

Reibschweissen: ein präzises Verfahren für drehsymmetrische Verbindungen

Autor(en): **Varga, Dezsö**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizerische Bauzeitung**

Band (Jahr): **86 (1968)**

Heft 45

PDF erstellt am: **13.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-70176>

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.

Zur ersten schweizerischen Fachmesse für Werkzeugmaschinen und Werkzeuge, FAWEM 68

Auf dem äusserst vielseitigen Fachgebiet der Werkzeugmaschinen und der Werkzeuge spielt die Schweiz nicht nur als Hersteller und Exporteur eine ausschlaggebende Rolle. Von der hiesigen Produktion dieser Industrie werden etwa 80 % exportiert. Der Rest, der dem Inlandmarkt zufließt, steht einem mengenmässig etwa gleichwertigen Import gegenüber. Sicher werden viele Interessenten die Möglichkeit des direkten Vergleichs zwischen den in- und ausländischen Angeboten begrüßen, die sich ihnen an der erstmals vom 15. bis 24. November 1968 stattfindenden Fachmesse für Werkzeugmaschinen und Werkzeuge, FAWEM 68, bietet. Die Maschinen-Messehallen der Schweizer Mustermesse in Basel werden der neu ins Leben gerufenen Fachmesse und den sich daran beteiligenden rund 120 Ausstellern aus 15 Ländern einen passenden Rahmen bieten.

Die Redaktion

Reibschweissen: Ein präzises Verfahren für dreh-symmetrische Verbindungen

Von Dipl.-Ing. D. Varga, Augsburg

DK 621.791.14

Hochwertige Verbindungen durch Reibung

Der Reibschweissvorgang ist besonders einfach und, weil die Grundparameter gut beherrschbare, mechanische Grössen sind, auch ausserordentlich zuverlässig. Die komplizierte Aufgabe des Schweisens – Auflösen und Abtragen der Oxydschicht, spaltfreies Aufeinanderbringen der zu verbindenden Flächen unter Ausschluss der Atmosphäre – wird hier auf eine eigenartige Weise durchgeführt. Allein die Reibung, diese Urmethode der Wärmezeugung, wird verwendet, um metallurgisch hochwertige Verbindungen zu erstellen.

Ein Werkstück wird festgehalten, das andere axial angepresst und gedreht; schon sorgt die auftretende, starke Reibung für die schnelle Erwärmung einer schmalen Zone beiderseits der Reibflächen, Bild 1.

Der Vorgang ist mit der Reibzeit oder über die Längenvorgabe einfach zu steuern. Diese wenigen Sekunden Reibzeit und der axiale Vorschub von einigen Millimetern bergen jedoch mehrere Phasen in sich; einige davon folgen einander automatisch, andere müssen durch die Steuerung der Reibschweiss-Maschine eingeleitet werden. Zuerst gleiten die oxydierten, von Flüssigkeiten, Schmutz und Gasen behafteten Flächen aufeinander. Gleichzeitig beginnt das Aufbrechen der Oxydschicht und die Instant-Verschweissung der durch die grosse Verformung blossgelegten Spitzen der Unebenheiten. Diese unzähligen, kleinen Schweissverbindungen verursachen überhaupt die Reibung. Ihre kontinuierliche Zerstörung erfordert eine entsprechend hohe Leistung und führt zur Erwärmung der Flächen [2], [11]. Die Summe der effektiven Kontaktflächen ist sehr klein. Von der Belastung abhängig, wird sie nicht mehr als 1/10 000 bis 1/1000 der nominellen Berührungsfächen betragen. Da nur die Gipfel der Rauigkeitsvorsprünge der unter Normalbelastung stehenden Flächen aufliegen, werden sie plastisch verformt. Dies wird durch die klassischen Reibungsgesetze erklärt, denn der Querschnitt der Verbindungsbrücken ist von der Ausdehnung der nominellen Gleitflächen beinahe unabhängig und direkt proportional zur Belastung.

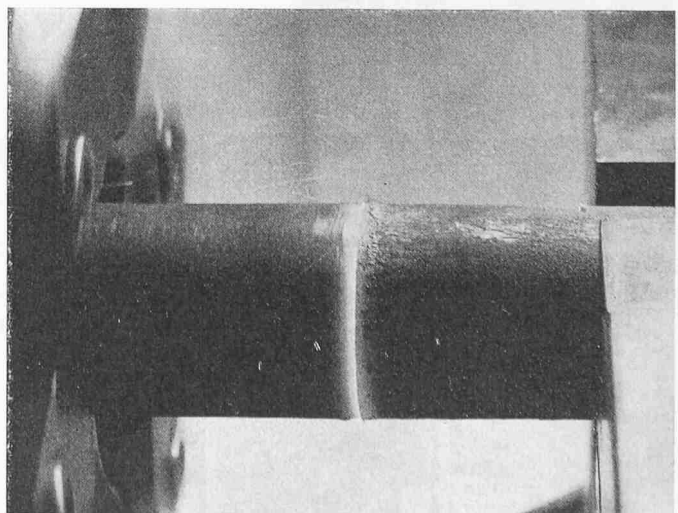
Durch den entstehenden, hohen örtlichen Druck in den Berührungsbezirken werden die Spitzen der Flächen so eng aneinandergedrückt, dass die inneren Kräfte der Materie Kaltverschweissungen herbeiführen. Durch das Erweichen des Metalls infolge der Reibung werden diese Vorgänge noch begünstigt. Das Abscheren, Verformen und Abreissen dieser Kleinst-Schweissverbindungen bedingt den physikalischen Verschleiss der Metalle. Dieser Vorgang ist um so heftiger, je sauberer die Flächen sind. Unter Ausschluss der Atmosphäre und bei reiner metallischer Reibung treten daher ungewöhnlich hohe Reibzahlen auf. Untersuchungen haben zum Beispiel ergeben, dass zwischen Nickel und Wolfram, nach Entfernung von adsorbiertem Sauerstoff und anderen Fremdstoffen, die Reibzahl auf $\mu = 6,0$

wächst. Versuche, um die Reibung zwischen Nickeloberflächen, die so gründlich wie möglich entgast werden, zu messen, schlugen fehl, weil das in diesem Fall auftretende $\mu \approx 100$ einfach zu hoch ist, um genau bestimmt werden zu können [1]. Der Verlauf des Drehmomentes oder der Stromaufnahme des Antriebsmotors zeugt eindeutig von dem für das Reibschweissen so charakteristischen «brutalen Vorgang» zu Beginn des Ablaufs, Bild 2.

In dieser Phase setzt ein regelrechtes Fressen ein, das allerdings die Flächen bestens zu säubern und zu glätten vermag, während der Abrieb restlos herausgeschleudert wird. Manche Teilchen verlassen zwar glühend die Reibstelle, ihre Masse ist jedoch im Verhältnis zu den Spritzern anderer Schweissverfahren verschwindend klein. Diese Teilchen sind schuppenförmig und führen so wenig Material, dass ihre Menge die Funktion der ihnen ausgesetzten Maschinenteile keineswegs beeinträchtigt.

