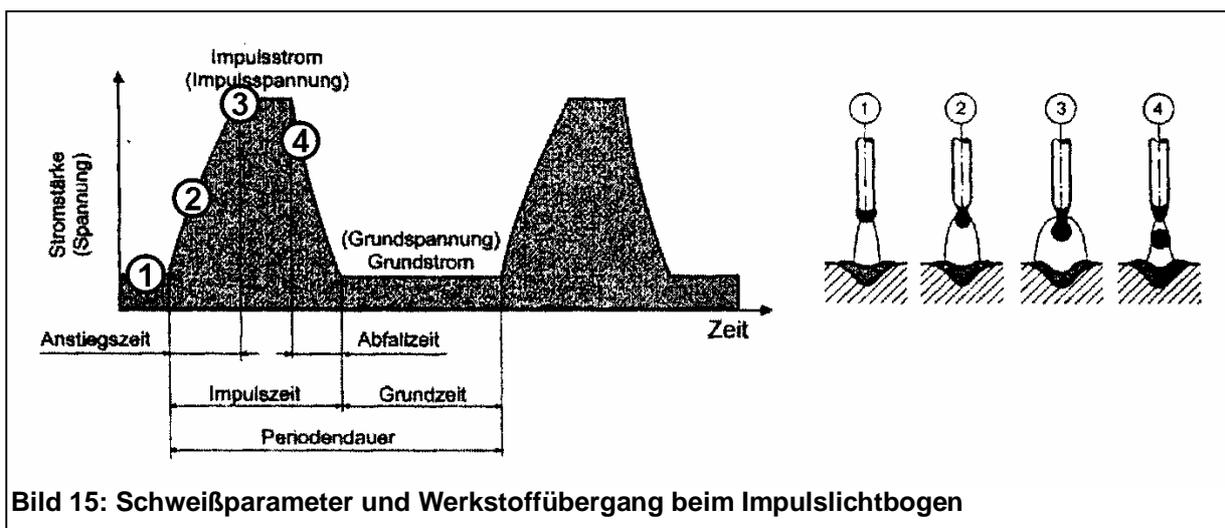
Der rotierende Lichtbogen wird in dem DVS-Merkblatt 0909-1 in Zusammenhang mit dem MSG-Hochleistungsschweißen definiert und beschrieben. Als MAG-Hochleistung (MAG-HL) wird die Prozessvariante benannt, bei der Drahtvorschube über 15m/min und/oder Abschmelzleistungen über 8kg/h erreicht werden. Für den MAG-HL Leistungsbereich werden nur die Lichtbogenarten s, p und r eingesetzt.

### 3.2.6 Impulslichtbogen

Handelte es sich bei den in Kapitel 3.2.1 bis 3.2.5 vorgestellten Lichtbogenarten um reine Gleichstrom-Lichtbögen, bei denen nur zwei Prozeßgrößen an der Stromquelle eingestellt werden mussten (Spannung und Drahtgeschwindigkeit, ggf. Drossel für kurzschlussbehaftete Prozesse), so ist diese Anzahl an Einstellgrößen beim Impulslichtbogen nicht mehr ausreichend. Zur Korrekten Einstellung bei MIG oder MAG-Impulslichtbogen sind mindesten 5 Einstellgrößen erforderlich:

1. Drahtgeschwindigkeit
2. Impulsfrequenz
3. Impulsbreite
4. Impulshöhe (Spannung oder Strom)
5. Grundstrom.

Abhängig von der Stromquellensteuerung können noch weitere Parameter eingestellt werden, die das Schweißergebnis beeinflussen, **Bild 15**.



**Bild 15: Schweißparameter und Werkstoffübergang beim Impulslichtbogen**

Die ideale Pulsgeometrie löst pro Puls einen Tropfen vom Drahtende ab. Die Geometrie ist im wesentlichen werkstoff- und gasabhängig. Ist die Pulsgeometrie eines Impulslichtbogens in Form von Impulsbreite, Impulshöhe und Grundstrom einmal für einen Anwendungsfall eingestellt, so kann der Schweißer die Leistung des Lichtbogens mit den zwei Parametern, Drahtvorschubgeschwindigkeit

und Impulsfrequenz (Lichtbogenlänge), regeln. Der Ablauf des Werkstoffüberganges stellt sich wie folgt dar:

Der Lichtbogen brennt werkstoffabhängig mit geringer Stromstärke (Grundstrom ca. 30 – 50 A), hierbei wird der Draht fast nicht angeschmolzen (**1, Bild 15**). Nach wenigen Millisekunden erfolgt ein sehr schneller Stromanstieg (800-1000 A/ms). Es werden größere Mengen Draht angeschmolzen (**2, Bild 15**) und die Pinchkraft wird aufgrund der sehr hohen Ströme wirksam (**3, Bild 15**). Im Bereich der abfallenden Flanke des Impulses erfolgt dann die Tropfenablösung (**4, Bild 15**).

Das Schweißen mit Impulslichtbogen hat sich für CrNi-Stähle, Ni-Basislegierungen, Al-Werkstoffe und Stähle in kritischen Lichtbogenbereichen gegenüber den Gleichstrom-Lichtbögen in vielen Fällen durchgesetzt. Besonders hohe Anforderungen an die dynamischen Leistungsreserven werden beim MAG-Schweißen unlegierter Baustähle an die Stromquelle gestellt, da die erforderlichen Ströme zur sicheren Tropfenablösung erheblich höher sind als z. B. beim Aluminium-Schweißen. Des Weiteren ist beim MAG-Schweißen von Baustählen darauf zu achten, dass das Mischgas weniger als ca. 20% CO<sub>2</sub> besitzt, da bei steigendem CO<sub>2</sub>-Anteil in Schutzgas der Lichtbogenansatz am Drahtende nach unten wandert und die Pinchkraft ab ca. 25 % CO<sub>2</sub> unwirksam wird, siehe **Bild 13**.

**Tabelle 2** gibt nochmals einen zusammenfassenden Überblick über die gebräuchlichsten Lichtbogenarten beim MSG-Schweißen.

Lichtbogenart Abkürzung	Prozesse		Werkstoffübergang	Tropfengröße
	möglich	z.Z. üblich im Einsatz		
Kurzlichtbogen „k“	MAGM	MAGM k	im Kurzschluß	fein
	MAGC	MAGC k		
	MIG			
Übergangslichtbogen	MAGM		Kurzschlußbehafet	fein- bis grob
	MAGC	MAGC		
	MIG			
Langlichtbogen „l“	MAGC	MAGC l	Kurzschlußbehafet	fein- bis grob
Sprühlichtbogen „s“	MAGM	MAGM s	Kurzschlußfrei	feinst
	MIG	MIG s		
Impulslichtbogen „p“	MAGM	MAGM s	Kurzschlußfrei	fein
	MIG	MIG s		
Rotierender Lichtbogen „r“	MAGM	MAGM r	Kurzschlußfrei	feinst
	MIG			

**Tabelle 2: Lichtbogenarten und Werkstoffübergänge beim MSG-Schweißen**

Für den Anwender ist es wichtig Vor- und Nachteile einzelner Lichtbogenarten zu erkennen um sie gezielt, je nach Anforderung der Schweißnaht, einsetzen zu können. Besonders im Bereich des MAG-Hochleistungsschweißens, spielen die einzelnen Lichtbogenarten und deren Stabilität eine entscheidende Rolle für die Fehlervermeidung und die Einbrandform.

