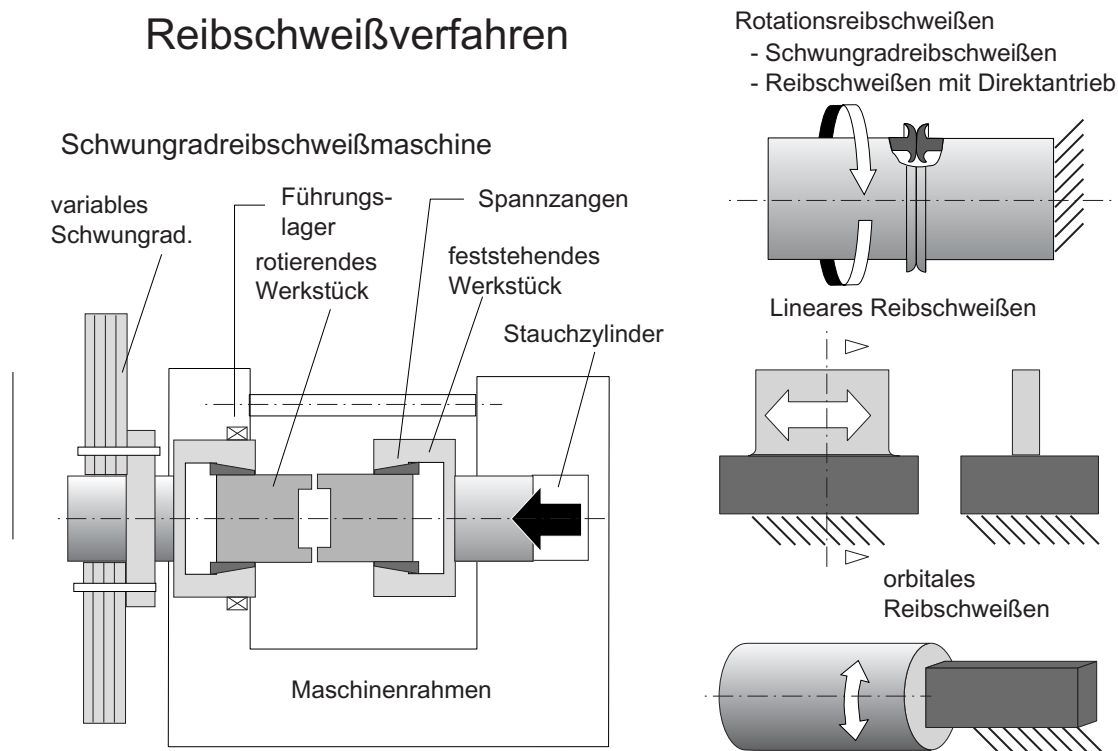


Schweißungen ohne flüssige Phase, Reibschweißen und Diffusionsschweißen

12.2.1.3.4 Reibschweißen

Reibschweißverfahren



Reibschweißen (engl. „**Friction Welding**“) dient sowohl dem Fügen metallischer Werkstoffe als auch von Kunststoffen und Metallen mit Keramiken. Dies kann mit unterschiedlichen Verfahren realisiert werden (Lit. 12.2.1.3-1). In allen Fällen werden die Schweißflächen unter Relativbewegung zusammengedrückt. Die dabei auftretende **Reibungswärme** dient dem Schweißvorgang. Der Reibvorgang erzeugt frische, reaktive Flächen, die sich ohne schmelzflüssige Phase im festen bzw. teigigen Zustand als eine Art Diffusionsschweißen verbinden. Der Abrieb führt zu einer exakten Anformung und spaltfreien Anlage der Schweißflächen. Bearbeitungsrauigkeiten werden vom Verschleiß abgetragen. Der innige Kontakt der Schweißflächen verhindert den Zutritt schädigender Umgebungsatmosphäre. Trotzdem kann bei reaktiven Werkstoffen wie Titanlegierungen und besonderen Verfahren (**lineares Reibschweißen**) ein **Schutzgasschleier** zwingend erforderlich werden. So lassen sich Gasaufnahme und damit spröde Phasen im Oberflächenbereich vermeiden. Die besonderen Merkmale des Schweißprozesses, insbesondere die Verbindung im festen bzw. teigigen Zustand ist Voraussetzung für das, bis auf die Kriechfestigkeit (Feinkornbildung durch den Verformungsprozess), grundwerkstoffnahe Festigkeitsverhalten. Weil der Werkstoff beim Reibschweißen gewöhnlich nicht aufgeschmolzen wird, ist **Heißrissbildung minimiert**. In besonderen Fällen, insbesondere bei merklichen Unterschieden in der Schmelztemperatur, wie beim Verschweißen von Ni-Gusslegierungen mit Stählen wie der Stahlwelle an ein Turbinenrad bei kleinen Maschinen und Turboladern (Bild 12.2.1.3.4-5), kann es jedoch (im Gussenteil) zur **Heißrissbildung** kommen.

Die hohen Reib- und Stauchkräfte (Bild 12.2.1.3-34) können bei nicht ausreichend steifen **Spannvorrichtungen** zu Formabweichungen wie Achsversatz, Abkippen und Stauchwegschwankungen führen, die mit ausreichend Aufmaß aufzufangen sind.