Nachdem dieser heftige Vorgang das schnelle Verschwinden aller Unebenheiten bewirkt hat, entsteht eine sonst in der Technik nicht vorhandene, totale Berührung der Reibflächen. Das Reibmoment fällt auf einen gleichbleibenden Wert ab, die Verhältnisse stabilisieren

Bild 1. Beim Reibschweissen wird das eine Werkstück festgehalten und das andere axial angepresst und gedreht



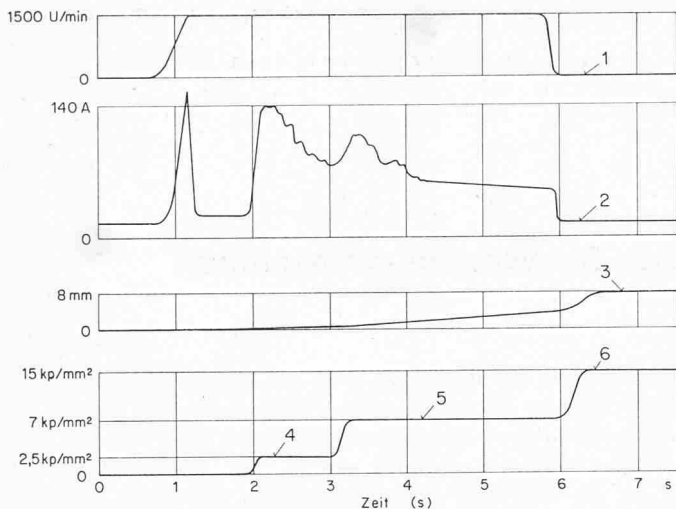


Bild 2. Verlauf der Schweißparameter bei einer Reibschweißung. Werkstoff C 45, Stabdurchmesser 30 mm

- | | |
|------------------------|-----------------|
| 1 Verlauf der Drehzahl | 4 Vorwärmedruck |
| 2 Stromaufnahme | 5 Reibdruck |
| 3 Längenversatz | 6 Stauchdruck |

sich. Das Reiben könnte, von dem selbstverständlich zunehmenden Längenverlust und von der wachsenden Wärmezone abgesehen, meist ohne wesentlichen Einfluss auf das Ergebnis, über längere Zeit fortgesetzt werden.

Jetzt ist die Phase erreicht, für deren optimalen Ablauf ernsthafte Überlegungen angestellt werden müssen. Die genaue Steuerung der Vorgänge wird in diesem Augenblick erstmals verlangt.

Auf den ersten Gedanken scheint es so, dass man nach Erreichung dieses intimsten Flächenkontaktes das Drehen abbrechen sollte, da eine bessere Annäherung der zu verschweißenden Flächen ja unmöglich ist. Die Praxis und die weitere Überlegung zeigen aber, dass die Erzeugung zusätzlicher Wärme verlangt wird, denn ein früh beendeter Reibvorgang ergibt eine zu schmale Wärmezone, deren Abkühlung durch das umgebende, kalte Metall schlagartig bewirkt wird. Dadurch wird das Gefüge dieser Zone einer Härtung ausgesetzt, Bild 3.

Bei hochlegierten Werkstoffen ist das Vorhandensein eines Wärmeüberschusses besonders zu beachten, da sonst Spannungsrisse entstehen können [3]. Für das Erstellen der unlöslichen Verbindung

sind Beginn und Dauer des Anhaltens und Stauchens von grösster Wichtigkeit. Erst der richtige Ablauf dieser Phase vermag die Güte der Schweißung wirklich zu gewährleisten.

Das eigentliche Verschweissen geschieht nachdem die Spindel der Reibschweiß-Maschine vom Antrieb getrennt und abgebremst wurde, um die Schweissstelle darauffolgend stauchen zu können. Mit dem Abschalten des Motors lässt die Wärmezeugung sofort nach; das praktisch gleichzeitig eingeleitete Stauchen soll der schnell fortschreitenden Abkühlung zuvorkommen. Dieses Bestreben führt in manchen Fällen zu einer Überschneidung gewisser Funktionen.

Die genaue Einstellbarkeit der Schaltfolge für Kupplung, Bremse und Stauchdruck ist besonders beim Schweißen hochlegierter Werkstoffe sehr wichtig. In der Mitte der Schweisszone entsteht ein feines Schmiedegefüge, das mit einer wärmebeeinflussten Zone ins Grundgefüge übergeht. Gewöhnlich werden im Durchmesserbereich von 8 bis 25 mm bis zum Abschalten der Spindel mehr als 100 Umdrehungen in der 4 bis 10 Sekunden langen Reibzeit ausgeführt. Hinzu kommt noch, dass bei jeder Umdrehung eine sehr grosse Zahl lokaler Schweissstellen abgebrochen wird. In der tief durchmengten Schicht der Schweisszone sind dadurch alle Kristalle wesentlich verkleinert, Bild 4.

Mikroskopische Untersuchungen geben keinen Aufschluss darüber, ob ein Schmelzen stattfindet. Es ist möglich, dass in winzigen Bereichen vorübergehend Temperaturen um den Schmelzpunkt auftreten. Bei den hohen spezifischen Drücken kann sich aber keine flüssige Schicht bilden. Aufwendige Temperaturmessungen lieferten auch nur unter dem Schmelzpunkt liegende Ergebnisse.

Die in der heissen Zone herrschenden, starken Atomschwingungen stellen die vollkommene Verbindung der beiden Werkstücke her, und zwar auch dann, wenn die beiden Werkstoffe ineinander nur begrenzt oder gar nicht lösbar sind. Die Löslichkeit ist kein Kriterium für die Reibschweisbarkeit; wichtiger ist, dass die Kristalle gittergeometrische Ähnlichkeit aufweisen.

Verschiedene, bisher mit anderen Methoden nur sehr schwer oder gar nicht schweisbare Werkstoff-Paarungen sind mit Erfolg geschweisst worden. Bild 5 gibt einige Ergebnisse an. Es muss dazu allerdings bemerkt werden, dass in einigen Fällen widersprechende Meldungen vorliegen. Die Gründe dafür sind zum Teil der Uneinigkeit in der Beurteilung einer Verbindung zuzuschreiben. Bei manchen Material-Paarungen lässt sich eine Verschweißung mikroskopisch nicht nachweisen, obwohl die Festigkeit der Schweissstelle höher liegt als im schwächeren Grundwerkstoff. Wiederum kommt es auch vor, dass eine scheinbar gelungene Schweißung sehr brüchig ist. Zum anderen können die dynamischen Eigenschaften verschiedener Maschinen das Reproduzieren fremder Ergebnisse erschweren.