### 3.3 Einstellen von MIG/MAG-Schweißanlagen

Zum Verständnis der Vorgänge beim Einstellen einer MIG/MAG-Stromquelle müssen einige Grundlegende Begriffe geklärt werden. Dabei handelt es sich um die Begriffe **GeräteKennlinie**, **Lichtbogenkennlinie** und **Arbeitspunkt**. Es werden die Zusammenhänge zunächst an den Gleichstrom-Lichtbogenarten (Kurz- bis Sprühlichtbogen) erläutert.

Die Lichtbogenkennlinie ist im schweißtechnisch relevanten Bereich annähernd eine Gerade, **Bild 16**. Die Lichtbogenkennlinie kennzeichnet den Zusammenhang zwischen der Lichtbogenlänge, gewählter Drahtgeschwindigkeit und erforderlicher Lichtbogenspannung. In **Bild 16** sind drei Lichtbogenkennlinien eingezeichnet: kurz, mittel und lang. Diese drei Lichtbogenkennlinien stehen exemplarisch für unendlich viele Kennlinien die in dieses Diagramm eingezeichnet werden könnten, da für jede Lichtbogenlänge (=Spannung) eine Lichtbogenkennlinie existiert. Technisch ist jedoch

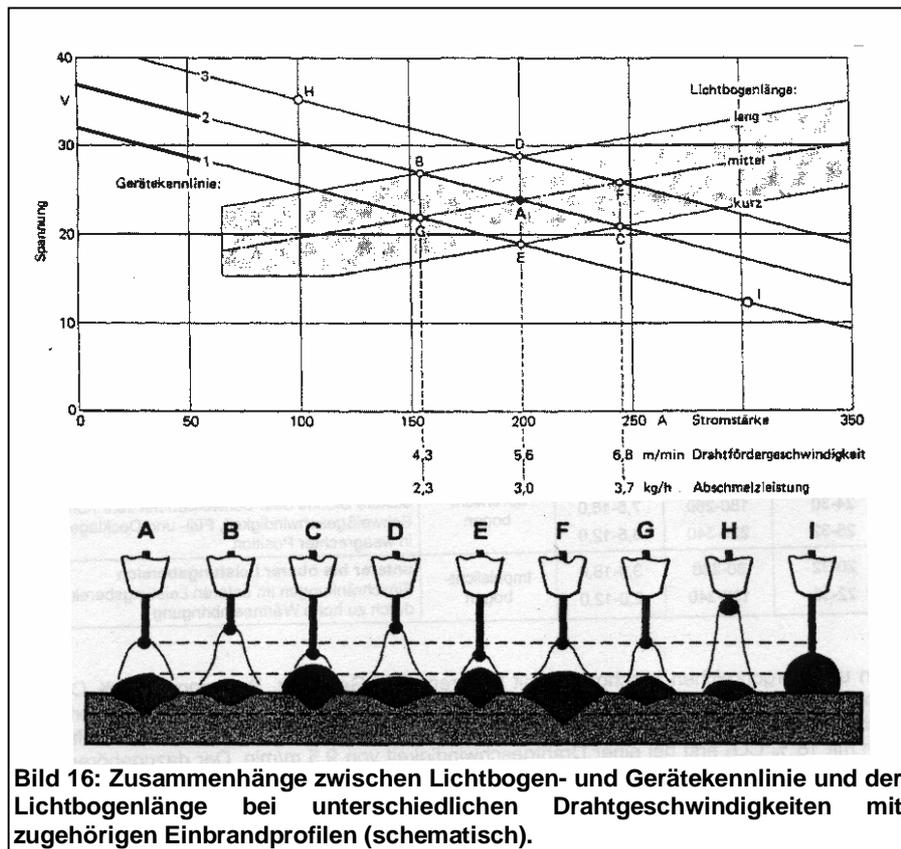
nicht jede Lichtbogenlänge von Bedeutung, da zu lange und zu kurze Lichtbögen das Schweißergebnis bezüglich Einbrand und Spritzer negativ beeinflussen.

Des Weiteren sind in **Bild 16** drei **Gerätekenlinien** einer Stromquelle eingezeichnet. Bei einer Stufenschalter-Stromquelle entspricht die Anzahl der möglichen Schalterstellungen der Anzahl an Gerätekenlinien, siehe **Bild 3**. Stufenlos einstellbare Stromquellen besitzen demzufolge ein vielfaches mehr an Gerätekenlinien! Wie bereits in Kapitel 2.2 beschrieben, sind Stromquellen beim MSG-Schweißen auf eine Konstantspannungs- bzw. auf eine leicht fallende Kennlinie ausgelegt. In **Bild 16** ist eine leicht fallende Kennlinie mit etwa 6-7 Volt pro 100 Ampere dargestellt. Die Einstellpraxis für einen Schweißer stellt sich nach **Bild 16** wie folgt dar:

Die optimale Lichtbogenlänge ist die mittlere Lichtbogenkennlinie und für die Schweißaufgabe möchte der Schweißer mit einer Drahtgeschwindigkeit von 5,6 m/min arbeiten. Da der Lichtbogen noch nicht gezündet ist (Strom = 0 A), stellt der Schweißer eine Spannung von 32 Volt ein, er stellt also die Gerätekenlinie 1 ein. Wird der Lichtbogen nun gezündet, dann ergibt sich im Schnittpunkt zwischen Lichtbogenkennlinie und Gerätekenlinie der sogenannte **Arbeitspunkt**, in diesem Fall Punkt E in **Bild 16**.

Die Schweißspannung beträgt nur noch rund 19 Volt (fallende Kennlinie 1), der Lichtbogen ist

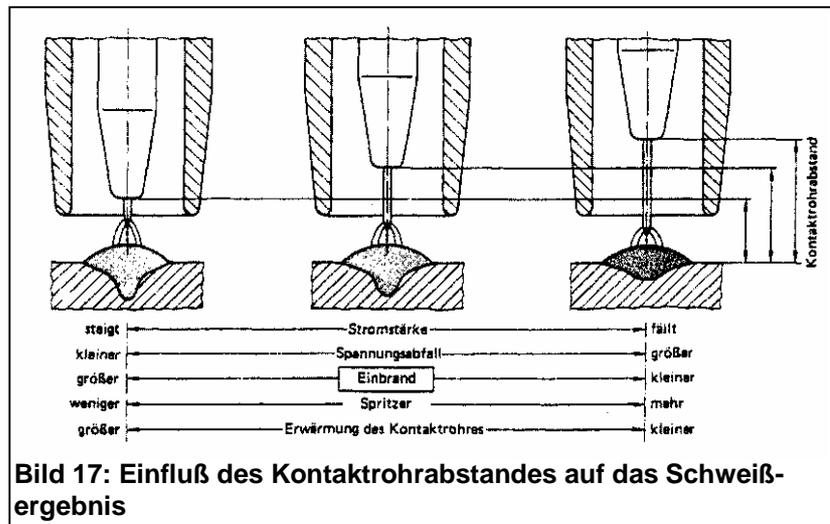
etwas zu kurz. Um nun die ideale Lichtbogenlänge zu erhalten muß der Schweißer die Spannung an der Stromquelle erhöhen. Er erhöht die Spannung während des Schweißens um rund 5 Volt, d. h. er verlässt die Gerätekenlinie 1 und wechselt auf Kennlinie 2. Der Lichtbogen wurde länger bei unveränderter Drahtgeschwindigkeit, der optimale Arbeitspunkt mit mittlerer Lichtbogenlänge ist erreicht, Punkt A in **Bild 16**. Würde der Schweißer bei dieser Einstellung (Punkt A) den Schweißprozeß stoppen (Lichtbogen aus, Strom = 0 A), so würde die Stromquelle in der Anzeige (falls vorhanden) eine Spannung von rund 38 Volt (die sog. **Leerlaufspannung**) anzeigen. Soll nun während des Schweißens ausgehend von **Punkt A Bild 16** die Drahtgeschwindigkeit (= **Abschmelzleistung**) erhöht werden, so kann der Schweißer erst die Spannung (Wechsel von Gerätekenlinie 2 auf 3, Punkt D) erhöhen. Der Lichtbogen ist nun etwas länger geworden, durch Erhöhung der Drahtgeschwindigkeit wandert der momentane Arbeitspunkt entlang der Gerätekenlinie 3 zum neuen idealen Arbeitspunkt F bei einer Drahtgeschwindigkeit von 6,8 m/min und einer mittleren Lichtbogenlänge. Grundsätzlich gilt: Wird die Spannung an der Stromquelle geändert, so wandert der Arbeitspunkt im Diagramm senkrecht nach oben bzw. unten. Wird nur die Drahtgeschwindigkeit verändert, wandert der Arbeitspunkt bei eingeschaltetem Lichtbogen entlang der Gerätekenlinie. Die Lichtbogenkennlinien „kurz“ und „lang“ begrenzen das Existenzgebiet des Lichtbogens, vergleiche hierzu **Bild 11**. Außerhalb dieser Existenzgebiete sind die Lichtbögen instabil bzw. die Schweißergebnisse unzureichend, Punkte H und I in **Bild 16**.



