

Grundsatzuntersuchungen zum Orbitalreibschweißen des unlegierten Baustahls S355J2.

Prof. Dr.-Ing. Irmhild Martinek, Otto-von-Guericke Universität Magdeburg
Prof. Dr.-Ing. Harald Goldau, Hochschule Magdeburg-Stendal
Dipl.-Ing.(FH) Frank Trommer, Daimler AG Stuttgart

Kurzfassung

Die anhaltenden Diskussionen um Kosten- und Gewichtsreduzierung sowie Steigerung der Funktion und Qualität führen zu einer zunehmenden Nachfrage an Materialmischbauweisen in der Industrie. Mit dem Reibschweißen lassen sich eine Vielzahl von Werkstoffen und Werkstoffkombinationen verschweißen. Das Standardverfahren ist das Rotationsreibschweißen, mit dem aufgrund seiner Prozesscharakteristik hauptsächlich rotationssymmetrische Voll- und Hohlprofile geschweißt werden. Für Bauteile mit anderen Fügequerschnitten kommt neben dem Linearreibschweißen auch das Orbitalreibschweißen in Frage. Das Orbitalreibschweißen ist in der Kunststoffindustrie schon seit einiger Zeit Stand der Technik und soll nun auch für metallische Anwendungen zum Einsatz kommen. In der vorliegenden Arbeit werden auf erste Ergebnisse zu Grundsatzuntersuchungen des unlegierten Baustahls S355J2 eingegangen.

1 Einführung in die Reibschweißtechnik

Das Reibschweißen (RS) gehört zur Gruppe der Pressschweißverfahren. Durch die Relativbewegung der Bauteile und durch Druck wird die für die Schweißung erforderliche Energie in Form von Wärme erzeugt. Diese Wärmeerzeugung führt im Vergleich zu den Schmelzschweißverfahren zu einer niedrigeren Füge­temperatur, die unterhalb der Schmelztemperatur der zu verbindenden Werkstoffe liegt. Dadurch können unerwünschte Gefügephasen minimiert oder vermieden werden. Dies hat zur Folge, dass sich mit dem RS auch eine Vielzahl von Werkstoffen und Werkstoffkombinationen fügen lassen, die nicht schmelzschweißgeeignet sind oder nur unter hohem Aufwand miteinander schmelzgeschweißt werden können. Neben der Möglichkeit zum Fügen dieser Werkstoffvielfalt zeichnet sich das RS auch durch die sehr gute Schweißqualität aus. Das Gefüge in unmittelbarer Nähe zur Reibschweißebene ist in der Regel sehr feinkörnig und weist bei sachgemäßer Prozessausführung eine hohe Festigkeit auf, die unter Umständen über der des Grundwerkstoffes liegt. Bekannt als robuster Produktionsprozess lässt sich das RS sehr gut automatisieren und eignet sich besonders für die Serien- bzw. Großserienfertigung. Ferner ist das RS sehr energieeffizient, da die Wärmeerzeugung direkt an der Fügeebene stattfindet und ohne große Transportprozesse und den damit verbundenen Verlusten auskommt. Außerdem sind keine Schweißzusatzstoffe erforderlich und Schutzgas wird nur bei Sonderanwendungen benötigt.

Nach DIN EN ISO 15620 [1] kann anhand der Relativbewegung in Rotations-, Linear- und Orbitalreibschweißen sowie RS mit Winkelschwingung unterschieden werden, wobei nur den ersten drei Verfahren industrielle Bedeutung zugemessen wird, siehe **Abbildung 1**.

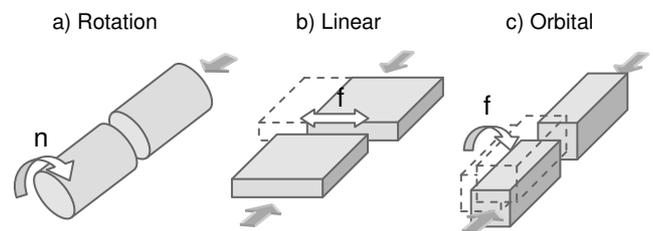


Abbildung 1: Reibschweißverfahren: Rotations-, Linear- und Orbitalreibschweißen

Das Rotationsreibschweißen (RRS) nimmt die Stellung des „Standardverfahrens“ ein und kann in seiner Ausführung noch in einige weitere Verfahrensvarianten untergliedert werden.[2] Die Relativbewegung beim RRS wird realisiert, indem (in den meisten Fällen) ein Füge­teil in einer Spindel rotiert, während das andere Füge­teil drehfest eingespannt ist. Für den RS-Prozess müssen beide Teile dann unter Axialdruck zusammengebracht werden. Eine große Einschränkung beim RRS ist die Geometrieabhängigkeit der Füge­teile. Dies bedeutet, dass mindestens das spindelseitig eingespannte Bauteil Rotationssymmetrie aufweisen muss. Dementsprechend eignen sich vor allem kreisrunde Voll- und Hohlprofile. Verfügt die Reibschweißmaschine über ein drehwinkelgenaues Bremssystem können unter Umständen auch Bauteile mit etwas von der Rotationssymmetrie abweichenden Querschnitten (Vielkantprofile) reibgeschweißt werden. Für die Erweiterung auf Bauteile mit nichtrotationssymmetrischem Querschnitt sind Reibschweißverfahren mit veränderter Relativbewegung entwickelt worden.

Beim Linearreibschweißen (LRS) erfolgt die Relativbewegung als geradlinige Schwingbewegung, welche über die Prozessparameter Schwingfrequenz und Schwingweite definiert wird. Die Relativgeschwindigkeit ist nach Betrag und Richtung auf der gesamten

Fläche gleich, sie ist allerdings zeitlich veränderlich und lässt sich annähernd als Sinuskurve darstellen. Bei jedem Schwinghub findet zweimal eine Richtungsänderung um 180° statt. Dadurch geht in den Umkehrpunkten die Geschwindigkeit auf null zurück, während in der Mittellage die Maximalgeschwindigkeit erreicht wird.[3] Aus diesem Grund ergeben sich im Gegensatz zum RRS veränderte Bedingungen für Reibungs- und Plastifizierungsvorgänge durch einen ständigen Wechsel von Haft- und Gleitreibung. Dadurch werden Linearreibschweißmaschinen auch anders belastet, so dass sich diese deutlich von Rotationsreibschweißmaschinen unterscheiden. Die Schwingungsaufbringung erfolgt durch hydraulische, mechanische bzw. elektromagnetische Antriebe mit Frequenzen von 40Hz bis etwa 250 Hz und Schwingweiten von bis zu 6mm.[4] Das LRS wurde zuerst auf Kunststoffe angewendet und ist dort unter dem Namen Vibrationsschweißen bekannt.[5] Erste Untersuchungen zum Linearreibschweißen von Metallen wurden schon in den frühen 80iger Jahren in England durchgeführt, jedoch hat das LRS von Metallen nicht den wirtschaftlichen Stellenwert wie das RRS erreicht. Ein Einsatzgebiet ist die Fertigung und Reparatur von Schaufelrädern, den so genannten Blinks.[6]

Eine Erweiterung zum LRS stellt das zweidimensionale Orbitalreibschweißen (ORS) dar, das ohne eine Schweißvorzugsrichtung auskommt. Im Gegensatz zum LRS wird beim ORS eine elliptische oder kreisförmige Relativbewegung in der Ebene ausgeführt, ohne dass es zu einer Verdrehung der Bauteile um deren Längsachse kommt.[7] Je nach Aufbau der Reibschweißmaschine wird nur ein Füge teil beziehungsweise werden beide Füge teile angetrieben. Bei Einkopfmaschinen beschreibt ein Werkstück eine Kreisbewegung mit dem Schwingkreisdurchmesser D_S und der Schwingfrequenz f , während das andere Werkstück stationär bleibt. Analog zu den anderen Reibschweißverfahren werden die Teile unter gleichzeitig wirkendem Axialdruck zusammengebracht. Durch diesen Verfahrensablauf ergeben sich die drei wesentlichen Vorteile des ORS, die zum Teil aber bisher nur von theoretischer Natur sind. Der erste wesentliche Vorteil des ORS ist die Möglichkeit Bauteile mit relativ beliebigem Fügequerschnitt reibzuschweißen. Zweitens: Der spezielle Bewegungsablauf führt dazu, dass jeder Punkt in der Reibebene zu jeder Zeit die gleiche Relativgeschwindigkeit besitzt. Es erfolgt ein nahezu gleichmäßiger Energieeintrag, dadurch sind auf der gesamten Fügeebene annähernd gleiche Phasenzustände zu finden. Diese Homogenisierung des Fügequerschnitts erfordert vergleichsweise geringe spezifische Reibkräfte.[8] Der dritte Vorteil des ORS gegenüber dem RRS ist, dass gleichzeitig mehrere Bauteile oder verschiedene parallele Stellen an einem Bauteil reibgeschweißt werden können. Jedoch sind bis heute keine derartigen Anwendungen bekannt, da die Realisierung aufgrund der vorhandenen Bauteiltoleranzen sehr schwierig ist. Die bisher