Der **Reibvorgang** regt 'empfindliche' Bauteile wie **Blinks** (Band 4, Bild 18.9-12.1, Bild 18.9-12.2 und Bild 18.9-13) zu **gefährlichen Schwingungen** an. Selbst wenn keine Ermüdungsrisse entstanden sind, kann die Schwingfestigkeit nicht zerstörungsfrei nachweisbar unzulässig abgefallen sein. Damit besteht im Betrieb ein erhöhtes Ausfallrisiko.

Schweißungen ohne flüssige Phase wie Reibschweißen (Lit. 12.2.1.3-28) und ganz besonders Diffusionsschweißen sind besonders von **Klebestellen** (engl. „**Kissing Bonds**“, Bild 12.2.1.3.5-1) bedroht. Diese, wenn auch seltenen, Fehler machen eine Qualitätssicherung schwer. Es handelt sich um nur teilweise materialschlüssig gebundene flächige Fehlstellen. Sie sind von seriengeeigneten ZfP-Verfahren wie Eindringprüfung, Ultraschall und Röntgen nicht oder nicht ausreichend sicher auffindbar. Somit bleibt für die Qualitätssicherung nur die „zweite Wahl“ einer genau **dokumentierten Prozessüberwachung** (Bild 12.1.2.3.4-5) und eine visuelle Inspektion. Merkmale zu denen in erster Linie der sich aufwerfende Schweißwulst gehört (Bild 12.2.1.3.1-3), zeigen in Form, Rissbildung, und Größe einen gleichbleibenden (stabilen) Schweißprozess an.

Bild 12.2.1.3.4-1 (Lit. 12.2.1.3-1, Lit. 12.2.1.3-57): *Reibschweißen wird in **Groß- und Kleinserien** auf vielen Gebieten des Maschinenbaus, insbesondere des **Leichtbaus** genutzt. In einigen Fällen lassen sich auch für das Schmelzschweißen kaum geeignete artgleiche Werkstoffe (z.B. Ni-Legierungen, Bild 12.2.1.3.1-11) verbinden (Bild 12.2.1.3.4-2). Festigkeit und Duktilität einer optimierten Reibschweißung übertreffen oft den Grundwerkstoff. Das gilt auch für viele mit einer Schmelzschweißung nicht verbindbare Werkstoffkombinationen.*

„**A**“ ***Verdichtertrottel** (Skizze links) eines großen Fantriebwerks (Skizze rechts). Das Teil wurde aus mehreren Einzelringen der hochfesten Ti-Legierung TiAl6V4 **schwungradreibgeschweißt**. Dies wurde notwendig, weil die Werkstoffqualität früherer aus zwei großen Teilen verschweißter Rotoren nicht ausreichte und es zu katastrophalen Schäden mit Bruchstückaustritt kam (Bild 11.2.2.1-6).*

„**B**“ ***Schaft eines Hüftgelenks** aus hochfesten Titanlegierungen. Trotz der **unterschiedlichen Querschnittsgeometrien im Nahtbereich** ist die Verbindung mit einer **Orbitalen Reibschweißung** möglich (Seite 12.2.1.3.4-1). Die Literatur erwähnt auch die Möglichkeit einer Verschweißung des Titanschafts mit einem*

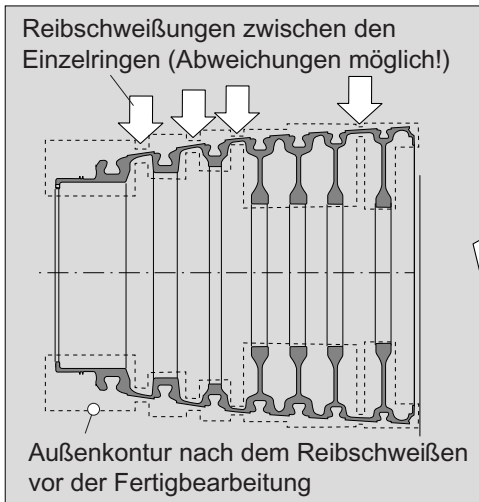
*Kobaltwerkstoff (Implantatwerkstoff CoCrMo). Das ist jedoch eher skeptisch zu sehen (Bild 12.2.1.3.4-2). Eine solche **Werkstoffkombination** dürfte notwendig sein, wenn die Gefahr besteht, dass die Ermüdungsfestigkeit der Titanlegierung bei oszillierender Reibbewegung (engl. fretting) der Gelenkkugel auf dem Konus zum Schwingbruch führt (Band 1 Bild 5.9.3-4). Das größte Problem bei der Schweißung einer **Ti-Legierung mit einem Fremdwerkstoff** besteht erfahrungsgemäß in der Bildung **spröder Phasen**. Sie entstehen während des Schweißvorgangs und/oder bei einer nachfolgenden, z.B. zum Schweißspannungsabbau notwendigen Wärmebehandlung. Erschwerend kann die vergleichsweise **schlechte Wärmeleitfähigkeit von Titanlegierungen und die unterschiedliche Wärmedehnung** zu vielen anderen Werkstoffen sein.*