**Bild 16:** Zusammenhänge zwischen Lichtbogen- und Gerätekenlinie und der Lichtbogenlänge bei unterschiedlichen Drahtgeschwindigkeiten mit zugehörigen Einbrandprofilen (schematisch).

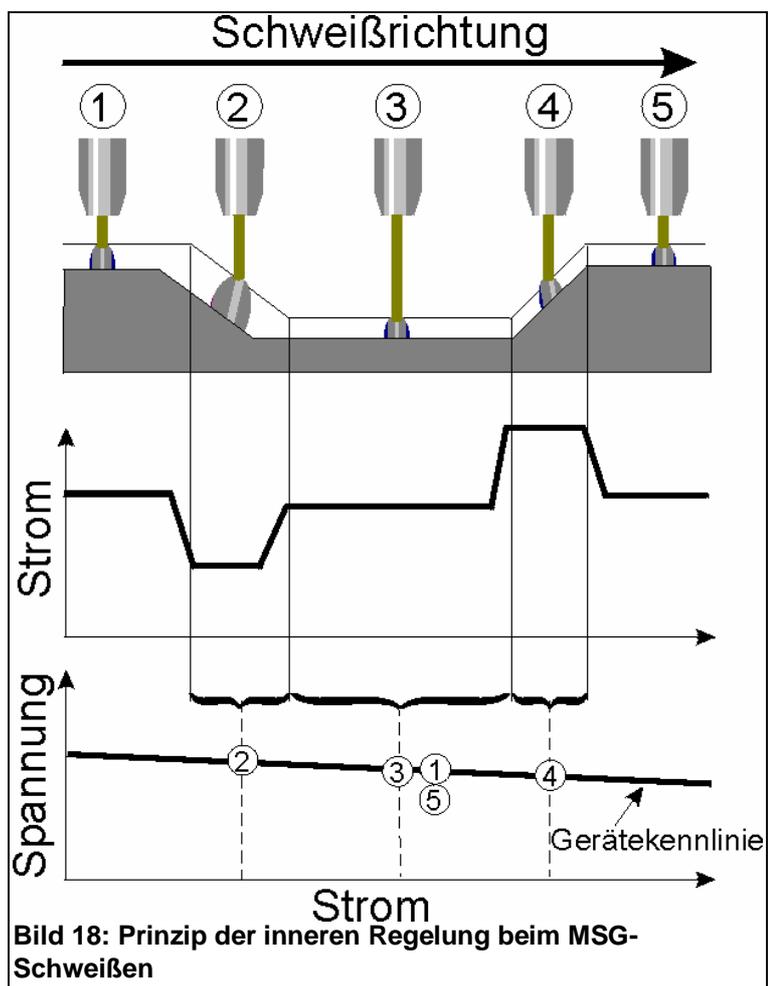
### 3.4 Kontaktrahabstand, Einbrand und innerer Selbstaussgleich

Beim MSG-Schweißen wird die Drahtelektrode im Brenner über ein Kontaktrrohr kontaktiert. Der **Kontaktrahabstand** hat einen erheblichen Einfluß auf den Einbrand und die Schweißparameter, **Bild 17**. Beim Schweißen mit dem Kurzlichtbogen wird mit geringem Kontaktrahabstand gearbeitet (ca. 8-12 mm), mit steigender Drahtgeschwindigkeit wird der Kontaktrahabstand erhöht, z. B. bei 10 m/min ist Kontaktrahabstand bei ca. 15-18 mm, bei 20 m/min bei ca. 25 mm, u.s.w..



Während des Schweißens ist es z. B. bei manueller Brennerführung nicht möglich den Kontaktrahabstand konstant zu halten. Gleichzeitig muß aber, um die Nahtqualität konstant zu halten, die Lichtbogenlänge immer gleich bleiben. Dies geschieht bei einer Stromquelle mit Konstantspannungskennlinie und einer konstanten Drahtgeschwindigkeit durch die sogenannte „**innerer Selbstaussgleich**“, **Bild 18**. Die Abstandsänderungen werden in dieser Darstellung durch eine unebene Nahtgeometrie, bei der der Brenner nicht nachgeführt wird, simuliert. Grundvoraussetzung zum Verständnis des inneren Selbstaussgleichs ist der Effekt der ohmschen Vorwärmung des freien Drahtendes. Die Widerstandserwärmung des freien Drahtendes bestimmt in erheblichen Maße der durch das freie Drahtende fließenden Strom und natürlich der Widerstand selbst.

In Punkt 1, **Bild 18** herrscht ein Gleichgewicht zwischen abschmelzendem Draht und zugeführtem Draht. Wird das Gleichgewicht gestört, hier durch eine Senke dargestellt (= Hochziehen des Brenners), so reagiert die Stromquelle sehr schnell um die Lichtbogenlänge konstant zu halten. Auf dem Weg von Punkt 1 nach Punkt 3 wandert der Arbeitspunkt auf der Gerätekennlinie zu Punkt 2. Dabei nimmt die Schweißspannung nur geringfügig zu (bei reiner Konstantspannung würde sie sich gar nicht ändern), der Schweißstrom hingegen sinkt stark ab. Der geringe Schweißstrom verringert die Abschmelzgeschwindigkeit in der Drahtelektrode, so dass die Lichtbogenlänge trotz der Abstandsänderung Kontaktrrohr/Oberfläche nahezu konstant bleibt. In Punkt 3 kommt der Lichtbogen wieder ins Gleichgewicht bei einem etwas erhöhten Kontaktrahabstand. Der Spannungsverlust ( $U = R \times I$ ) im längeren freien Drahtende ist nun etwas größer als in Punkt 1 wodurch der Gesamtwiderstand im Stromkreis ansteigt. In Folge des-