gemachten Erfahrungen mit dem ORS kommen vor allem aus der Kunststoffindustrie [9], ein weiträumiger Einsatz für Metallverbindungen ist jedoch noch nicht zu finden. Ein Hauptgrund dafür ist die bisher eingeschränkte Maschinenteknik, die auf geringe Fügequerschnitte begrenzt ist und somit technisch relevante Aufgabenstellungen nur bedingt möglich sind. Die auftretenden Kräfte sind beim ORS von Metallen um ein Vielfaches größer als bei Kunststoffen, weshalb die Maschinen deutlich steifer ausfallen müssen. Metalle sind im Gegensatz zu den Kunststoffen gute Wärmeleiter. Um die hohe Wärmeableitung bei den metallischen Werkstoffen zu kompensieren und die notwendige Schweißenergie erzielen zu können, muss mehr Wärmeleistung aufgebracht werden. Der Schwingantrieb der ORS-Maschine erfordert deshalb eine Auslegung mit höherer Leistung. Neben diesen technischen Aspekten kommt hinzu, dass es für das ORS bisher nur wenige wissenschaftliche Untersuchungen gibt. Die zwei wesentlichen Forschungsprojekte wurden von [8] und [10] durchgeführt.

2 Aufgaben und Untersuchungsziele

Es hat sich gezeigt, dass es vor allem beim ORS von metallischen Werkstoffen noch Erkenntnislücken gibt. Die vorliegende Arbeit ist ein Bestandteil einer wissenschaftlichen Untersuchung, die zum Ziel hat, einige der Unvollständigkeiten zum ORS zu schließen. Dabei sollen die Untersuchungsergebnisse nicht nur zur Ergänzung des Prozesswissens beitragen. Es wird angestrebt, entsprechende Erkenntnisse direkt an den Maschinenhersteller zu übermitteln, um die Entwicklung der ORS-Maschinenteknik zu forcieren. Erste umfangreiche Untersuchungen werden an einfachen Probekörpern aus dem unlegierten Baustahl S355J2 durchgeführt. Die wesentlichen Untersuchungsschwerpunkte werden wie folgt definiert:

1. Theoretische Analyse des Prozessablaufes
2. Realisierung eines geeigneten Versuchs- und Messaufbaus zur Erfassung wichtiger Prozessgrößen während des ORS-Prozesses
3. Aufzeigen geeigneter Prozessparameter zum Orbitalreibschweißen von S355J2
4. Nachweis des homogenen Energieeintrages

3 Theoretische Betrachtungen

Die ORS-Versuche werden auf einer Maschine mit einem angetriebenen Schwingkopf durchgeführt. Aus diesem Grund sind die nachfolgenden Aussagen und Gleichungen auf diesem Maschinentyp bezogen, für Doppelkopfmaschinen ergeben sich jedoch ähnliche Bedingungen. Wie bereits erwähnt, beschreibt bei einer Einkopfmaschine ein Werkstück eine Kreisbewegung mit dem Schwingkreisdurchmesser D_S und der Schwingfrequenz f . Damit lässt sich die Reib- bzw. Relativgeschwindigkeit v_{Rel} berechnen zu:

$$v_{Rel} = \pi \cdot D_S \cdot f \quad (1)$$

Im Laufe der Versuche wurde festgestellt, dass bei hohen Frequenzen ab $f > 100\text{Hz}$ aufgrund der Fliehkräftbelastung auf den Schwingkopf der tatsächliche Schwingkreisdurchmesser deutlich größer als der eingestellte Wert sein kann, siehe **Abbildung 2**. Zur Bestimmung der realen Relativgeschwindigkeit ist die Kenntnis aller Istwerte deshalb von großer Bedeutung.

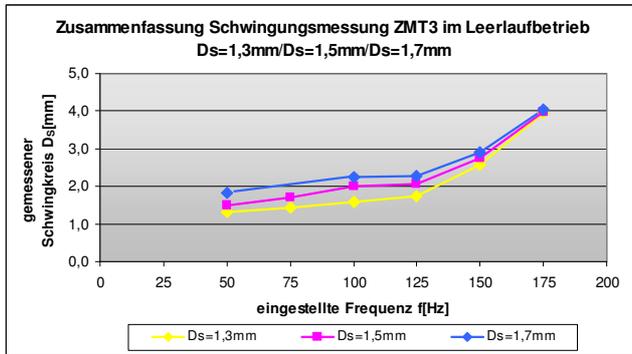


Abbildung 2: Messung Schwingkreisdurchmesser

Der Schwingkreisdurchmesser D_s hat des Weiteren einen großen Einfluss auf die sich ergebene Reibfläche und damit auf den Wärmeeintrag. Die verwendeten Schweißproben haben einen rechteckigen (quadratischen) Fügequerschnitt. In Anlehnung an [11] wird die rechteckige Fläche in fünf diskrete Bereiche eingeteilt, siehe **Abbildung 3**.

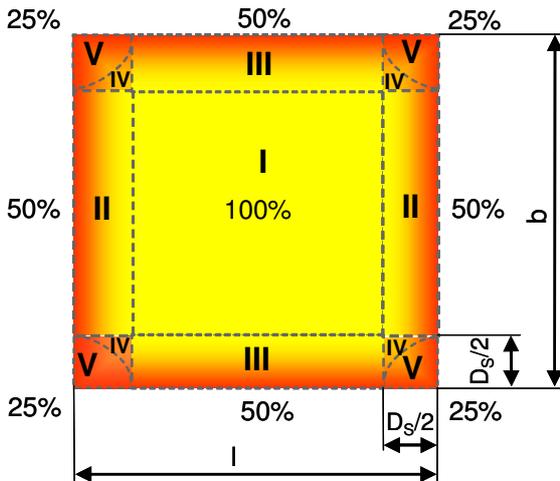


Abbildung 3: Wärmeentwicklung einer Rechteckfläche beim ORS

Verursacht durch die Orbitalbewegung der Fügeteile zueinander, werden die Bereiche I-V im Laufe des Prozesszyklusses unterschiedlich überdeckt, so dass einige Bereiche während der Reibphase frei liegen. Dies hat zur Folge, dass einerseits der Reibvorgang unterbrochen und infolgedessen auch die Wärmeentwicklung beeinträchtigt wird. Überdies ergibt sich an den freien Flächen auch eine verstärkte Abkühlung durch Konvektion und Strahlung, die sich ebenfalls negativ auf eine gleichmäßige Erwärmung auswirkt. Wird beim ORS von einem homogenen Energieeintrag gesprochen, dann ist dies bei genauerer Betrachtung nur im zentralen Bereich I (100% Überdeckung) der Fall. In Richtung der Bauteilränder wird die durch-

schnittliche Überdeckung immer kleiner, so dass diese an den Kanten nur noch 50% beträgt. Die Eckpunkte werden sogar nur zu 25% überdeckt und sind damit die am wenigsten erwärmten Bereiche. In der Praxis findet durch Wärmeleitung bei einer entsprechenden Reibzeit aber ein Temperatenausgleich statt. Die Aufteilung eines Rechteckprofils in die fünf Bereiche ist allerdings nur bei kleineren Querschnitten von Bedeutung. Hier können die Randbereiche II-V bei entsprechender Wahl des Schwingkreisdurchmessers schon relativ groß ausfallen, weshalb die Annahme eines homogenen Wärmeeintrages nicht mehr zutreffen würde. Bei großen Querschnitten (z.B. bei [10]) ist der zentrale Bereich I ebenfalls groß im Verhältnis zur Gesamtfläche, so dass ein einheitlicher Wärmeeintrag über die komplette Fügefläche angenommen werden kann. Die durchschnittlich überdeckte Reibfläche $A_{\bar{U}}$ lässt sich durch Betrachtung der Einzelflächen (I-V) berechnen mit:

$$\overline{A_U} \approx 0,08 \cdot D_s^2 - 0,32 \cdot (l + b) \cdot D_s + l \cdot b \quad (2)$$

In **Abbildung 4** ist die durchschnittliche Flächenüberdeckung in Abhängigkeit vom Schwingkreisdurchmesser und der Größe des Fügequerschnitts dargestellt. Die Fläche A_1 ist am kleinsten, während A_2 und A_3 die 4fache beziehungsweise 16fache Größe von A_1 aufweisen. Es ist ersichtlich, dass bei gleichem Schwingkreisdurchmesser (z.B. $D_s=1\text{mm}$) die durchschnittliche Überdeckungsfläche bei einer größeren Fügefläche auch größer wird. Dies liegt daran, dass die äußeren Flächen anteilmäßig immer kleiner werden. Bezogen auf die Gesamtfläche wird ein großer Fügequerschnitt somit homogener erwärmt als ein kleiner. Damit die frei liegenden Bereiche bei kleineren Querschnitten möglichst gering ausfallen, sollte der Schwingkreisdurchmesser nicht zu groß gewählt werden. Die Schwingfrequenz muss dann erhöht werden, um trotzdem die notwendige Relativgeschwindigkeit zu erhalten.