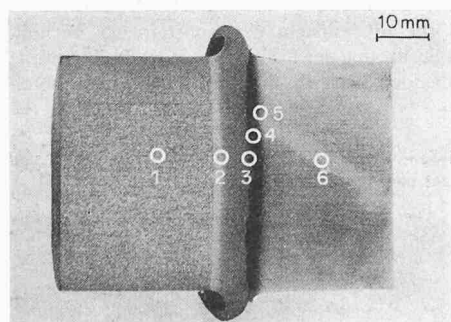
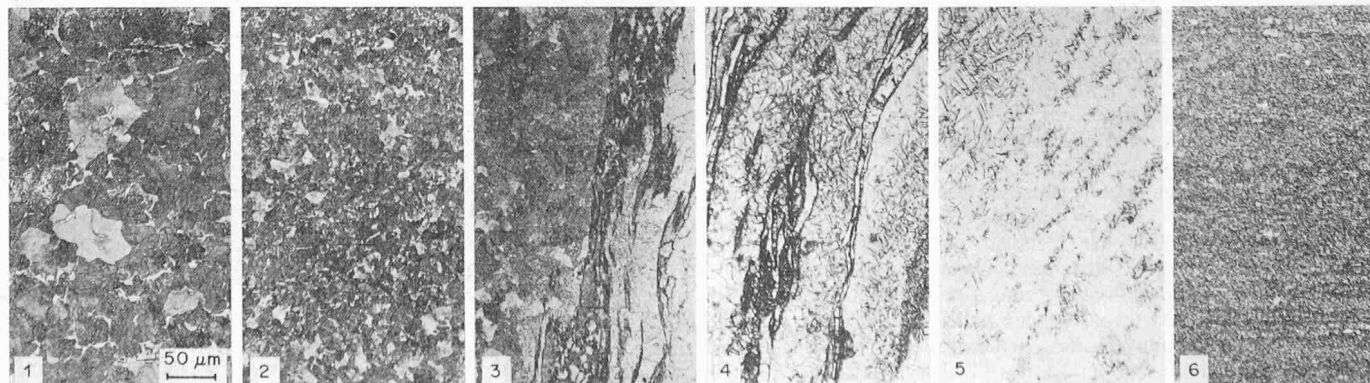
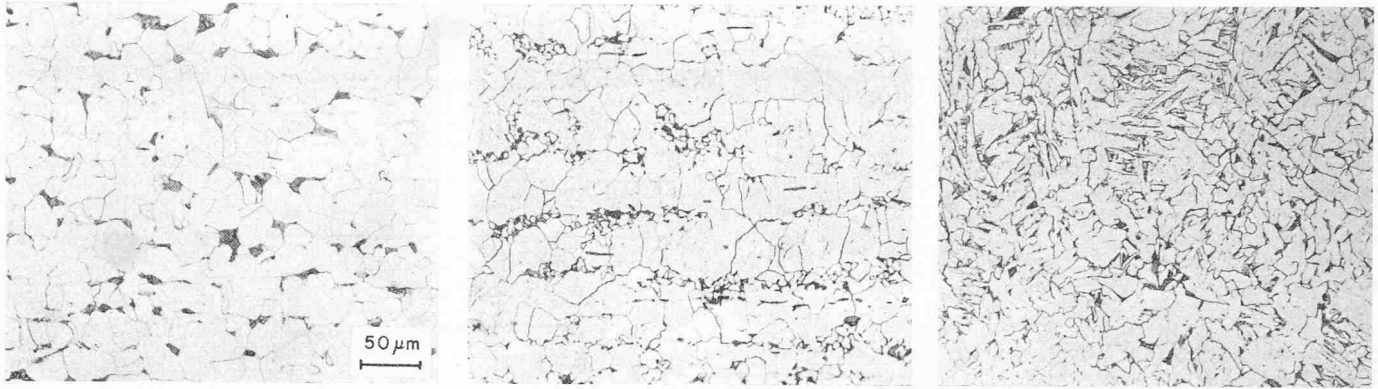


Bild 3. Makro- und Mikroaufnahmen der charakteristischen Gefüge einer Reibschweißung zwischen C 60 und D Mo 5

- | | | |
|--------------------|------------------|----------------------|
| 1 Grundgefüge C 60 | 3 Schweissgefüge | 5 Übergangsgefüge |
| 2 Übergangsgefüge | 4 Schweissgefüge | 6 Grundgefüge D Mo 5 |





Grundgefüge

Übergangsgefüge

Schweissgefüge

Bild 4. Mikroaufnahmen einer Reibschweissung. Werkstoff der geschweissten Teile St 37

Eine neuartige Schweissmaschine

Funktionen der Reibschweiss-Maschine

Die zu verschweisenden Teile müssen gespannt, unter Axiallast gedreht und am Ende angehalten und gestaucht werden. Die Primärfunktionen einer Reibschweiss-Maschine sind damit: Spannen/Zentrieren, Drehen, Druckausüben und Anhalten. Die dazu nötigen Maschineneinheiten sind: Spannfüter, Spindel, Antrieb und Arbeitsschlitten [8].

Die Anforderungen an das Spannfüter sind meist höher als sonst bei Werkzeugmaschinen. Neben grossen axialen und radialen Kräften müssen die Backen das hohe Drehmoment übertragen. Hydraulisch betätigte Spezialspannfutter können den nötigen Überschuss an Spannkraften aufbringen. Dieser Überschuss wird als Sicherheit benötigt, denn keine der allfälligen Veränderungen, die zur Schwankung des übertragbaren Drehmoments führen, darf das Werkstück zum Rutschen bringen, da schon eine kurzzeitige Relativbewegung die Greiffläche der Backen zerstört.

Eine merkliche Verbesserung der Verhältnisse lässt sich durch den gesteuerten Aufbau des Axialdruckes erreichen. Mit einem entsprechend gewählten Druckprogramm kann das Reibmoment auf den nominellen Wert der plastischen Phase begrenzt werden. Um die Kosten einer aufwendigen Steuerung und hydraulischen Betätigung zu ersparen, jedoch die Sicherheit gegen Beschädigung der Backen sicherzustellen, bedient man sich oft eines Spezialfutters, dessen Spannkraft durch die zunehmende Belastung erhöht wird. Dieselbe Kraft, die den intimen Kontakt der Reibflächen gewährleistet, ruft logischerweise eine hohe Belastung der Spindellagerung hervor. Zum Glück steht die Spindel meist, wenn während des Stauchens die grösste Axialkraft aufzunehmen ist. Zwei typische Beispiele von Reibschweissanlagen wurden im Welding Institute in Grossbritannien gebaut; Bild 6 zeigt die grösste, Bild 7 die kleinste dieser Anlagen.

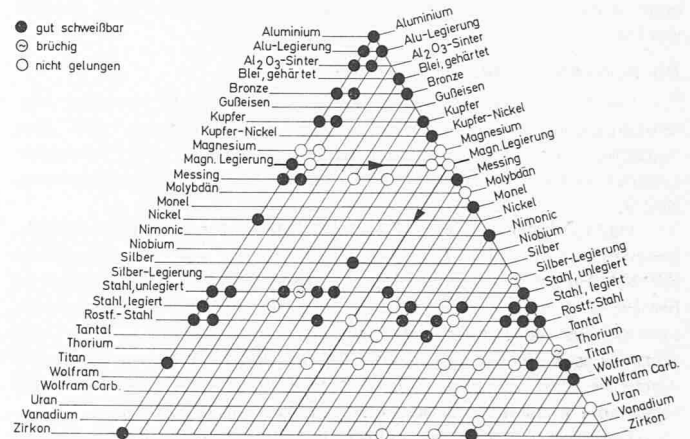


Bild 5. Zusammenstellung der Ergebnisse verschiedener Reibschweissversuche

Ausgeklügelte Lagerungen müssen bei Verwendung der besten Elemente für die hohen Lasten eingebaut werden. Die Nase der Spindel soll so kurz wie möglich sein und die Lagerspiele müssen niedrig gehalten werden, Bild 8. Während des Stauchens der Werkstücke würde jede Deformation oder Ungenauigkeit in die erstellte Verbindung «hineinkühlen».