„**C**“ ***Integrales Verdichterrad** (Blink, Lit. 12.2.1.3-1, Bild 12.2.1.3.4-7): Der Durchmesser beträgt ca. 80 cm. Werkstoff ist eine hochfeste Titanlegierung (TiAl6V4). Die Schaufelblätter sind auf Endkontur vorgefertigt. Als separate Präzisions Schmiedestücke lässt sich z.B. die **Orientierung und Ausbildung des Ge-***

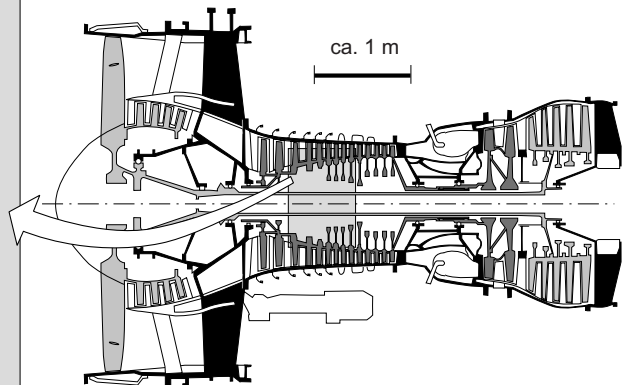
Fortsetzung auf Seite 12.2.1.3.4-4

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden Reibschweißen

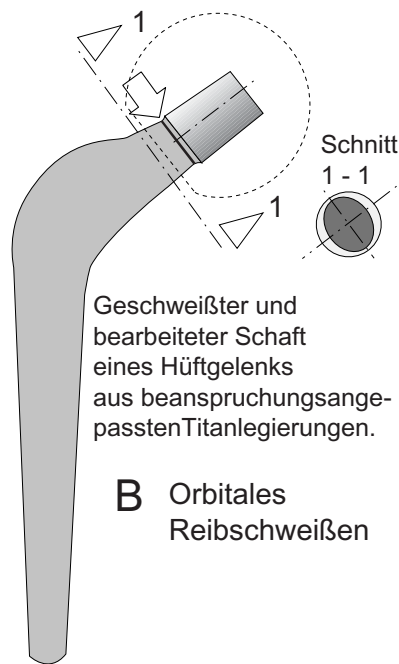
Beispiele für die Anwendung verschiedener Reibschweißverfahren.



A Schwungradreibschweißen



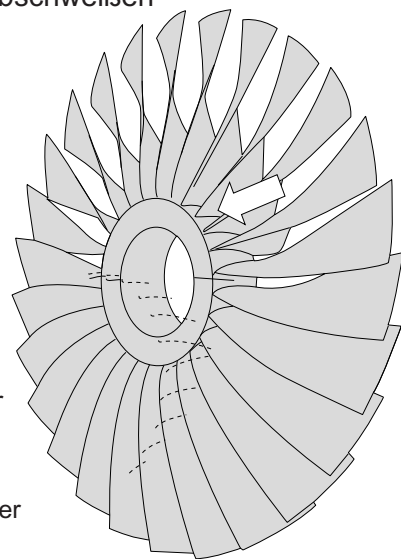
Die Detaildarstellung des Rotors ist schematisch, die Reibschweißpositionen können abweichen.



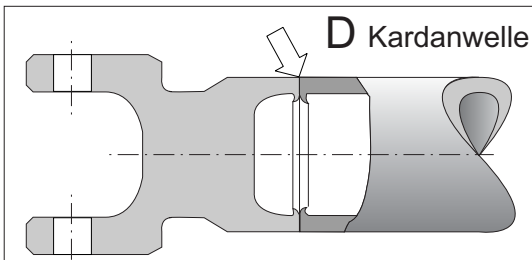
B Orbitales Reibschweißen

C Lineares Reibschweißen

Integrales Verdichterslaufrad (Fan-Blisk).

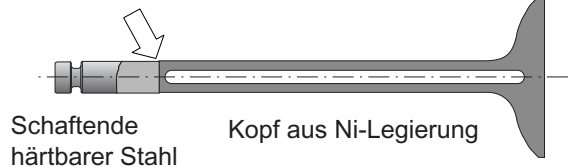


- Aufschiessen aller Schaufeln bei der Neuteilherstellung.
- Tausch beschädigter Schaufelblätter bei einer Reparatur.