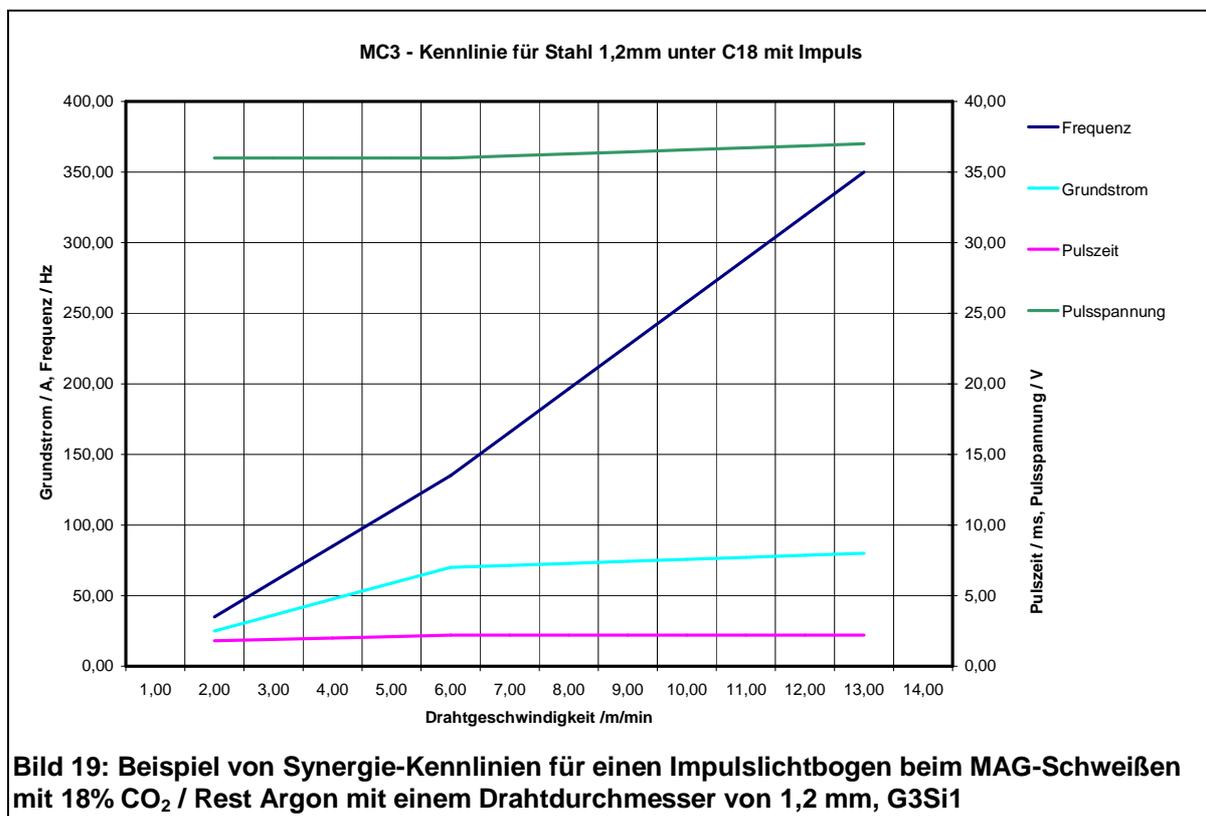


sen stellt sich eine geringfügig höhere Spannung und geringerer Schweißstrom ein. Der geringere Schweißstrom reicht aber aus um den Draht genauso schnell abzuschmelzen wie in Punkt 1, da ja gleichzeitig der Widerstand des freien Drahtendes gestiegen ist und somit auch die Widerstandserwärmung des freien Drahtendes. In Punkt 4 dreht sich der ganze Vorgang um, der Lichtbogen wird geringfügig verkürzt, bei gleichzeitigen Anstieg des Stromes, was zu einem beschleunigten Abschmelzen des Drahtes führt. In Punkt 5 wird der Ausgangszustand wieder erreicht.

Der innere Selbstausgleich kann Brenner- und Werkstückbewegungen schnell korrigieren, jedoch nur in einem eingeschränkten Bereich, bei extremen Bewegungen des Brenners oder ungleichmäßigem Drahtvorschub ist sie machtlos. Des weiteren ist er nur wirksam bei Drahtelektroden mit relativ hohem elektrischen Widerstand wie un- und hochlegierten Stählen. Bei Aluminium-Werkstoffen mit sehr geringen elektrischen Widerständen im freien Drahtende funktioniert dieser Regelmechanismus ebenso wenig.

### 3.5 Synergie-Kennlinien (Einknopfbedienung)

Bis jetzt wurde bei den Einstellung der Schweißparameter immer von einer Eingabe von mindestens 2 Parametern bei Gleichstromlichtbögen (Drahtgeschwindigkeit, Spannung, bei Kurzschluß auch Drossel) ausgegangen. Wie bereits beim Impulslichtbogen bereits vorgestellt, sind bei diesem Lichtbogentyp noch wesentlich mehr Parameter einstellbar. Der Umstand, dass bei Änderung der Drahtvor



schubgeschwindigkeit immer noch mindestens ein zweiter Parameter (Spannung oder Frequenz) nachgeregelt werden musste führte zur Entwicklung der **Synergie-Stromquellen**, auch bekannt unter dem Begriff **Einknopfanlagen**. Dieser Stromquellentyp erlaubt es nun mit einem Knopf, oftmals als Energie- oder Leistungs-Knopf bezeichnet, gleichzeitig mehrere Parameter entsprechend der Lichtbogenkennlinie zu verstellen. Die Führungsgröße ist dabei immer die Drahtgeschwindigkeit, alle anderen Parameter werden nachgeführt. Wird zum Beispiel bei einem Gleichstromlichtbogen die Leistung erhöht, so bedeutet dies, dass **gleichzeitig die Drahtgeschwindigkeit und die Schweißspannung** erhöht werden und die **Lichtbogenlänge** dabei **konstant** bleibt. Bei einem Impulslichtbogen können gleichzeitig über dem Leistungsknopf mehrere Parameter verstellt werden, **Bild 19**.

Eine Synergiekennlinie wird immer nur für eine bestimmte Werkstoff-/Schutzgas-Kombination programmiert. Wird ein anderer Werkstoff oder Schutzgas verschweißt, müssen andere Kennlinien programmiert werden, bzw. aus dem Speicher der Stromquelle abgerufen werden. Bei vielen Synergie-

Stromquellen ist es nicht möglich eigene, anwendungsspezifische Synergiekennlinien zu programmieren und zu speichern. Diese Programmierung von speziellen Kennlinien kann oftmals nur durch den Stromquellenhersteller erfolgen. Der Vorteil von Synergie-Stromquellen ist, dass sie für eine bestimmte Anwendung keine größeren Einstellkenntnisse des Schweißers voraussetzen und recht einfach zu bedienen sind. Nachteilig ist aber gleichzeitig, dass bei speziellen Anwendungen nicht alle Parameter einzeln und optimal auf den Schweißprozess eingestellt werden können.

#### 4. Schweißzusatz- und Hilfsstoffe

##### 4.1 Zusatzwerkstoffe (Drahtelektroden)

Das MSG-Schweißen hat große Bedeutung beim Schweißen von folgenden Werkstoffen erreicht:

- un- und niedriglegierte Stähle (Baustähle, warmfeste Stähle, etc.) – MAG-;
- hochlegierte Stähle (CrNi-Stähle) – MAG -;
- Ni-Basis-Werkstoffe, verschleißfeste Werkstoffe – MAG -;
- Aluminium-Legierungen – MIG -;
- MSG-Löten mit Bronzedrähten (verzinkte Bleche, einige CrNi-Stähle) – MIG oder MAG -.

Tabelle 3 gibt einen Überblick über die gängigsten Normen für Drahtelektroden unterschiedlichster Werkstoffe. Die Drahtelektroden für das MSG-Schweißen sind meist auf Spulenkörper gewickelt und werden je nach Anwendung als Spulenkörper mit 1 –15 kg Zusatzwerkstoff bis hin zu Fassspulen mit mehreren 100 kg Zusatzwerkstoff geliefert. Die lieferbaren Drahtdurchmesser erstrecken sich im industriellen Maßstab von 0,6 mm (selten) über 0,8 / 0,9 / 1,0 mm (Dünnbleche), bis 1,2 mm (Standard) und seltener 1,6 mm. An die Drahtoberflächen werden erhöhte Anforderungen gestellt, um den Strom im Kontaktrohr sicher auf den Draht übertragen zu können und mit möglichst geringen mechanischem Widerstand durch das Schlauchpaket zu gleiten.