Zwangweise entsteht aber Reibung auch woanders als an der Schweissstelle. Von Produktionsmaschinen erwartet man ein schnelles Arbeiten. Taktzeiten von 6 bis 12 s bedeuten, dass der laufende Antriebsmotor innerhalb dieser Zeit der ruhenden Masse der Spindel

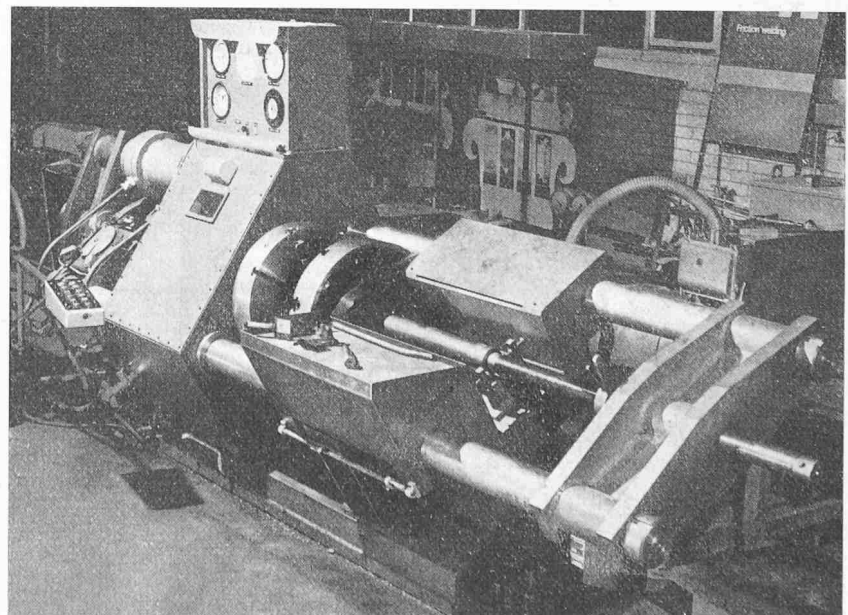


Bild 6. Versuchsmaschine zum Reibschweissen von Stäben von 90 mm und Rohren von 200 mm Durchmesser. Höchste Axialkraft 100 Mp; Drehzahlbereich 200 bis 1400 U/min (Welding Institute, Abington, Cambridge, England)

Tabelle 1. Daten der Grundausführung der Maschine RS 15000

Maximale Vorschubkraft	15 000 kp
normale Spindeldrehzahlen	1000 und 1500 U/min
Anschlussleistung	30 kW
Maximale Werkstücklänge	550 mm
Maximaler Spindeldurchlass im Bereich von 250 mm	45 mm
Maximaler Hub	270 mm
Gesamtlänge der Maschine	3100 mm
Gesamtbreite der Maschine	900 mm
Gesamthöhe der Maschine	1280 mm
Gesamtgewicht	4500 kg

erst zu- und am Ende der Reibphase unter Last abgeschaltet werden muss. Der Schlupf der praktisch alle 3 bis 6 s geschalteten Kupplung verursacht deren starke Erwärmung. Die hohen Beschleunigungs- und Verzögerungskräfte belasten alle anderen Elemente der Kraftübertragung, wobei die Verzögerungskraft meist die höhere ist, denn zum Stauchen soll die Spindel schnell angehalten werden, während beim Anlauf zum Schonen der Maschine ein sanfterer Weg gewählt werden kann.

Die Reibschweiss-Maschine RS 15000

Die Einspindelausführung der Maschine besteht aus dem Maschinengestell, dem Spindelstock mit Schaltkupplung und dem Antriebsmotor, der gleitenden Spannvorrichtung mit Vorschubzylinder, der Hydraulikanlage und der elektrischen Ablaufsteuerung, Bild 9.

Das Grundgestell ist eine robuste, verwindungssteife Stahlblechkonstruktion. Es nimmt die hohen Axialkräfte auf. Die Spindel ist mit Präzisionswälzlager in einem starren Gehäuse gelagert und so bemessen, dass die grossen Stauch- und Biegekräfte bei angemessener Lebensdauer der Lager aufgenommen werden können. Über eine Kupplungs-Riemenscheiben-Kombination wird die Spindel mit dem Antriebsmotor verbunden. Eine starke Scheibenbremse ist vorgesehen aber nicht für jede Schweissaufgabe erforderlich.

Die Spannvorrichtung für das nichtrotierende Werkstück besteht aus einem hydraulisch betätigten, kräftigen Spannfutter, das auf einem Flachführungsschlitten montiert ist. Reib- und Stauchkraft sowie Zustell- und Arbeitswege werden durch einen entsprechend bemessenen Hydraulikzylinder bewirkt und über das Werkstück selbst auf die Spannvorrichtung bzw. auf den Schlitten übertragen.

Das Hydraulikaggregat ist von der Maschine getrennt aufgestellt. Es enthält in Kompaktbauweise alle Druckerzeuger-, Steuer- und Regelgeräte, die gut zugänglich auf einer Platte montiert sind. Die elektrische Ablaufsteuerung ist eine Schützsteuerung; diese wurde in einem flachen Schaltschrank untergebracht und an der linken Stirnwand des Maschinengestells aufgehängt. Das Steuerpult ist vor dem Spindelstock funktions- und bedienungsgerecht angeordnet. Es umfasst die Drucktaster für Spannen, Eilgang und Start, ferner die Druckminderventile mit Manometer für die Einstellung von Reib- und Stauchdruck sowie das Relais für die Wahl der Schweiss-

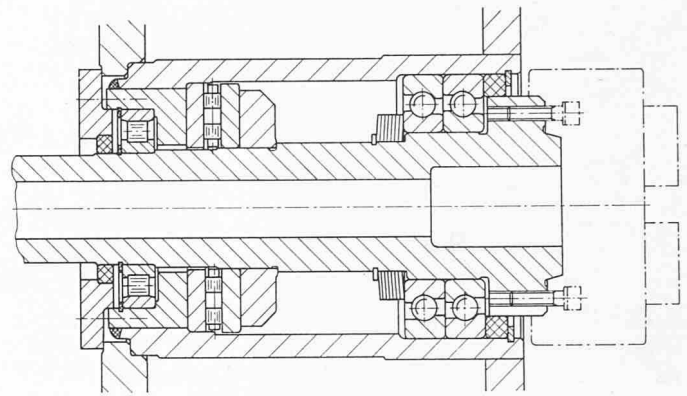
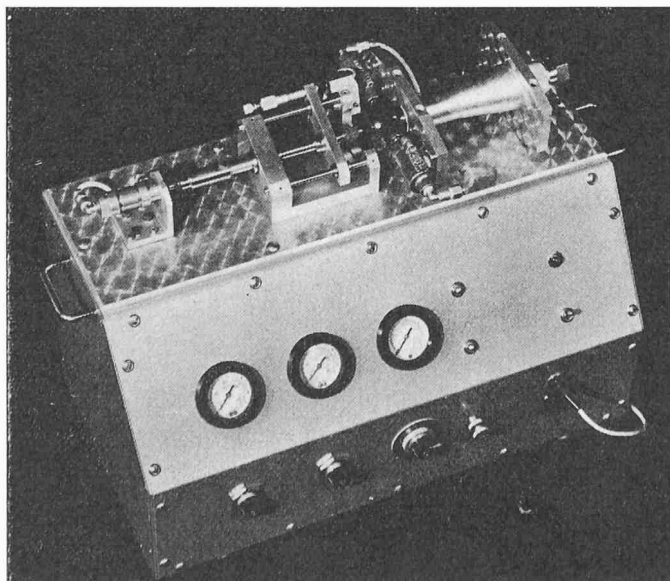


Bild 8. Konstruktion der Spindellagerung einer Reibschweissmaschine

zeit. Wahlschalter für manuellen bzw. maschinellen Betrieb oder für verschiedene Programme sind ebenfalls vorgesehen.

Der Spindeldurchlass beträgt 30 mm und ist vorne auf 80 mm erweitert. Im Spannfutter können Werkstücke mit 60 mm \varnothing und 300 mm Länge aufgenommen werden. In der Spannvorrichtung des Schlittens können Teile bis 250 mm Länge gespannt werden; Möglichkeit auf Erweiterung bis 500 mm besteht. In Tabelle 1 sind die wichtigsten Daten dieser Maschine zusammengefasst. Mit ihr lassen sich Baustähle von 12 bis 35 mm \varnothing verschweissen, was einem Querschnitt von 100 bis 1000 mm² entspricht. Für legierte und hochlegierte Stähle verschiebt sich dieser Bereich nach unten – etwa auf 8 bis 30 mm \varnothing , das heisst 50 bis 700 mm² nominelle Schweissfläche.