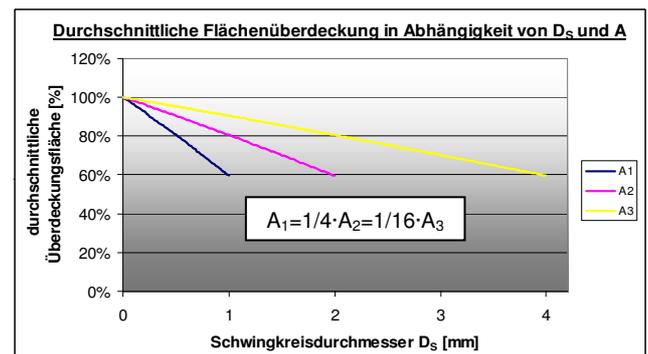


Abbildung 4: Durchschnittliche Überdeckung in Abhängigkeit von Flächengröße und Schwingkreisdurchmesser

Unter Verwendung von Gl. (2) kann dann der Anpressdruck während der Reibphase bestimmt werden:

$$p_{\text{Reib}} = \frac{F_{Ax}}{A_{\bar{U}}} = \frac{F_{Ax}}{0,08 \cdot D_s^2 - 0,32 \cdot (l + b) \cdot D_s + l \cdot b} \quad (3)$$

Hierbei entspricht F_{Ax} der aufgetragenen Axialkraft während der Reibphase.

4 Versuchsaufbau

Wie bereits erwähnt, bezieht sich der industrielle Einsatz für das ORS bisher nur auf den Kunststoffbereich, spezielle ORS-Maschinen zum Schweißen von metallischen Werkstoffen sind derzeit noch nicht verfügbar. Aufgrund dessen werden die praktischen ORS-Versuche auch auf einer modifizierten Kunststoffmaschine durchgeführt. Die Maschine kann Axialkräfte von maximal $F=15\text{kN}$ aufbringen, und der Schwingantrieb lässt sich mit Frequenzen bis zu $f=180\text{Hz}$ betreiben. Da in der Reibschweißmaschine keine Messtechnik integriert ist, werden die wichtigsten Prozessgrößen über einen externen Messaufbau erfasst. Während des ORS-Prozesses werden die Schwingung sowohl des bewegten als auch des feststehenden Werkstückes gemessen, die aufgetragene Axialkraft wird detektiert, und zusätzlich zeichnet ein Wegmesssystem den zurückgelegten Axialweg (Schweißverkürzung) auf. Daneben werden die Prozesstemperaturen mittels eines Thermografiesystems bestimmt. Die Messergebnisse werden über einen Datenrekorder zusammengeführt und per PC ausgewertet. In **Abbildung 5** ist die Schweißanlage ZMT3 und der verwendete Versuchs- und Messaufbau dargestellt.

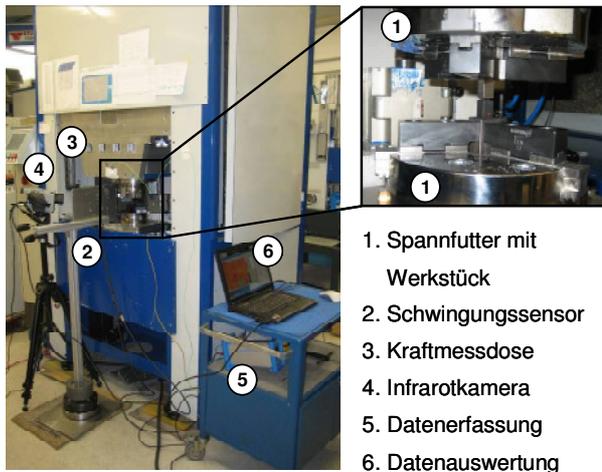


Abbildung 5: ORS-Maschine ZMT3 und verwendeter Versuchsaufbau

Vorversuche haben gezeigt, dass Proben aus unlegiertem Baustahl (S355J2) und einer Fügefläche von $A=100\text{mm}^2$ noch im Leistungs- und Steifigkeitsspektrum dieser Maschine liegen. Um die Verfahrensabgrenzung zum Rotationsreibschweißen aufzuzeigen, werden Vierkantproben mit einer jeweiligen Kantenlänge von $l=10\text{mm}$ verwendet, **siehe Abbildung 6**. Die Auskraglänge je Bauteil beträgt $l=15\text{mm}$, um genügend Platz für die Thermografiemessungen zu haben. Für diese Auskrägung wurden keine Nachteile bezüglich Steifigkeit oder unerwünschter Schwingungen beobachtet. Der Spannquerschnitt beträgt $20\text{mm} \times 20\text{mm}$.

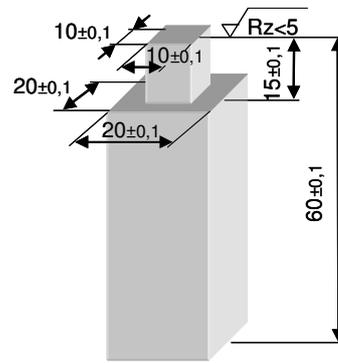


Abbildung 6: ORS-Schweißprobe (S355J2)

5 Versuchsplanung

Für das ORS gibt es eine Reihe von Parametern, die auf den Schweißprozess Einfluss haben. Zur Analyse und Beschreibung dieser Prozesseinflüsse sowie in nachgeschalteten Optimierungsphasen ist eine Durchführung von Experimenten unumgänglich. Die Methodik der statistischen Versuchsplanung (auch DOE = Design of Experiments) bildet ein wichtiges Werkzeug zur schnellen, zielgerichteten und kostengünstigen Entwicklung und Optimierung von Produkten oder Prozessen. Hierbei sollen mit wenigen Einzelexperimenten der Wirkzusammenhang (Effekt) zwischen den Einflussfaktoren und Zielgrößen möglichst genau ermittelt werden. Im Gegensatz zur konventionellen „one-factor-at-a-time“-Methode werden bei der statistischen Versuchsplanung mehrere Faktoren gleichzeitig verändert, wodurch weniger Einzelexperimente benötigt werden. Des Weiteren erlauben nach der statistischen Versuchsplanung durchgeführte Experimente eine Untersuchung der Haupteffekte sowie derer Wechselwirkungen. Diese können statistisch ausgewertet werden und liefern damit eine Aussage darüber, ob die untersuchten Faktoren einen signifikanten Einfluss auf das Ergebnis (=Zielgröße) haben.[12],[13]

Die statistische Versuchsplanung umfasst neben einer detaillierten Analyse der Ausgangssituation und Festlegung der Ziel- und Einflussgrößen auch die Aufstellung des eigentlichen Versuchsplans, die Durchführung dieses sowie eine ausführliche Auswertung und Ergebnisinterpretation. Es ist von grundlegender Bedeutung viel Fachwissen in die Untersuchungen einfließen zu lassen, um frühzeitig Irrwege auszuschließen und Fehlinterpretationen vorzubeugen. Dazu konnten erste Ergebnisse aus den Vorversuchen genutzt werden. In **Tabelle 1** sind die variablen Einflussfaktoren sowie die Zielgrößen dargestellt. Als variable Faktoren werden die Schwingfrequenz f , der Schwingkreisdurchmesser D_S , die Reibzeit t_R , sowie der Reib- und der Stauchdruck p_R bzw. p_{St} gewählt. Die jeweiligen Parameterwerte werden auf zwei Einstellstufen variiert. Bei den Parametern Reib- und Stauchdruck wird im Versuchsplan der einstellbare Maschinendruck in bar gewählt, da im Vorfeld der sich einstellende Schwingkreis nicht bekannt ist, welcher nach Gl. (3) die spezifische Kraft in N/mm^2 maßgeblich beeinflusst. Die Stauchzeit bleibt bei allen Versuchen konstant und

beträgt $t_{st}=20s$, um das Ausspannen der verschweißten Proben zu gewährleisten. Für die Versuchsauswertung werden zwei Untersuchungs- bzw. Zielgrößen, die Fügezonentemperatur und die maximale Zugkraft, herangezogen.