EN-/prEN-Nummer	Titel	Ausgabe	Zusammenhang mit		
			DIN	*)	ISO
EN 440	Schweißzusätze – Drahtelektroden und Schweißgut zum MSG – Schweißen von unlegierten Stählen und Feinkornstählen - Einteilung	1994	DIN EN 440	IDT	ISO 864 DIS 14341
EN 758	Schweißzusätze – Fülldrahtelektroden zum Lichtbogenschweißen mit und ohne Schutzgas von unlegierten Stählen und Feinkornstählen - Einteilung	1997	DIN EN 758	IDT	WI <sup>4)</sup>
prEN ISO 1071 <sup>1)</sup>	Schweißzusätze – Drahtelektroden, Drähte und Stäbe zum Lichtbogenschweißen für Gusseisenwerkstoffe		DIN 8573	VGL	DIS 14174
EN 12070	Schweißzusätze – Drahtelektroden, Drähte und Stäbe zum Lichtbogenschweißen warmfester Stähle - Einteilung	1999	DIN EN 12070	IDT	DIS 11837
EN 12071	Schweißzusätze – Fülldrahtelektroden, Drähte und Stäbe zum Lichtbogenschweißen warmfester Stähle - Einteilung	1999	DIN EN 12071	IDT	WI <sup>4)</sup>
EN 12072	Schweißzusätze – Drahtelektroden, Drähte und Stäbe zum Lichtbogenschweißen nichtrostender und hitzebeständiger Stählen - Einteilung	1999	DIN EN 12072	IDT	DIS 14343
EN 12073	Schweißzusätze – Fülldrahtelektroden, Drähte und Stäbe zum Metall-Lichtbogenschweißen mit und ohne Schutzgas von nichtrostenden und hitzebeständigen Stählen - Einteilung	1999	DIN EN 12073	IDT	WI <sup>4)</sup>
EN 12534	Schweißzusätze – Drahtelektroden und Schweißgut zum Metall-Schutzgasschweißen von hochfesten Stählen - Einteilung	1999	DIN EN 12534	IDT	
prEN 12535 <sup>3)</sup>	Schweißzusätze – Fülldrahtelektroden zum Metall-Schutzgasschweißen von hochfesten Stählen – Einteilung	1999	DIN EN 12535 <sup>1)</sup>	IDT	
prEN ISO 182733	Schweißzusätze – Drahtelektroden, Drähte und Stäbe zum Lichtbogenschweißen für Aluminium und Aluminiumlegierungen - Einteilung	1999	DIN 1732-1 E DIN EN ISO 18273	VGL IDT	DIS 18273
prEN ISO 18274 <sup>1)</sup>	Schweißzusätze – Drahtelektroden, Drähte und Stäbe zum Lichtbogenschweißen für Nickelwerkstoffe		DIN 1736-1	VGL	DIS 18274
DIN = Deutsche Norm		IDT = DIN ist mit Europäischer Norm/Normentwurf IDENTISCH			
EN = Europäische Norm		VGL = DIN ist mit europäischer Norm/Normentwurf vergleichbar			
prEN = Europäischer Normentwurf		*) Art des Zusammenhangs			
ISO = Internationale Norm		1) In Vorbereitung: Veröffentlichung wird im Jahre 2000 erwartet			
ISO/DIS = Internationaler Normentwurf		4) Normungsvorhaben (WI) im zuständigen ISO Normungsgremium zur Übernahme/parallelen Abstimmung (PV) vorgesehen			
WI = Normungsvorhaben					

Tabelle 3: Normen für Schweißzusätze

Für Stahlwerkstoffe (unlegiert und hochlegiert) gibt es zusätzlich neben den weit verbreiteten Massivdrahtelektroden auch noch sogenannte Fülldrahtelektroden. Fülldrahtelektroden bestehen aus einer metallischen rohrförmigen Umhüllung und einer pulverförmigen Füllung. Fülldrähte weisen unterschiedliche Querschnitte auf, je nach Fertigungstechnologie des Herstellers, **Bild 20**. Dabei werden die Fülldrahtelektroden nach der Art ihrer Füllung in drei unterschiedliche Typen unterteilt:

- Metallpulverdrähte
- Rutil-Drähte (schlackebildend);
- basische Fülldrähte (schlackebildend).

Die Füllstoffe haben in Verbindung mit dem Schutzgas Einfluß auf Lichtbogenstabilität, Spritzerbildung, Raupenprofil, Einbrand, Schlackenentfernbarkeit, Nahtaufbau in Zwangslagen und mechanische Gütewerte des Schweißgutes. Fülldrähte können mit allen gängigen Schutzgas-Schweißstromquellen im Gleichstrom- und Impulslichtbogen-Betrieb verschweißt werden. Gasgeschützte Fülldrähte erfordern eine Schutzgasabdeckung in gleicher Güte wie Massivdrahtelektroden.



**Bild 20: Querschnitte von Fülldrahtelektroden**

Eine Ausnahme sind die selbstschützenden Fülldrahttypen, die aufgrund ihrer Füllung, ähnlich wie bei Stabelektroden, selbständig ein Schutzgas bilden. Selbstschützende Fülldrähte eignen sich besonders für den Einsatz auf Baustellen, da hier kein Schutzgas zur Abschirmung der Schmelze erforderlich ist (Problem der Zugluft bei Schutzgasabdeckung). Im Baustelleneinsatz weisen selbstschützende Fülldrähte in den meisten Fällen eine höhere Wirtschaftlichkeit als Stabelektroden auf. Für den Standard-Anwendungsfall in Fertigungsbetrieben (Hallenfertigung) eignen sich diese Fülldrahttypen jedoch nicht (Nahtqualität schlechter, hohe Rauchentwicklung, ca. 3xteurer als Massivdraht, Schweißparameter schlechter einzustellen,...).

Fülldrähte sind grundsätzlich teurer als Massivdrahtelektroden. Sie kommen deshalb nur dort zum Einsatz wo die Schweißseigenschaften und/oder die Nahtgüte Vorteile ergeben. Nähere Details zum Thema Wirtschaftlichkeit siehe Kapitel 5.

#### 4.2 Auswahlkriterien für Schutzgase

Wie der Name bereits besagt, müssen die eingesetzten Gase eine Schutzfunktion ausüben. Das flüssige Metall im Tropfenübergang und im Schweißbad, das erstarrte aber noch heiße Metall des Schweißgutes, sowie teilweise auch das erhitzte Material im Nahtnahen Bereich, sind reaktionsfreudig oder empfindlich gegenüber Luftbestandteilen wie Sauerstoff, Stickstoff, Feuchtigkeit, etc. Das Schutzgas muß also in erster Linie diesen empfindlichen Bereich durch eine möglichst laminare Strömung umhüllen und abdecken. Die optimale Durchflußmenge dafür ist abhängig von der Brennergröße (besonders der Gasdüse), Leistungsbereich, Gasdüsenabstand zur Naht, Nahtart, Schweißposition und Gaszusammensetzung. Überwiegend sind die Werte zwischen 12 und 22 l/min ausreichend.

Zusätzlich zu der Schutzfunktion können Schutzgase aber noch andere Aufgaben wahrnehmen:

- Beeinflussung (Stabilisierung) des Lichtbogens
- Metallurgische Reaktionen
- Einbrandsteuerung
- Regeln des Benetzungsverhaltens

Der Wirkmechanismus wird im Folgenden Abschnitt prozeßbezogen beschrieben.