D Kardanwelle

E Hohles Bimetallventil

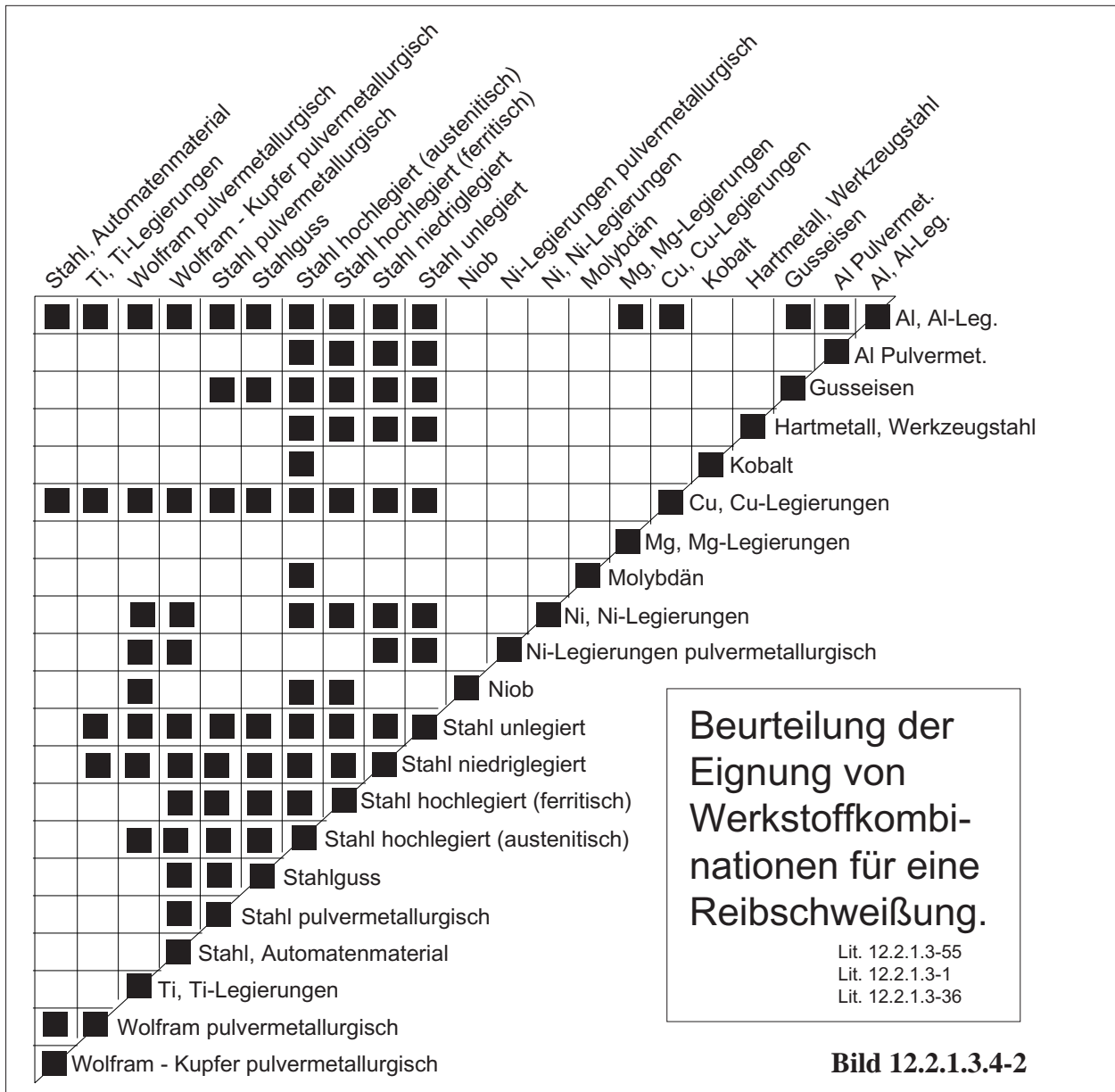


Schaftende härterer Stahl

Kopf aus Ni-Legierung

Bild 12.2.1.3.4-1

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden Reibschweißen



Fortsetzung von Seite 12.2.1.3.4-2

*füges (in radialer Richtung) optimieren. Dies ermöglicht eine maximale Schwingfestigkeit der Schaufelblätter. Sie haben eine verdickte Fügezone, die einem Ansatz an der Scheibe entspricht. Die Schweißung wird nur noch spanend bearbeitet. Als Verfahren dient das **lineare Reibschweißen** (Seite 12.2.1.3.4-1). Bei **Neuteilen** wird die gesamte Beschaufelung hergestellt. Das Verfahren dient auch der **Reparatur** mit dem Tausch beschädigter Einzelblätter. Diese Technologie hat sich nach einer langen Entwicklungs- und Erprobungsphase in der Praxis bewährt.*

*„D“ **Hohlwelle/Kardanwelle**: Durch **Rotations-Reibschweißen** werden die kraft-/moment-einleitenden Endstücke mit dem rohrförmigen Übertragungsschaft verbunden. Damit entsteht ein torsions- und biegesteifes Leichtbauteil das insbesondere Schwingungen minimiert. Solche Teile findet man seit Jahren in Großserien des Fahrzeugbaus.*

*„E“ **Ventile** von Kolbenmotoren: Durch die Verschweißung eines warmfesten abgasbeaufschlagten Ventiltellers, gegebenenfalls mit hohlem Schaft mit einem verschleißfesten Schaftende/Kopf sind **leichte, temperaturbeständige Auslassventile** realisierbar. Solche **Bimetall-***

Das Aussehen einer unbearbeiteten Reibschweißnaht kann etwas über die Prozessstabilität verraten.