Die Normalausführung der Maschine ist zum Schweiessen verhältnismässig kurzer, runder Teile, wie Bolzen auf Flansche, in zwei Hälften geschmiedeter Werkstücke, Schäften von Schnellstahlwerkzeugen usw. konstruiert. Die Bauweise erlaubt aber die Anpassung an andere Erfordernisse. Für Rohre ist ein langsamer, für Leichtmetalle ein schneller Antrieb vorgesehen.

Der Arbeitsvorgang besteht normalerweise aus folgendem Ablauf:

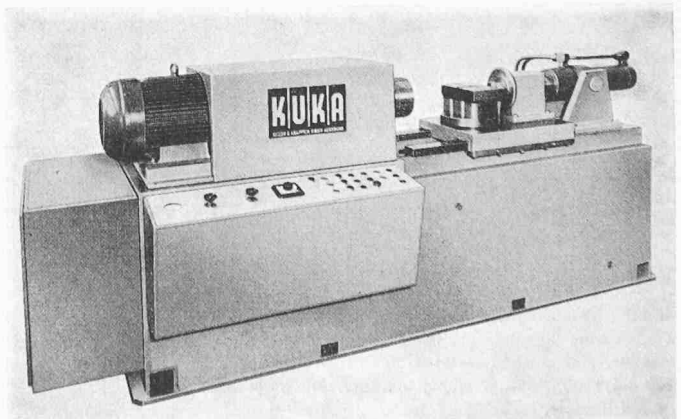
1. Einlegen und Spannen eines Werkstückes in das Spannfutter des Spindelstockes
2. Einlegen und Spannen des Gegenstückes in das Spannfutter des Schlittens
3. Startknopf drücken. Eilgang und Reibzeit laufen entsprechend der Relais-einstellung ab. Die Steuerung schaltet selbsttätig auf Stauchen um
4. Nach erfolgter Stauchung fährt der Schlitten in die Ausgangsstellung zurück, der Spanner öffnet, das geschweisste Teil kann entnommen werden.

In der Zweispindelausführung – 2 RS 15000 – bleibt der Aufbau der Maschine im wesentlichen der gleiche, nur wird ein längeres Grundgestell verwendet und anstelle des hydraulisch beaufschlagten

Links:

Bild 7. Mikroreibschweissmaschine MFW 3 zum Schweiessen von Drähten. Durchmesser-Bereich rund 0,5 bis 3,5 mm; Axialkraft 2 bis 40 kp; Spindeldrehzahl bis 65 000 U/min (Welding Institute, Abington, Cambridge)

Bild 9. Ansicht der Reibschweissmaschine Modell RS 15 000



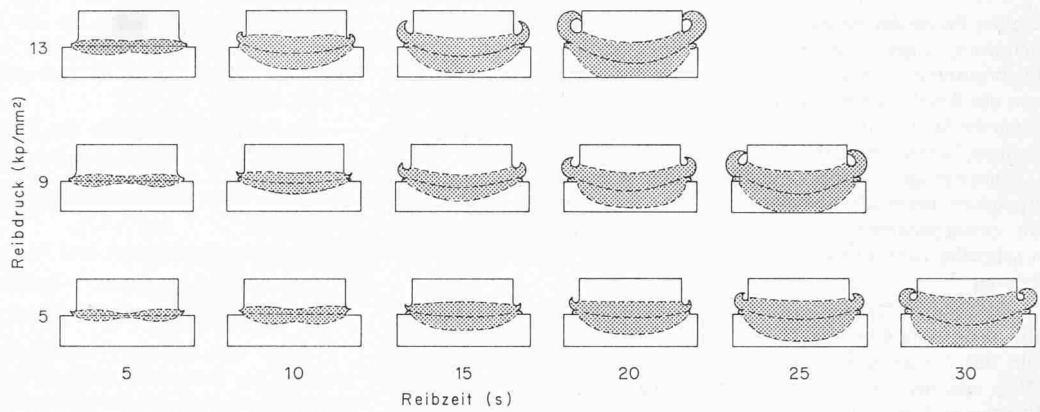


Bild 10. Form und Grösse des Schweisswulstes beim Reibschweißen in Abhängigkeit vom Druck und von der Zeit

Spannfutters auf der Schlittenführung eine Spindel mit Antrieb montiert. Mit der Zweispindelmaschine lassen sich zweiteilige Werkstücke; bei Verwendung eines Zwischenkopfes dreiteilige Werkstücke oder auch zwei zweiteilige Werkstücke gleichzeitig schweißen.

Genauigkeitsschweißen bearbeiteter Werkstücke

Dieser Untertitel ist bestimmt irreführend, denn Reibschweißen kann beides: fertiggearbeitete und rohe Werkstücke verbinden. Umfangreiche Versuche haben bewiesen, dass es auf die Art der Flächenvorbereitung nicht ankommt; der Zustand der Flächen ist in den meisten Fällen von zweitrangigem oder noch geringerem Einfluss, Bild 11 [4, 13]. Ob die zu verbindenden Flächen verölt oder verzündert, ob sie glatt gesägt oder grob geschnitten waren, verursacht keine merklichen Unterschiede. Sogar Schweißungen in neutraler Gasatmosphäre hatten eine nachweisbare Steigerung der Güte nicht herbeizuführen vermocht.

Der glatte Stoss eignet sich selbstverständlich ausgezeichnet für eine Kontrolle des Schweißablaufes nach der Längenvorgabe. Das deckt sich auch meist mit den Forderungen, da die Länglenkontrolle hauptsächlich bei bereits bearbeiteten Teilen verlangt wird. Das soll aber nicht heissen, grobe Teile könnten nicht nach Länge oder gar auf Länge geschweisst werden. Die Spitzen eines grob, vielleicht auch schräg geschnittenen Werkstückes tragen sich sehr schnell ab und dann erfolgt der Eingriff über die ganze Fläche. Dieser, für die Länglenkontrolle als Anfangspunkt dienende Wert der vollen Reibung liesse sich durch Messen des Reibmomentes mit dessen maximalem Wert ziemlich genau erfassen. Wo dieser Aufwand nicht berechtigt ist, soll man den Ablauf einfach nach der Zeit kontrollieren. Das schnelle Verschwinden der Unebenheiten sorgt dafür, dass keine grossen Abweichungen auftreten.

Das Messen der Reibzeit kann «über Alles» erfolgen, das heisst mit dem Zuschalten eines Relais beim Auftreten des hydraulischen Druckes, oder nach der «reinen Reibzeit», wenn das Zeitmessgerät erst durch einen Schwellenwert im Strom oder Drehmoment in Bewegung gesetzt wird.

Bei Material-Paarungen ungleicher Masse oder unterschiedlicher Wärmefestigkeit ist das grössere und festere Teil möglichst plan vorzubereiten. Um zum Beispiel ein Rohr auf eine Platte zu schweißen, ist ein guter Planlauf der gespannten Platte besonders wichtig, sonst leitet die Umgebung der reibenden Stelle soviel Wärme ab, dass das Rohr selbst nach längerem Reiben und nach dem Erzeugen eines starken Wulstes zu keiner richtigen Berührung kommen kann. Der überhöhte spezifische Druck an dieser verkleinerten Reibfläche drängt auch die eben erwärmte Schicht sofort in den Wulst; damit liegen praktisch kühle Reibflächen gegeneinander. Das ist ein weiterer Grund, warum die Lage sich kaum bessern kann [12].