Die Schutzgase sind in der EN 439 genormt. Die Einteilung erfolgt grundsätzlich nach dem reaktiven Verhalten der Gase, d.h. inert und aktiv, wobei die aktiven Gase nach ihrem Oxidationsgrad („Sauerstoffangebot“) unterteilt werden.

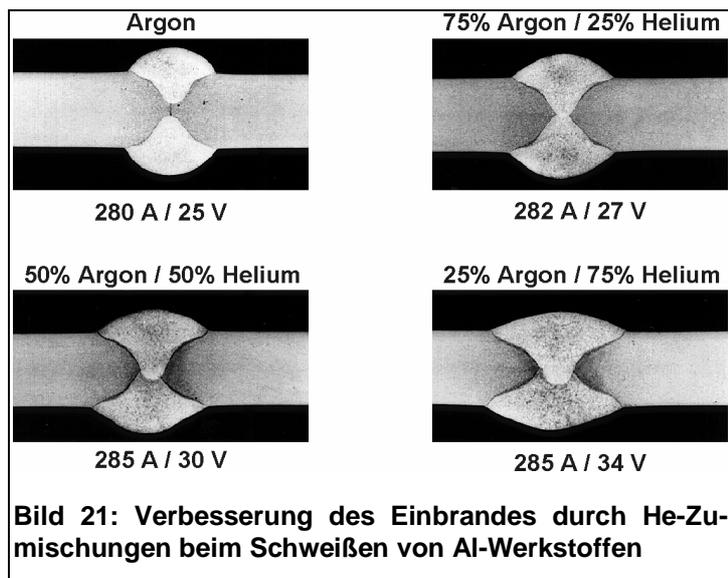
Für das MIG Schweißen kommen nur Gase der Gruppe „I“=inert zum Einsatz.

Für das MAGM-Schweißen werden die Gruppen M1 für hochlegierte Stähle und M2 für unlegierte Stähle bevorzugt. Der MAGC-Prozeß wird unter CO<sub>2</sub> = Gruppe „C“ durchgeführt.

Zusätzlich benennt diese Norm Mindestanforderungen an Gasereinheiten und Mischgenauigkeiten.

#### 4.2.1 MIG-Schweißen

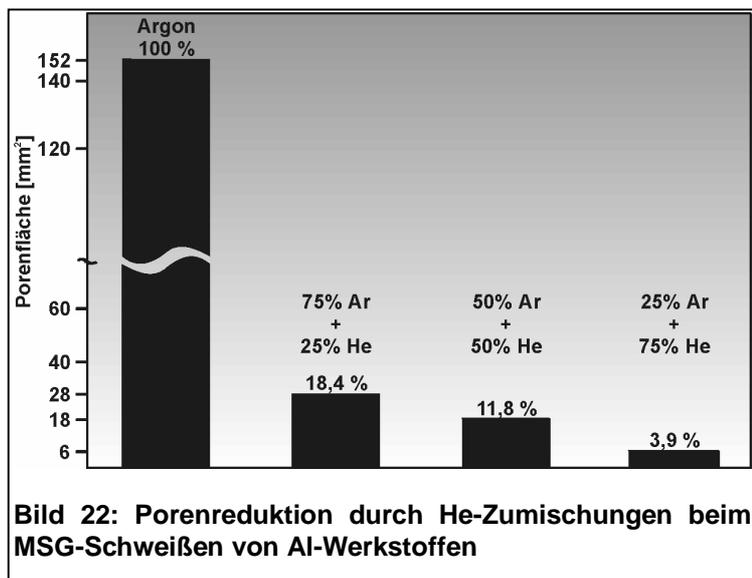
Das MIG-Schweißen wird überwiegend an Aluminium-Werkstoffen, mit Al-Legierungen als Zusatz, eingesetzt. Bedingt durch die Wasserstoffempfindlichkeit und Oxidationsfreude dieser Legierungen, muß das Schutzgas inert und „trocken“ sein. Standard ist heute Argon (Ar) mit einer Reinheit von mindestens 99,996 %vol. Wenn die Reinheit als Einflußfaktor auf die Porenhäufigkeit berücksichtigt wird, dann ist es empfehlenswert mögliche Quellen für Verunreinigungen zu entdecken und abzustellen. Auch ein „sauberes“ Gas kann auf seinem Weg von der Flasche/dem Tank zum Brenner über Schwachstellen der Zuleitung Feuchtigkeit, Sauerstoff oder sonstige Gase aufnehmen. Solche Schwachstellen können sein: Verschraubungsteile, Druckminderer, Schlauchmaterialien mit hoher Permeabilität und Diffusion von Wasserdampf (Luftfeuchtigkeit), unsachgemäße Dichtmaterialien, etc..



**Bild 21: Verbesserung des Einbrandes durch He-Zumischungen beim Schweißen von Al-Werkstoffen**

Argon ist schwerer als Luft und verspricht somit eine gute Abdeckung des Schweißbereiches. Die leichte Ionisierbarkeit ermöglicht gute Lichtbogenzündeeigenschaften auch bei niedrigen Stromstärken, was besonders im Dünnschichtbereich vorteilhaft ist.

Die relativ niedrige Wärmeleitfähigkeit und eine geringe Fähigkeit Wärme an metallische Oberflächen abzugeben sind Eigenschaften des Argons, welche im Falle der Al-Werkstoffe, mit deren hohen Wärmeleitfähigkeit, nachteilig sind. Das schnelle Abkühlen der Schmelze kann zu einer unvollständigen Ausgasung und somit zu Poren führen. Aus diesem Grund wird in letzter Zeit verstärkt mit Argon-Helium Gemischen gearbeitet. Helium ist ebenfalls ein inertes Gas, besitzt aber wesentlich bessere Wärmeleiteigenschaften als Argon. Durch den besseren Wärmetransfer vom Lichtbogen zum Grundwerkstoff und Schmelzbad kann der Einbrand verbessert und die Porenhäufigkeit reduziert werden, **Bilder 21 und 22**. Beim Einsatz von Helium - Gemischen ist für den Anwender zu beachten, daß Helium eine höhere Ionisationsenergie benötigt, wodurch die Schweißspannung entsprechend angehoben werden muß.



**Bild 22: Porenreduktion durch He-Zumischungen beim MSG-Schweißen von Al-Werkstoffen**

Da einige Al-Werkstoffe beim MSG-Schweißen einen unruhigen Lichtbogen erzeugen, wurde versucht auch dieses Problem durch spezielle Gase zu lösen. So entstanden die „dotierten“ Gase, bei denen dem Argon oder Ar-He-Gemisch eine kleine Menge  $O_2$ ,  $NO$  oder  $N_2$ , beigemischt wird, meistens im Bereich von 150 bis 300 vpm. Diese, beim WIG-Prozeß bereits bewährte Methode, kann auch im Falle des MIG-Schweißens zu einem ruhigeren Lichtbogen, stabilen Einbrandverhältnissen und gleichmäßiger Nahtzeichnung führen.