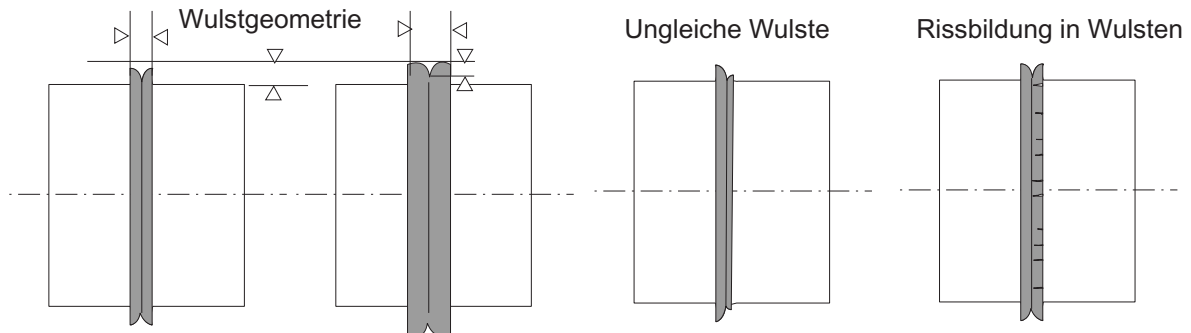


Bild 12.2.1.3.4-3

konzepte ermöglichen dem Konstrukteur in vielen Fällen (z.B. Turboladerrotoren, (Bild 12.2.1.3.4-5) neben einem angepassten Betriebsverhalten Material- und Gewichtseinsparungen.

***Bild 12.2.1.3.4-2** (Lit. 12.2.1.3-55, Lit. 12.2.1.3-1, Lit. 12.2.1.3-36): Das Funktionsprinzip der Reibschweißung ohne Schmelze ermöglicht eine **Verbindung unterschiedlicher Werkstoffe**. Das Schaubild soll dem Konstrukteur eine erste Auswahl erleichtern. Er muss sich jedoch bewusst sein, dass ihm eine **ausreichende Verfahrens- und Betriebserprobung nicht erspart** bleibt. Dabei kommt es auch auf den **Zustand des Halbzeugs** in der Kontaktfläche an. Eine Optimierung der Gefüge beim Schmiede- oder Gießprozess und/oder mit reiner Wärmebehandlung kann notwendig werden.*

***Bild 12.2.1.3.4-3** (Lit. 12.2.1.3-36): Beim Reibschweißen muss die **zerstörungsfreie Qualitätssicherung durch die Parameterüberwachung** und -dokumentation (Bild 12.2.1.3.4-4) des Schweißprozesses erfolgen. Dies hat sich in der Praxis bewährt. Eine sichere zerstörungsfreie, serieneignete Identifikation verfahrenstypischer, auch innenliegender **Klebestellen** (engl. kissing bonds, Bild 12.2.1.3.4-5 und Bild 12.2.1.3.5-1) ist nicht möglich.*

*Dem erfahrenen Fachmann ist es jedoch möglich, am **Erscheinungsbild des Schweißwulsts** auf grobe **Abweichungen der Verfahrensparameter** oder Veränderungen der Reibflächen aufmerksam zu werden. Dazu gehört eine die Reibung bzw. den Energieeintrag verändernde Verschmutzung. Ein Beispiel sind **Hochtemperaturgleitmittel** wie über Reinigungsbäder verschlepptes hexagonales Bor-nitrid. Denkbar ist auch, dass Abweichungen im Werkstoff bzw. des Gefüges einer Schweißkomponente die gewohnte Wulstausbildung verändern. Eine visuelle **Einschätzung des Nahtwulsts** ersetzt natürlich nicht die **Parameterüberwachung!***