Tabelle 1: statistische Versuchsplanung S355J2: Zielgrößen und Faktoren

Einflussgröße	Wert	
	tief	hoch
Schwingfrequenz f [Hz]	160	180
Schwingkreis D_S [mm]	1,5	1,7
Reibdruck p_R [bar]	0,5	0,8
Reibzeit t_R [s]	1	3
Stauchdruck p_{st} [bar]	1,0	2,0
Zielgrößen		
Fügezonentemperatur $T_{Fü}$ [°C]		
Maximale Zugkraft F_{Zug} [N]		

Für die Grundsatzuntersuchungen wird ein teilfaktorierter 2^{5-1} -Plan mit einem Zentralpunkt verwendet, bei dem für jeden Faktor zwei Einstellstufen existieren (tief bzw. hoch). Zur vollständigen Realisierung dieses Plans müssen $2^{5-1}+1=17$ Versuche durchgeführt werden. Um eine bessere statistische Absicherung zu gewährleisten, wird jeder Versuch wiederholt, was insgesamt 34 Versuche bedeutet. Gegenüber dem vollfaktorierten Versuchsplan, bei dem 66 Schweißungen durchzuführen sind, können mit dem teilfaktorierten Versuchsplan nahezu die Hälfte der Versuche eingespart werden. **Abbildung 7** zeigt schematisch den Versuchsraum für solch einen teilfaktorierten Versuchsplan, jedoch mit drei statt der verwendeten fünf Faktoren.

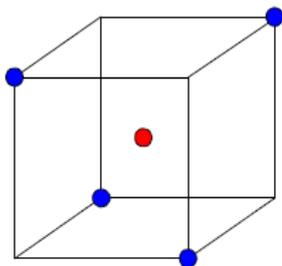


Abbildung 7: Teilfaktorierter Versuchsraum mit 3 Faktoren, Schema

Sowohl die Aufstellung als auch die Auswertung des Versuchsplans werden mit Hilfe der Software MINITAB Version 15 durchgeführt.[14]

6 Versuchspandurchführung und -auswertung

Der ORS-Prozess läuft bei allen Versuchen in ähnlicher Weise ab und wird hier am Beispiel des Versuchs V17 erläutert, der den Sternpunkt darstellt. Für die gesamten Schweißversuche wird das Reiben über Zeit gewählt. In **Abbildung 8** sind die dazugehörigen Kraft-, Weg- und Schwingungskurven dargestellt. Zuerst fährt der Vorschubschlitten aus der Grundstellung

zu einer definierten Startposition, bei der beide Werkstücke einen Abstand von etwa 2mm aufweisen. Während dieses Anfahrens wird über ein Signal des Wegmesssystems die komplette Messaufzeichnung gestartet. Beim Erreichen der Startposition lenkt der Schwingkopf um den halben Schwingkreisdurchmesser aus, und der Schwingantrieb schaltet sich ein. Es ist gut zu erkennen, dass der Schwingkreisdurchmesser bis zur eingestellten Soll-Frequenz von $f=170Hz$ auf einen mehr als doppelt so großen Wert der ursprünglichen Einstellung anwächst. Des Weiteren ist ersichtlich, dass auch der Vorschubkopf mit dem feststehenden Werkstück zum Schwingen angeregt wird. Der Vorschubkopf bleibt etwa $t=0,5s$ an der Startposition, um ein belastungsfreies Hochlaufen des Schwingantriebes auf Nennfrequenz zu gewährleisten. Nach dieser Verweilzeit fährt der Vorschubschlitten weiter, bis es schließlich zum Bauteilkontakt kommt und sich die Axialkraft aufbaut. Gleichzeitig wird die Schwingbewegung aufgrund des zusätzlichen Reibwiderstandes gedämpft, und der Schwingkreis nimmt ab. Nach 0,2-0,3s setzt die Plastifizierung des Werkstoffes ein, der Reibwiderstand wird kleiner, und es kommt zu einer erneuten Zunahme des Schwingkreisdurchmessers. Durch den andauernden Wärmeintrag entfestigt weiterer Werkstoff in unmittelbarer Nähe der Fügeebene, die Axialkraft kann nicht mehr aufgenommen werden, und plastisches Material wird nach außen verdrängt. Dieser fortlaufende Prozess führt zur Verkürzung der Bauteile und Ausbildung der Schweißwulst. Mit dem Ende der Reibphase wird die Schwingbewegung innerhalb von etwa 150ms auf null abgebremst, und der Schwingkopf wird schlagartig auf seine Ausgangsposition zurückgesetzt, so dass beide Werkstücke zueinander fluchten. Die Axialkraft wird auf Stauchkraftniveau erhöht, was zu einer kurzzeitigen Erhöhung der Verkürzungsgeschwindigkeit führt. Nachfolgendes Material wird jedoch nicht mehr erhitzt, so dass die Schubfestigkeit rasch ansteigt und die Bauteilverkürzung beendet wird. Die Stauchkraft wird einige Sekunden aufrechterhalten, damit die Verbindung ungehindert ablaufen kann.

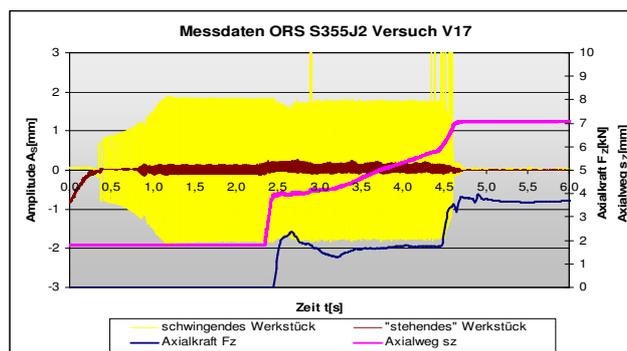


Abbildung 8: Prozesskurven

Nachfolgend zeigt **Abbildung 9** eine Auswahl von drei Schweißversuchen, in **Abbildung 10** sind die ermittelten Fügezonentemperaturen $T_{Fü}$ und die maximalen Zugkräfte F_{Zug} aufgeführt. Bei der Parameterkombination eingestellter Schwingkreis $D_S=1,5mm$ und Schwingfrequenz $f=160Hz$ läuft der ORS-Prozess

nicht korrekt ab, die Füge­teile fressen und vollziehen keine gegenseitige Relativbewegung mehr (V04). Dadurch bleibt die Temperaturentwicklung in der Fügeebene auf einem sehr kleinen Niveau, der Werkstoff plastifiziert nur in einem geringen Maße, und die Probe verkürzt kaum. Die beiden anderen Versuche (V10, V17) laufen ohne Auftreten von Fresserscheinungen ab, es werden Fügezonentemperaturen von etwa $T_{FÜ}=1100^{\circ}\text{C}$ erreicht. Vergleicht man den Diagrammverlauf der Fügezonentemperaturen mit dem der maximalen Zugkräfte, so ist eine große Ähnlichkeit zwischen beiden Schaubildern festzustellen. Die maximalen Zugkräfte der Versuche, bei denen die Füge­teile gefressen haben, liegen mit $F_{Zug}=15.000\text{--}20.000\text{N}$ deutlich unter Festigkeit des Grundwerkstoffes, der bei etwa $F_{Zug}=70.000\text{N}$ versagt. Bei den Versuchen V10 und V17 bricht die Schweißprobe im Grundmaterial.