Die wichtigsten Parameter sind in der Reihenfolge: spezifischer Reib- und Stauchdruck, Reibzeit und Umdrehungszahl. Da sie voneinander abhängig sind, wird die Wahl des einen die anderen beeinflussen, Tabelle 2. Interessant ist der Umstand, dass eine grosse Zahl von Kombinationen zu festen Schweißungen führt. Dies wiederum ist oft zu viel des Guten, weil es das Bestimmen der optimalen Parameter erschwert [14].

Die Grösse dieser Parameter ist von den thermischen und mechanischen Eigenschaften der Werkstoffe sowie den Abmessungen und der Form der Werkstücke abhängig. Baustähle werden zum Beispiel mit 3 bis 5 kp/mm² erwärmt und mit 8 bis 15 kp/mm² ge-

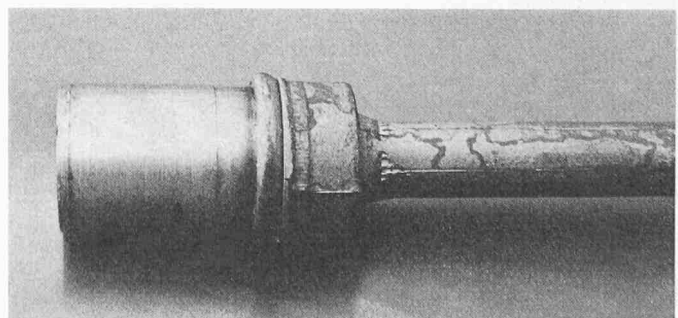
staucht; die verwendeten Drehzahlen liegen um 750 bis 1500 U/min, und die Reibzeit ergibt sich durch die Form bzw. die Abmessungen der Werkstücke. Erhöhter Druck verkürzt die Schweißzeit bei verkleinerter Schweißzone und umgekehrt verminderter Druck bedeutet längere Zeit und tiefere Wärmezone, Bild 10. In verschiedenen Ländern bevorzugen die Institute und Firmen vorerst unterschiedliche Methoden. So gibt es die Kombinationen von hoher Drehzahl/niedrigem Druck, mittlerer Drehzahl/steigendem Druck, niedriger Drehzahl/hohem Druck, deren endgültige Eignung für eine Schweißaufgabe auch von maschinenbautechnischen Gesichtspunkten abhängig ist. Zu hohe Drehzahlen oder Drücke stellen strenge Forderungen an die Spindellagerung, das Druckprogramm bedeutet zusätzliche Kosten [9]. Wie sonst in der Technik üblich, versucht man auch hier, den vielbesagten Mittelweg zu gehen und das wirtschaftliche Feld der Kompromisse nur in Ausnahmefällen zu verlassen.

Ob zwischen den zu verschweißenden Flächen vor dem Anfahren ein Spalt ist oder nicht, ist lediglich für die Maschine von Bedeutung. Lässt man die Spindel frei hochlaufen, helfen die drehenden Massen

Tabelle 2. Spezifische Reib- und Stauchdrücke für verschiedene Werkstoff-Paarungen

Werkstoffsorte	Form der Werkstücke	P_{reib} kp/mm ²	P_{stauch} kp/mm ²	
C 22	- C 35	Rohr - Rohr	0,5- 2	8-12
St 37	- St 37	Rohr - Rohr	1- 3	8-12
St 55.1 C	- St 55.1 C	Rohr - Rohr	2- 4	8-12
40 Mn 4	- C 35	Rohr - Rohr	1- 3	10-20
St 37	- St 37	Stab - Stab	2- 4	6- 8
St 37	- 9 S 20 K	Stab - Stab	3- 5	7-10
C 45	- C 45	Stab - Stab	6- 8	8-12
St 37	- V 2 A	Stab - Stab	6- 8	8-12
Ck 35 N	- Ck 35 N	Stab - Stab	6- 8	10-15
St 37.11	- St 37.11	Stab - Platte	6-10	10-20
St 50	- St 37	Stab - Platte	6-10	12-16
St 60	- St 60	Stab - Platte	6-10	15-25
42 Cr Mo 4	- X 12 Cr Co Ni	Stab - Stab	6-10	15-25
D Mo 5	- C 60	Stab - Stab	8-12	20-30
X 45 Cr Ni W 18.9 - Nimonic 80 A	- Nimonic 80 A	Stab - Stab	10-15	25-40

Bild 11. Mit einem rohen Schmiedestück reibverschweisste, bearbeitete Hülse



die erste Phase der Reibung zu überwinden. Wird die Spindel unter Axialdruck zugeschaltet, werden Antrieb und Motor mehr in Anspruch genommen. Kleinere Drehmomentenspitzen werden entstehen, wenn der Axialdruck erst allmählich aufgebaut wird. Bei Verwendung geeigneter Steuerung kann der ganze Ablauf mit einem fast gleichmässigen Drehmoment bewältigt werden.

Druckprogramme sind nicht nur zur Schonung der Maschine vorgesehen: Beim Schweißen hochlegierter Stähle werden Druckstufen zum zweckmässigen Erwärmen der Werkstückenden angewendet. Zu schnelles Schweißen dieser Werkstoffe ergibt eine brüchige Verbindung.

Die Spannzeuge der Reibschweiss-Maschine sind zwar aufwendig, dafür bleibt ihre Genauigkeit bei richtiger Bemessung lange erhalten. Teile mit beständigen Abmessungen, die sich gut aufnehmen und kräftig spannen lassen, können mit einigen hundertstel Millimeter Mittenversatz verschweisst werden. Das erlaubt oft eine Verminderung der Bearbeitungszugaben. Das Schweißen «auf Länge» ist ebenfalls gut möglich. Wird der Vorgang einfach nach Zeit oder Längenvorgabe gesteuert, hängt die Streuung der erzielten Längen vor allem vom Werkstück selbst ab. Sind die Rohmasse von vornherein sehr unterschiedlich, kann man durch Auf-Anschlag-Stauchen zu einem genauen Endmass kommen. Der feste Anschlag sorgt dafür, dass die Toleranz bei Teilen mittlerer Durchmesser innerhalb eines zehntel Millimeters bleibt. Es tritt jedoch ein Problem auf, wenn die Längenmasse der zu schweisenden Teile stark schwanken.

Die Abschaltung des Vorganges erfolgt zwar mittels einer dem Anschlag vorgesetzten, genau einstellbaren, festen Nocke, doch sind die Verhältnisse von Fall zu Fall etwas unterschiedlich. Bei der Paarung überlanger Teile wird die Reibzeit verhältnismässig ausgedehnt und eine breite Wärmezone erzeugt. Das Stauchen erfolgt dann mehr gegen den Anschlag als gegen die Schweisstelle selbst, weil letztere ja zu weich wurde. Dies kann zur Herabsetzung der Festigkeit führen. Der Ausweg scheint eine entsprechende Änderung der Stauchvorgabe zu sein, damit die Kraft früher oder später einsetzt, je nach Ausgangslänge der Paarung. Das ist schon ein erster Schritt zur Automatisierung der Kontrolle, der das Stauchen auf gleiche Festigkeit hin regelt.

Wenn während des Schweißens die erprobten Werte oder Bereiche der Hauptparameter gewährleistet worden sind, so erfolgt praktisch eine selbsttätige Gütekontrolle. Wird dazu noch der eine oder andere Parameter den vorliegenden Schwankungen entsprechend von der Kontrolle selbst geändert, hat man es mit einer automatischen Steuerung zu tun.