#### 4.2.2 MAG-Schweißen

Das MAG-Schweißen wird überwiegend am Grundwerkstoff Stahl und mit Stahl als Zusatzwerkstoff eingesetzt. Die Beimischung aktiver Gaskomponenten wie  $O_2$  und  $CO_2$ , oder beide, dient einer Teiloxidation des abschmelzenden Zusatzwerkstoffes und damit einer Lichtbogenstabilisierung und leichter Tropfenablösung. Ein MIG-Prozeß an diesen Werkstoffen ist durchaus auch möglich, wird aber nicht eingesetzt da der Lichtbogen wesentlich unruhiger ist und der Einbrand gegenüber aktiven Gasen geringer ausfällt,

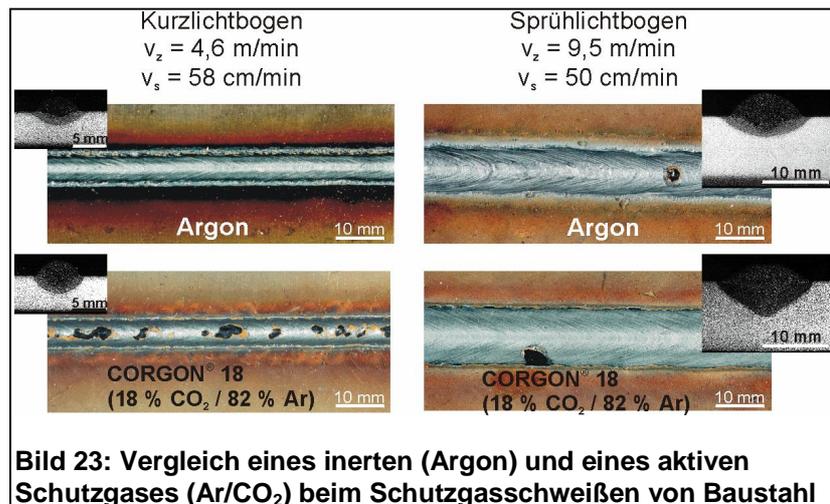
**Bild 23.** Grundsätzlich wird mit Argon- $CO_2$ , Argon- $O_2$  oder Argon- $CO_2$ - $O_2$ -Gemischen gearbeitet. Die auf den Schweißprozeß relevanten Eigenschaften dieser Zumischkomponenten können wie folgt zusammengefaßt werden:

- |  |   |
|--|---|
| <p><math>CO_2</math></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- reagiert mit Werkstoff (oxidierend)</li> <li>- stabilisiert den Lichtbogen</li> <li>- schwerer als Luft - gute Abdeckung</li> <li>- dissoziiert im Lichtbogen zu <math>CO+O</math> – der Volumenanstieg verbessert die Schutzfunktion</li> <li>- nach Dissoziation oxidierende, leicht aufkohlende Wirkung</li> <li>- hohes Ionisations- und Dissociationspotential – erschwert die Zündung</li> <li>- rekombiniert von <math>CO</math> und <math>O</math> zu <math>CO_2</math> – Wärmefreisetzung – Einbrandverbesserung</li> <li>- guter Wärmetransport und Rekombinationswärme – gute Ausgasung des Bades – porenarm</li> <li>- mit steigendem <math>CO_2</math>-Gehalt – erschwerte Ablösung der Tropfen – Spritzer</li> <li>- mit steigendem <math>CO_2</math>-Gehalt – verstärkte Oxidation – „Schlackebildung“ an Nahtoberfläche</li> </ul> | <p><math>O_2</math></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- stärkere oxidierende Wirkung – 2 bis 3 mal höher als <math>CO_2</math></li> <li>- stabilisiert den Lichtbogen</li> <li>- reduziert die Oberflächenspannung der Stahlschmelze – feinschuppige Nahtoberfläche</li> <li>- dünnflüssige Schmelze – Gefahr von Badvorlauf und Bindefehler, besonders bei Fallnaht</li> <li>- geringes Ionisationspotential – geringe Spannung und Wärmeeinbringung</li> </ul> |
|--|---|

Der mengenmäßige Anteil der aktiven Komponenten im Gasgemisch richtet sich in erster Linie nach der Verträglichkeit mit dem Werkstoff. So werden un- und niedriglegierte Stähle mit höherem  $CO_2$ - und/oder  $O_2$ -Anteilen geschweißt als hochlegierte Stähle. Bei letzteren muß der Oxidationsgrad des Schutzgases begrenzt werden, da sonst ein zu starker Abbrand an Legierungselementen die Korrosionsbeständigkeit beeinträchtigt. Zusätzlich kann ein zu hoher  $CO_2$ -Anteil eine gewisse Aufkohlung im Schweißgut bewirken, was die interkristalline Korrosion fördern kann. Ausgenommen von diesen Begrenzungen sind die Fülldrähte bei denen der Schutz des Werkstoffes im Lichtbogenbereich von der Schlacke übernommen wird. Bei diesem Zusatzwerkstoff sind aktivere Mischgase und teilweise auch  $CO_2$  zulässig.

Im Falle der **hochlegierten Stähle** die mit Massivdraht verschweißt werden kommen Schutzgase mit 2,5%  $CO_2$  oder mit 1 bis 3%  $O_2$  am häufigsten zum Einsatz. Auch hier führen  $O_2$ -haltige Gase zu einer verstärkten Oxidation, aber gleichzeitig zu einer Reduzierung der Oberflächenspannung. Diese Schutzgase sind auch für Fülldrähte geeignet.

Als grobe Orientierung kann die Gruppe M1 der EN 439 für das MAG-Schweißen von hochlegierten Stählen in Betracht gezogen werden. Hingegen ist die Gruppe M2 bevorzugt für das MAG-Schweißen von un- und niedriglegierten Stählen. Die stärker oxidierende Gruppe M3 wird in Europa selten benutzt. Auf alle Fälle ist der Anwender gut beraten die Empfehlung und/oder die Zulassung seines jeweiligen Drahtlieferanten zu berücksichtigen. Die Zulassungen eines bestimmten MAG-Drahtes sind immer gekoppelt an eine oder mehrere Gruppen aus der EN 439.



Auswirkung auf	Ar/CO <sub>2</sub> (Standard: 18 % CO <sub>2</sub> )	Ar/O <sub>2</sub> (Standard: 8 % O <sub>2</sub> )	CO <sub>2</sub>
Einbrand			
• Normalposition	gut	gut	gut
• Zwangslagen, z.B. Pos. f oder q	sicherer mit zunehmendem CO <sub>2</sub> -Gehalt	kann kritisch werden wegen Vorlauf des dünnflüssigen Bades	am sichersten
Oxidationsgrad	steigend mit zunehmendem CO <sub>2</sub> -Gehalt	hoch, z.B. bei 8 % O <sub>2</sub>	hoch
Porosität	sicherer mit zunehmendem CO <sub>2</sub> -Gehalt	empfindlich	am sichersten
Spaltüberbrückbarkeit	besser werdend mit abnehmendem CO <sub>2</sub> -Gehalt	gut	schlechter als bei Mischgasen
Spritzerauswurf	spritzerärmer mit abnehmendem CO <sub>2</sub> -Gehalt	gering	am höchsten
Thermische Brennerbelastung	geringer werdend mit zunehmendem CO <sub>2</sub> -Gehalt	hoch Leistung kann wegen zu heißem Brenner eingeschränkt werden	geringer

Tabelle 4: Grundlegende Eigenschaften von Schutzgasen beim MAG-Schweißen von Baustahl

Innerhalb dieser benannten Gruppen sind aber ziemlich großzügige Grenzen für die jeweiligen Komponenten benannt. Entsprechend kann auch das Schweißergebnis mit zwei verschiedenen Gasen aus ein und derselben Gruppe sehr unterschiedlich aussehen. Um eine optimale Gaszusammensetzung für die Anforderungen der jeweiligen Schweißaufgabe zu finden ist es also erforderlich die Auswirkung der Aktivgase zu kennen. **Tabelle 4** bietet eine Zusammenfassung bezogen auf das MAG-Schweißen von un- und niedriglegierten Stählen.

Bedingt durch den Trend zum vollmechanischen Schweißen (Roboter) und höheren Schweißgeschwindigkeiten, hat auch beim MAG-Schweißen die Beimischung von Helium an Bedeutung zugenommen. Ziel dieser Maßnahme ist ein verbesserter Wärmetransfer im Schweißbereich. Besonders bei höheren Schweißgeschwindigkeiten kann durch 20-50% Helium im Schutzgas das Schweißergebnis verbessert werden.