V04: $D_S=1,5\text{mm}$; $f=160\text{Hz}$; $t_R=3\text{s}$; $p_R=0,5\text{bar}$; $p_{St}=1,0\text{bar}$
V10: $D_S=1,7\text{mm}$; $f=180\text{Hz}$; $t_R=3\text{s}$; $p_R=0,8\text{bar}$; $p_{St}=2,0\text{bar}$
V17: $D_S=1,6\text{mm}$; $f=170\text{Hz}$; $t_R=2\text{s}$; $p_R=0,7\text{bar}$; $p_{St}=1,5\text{bar}$

Abbildung 9: Auswahl Schweißproben

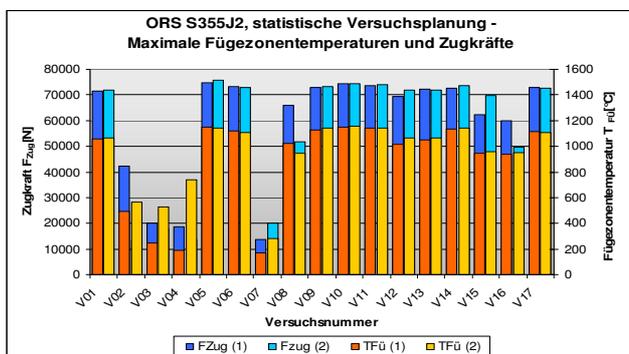


Abbildung 10: Zugkräfte und Fügezonentemperaturen

Die Zuordnung der Messergebnisse der Zielgrößen Fügezonentemperatur und Zugkraft zu der jeweiligen Parameterkombination ermöglicht eine Signifikanzanalyse der wichtigsten Einflussgrößen sowie deren gemeinsame Wechselwirkungen. Der „Effekt“ einer Einflussgröße beziehungsweise einer Wechselwirkung zweier oder mehrerer Einflussgrößen wird auf Grundlage statistischer Zusammenhänge bestimmt. Analog zur zufälligen Streuung der Versuchsergebnisse streuen auch die Effekte, da diese aus den Versuchsergebnissen berechnet werden. Durch den Vergleich der Größe des Effektes mit dessen Zufallsstreuung, das heißt, der Größe des Vertrauensbereiches, ist eine Aussage über die Signifikanz des Effektes möglich. Der Effekt wird als „signifikant“ bezeichnet, wenn er größer als die Breite seines Vertrauensbereiches ist. Falls er kleiner ist, bezeichnet man den Effekt als

„nicht signifikant“. Dies bedeutet jedoch nicht, dass der Effekt keinen Einfluss auf den Prozess hat, er könnte aber auch null sein!

In **Abbildung 11** ist das Pareto-Diagramm für die Zielgröße Zugkraft F_{Zug} dargestellt, das die Effekte der Einflussgrößen Schwingfrequenz f , Schwingkreisdurchmesser D_S , Reibzeit t_R , sowie Reib- und Stauchdruck p_R beziehungsweise p_{St} und deren Wechselwirkungen veranschaulicht. In dem Diagramm ist die Lage des 95%- (Punktlinie), 99%- (Strichlinie) und 99,9%-Vertrauensbereiches (durchgängige Linie) eingezeichnet. Je sicherer man sein möchte, dass ein Effekt signifikant ist, desto größer ist der Vertrauensbereich zu wählen. Jedoch verschiebt sich bei der Wahl eines größeren Vertrauensbereiches auch dessen Lage. Liegen die Effekte innerhalb des 95%-Vertrauensbereiches, so gibt es keinen Hinweis auf einen Unterschied zur zufälligen Streuung. Ein Einfluss der dazugehörigen Parameter und Wechselwirkungen auf den Prozess ist nicht zu erkennen. Effekte zwischen dem 95%- und 99%-Vertrauensbereich deuten auf ein indifferentes Ergebnis hin. Um Klarheit über den Einfluss des Parameters zu bekommen, sind möglichst mehr Daten heranzuziehen. Liegen die Effekte zwischen dem 99%- und dem 99,9%-Vertrauensbereich oder sind größer als der 99,9%-Vertrauensbereich, so sind die entsprechenden Einflussgrößen/Wechselwirkungen signifikant beziehungsweise hochsignifikant. Das Pareto-Diagramm macht deutlich, dass für die Zugkraft die Parameter Schwingfrequenz und Schwingkreisdurchmesser sowie deren Wechselwirkung ein hochsignifikanter Einfluss besteht. Des Weiteren ist auch ein Einfluss bezüglich des Reibdruckes sowie der Wechselwirkung Reibdruck-Stauchdruck und Reibdruck-Reibzeit zu erwarten. Für alle anderen Parameter und Wechselwirkungen gibt es keine Hinweise auf deren Prozesseinfluss, sie liegen innerhalb des 95%-Vertrauensbereiches.

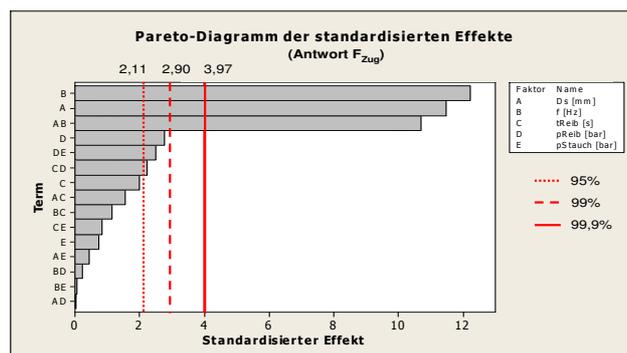


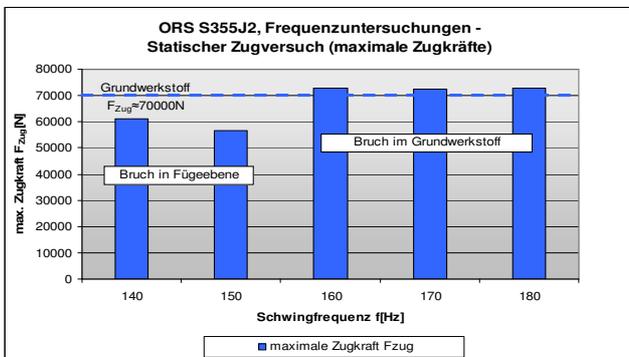
Abbildung 11: Pareto-Diagramm maximale Zugkräfte

7 Weiterführende Untersuchungen

Die Einstellparameter Schwingfrequenz, Schwingkreisdurchmesser und Reibdruck zeigen in der Auswertung des statistischen Versuchsplans die größte Signifikanz auf die maximale Zugkraft, weshalb diese ausgemachten Haupteinflussgrößen im Einzelnen noch näher untersucht werden. Dabei wird nur der zu

untersuchende Parameter variiert, während alle anderen Faktoren konstante Einstellwerte annehmen.

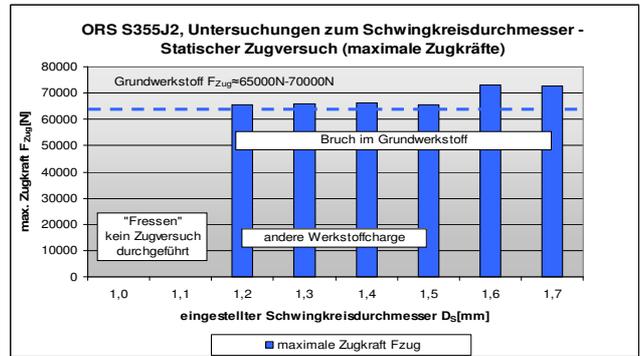
Bei der Untersuchung zur Schwingfrequenz kommt wieder der maschinenspezifische Punkt zum Tragen, dass aufgrund der hohen Fliehkräfte und der Maschinenelastizität sich deutlich größere Schwingkreisdurchmesser ergeben als der eingestellte Wert von $D_S=1,7\text{mm}$. Mit Erhöhung der Frequenz vergrößern sich auch der Schwingkreisdurchmesser und entsprechend auch die Relativgeschwindigkeit. Ab einer Schwingfrequenz von $f=150\text{Hz}$ und darunter reicht die sich ergebene Relativgeschwindigkeit für den unlegierten Baustahl S355J2 nicht mehr aus, um genügend Reibwärme zu produzieren. Die Werkstoffplastifizierung läuft zu kalt ab, und es kommt zum Fressen der Fügepartner. Demzufolge kann sich keine qualitativ hochwertige Schweißverbindung ausbilden, die Proben versagen im Zugversuch in der Fügeebene, siehe **Abbildung 12**. Bei den Versuchen mit $f=160\text{Hz}$ - 180Hz läuft der ORS-Prozess korrekt ab. Die Brüche liegen beim Zugversuch im Grundwerkstoff.



konstant: $D_{S\text{eingest.}}=1,7\text{mm}$; $t_R=2\text{s}$; $F_R=1700\text{N}$; $F_{St}=3800\text{N}$