Die meisten Reibschweiss-Maschinen werden zunächst nur mit einer genauen Kontrolle versehen. Für wichtige Schweisstteile oder für solche aus empfindlichem Material werden zusätzlich Geräte zur Überwachung des Schweißvorganges eingebaut. Das Vorhandensein der Hauptparameter bürgt schon für den normalen Ablauf der Schweißung. Eine sich mit der vorgesehenen Drehzahl drehende Spindel nimmt unter dem vorgeschriebenen Axialdruck eine sich wiederholende Leistung auf, die dann als Wärme in der Schweisstelle vorhanden sein muss. Man kann das Problem auch vom anderen Ende aufrollen: Kontrolle und Vergleich des Ist- und Sollwertes des Längenversatzes während der Reib- und der Stauchphase beweisen auch das Vorhandensein einer ausreichenden Energie bzw. den normalen Verlauf der Schweißung. Ergänzend sollten aber noch die Schwellwerte der Axialkräfte überwacht werden.

Diese zweite Generation von Kontrolleinrichtungen für das Reibschweißen bringt uns schon ziemlich nahe an den echten Schweiß-

automaten, der sich selbst an die Verhältnisse anzupassen vermag. Das Reibschweiss-Verfahren wird von Fachleuten als eines derer angesehen, die als erste im wahrsten Sinne des Wortes automatisiert werden können.

Die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens besteht neben Energie-, Arbeitskraft- und Zeiteinsparung darin, dass

- die zu verschweisenden Flächen meist nicht vorbereitet werden müssen
- ungleiche Querschnitte und Werkstoffe verschweisbar sind
- Bearbeitungszugaben beträchtlich vermindert werden können
- eine Nachbearbeitung oft gänzlich entfallen kann.

Eine umfangreiche Aufstellung der charakteristischen Eigenschaften des Verfahrens stellt Tabelle 3 dar. Es gibt eine Reihe von Schweißaufgaben, die das Reibschweißen von den bisherigen Methoden mit Erfolg übernehmen kann. Eine weitere Gruppe der Anwendungen wird durch Änderungen und Neukonstruktionen ins Leben gerufen, um diese Methode verwenden zu können, Bild 12.

Zusammenfassung

Das bereits im Jahre 1891 [5] erstmals erwähnte und vor 10 Jahren in der UdSSR wieder aufgegriffene Verfahren [6, 7, 10, 15] der Nutbarmachung der durch Reibung erzeugten Wärme zum Zwecke der Verbindung rotationssymmetrischer Teile wird beschrieben. Die Merkmale, Besonderheiten und Vorteile dieser Schweißmethode werden erörtert und die konstruktiven Eigenarten der dazu geeigneten Maschinen beschrieben. Nach langer Entwicklungsarbeit, während der viele neuartige maschinenbauliche Probleme gelöst werden mussten, sind nun die ersten Hochleistungs-Produktionsmaschinen in Betrieb genommen worden.

Im zweiten Abschnitt der neueren Reibschweiss-Entwicklung tragen Maschinenbauer, Produktionsingenieure und Konstrukteure die weitere Einführung voran; sie bauen leistungsfähigere Maschinen zum Schweißen vorhandener und neukonstruierter Teile.

Adresse des Verfassers: Dipl.-Ing. *Dezsö Varga*, Projekt-Ingenieur der Firma Keller & Knappich GmbH, D-8900 Augsburg.

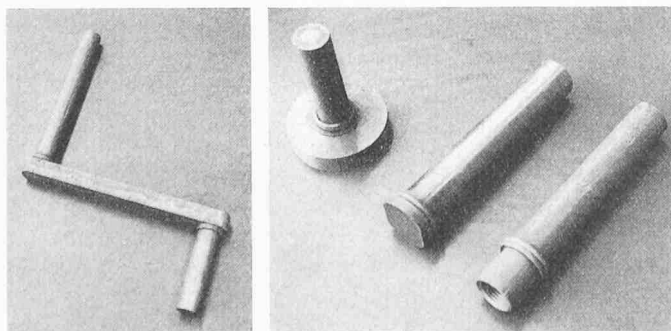
Literaturverzeichnis

- [1] *Bowden, F. P. und Tabor, R.*: Reibung und Schmierung fester Körper. Springer-Verlag, Berlin 1959.
- [2] *Eichhorn, F. und Schaefer, R.*: Reibschweissverbindungen an Stählen. «Technische Mitteilungen», Januar 1969.
- [3] *Gegenbach, O.*: Reibschweissen-Verfahren und Anwendungsmöglichkeiten. «Schweißen und Schneiden», 1967, Heft 7.
- [4] *Hollander, M. B.*: Developments in Friction Welding. «Metals and Engineering», May, 1962.

Tabelle 3. Charakteristische Merkmale des Reibschweißens

Kein Vorbereiten der Reibflächen – für grobe wie für glatte geeignet
unterschiedliche Abmessungen und Formen verschweisbar
kräftige Spannzeuge ermöglichen Präzisionsschweißen
gehärtete Stahlbacken bewirken niedrigen Verschleiss und bleibende Genauigkeit
Kühlung der Backen äusserst selten erforderlich
Be- und Entladen aufwendig
Ladeeinrichtung keinerlei Wirkungen ausgesetzt
sekundenschnelles Schweißen verschiedener Werkstoffe
nur bei hochlegierten Werkstoffen längere Schweißzeit
Schmelztemperatur wird nicht erreicht
geringerer Längenverlust im festen Werkstoff
Schweißparameter sind einfache, mechanische Größen
Kontrolle sichert Wiederholbarkeit
kräftiger aber meist gleichmässiger Wulst entsteht
Wulst kann geformt und als Flansch verwendet werden
Verbindungszone besteht aus Schmiedegefüge
Lunker und Einschlüsse sind ausgeschlossen
Aufhärtung in der schmalen Schweißzone
niedriger Energiebedarf – normale Leitungen
Spindellagerung hoch belastet
ein Abbremsen der Drehbewegung oft notwendig
keine Spritzer, Gase; kein störendes Licht
vollkommene Mechanisierung leicht möglich
selbsttätige Güteüberwachung einfach zu verwirklichen
Automatisierung der Kontrolle bietet sich an

Bild 12. Verschiedene reibgeschweisste Werkstücke



- [5] Hollander, M. B.: Friction Welding: An «old Infant». «Tooling and Produktion», 1962, Heft 7/8.
- [6] Klopstock, H.: British Patent Nr. 572 789 vom 11. 9. 1942.
- [7] Richter, W.: DR-Patent Nr. 477 084 vom 31. 5. 1929.
- [8] Schaefer, R.: Reibschweissen von Metallen – Maschinen und Anwendungsbeispiele. «Industrie-Anzeiger», Schweiss- und Schneidtechnik. Verlag Girardet, Essen, 3. Febr. 1967.
- [9] Schaefer, R.: Schwungradschweissen – eine neue amerikanische Entwicklung. «Schweissen und Schneiden», 1967, Heft 2.
- [10] Tschudikov, A. J.: UdSSR-Patent Nr. 106 207 vom 16. 2. 1956.

- [11] Tylecote, R. F.: The Solid Phase Welding of Metals. Ed. Arnold Publishers. London, 1968.
- [12] Varga, D.: Reibschweissen – Ein praktisches Verfahren mit Zukunft. «Der Praktiker» (DVS), Dezember 1967.
- [13] Vill, V. J.: Reibschweissen von Metallen. Deutscher Verlag für Schweisstechnik, Krefeld.
- [14] Voinov, V. P.: The Fatigue Strength of Friction Welded Joints. Avt. Svarka, 1967, Nr. 2 BWRA, Abington, England.
- [15] Welding Handbook: Welding, Cutting and Related Processes. American Welding Society, New York, 1964.