## 5. Wirtschaftlichkeit

Das MSG-Schweißen ist ein äußerst wirtschaftlicher Fügeprozess. Unabhängig vom der Schweißaufgabe lässt sich die Wirtschaftlichkeit einer Fertigung nach folgenden Kriterien beurteilen:

- **Fertigungskosten** (Montagezeit, Schweißgeschwindigkeit, Nacharbeit, Lohnkosten, Anlagenkosten, Reparaturkosten,...);
- **Drahtkosten** (Kosten für Zusatzwerkstoff, Spritzerverluste);
- **Gaskosten** (Gaspreis, Gasdurchfluß, Schweißgeschwindigkeit, Abschmelzleistung,.....)
- **Energiekosten** (Strompreis, Wirkungsgrad der Stromquelle,.....).

Die **Gesamtkosten** einer Schweißnaht ergeben sich aus der Summe der o. g. Kosten. Es ist ersichtlich, das sich hinter den vier oben genannten Begriffen ein wesentlich komplexerer Sachverhalt verbirgt als man zunächst annehmen mag. Beim MAG-Schweißen von Baustahl kann eine sehr grobe relative Kostenverteilung wie folgt vorgenommen werden (Erfahrungswerte aus der Praxis): Etwa **60-80%** der Gesamtkosten entfallen bei einer Schweißnaht auf die **Fertigungskosten**, dies liegt in den hohen Personal- und Anlagekosten begründet. Die **Drahtkosten** liegen bei etwa **10-30%**, **Gaskosten** zwischen **2-15%** der Gesamtkosten. Die **Energiekosten** sind vernachlässigbar klein, rund **1%** der Gesamtkosten einer Schweißnaht.

Die von einigen Drahtherstellern lancierten Werbungen für Fülldrähte sind mit allerhöchster Vorsicht zu genießen. In diesen Werbungen wird fast immer mit höheren Abschmelzleistungen der Fülldrähte gegenüber Massivdrähten geworben und damit suggeriert, das trotz ca. 3x höheren Fülldrahtpreis die Kosten für die zu fertigende Schweißnaht erheblich geringer sind als mit Massivdraht. Diese sehr einfache und pauschale Äußerung ist oftmals falsch. Kostenrechnungen belegen, dass mit Massivdrähten bei Baustahl in der Mehrzahl der Fälle kostengünstigere Schweißnähte zu fertigen sind als mit Fülldrähten (Detaillierte Untersuchung zum Thema Kosten bei Fülldraht/Massivdraht-Schweißungen

in: DVS Berichte Band 209, Seiten 12-20). Aber wie immer keine Regel ohne Ausnahme: Schweißt ein kleiner Stahlbaubetrieb mit einer sehr einfachen, nicht pulsfähigen Stromquelle, Schutzgas 18% CO<sub>2</sub> / Rest Argon und 1,2 mm Massivdraht mit Drahtfördergeschwindigkeiten um 7-9 m/min (Übergangslichtbogen, s. Kapitel 3.2.2), so entstehen sehr viele Spritzer, die eine Nacharbeit erforderlich machen – die Fertigung wird hierdurch sehr teuer. Würde unter diesen Bedingungen ein Metallpulverdraht eingesetzt, so würde der Schweißer schon bei dieser Drahtgeschwindigkeit im spritzerarmen Sprühlichtbogen schweißen. Trotz ca. 2-3 mal höherem Fülldrahtpreis wäre die Fertigung aufgrund der geringeren Nacharbeiten wirtschaftlicher. Aber es wäre genauso denkbar eine pulsfähige Stromquelle zu kaufen und mit Hilfe des Impulslichtbogens einen spritzerfreien Werkstoffübergang mit dem Massivdraht zu gewährleisten. Eine andere Möglichkeit wäre der Wechsel des Schutzgases auf z. B. 5% O<sub>2</sub> /Rest Argon unter Beibehaltung von alter Stromquelle und Massivdraht. Sauerstoffhaltige Schutzgase sind erheblich spritzerärmer als Ar/CO<sub>2</sub> – Gemische. Es wird anhand dieses kleinen Beispiels schon deutlich an wie vielen Größen des Schweißprozesses „gedreht“ werden kann um die Wirtschaftlichkeit eines Schweißprozesses zu optimieren. Einen sehr guten Gesamtüberblick zum Thema Kostenreduzierung/Wirtschaftlichkeit gibt F. Tessin in DVS-Berichte 209, Seiten 7-11.

Bei Al-Werkstoffen konkurriert das MIG-Schweißen mit dem WIG-Prozess und ist, falls nicht spezielle Güteanforderungen gestellt werden, aufgrund der höheren Abschmelzleistungen und Schweißgeschwindigkeiten in Bezug auf die Fertigungskosten klar im Vorteil. Jedoch soll an dieser Stelle nochmals der Begriff **„Güteanforderungen“** hervorgehoben werden. Die höheren Abschmelzleistungen und Schweißgeschwindigkeiten des MIG, aber auch des MAG-Prozesses bringen keine Kostenvorteile, wenn nur mit Hilfe von Nacharbeiten die geforderte Nahtgüte erreicht werden kann. Als Beispiel sei an dieser Stelle die Güteanforderung Spritzerfreiheit der Schweißnaht angeführt. Unter diesem Kriterium kann es durchaus sinnvoll sein mit geringeren Schweißgeschwindigkeiten mit Hilfe des WIG- oder Plasma-Prozesses zu fertigen, da die Kosten für Nacharbeit den Kostenvorteil der höheren Schweißgeschwindigkeit des MIG-Prozesses übertreffen könnten. Wichtig in diesem Zusammenhang ist aber festzuhalten, dass mit Hilfe des MIG-Prozesses (MAG natürlich ebenso) qualitativ hochwertige Nähte zu erstellen sind.

Neuere Entwicklungen sind die MSG-Hochleistungsprozesse, bei denen mit erhöhten Drahtfördergeschwindigkeiten (bei sehr guter Nahtqualität) sowohl Abschmelzleistung als auch Schweißgeschwindigkeit gegenüber den konventionellen MSG-Prozessen gesteigert werden kann. Diese Hochleistungsprozesse sind jedoch überwiegend nur vollmechanisch einsetzbar und nicht für Zwangslagen geeignet. Der MSG-Schweißprozess mit den z. T. höchsten Schweißgeschwindigkeiten ist der Tandem-Schweißprozess für Stähle (unlegiert und hochlegiert), Aluminium und Ni-Basis-Werkstoffe. Dieser Prozess arbeitet mit zwei in Schweißrichtung hintereinander geschalteten Drahtelektroden und ist vollmechanisch von dünnsten bis hin zu dicksten Blechen einsetzbar. Bild 24 zeigt einen Tandembrenner mit typischer Drahtanordnung.



**Bild 24: Brennersystem mit Drahtanordnung zum Tandem-Schutzgasschweißen**

## 6. Zusammenfassung

Das MSG-Schweißen ist aufgrund seiner extremen Vielseitigkeit eines der wirtschaftlichen Schweißverfahren die es zur Zeit gibt. Die hohe Güte der Schweißverbindung in Kombination mit neuesten Entwicklungen auf den Gebieten der Stromquellentechnologie, den Schutzgasen, Werkstoffen und Prozessmodifikationen erschließen ein enorm großes Anwendungsfeld für das Metall-Schutzgasschweißen vom Dünnblech bis zum Dickblech, gestern, heute und sicherlich auch noch in der Zukunft.