Abbildung 12: Zugkraft-Schwingfrequenz-Diagramm

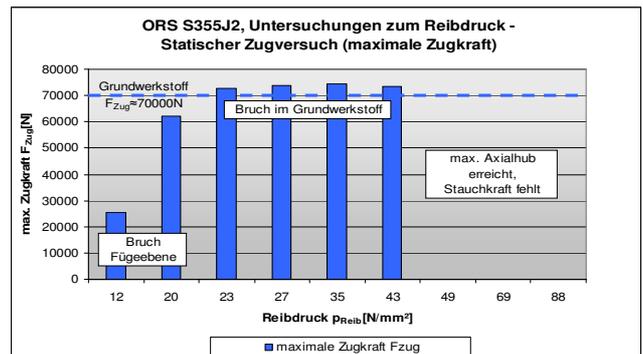
Analog zu den Frequenzuntersuchungen werden bei den Versuchen zur Charakterisierung des Schwingkreisdurchmessers alle übrigen Parameter konstant gehalten, während der Schwingkreisdurchmesser selber in einem Bereich von $D_S=1,0\dots1,7\text{mm}$ verändert wird. Auch bei diesen Versuchen ergibt sich wieder ein großer Unterschied zwischen Einstellung und gemessenem Schwingkreisdurchmesser, der für die Einstellungen $D_S=1,2\dots1,7\text{mm}$ allerdings einen konstanten Wert von $D_S\approx4,0\text{mm}$ annimmt. Dies ist damit zu begründen, dass die gleich große Schwingfrequenz ähnliche Fliehkräfte verursacht, die - aufgrund der vorhandenen Maschinenelastizität - zu annähernd gleichen Schwingkreisdurchmessern führen. Die Steifigkeit der verwendeten Reibschweißmaschine nimmt dementsprechend eine deutlich größere Rolle ein, als die Einstellung des Schwingkreisdurchmessers! Im Gegensatz zu den größeren Durchmessern sackt der Schwingkreisdurchmesser für die Einstellungen $D_S=1,0\text{mm}$ sowie $D_S=1,1\text{mm}$ in der Anlaufphase auf Werte von $D_S=0,2\text{mm}$ beziehungsweise $D_S=0,5\text{mm}$ ab. Damit bleibt die Relativgeschwindigkeit viel zu gering, und die Fügeteile fressen. In **Abbildung 13** sind die Ergebnisse des statischen Zugversuchs aufgezeigt.



konstant: $f=180\text{Hz}$; $t_R=2\text{s}$; $F_R=1700\text{N}$; $F_{St}=3800\text{N}$

Abbildung 13: Zugkraft-Schwingkreis-Diagramm

Der Reibdruck wird als weiterer Parameter neben der Schwingfrequenz und dem Schwingkreisdurchmesser untersucht. Es wird ein Einstellbereich auf der ORS-Maschine zwischen $p_R=0,3\dots2,5\text{bar}$ gewählt, was einem tatsächlichen Reibdruck von etwa $p_R=10\dots90\text{N/mm}^2$ entspricht. Alle weiteren Parameter werden konstant gehalten. Die Umrechnung auf den durchschnittlichen Reibdruck erfolgt mit Hilfe der Formel (3), in der die Probengeometrie, der tatsächliche Schwingkreisdurchmesser und die Axialkraft einfließen. Mit zunehmendem Reibdruck werden der Schwingkreisdurchmesser und damit auch die Relativgeschwindigkeit kleiner. Bei einem Druck von $p_R=10\text{N/mm}^2$ beträgt der Schwingkreisdurchmesser $D_S\approx4,0\text{mm}$ während der Reibphase, bei $p_R=90\text{N/mm}^2$ ist er mit $D_S\approx3,5\text{mm}$ immer noch mehr als doppelt so groß wie der Einstellwert. Die Schwingkreisreduzierung ist plausibel, da mit größer werdendem Reibdruck der Reibwiderstand in der Fügeebene zunimmt und damit der Fliehkraft entgegenwirkt. Somit wird auch die Auslenkung des Schwingkopfes kleiner. Die Ergebnisse des statischen Zugversuchs zeigt **Abbildung 14**.



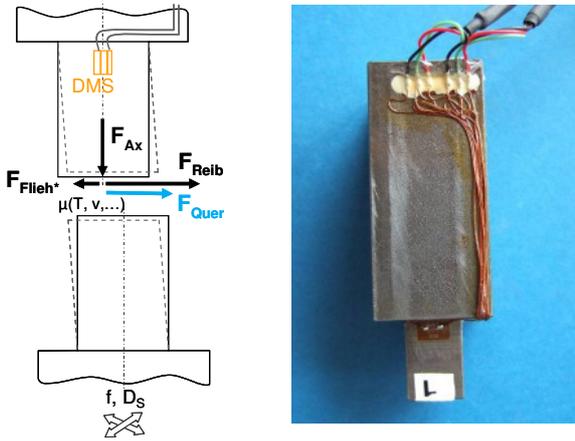
konstant: $f=180\text{Hz}$; $D_{S\text{eingest.}}=1,7\text{mm}$; $t_R=2\text{s}$; $F_{St}=3800\text{N}$

Abbildung 14: Zugkraft-Reibdruck-Diagramm

Bei einem Reibdruck von $p_R=12\text{N/mm}^2$ bzw. $p_R=20\text{N/mm}^2$ und der eingestellten Reibzeit von $t_R=2\text{s}$ ist die Probenverkürzung sehr gering und die Reibschweißverbindung versagt in der Fügeebene. Mit steigendem Druck nehmen die Verkürzung und damit auch die Wulstausbildung zu. Ab einem Reibdruck von etwa $p_R=23\text{N/mm}^2$ und einer Gesamtverkürzung von etwa $s_{\text{Ges}}=2\dots3\text{mm}$ wird Grundwerkstofffestigkeit erreicht. Für die letzten drei Versuche mit einem

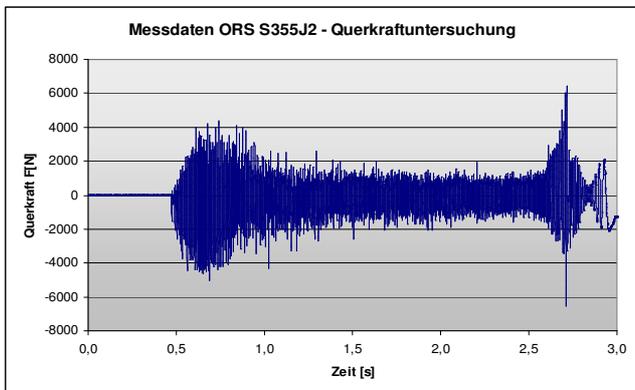
Reibdruck $p_R \geq 49 \text{ N/mm}^2$ wird der maximale Axialhub der Reibschweißmaschine erreicht. Dementsprechend bricht die Axialkraft ein, was sich negativ auf die Verbindungsqualität auswirkt. Die Proben sind im Diagramm deshalb nicht berücksichtigt, grundsätzlich können diese Parametereinstellungen aber gefahren werden.

Neben den detaillierten Parameteruntersuchungen werden für einen ausgewählten Parametersatz Querkraftuntersuchungen durchgeführt. Die Kenntnis der auftretenden Prozesskräfte ist von großem Interesse, da sie ein wichtiger Bestandteil zur Auslegung der Reibschweißmaschine ist. Zur Bestimmung der Querkräfte werden auf der Oberfläche einer Schweißprobe Dehnmessstreifen appliziert. Über die Durchbiegung bzw. Dehnung der Probe kann dann auf die Gesamtquerkraft geschlossen werden, die sich aus einer Reibkraftkomponente und einer Fliehkraftkomponente zusammensetzt. Die auftretenden Prozesskräfte (schematisch) und eine Schweißprobe mit DMS-Applizierung sind in **Abbildung 15** dargestellt. Des Weiteren zeigt **Abbildung 16** das Querkraft-Zeit-Diagramm einer ORS-Schweißung.



F_{Ax} : Axialkraft F_{Reib} : Reibkraft
 F_{Flieh} : Fliehkraftkomponente F_{Quer} : Querkraft

Abbildung 15: links: Kräfte beim ORS (schematisch); rechts: DMS-beklebte Probe



$D_S=1,6\text{mm}$; $f=170\text{Hz}$; $t_R=2\text{s}$; $F_R=1700\text{N}$; $F_{SI}=3800\text{N}$

Abbildung 16: Querkraft-Zeit-Diagramm

Das Diagramm zeigt den typischen Reibschweißverlauf: beim Anreiben erreicht die Querkraft ein erstes

Maximum mit Querkraften von bis zu $F_{Quer}=4000\text{N}$. Aufgrund des Temperaturanstieges und dem damit verbundenen Abfall des Reibwiderstandes in der Fügezone fällt die Querkraft wieder ab, bis die Wärmeentwicklung und Wärmeabfuhr ein Gleichgewichtszustand erreichen. Die Querkraft nimmt dann einen quasistatischen Verlauf ein mit Werten im Bereich von $F_{Quer}=1500\text{N}$. In der Brems- und Stauchphase wird ein zweites Maximum durchfahren bei dem Querkraften von über $F_{Quer}=6000\text{N}$ auftreten.