Rasterbauwerke für Tunnel

Von Erwin Beusch, dipl. Ing., Motor-Columbus AG, Baden

DK 625.712.35:628.92

1. Einleitung

Im Rahmen des schweizerischen Nationalstrassennetzes wurden in den letzten Jahren zahlreiche Tunnel fertiggestellt, andere sind zurzeit im Bau oder werden projektiert. Da es sich vorwiegend um kreuzungsfreie und teilweise richtungstrennte Hochleistungsstrassen handelt, werden sie für eine hohe Ausbaugeschwindigkeit angelegt. Ein in einem zügig trassierten Strassenzug liegender Tunnel kann die mögliche Kapazität der Strasse vermindern oder sogar eine Verkehrsgefährdung hervorrufen, wenn es nicht gelingt, die im Tunnel herrschenden Sichtverhältnisse denjenigen auf der freien Strecke anzupassen. Damit fällt der Tunnelbeleuchtung eine wichtige Rolle und dem projektierenden Bauingenieur und dem ihm zur Seite stehenden Beleuchtungsfachmann eine verantwortungsvolle Aufgabe zu.

Während eine normale Strassenbeleuchtung ihre Hauptfunktionen in der Nacht erfüllen muss, sind für die Anforderungen an die Beleuchtung eines Strassentunnels die Tageslichtverhältnisse massgebend. Die grössten Probleme stellen sich bei der Tunnel-einfahrt, wo der Übergang vom hohen Leuchtdichtepegel im Freien auf den viel tieferen im Tunnel bewerkstelligt werden muss. Es ist aus technischen, vor allem aber aus wirtschaftlichen Gründen ausgeschlossen, in der Einfahrzone Beleuchtungsverhältnisse zu schaffen, welche denjenigen im Freien entsprechen. Die Erfahrung mit einigen neuen Anlagen, welche dem heutigen Stand der Kenntnisse entsprechend gebaut wurden, zeigen auch, dass diese Forderung nicht sinnvoll wäre.

2. Physiologische und optische Grundlagen

Wenn sich ein Fahrzeuglenker einem unbeleuchteten oder schwach beleuchteten Tunnel nähert, wird er die Tunnelöffnung als schwarzes Loch empfinden, in welchem er keine Einzelheiten mehr unterscheiden kann. Diese Erscheinung, der sogenannte «Schwarzloch-Effekt», ist jedem Automobilisten bekannt. Aus Gründen der Verkehrssicherheit muss aber unbedingt gefordert werden, dass der Lenker mögliche Hindernisse im Tunnelinnern erkennen kann, und zwar auf eine Distanz, welche mindestens dem Anhalteweg entspricht.

Diese Sichtprobleme werden hauptsächlich durch zwei Eigenschaften des menschlichen Auges hervorgerufen, welche in eingehenden Versuchen von de Boer [1], Schreuder [2] sowie Mäder und Fuchs [3] näher bestimmt worden sind. Schreuder hat die verschiedenen Ergebnisse dieser Versuche verglichen [4] und festgestellt, dass trotz erheblichen Unterschieden in den Untersuchungsmethoden eine weitgehende Übereinstimmung besteht. Im folgenden werden die beiden Phänomene kurz erwähnt, ohne auf die Ergebnisse der vorher genannten Untersuchungen einzugehen. Näheres kann der Literatur entnommen werden.

2.1 Induktion

Dies ist ein Problem des Kontrastsehens, d. h. der Wahrnehmung eines Leuchtdichte-Unterschiedes zwischen einem Gegenstand und dessen Umgebung oder dessen Hintergrund. Das menschliche Auge kann in einem dunkeln Teil des Gesichtsfeldes keine Einzelheiten wahrnehmen, solange die Empfindlichkeit des Auges auf die hohe Leuchtdichte des Umfeldes eingestellt ist. Dieser Fall ist bei der Tunneleinfahrt vorhanden, und unter bestimmten Umständen – ungünstige topographische Gegebenheiten, starker Lichteinfall an einem hellen Sommertag – kann auch ein gut beleuchteter Tunneleingang als dunkles Loch empfunden werden.

2.2 Adaptation

Darunter versteht man die Anpassung der Empfindlichkeit des Auges an einen sich verändernden Leuchtdichtepegel. Das menschliche Sehorgan braucht für die Adaptation an eine andere Leuchtdichte eine gewisse Zeit, und zwar für den Übergang hell-dunkel bedeutend mehr als für den umgekehrten Vorgang.

3. Beleuchtungstechnische Grundlagen

Verschiedene Autoren haben die Ergebnisse der vorher erwähnten Untersuchungen ausgewertet und praktische Empfehlungen für die Planung einer guten Tunnelbeleuchtung ausgearbeitet. In der Schweiz hat sich die Schweizerische Beleuchtungs-Kommission (SBK) dieser Aufgabe angenommen und im Rahmen der Fachgruppe 5 (öffentliche Beleuchtung) dieses aktuelle Problem behandelt. Mitte dieses Jahres wurden die diesbezüglichen Leitsätze [5] veröffentlicht. Darin werden fünf beleuchtungstechnische Zonen unterschieden, welche wie folgt beschrieben werden:

I Anfahrzone: Zone vor dem Tunnelportal, in der durch eine zweckmässige Gestaltung der Umgebung die Leuchtdichten herabgesetzt werden, um das Auge auf das Sehen im Tunnel vorzubereiten. Ihre Länge beträgt 100 bis 200 m.

II Einfahrzone: Zone unmittelbar hinter dem Tunnelportal, in der die Leuchtdichte so gross sein muss, dass der Fahrzeugführer noch vor dem Erreichen des Portals, also bei an die Anfahrzone adaptiertem Auge, Hindernisse erkennen kann. Ihre Länge ist gleich der Anhaltstrecke und hängt hauptsächlich ab von der zugelassenen Höchstgeschwindigkeit, von der Neigung der Fahrbahn und von der Beschaffenheit des Strassenbelages.

III Übergangszone: Zone, die an die Einfahrzone anschliesst und in der die Leuchtdichte entsprechend der Fahrgeschwindigkeit und der fortschreitenden Adaptation allmählich abnehmen darf, ohne dass die Sehbedingungen ungenügend werden.

IV Mittelzone: Zone mit gleichbleibender, niedriger Leuchtdichte im Tunnelinnern.

V Ausfahrzone: Zone, in der sich das Auge des Fahrzeugführers wieder auf die Aussenleuchtdichte adaptiert.

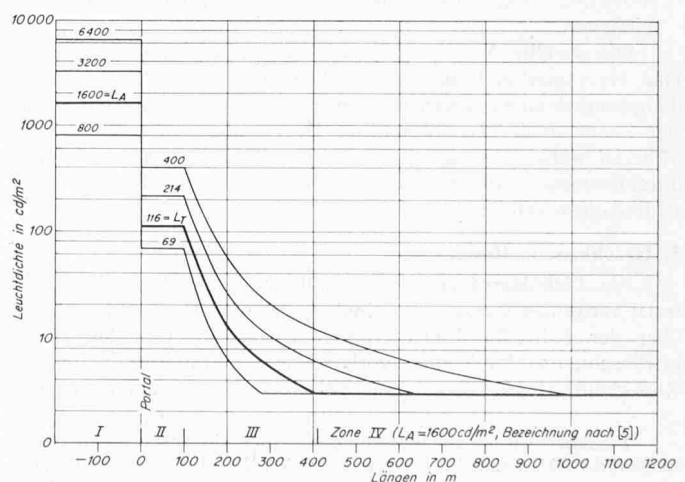


Bild 1. Leuchtdichte-Verlauf für Höchstgeschwindigkeit 80 km/h. Adaptationspunkt rund 25 m vor dem Portal. Anhaltstrecke nach SNV 40 130 a. L_A = Aussenleuchtdichte, L_T = Leuchtdichte im Tunnel