Typischer Zeitablauf einer Schwungrad-Reibschweißung

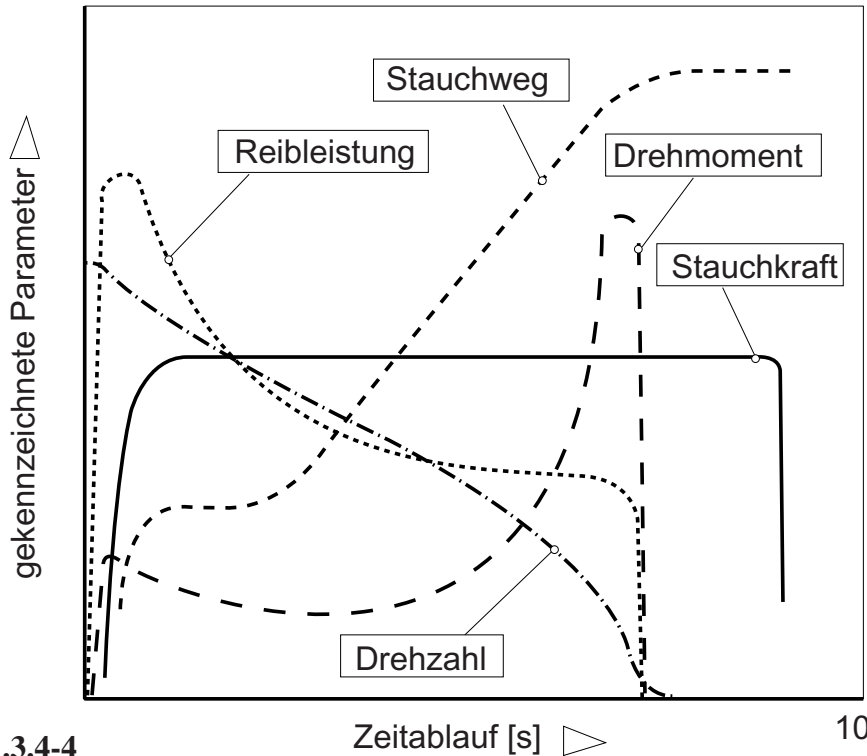


Bild 12.2.1.3.4-4

Bild 12.2.1.3.4-4 (Lit. 12.2.1.3-1): Als das für **Triebwerksrotoren** gebräuchlichste Reibschweißverfahren soll hier das **Schwungradreibschweißen** (engl. „Inertia Welding“) behandelt werden. Die **Schweißqualität wird mit der kontinuierlichen Dokumentation der Maschinenparameter** sichergestellt. Dies ist erforderlich, weil wenn auch seltene, so doch mögliche **Klebestellen** („Kissing Bonds“, Bild 12.2.1.3.4-7, Bild 12.2.1.3.5-1 und Bild 12.2.1.3.5-3) mit den serieneigneten zerstörungsfreien Prüfverfahren nicht ausreichend sicher zu detektieren sind. Der Verlauf der Prozessparameter die sich gegenseitig beeinflussen, streut in einem engen Rahmen. Bereits kleine Abweichungen von den erprobten und festgeschriebenen Maschinendaten lassen sich deshalb erkennen, bevor es zu Schweißfehlern kommt. Mit dem Schwungradschweißen können nur Rohrquerschnitte und, weniger günstig, auch Vollquerschnitte verbunden werden (Bild 12.2.1.3.4-5). Zuerst wird in eine Schwungradscheibe eine Seite des Werkstü-

ckes eingespannt und auf die notwendige Drehzahl bzw. kinetische Energie des Schwungrads gebracht. Dann wird das stehende, fest eingespannte Gegenstück mit einer schnell ansteigenden und anschließend konstanten Stauchkraft angedrückt. Stauchweg, Drehmoment und Reibleistung ergeben sich aus den selbststellenden Reibbedingungen. Aus diesem Grund müssen die **Maschinendaten** (Prozessdaten) **einer Reibschweißung vorher in ausreichend bauteilrelevanten Versuchen ermittelt und optimiert** werden. Es sei hier erwähnt, dass auch die Überwachung wichtiger weiterer Einflüsse notwendig werden kann. Ein Beispiel sind Titanlegierungen für die ein ausreichender Schutzgasschleier garantiert werden muss.

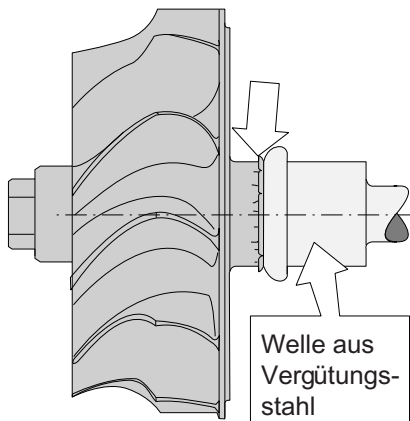
Weiter empfiehlt sich bei **schwingempfindlichen Bauteilen wie Blisks** (Band 4, Bild 18.6-13) eine Überwachung auf Resonanzschwingen beim Reibvorgang. Gegebenenfalls ist eine geeignete **Dämpfung** (z.B. Elastomerbeilagen) vorzusehen.

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden Reibschweißen

Auch Reibschweißungen können trotz vieler Vorteile Fehlstellen aufweisen.

Metallografischer Querschliff durch eine Reibschweißung mit typischen Merkmalen.

Warmrissbildung neben der Reibschweißung eines Turbinenrads aus einer Ni-GussLegierung.

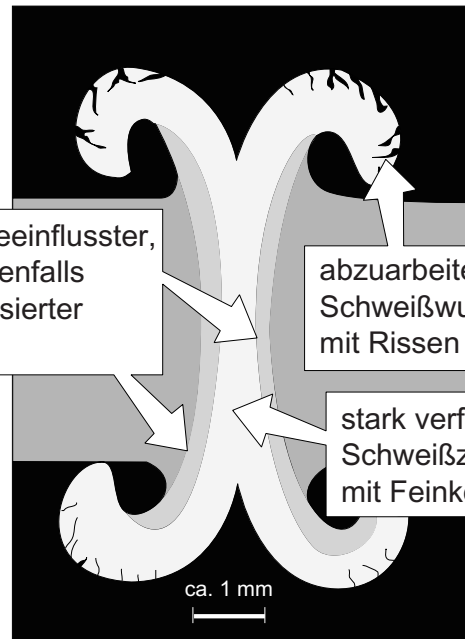


Welle aus Vergütungsstahl

Wärmebeeinflusster, gegebenenfalls rekristallisierter Bereich.

abzuarbeitender Schweißwulst mit Rissen

stark verformte Schweißzone mit Feinkorn



ca. 1 mm

Zusammenstellung von möglichen Fehlstellen in Reibschweißungen

Spröde Phasen bei Titanlegierungen durch schlechten Schutzgasschleier bzw. Luftzutritt.

Heißrissbildung in grobkörnigem Ni-Legierungsguss

Bindfehler/Klebestellen durch - verunreinigte Schweißflächen z.B. Trockenschmierstoffe wie Bornitrid, Grafit oder MoS₂

Abfall der Schwingfestigkeit an Auftreffstellen von Schweißspritzern oder angeklebten nicht entfernten Schweißspritzern.