An einer weiteren Probe, die mit dem gleichen Parametersatz der Querkraftversuche geschweißt wird, findet eine Schliff- und Härteuntersuchung statt. Die Härteverlaufskurven liegen in der Nahtmitte sowie ca. 2mm und ca. 4mm außermittig. Den Schliff und die Härteverläufe zeigt **Abbildung 17**. Es liegen keine Fehlstellen oder Poren vor, und die maximalen Härteverläufe betragen 400HV.

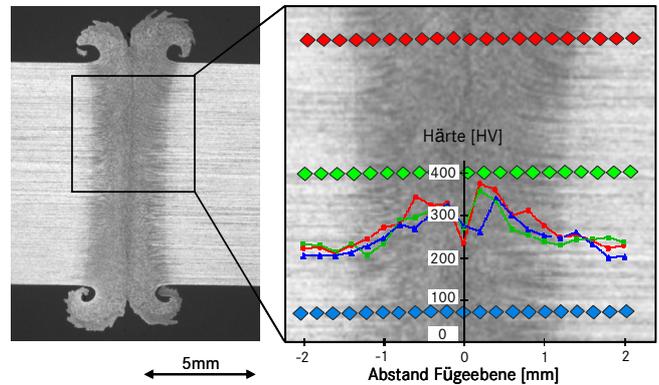
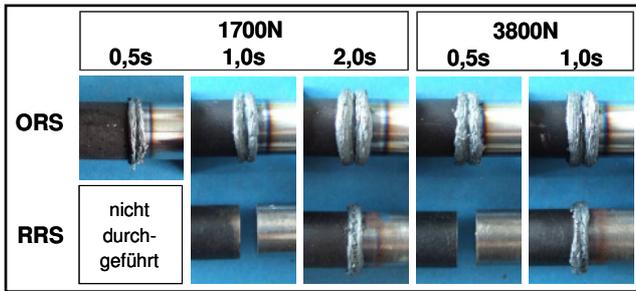


Abbildung 17: Schliff- und Härteuntersuchung

8 Verfahrenvergleich ORS und RRS

Zusätzlich zu den Grundsatzuntersuchungen wird ein Verfahrenvergleich zwischen Rotation- und Orbitalreibschweißen durchgeführt. Ziel der Untersuchungen ist zum einen die qualitative Gegenüberstellung des jeweiligen Energieeintrages während des Reibschweißprozesses und zum anderen das Aufzeigen der möglichen Prozesspotentiale des ORS gegenüber dem RRS aufgrund von Reibkraft- und Reibzeitreduzierung. Dazu werden die Messgrößen maximale Fügezonentemperatur und Gesamtbauteilverkürzung herangezogen. Ferner werden statische Festigkeitsuntersuchungen in Form der Zugprüfung durchgeführt. Die Schweißparameter können aufgrund der Verfahrensunterschiede nicht komplett vom ORS auf das RRS übertragen werden. Dennoch werden möglichst gleiche Prozesszeiten und -kräfte sowie ähnliche Relativgeschwindigkeiten eingestellt. Als Proben kommen runde Vollquerschnitte mit Durchmesser $d=12\text{mm}$ aus S355J2 zum Einsatz, siehe **Abbildung 18**. Dabei werden jeweils zwei unterschiedliche Reibkräfteeinstellungen ($F_{Reib}=1700\text{N}/1900\text{N}$) für unterschiedliche Reibzeiteinstellungen ($t_{Reib}=0,5\text{s}/1,0\text{s}/2,0\text{s}$) gefahren. In **Abbildung 19** sind für das geringere Reibkräfteniveau von $F_{Reib}=1700\text{N}$ die Messdaten für die maximalen Fügezonentemperaturen sowie die Gesamtverkürzung aufgezeigt.



konstant: $D_S=1,6\text{mm}$; $f=180\text{Hz}$; $n=3200\text{min}^{-1}$; $F_{St}=6800\text{N}$

Abbildung 18: ORS vs. RRS, Schweißwulstausbildung

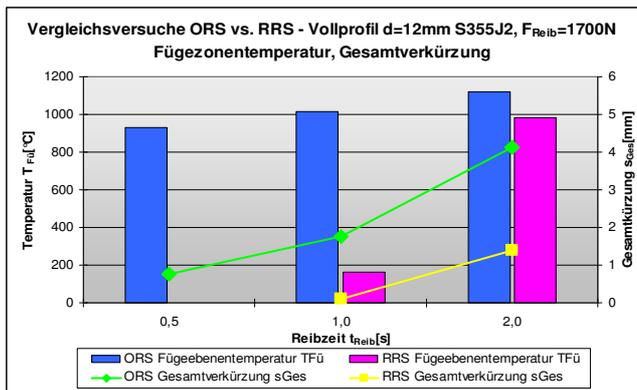


Abbildung 19: ORS vs. RRS, Fügezonentemperatur, Verkürzungen

Sowohl die Bilder zur Schweißwulstausbildung als auch das Diagramm zeigen einen deutlichen Unterschied zwischen den ORS- und RRS-geschweißten Proben auf. Für die ORS-Proben lassen sich mit jeder der gewählten Einstellungen Schweißverbindungen im Bereich der Grundwerkstofffestigkeit herstellen. Mit zunehmender Reibzeit und/oder steigender Reibkraft nehmen die Probenverkürzung und damit die Wulstausbildung sowie die Fügezonentemperaturen aufgrund des erhöhten Wärmeeintrages zu, was analog dazu auch für die RRS-Proben gilt. Jedoch wird bei den RRS-Versuchen mit niedrigem Kraftniveau ($F_{Reib}=1700\text{N}$) nur bei $t_{Reib}=2,0\text{s}$ eine Verbindung erzielt, bei $F_{Reib}=3800\text{N}$ kann die Reibzeit auf $t_{Reib}=1,0\text{s}$ reduziert werden, um einen Stoffverbund zwischen den Teilen zu erhalten. Der Vergleich der Relativgeschwindigkeiten zeigt, dass sich beim ORS eine Relativgeschwindigkeit von etwa $v_{Rel}\approx 2,0\text{...}2,1\text{m/s}$ über den gesamten Reibquerschnitt einstellt, während beim RRS nur am Probenumfang eine Relativgeschwindigkeit von $v_{Rel}\approx 2,0\text{m/s}$ vorherrscht, die zum Probenzentrum bis auf $v_{Rel}\approx 0\text{m/s}$ abfällt. Diese Ergebnisse unterstreichen damit den verbesserten Energieeintrag des ORS gegenüber dem RRS aufgrund gleichmäßiger Reibbedingungen und das Potential, auch rotationssymmetrische Bauteile ORS zu schweißen!

9 Zusammenfassung und Fazit

Das Orbitalreißschweißen stellt eine Verfahrensmodifikation zum Rotationsreißschweißen dar, welche unter anderem zum Ziel hat, die Bauteilpalette zu erweitern. Ferner werden für dieses Schweißverfahren aber auch prozessbezogene Vorteile gesehen, wie ein

gleichmäßigerer Energieeintrag und die Absenkung der spezifischen Reibkräfte. Dadurch ließen sich Taktzeiten reduzieren, und Wandstärken sensibler Bauteilstrukturen könnten kleiner dimensioniert werden. In der vorliegenden Arbeit werden Grundsatzuntersuchungen mit dem unlegierten Baustahl S355J2 durchgeführt. Zuerst findet eine theoretische Analyse des Prozessablaufes statt, um einen Überblick zum prozessspezifischen Bewegungs- und Geschwindigkeitsablauf und zur Wärmeentwicklung zu erhalten. Es zeigt sich, dass zum einen die Probenabmessungen Einfluss auf diese Größen nehmen und zum anderen die Wahl des Parameters Schwingkreisdurchmessers von Bedeutung ist. Ein großer Schwingkreisdurchmesser führt zu höheren Relativgeschwindigkeiten, gleichzeitig wird die durchschnittliche Überdeckungsfläche aber auch kleiner. In praktischen Experimenten werden die wichtigsten Prozessparameter bei artgleichen Verbindungen untersucht. Dazu wird die Methodik der statistischen Versuchsplanung angewendet, um bei möglichst geringem Versuchsumfang die wichtigsten Prozessparameter und deren Wechselwirkungen zu detektieren. Die ORS-Versuche werden auf einer modifizierten Kunststoffmaschine durchgeführt, und mit einem geeigneten Versuchs- und Messaufbau werden wichtige Prozessgrößen während des ORS-Prozesses aufgenommen.

Für den unlegierten Baustahl S355J2 stellt sich heraus, dass für eine qualitativ hochwertige ORS-Verbindung mit Festigkeiten im Bereich des Grundwerkstoffes eine Mindestreibenergie erforderlich ist. Eine Möglichkeit auf die zugeführte Energie zurück zu schließen, ist die Bewertung der Fügezonentemperatur. Werden Temperaturen von mindestens $T_{Fü}=1050\text{...}1100\text{°C}$ erreicht, so versagen die Proben beim statischen Zugversuch im Grundwerkstoff. Wird nicht genügend Reibwärme erzeugt und die Fügezonentemperatur bleibt deutlich unter $T_{Fü}=1000\text{°C}$, dann läuft der ORS-Prozess dagegen nicht korrekt ab, und es kann zu Fresserscheinungen zwischen beiden Fügeteilen kommen. Die Haupteinflussgröße auf die Wärmeentwicklung beim Stahl S355J2 ist die Relativgeschwindigkeit v_{Rel} , die ein Produkt aus der Schwingfrequenz f und dem Schwingkreisdurchmesser D_S ist. Um die beschriebene Mindesttemperatur in der Fügeebene zu erreichen, muss eine Relativgeschwindigkeit von $v_{Rel}\geq 1,5\text{m/s}$ aufgebracht werden. Ein weiterer Parameter mit Einfluss auf die Wärmeentwicklung und somit auf die Festigkeit der Verbindung ist der Reibdruck. In **Abbildung 20** ist ein geeignetes Prozessfenster zum ORS des Stahls S355J2 in Abhängigkeit von der Relativgeschwindigkeit und vom Reibdruck bei einer konstanten Reibzeit von $t_R=2\text{s}$ dargestellt. Es ist ersichtlich, dass bei entsprechender Relativgeschwindigkeit ein sehr großer Reibdruckbereich gefahren werden kann. Bei einem sehr kleinen Reibdruck im Bereich von $p_R=20\text{N/mm}^2$ muss die Relativgeschwindigkeit etwas niedriger gewählt werden, um die notwendige Reibungsintensität zu erzeugen. Eine hohe Relativgeschwindigkeit bewirkt ein starkes Gleiten, was eine verminderte Wärmeentwicklung zur Folge hat. Dem kann mit einem höheren

Reibdruck entgegen gewirkt werden, der auch dazu führt, dass die Verkürzungsgeschwindigkeit größer wird und ein vorgegebener Reibweg schneller erreicht wird. In Summe lässt sich feststellen:

1. kleiner Reibdruck - niedrigere Relativgeschwindigkeit - längere Reibzeiten
2. großer Reibdruck - höhere Relativgeschwindigkeit - kurze Reibzeiten

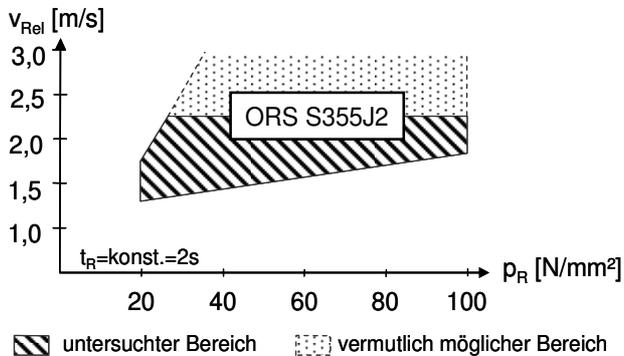


Abbildung 20: ORS-Prozessfenster für S355J2

Der gleichmäßigere Energieeintrag beim ORS gegenüber dem RRS wird anhand von Vergleichsversuchen mit runden Vollprofilen nachgewiesen. Bei reduzierten Reibkräften und Reibzeiten unter $t_R=1s$ können mit dem ORS qualitativ hochwertige Verbindungen hergestellt werden, während beim RRS die Wärmeentwicklung bei gleichen Schweißparametern sehr gering ist, so dass zum Teil überhaupt keine Verbindungsbildung erfolgt. Damit hat das ORS auch Potential für Massenteile mit rotationssymmetrischem Querschnitt, bei denen schon kleine Taktzeitreduzierungen zu größeren Kosteneinsparungen führen können. Des Weiteren bedeutet eine Verringerung der Reibkräfte auch eine Reduzierung sowohl der Bauteil- als auch Maschinenbelastung im Betrieb.

Während der Versuche hat sich gezeigt, dass die Maschinenteknik einen sehr starken Einfluss auf den ORS-Prozess hat. Vor allem der Vergleich von eingestelltem und tatsächlichem Schwingkreisdurchmesser weist eine sehr große Differenz auf. Die Ursache dafür ist die vorhandene Maschinenelastizität, so dass bei hohen Frequenzen und damit verbundenen hohen Fliehkräften der Schwingkopf elastisch ausgelenkt wird. Des Weiteren sind für zukünftige Maschinenkonzepte entsprechend leistungsstarke Antriebsmotoren vorzusehen, um die benötigten Relativgeschwindigkeiten zu erreichen und die notwendigen Momente bei größeren Querschnittsflächen aufzubringen. Ferner ist über geeignete Spannmittel nachzudenken. Ein Großteil der Lagerbelastung der Maschine kommt aus den Fliehkräften der bewegten Massen. Hier muss ein Kompromiss zwischen einer genügend steifen Einspannung bei gleichzeitig kleiner Masse der Spannvorrichtung gefunden werden.

Die Grundsatzuntersuchungen zum ORS für den unlegierten Baustahl S355J2 machen die Einsatzpotentiale deutlich. Dennoch muss das ORS seine Industrie-

tauglichkeit noch beweisen und bedarf deshalb noch weiterer Untersuchungen. Die vorgestellten Ergebnisse sind Teil einer wissenschaftlichen Arbeit, die sich bis Anfang 2011 mit diesem Thema beschäftigt und die Entwicklung des Orbitalreibschweißens noch weiter voran treiben soll.

10 Literatur

- [1] EN ISO 15620: Reibschweißen von metallischen Werkstoffen, 07/2000.
- [2] Appel, L.: Grundlagen der Reibschweißtechnik. 12. Erfahrungsaustausch Reibschweißen bei der SLV München, München, 03/2002.
- [3] Appel, L., Cramer, H.: Linear- und Orbitalreibschweißen, Fügeverfahren mit hohem Innovationspotential. 2. Kongress "Join-Tec" – Fügen mit minimaler Grundwerkstoffbeeinflussung –, S.18-25, 22./23.02.2005.
- [4] Nentwig, A.W.E., Appel, L.: Fügen nichtrotationssymmetrischer Teile durch Reibschweißen. Stahl, H.4, S.34-36, 1996.
- [5] Ehrenstein, G.W.: Handbuch Kunststoff-Verbindungstechnik. Hanser Fachbuchverlag, München, 2004.
- [6] Freeman, R.: Flying high – with the aerospace industry. TWI Bulletin, 2003.
- [7] Trommer, F. et al: Das Orbital- und Präzisionsreibschweißen als innovative Fügeverfahren für moderne Werkstoffe. DVS-Berichte Band 250, DVS Media GmbH, Düsseldorf, S.422-424, 2008.
- [8] N.N.: Untersuchungen zum Orbitalreibschweißen von metallischen Werkstoffen und Mischverbindungen an nichtrotationssymmetrischen Verbindungsquerschnitten. Forschungsvorhaben AiF-Nr. 14.962N, DVS-Nr. 5.038, Laufzeit 01/2007-12/2008.
- [9] Branson Ultrasonic Corp.: <http://www.bransoneurope.eu/products/orbital-vibration-welding>, 03/2010.
- [10] Maalekian, M.: Friction welding of high carbon steel in large cross-section. PhD thesis, Graz University of Technology, Austria, 2007.
- [11] Craine, R.E., Francis, A.: Frictional heat generated in the early stages of an orbital friction welding process. Wear, 114(1987), H.3, S. 355-365.
- [12] Kleppmann, W.: Taschenbuch Versuchsplanung, Produkte und Prozesse optimieren. 4., überarb. Aufl., Carl Hanser Verlag, München/Wien, 2006.
- [13] Petersen, H.: Grundlagen der statistischen Versuchsplanung, Band 2., ecomed Verlagsgesellschaft AG & Co. KG, Landsberg, 1991.
- [14] Minitab Ltd.: <http://www.minitab.com>, 21.09.2010.