Bildung spröder Phasen bei ungünstiger Werkstoffkombination

Axiale Rissbildung, ausgehend von Rissen im Schweißwulst. SpRK-Einfluss von Handschweiß oder Cl-haltigen Reinigungsmitteln.

Bild 12.2.1.3.4-5

Bild 12.2.1.3.4-5: Werden die erprobten **Verfahrensparameter beim Reibschweißen** eingehalten, zeigt die Erfahrung, dass gefährliche Fehlstellen äußerst selten sind. Trotzdem sind verschiedene Schweißfehler an Reibschweißungen möglich. Diese können besonders umfangreiche Aktionen auslösen, wenn sie von der Prozessüberwachung, welche die Qualitätsgarantie darstellt, nicht erkannt wurden.

Das Detail oben rechts zeigt den Querschliff durch die Reibschweißung eines Ringquerschnitts mit typischen Merkmalen. Was an der nicht nachgearbeiteten Schweißung im Unterschied zu Schweißnähten anderer Verfahren zuerst auffällt, ist der üblicherweise ausgeprägte, mehr oder weniger **engerollte, Schweißwulst**. Dieser bildet sich bei Werkstoff- und Geometriesymmetrie in gleicher Form beidseitig des Schweißstoßes aus. Der Wulst kann auf Grund der extremen plastischen Verformung ausgeprägte **Axialrissbildung (Warmrisse)** aufweisen. Wenn die Risse mit den Wülsten abgearbeitet werden, ist die Güte der Schweißung nicht beeinträchtigt. Die wiederholbare Ausbildung der Wulste ist ein Merkmal für die **Stabilität des Prozesses**. Falls unterschiedliche Werkstoffe oder unterschiedlich steife Querschnitte verbunden werden, sind nicht stoßsymmetrische Wulste zu erwarten.

In Nahtebene befindet sich ein stark verformtes, nach außen gerichtetes feinkörniges Gefüge. Die beidseitig anschließende Wärmeeinflusszone (WEZ) kann bereits, im Vergleich zum unbeeinflussten Grundmaterial, grobkörnigeres rekristallisiertes Gefüge aufweisen. Anzeichen einer erstarrten Schmelze sollten verfahrensbedingt nicht vorliegen.

In der unteren Skizze sind potenzielle Probleme, Schwachstellen und Fehler zusammengefasst.

Warmrissbildung: Obwohl sich keine Schmelzzone im Stoß ausbildet, können bei ungünstigen Materialeigenschaften Warmrisse entstehen. Teigige Korngrenzen werden ohne Auf-

schmelzung von den hohen Schweißkräften und/oder Wärmespannungen aufgerissen (Bild 12.2.1.3.1-10). **Warmrissanfällig** sind erfahrungsgemäß grobkörnige Ni-Gusslegierungen. Das Problem tritt bei **kleinen Turbinenrädern und Turboladern** auf, die mit einer Welle aus Stahl verschweißt werden (Skizze). Die Rissbildung ist besonders intensiv, wenn sich in zuletzt erstarrenden Materialanhäufungen wie typischerweise dem Nabenansatz auf der Rückseite, Seigerungen und Mikroporen angereichert haben. Bei solchen unvermeidlichen Rissen muss entweder das Fügeverfahren gewechselt werden (z.B. Löten) oder die Schweißung in eine unproblematische Zone gelegt werden. Ist das nicht möglich, bedarf es **Versuche und ausreichende Kenntnis der zu erwartenden Betriebsbelastungen**, um mit einer **bruchmechanischen Abschätzung** den sicheren Betrieb trotz der Risse nachzuweisen.

Bindfehler/Klebestellen: Diese gefährlichen teilweise großflächigen und zum Aufreißen neigenden Fehlstellen (Bild 12.2.1.3.4-6) sind schwer zerstörungsfrei nachweisbar. Ob eine Prozessüberwachung ausreichend sicher die Entstehung solcher Fehlstellen nachweist ist zweifelhaft. Denkbare Ursachen sind Einflüsse die örtlich den Schweißprozess mit einer Änderung der Reibbedingungen beeinflussen. Zu potenziell gefährlichen Medien gehören **Hochtemperatur-Trockenschmiermittel wie hexagonales Bornitrid, Molybdändisulfid und mit Grafit verunreinigte Stoßflächen**.

Spröde Phasen: Mit Reibschweißen kann man sehr **unterschiedliche Werkstoffe** verbinden. Wichtig ist, dass die erforderliche plastische Verformbarkeit (Fließverhalten) beider Werkstoffe während des Schweißprozesses etwa im gleichen Temperaturfenster liegt. Eine ungünstige Kombination verschiedener Werkstoffe kann während des Schweißens zur **Bildung spröder Phasen** führen. Auch eine nachfolgende **Wärmebehandlung** und/oder ausreichend hohe Betriebstemperaturen können auf diese Weise verspröden wirken. **Ein Beispiel sind**

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden Reibschweißen

Ti-Legierungen in Kombination mit Ni-Legierungen oder Stählen. So kann die Schweißnaht selbst zur Schwachstelle werden. Bei **Schlagbeanspruchung** (z.B. als Folgeschaden) kann es zum **spontanen Bruch** kommen.

Versprödung mit spröden Phasen kann bei Titanlegierungen auch unter Luftzutritt entstehen (Bild 12.2.1.3.1-18). Dies ist besonders beim linearen Reibschweißen zu beachten, weil die oszillierende Schweißbewegung und ein Kippen der Reibflächen die Gefahr der Sauerstoffaufnahme auf der Schweißfläche erhöht (Lit. 12.2.1.3-1).

Spontane Rissbildung/Spannungsrissskorrosion (SpRK): Hochfeste **Titanlegierungen** sind im Bereich von **Kerben** und verstärkt beim Einwirken von Halogenen wie **Chlor**, sehr empfindlich für diese Rissskorrosion (Bild 12.2.2.3-16). Solche axial verlaufende Risse (Bild 12.2.1.3.4-6) gehen bevorzugt von den üblichen und akzeptierten Rissen im Schweißwulst aus. Anscheinend genügen **minimale Rückstände von Handschweiß (Fingerabdrücke)** im Schweißstoßbereich um die Risse auszulösen. Denkbar ist auch der Einfluss dünnster Cl-Reaktionszonen an der Bauteiloberfläche. Solche extrem dünnen Lagen können sich beim Reinigen der Titanteile vor dem Schweißen in **Cl-haltigen Bädern** („Tri“, „Per“) bilden (Bild 12.2.1.7-8).

Schweißspritzer: Ähnlich wie bei Schmelzschweißungen können auch beim Reibschweißen „Schweißspritzer“ entstehen. Es dürfte sich hier jedoch nicht um Schmelztropfen handeln. Wahrscheinlich sind es glühende Abriebpartikel. Ausreichend heiße **Partikel von Titanlegierungen brennen** während des Flugs durch die Luft. Diese zusätzliche Wärme macht sogar ein Schmelzen denkbar. Treffen solche **Partikel auf später im Betrieb hochbelastete Bauteilzonen** (z.B. Innenflächen eines Rotors wie Nabe und **Scheibenmembrane**, Band 4, Bild 18.6-6) kann die gefährlich abgefallene Schwingfestigkeit (Band 4, Bild 18.6-12) zum **LCF-Bruch** führen. Aus diesem Grund sollten

auch bei Reibschweißungen, ähnlich wie beim Elektronenstrahlschweißen, solche Zonen geeignet abgedeckt werden (Band 4, Bild 18.6-11).

Bild 12.2.1.3.4-6: Beim **Reibschweißen** können verfahrensbedingt beachtliche **Formkerben** entstehen. Diese können sich sowohl auf die **Betriebssicherheit** als auch auf Folgeschäden im **Fertigungsprozess** auswirken. Von besonderem Interesse ist die **Innenseite einer Hohlwelle**, deren Schweißwulst nicht nachgearbeitet werden kann. Diese Kerbe wird im Fall eines Bindefehlers zwischen den Wulstseiten gefährlich verstärkt (Skizze oben links). Spannungserhöhend kann sich auch ein nicht nacharbeitbarer Wellenversatz auf der Innenseite auswirken.

Handelt es sich um eine Vollwelle (Skizze oben rechts) werden zur Mitte hin die Reibverhältnisse immer ungünstiger (niedrige Relativbewegung, Abfluss des Wulstes behindert). So wird ein **zentral liegender Fehler in der Schweißebene** begünstigt. Solange sich dieser in einer sehr niedrig beanspruchten Zone befindet, mag die Betriebssicherheit des Bauteils nicht betroffen sein. Reicht oder wächst dieser Fehler aber in höher belastete Zonen, ist mit einem plötzlichen Wellenbruch zu rechnen.

Die Beanspruchung der Rohrinneenseite ist bei Biegespannung relativ niedrig. Treten jedoch merkliche Fliehkräfte und/oder Wärmespannungen auf, ist durchaus mit einem **LCF-Risswachstum von einer inneren, ausreichend großen Fehlstelle** zu rechnen. Das kann der Fall sein, wenn Werkstoffe mit **unterschiedlichem Wärmedehnungskoeffizienten** gefügt werden. Beispielsweise ein Turbinenrad aus einer Ni-Legierung mit einer Stahlwelle (Skizze unten links, Bild 12.2.1.3.4-6). Die Spannungen können bei zu großer Nähe der Schweißung zur Radrückwand besonders hoch sein. Ein solcher Riss wird erst außen, z.B. mit Eindringprüfung erkennbar, wenn bereits der Querschnitt gefährlich geschwächt ist. Aus diesem Grund sind solche Risse nicht vor einem Wellenbruch oder Radbruch abfangbar.

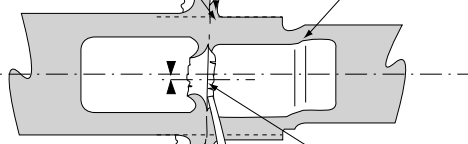
Formkerben in Reibschweißungen können im Fertigungsprozess oder im Betrieb Risse auslösen.

Mögliche prinzipbedingte Formkerben in Reibschweißungen können bereits im Fertigungsprozess Risse auslösen.

Unterschiedliche Wärmedehnungen können hohe Schweißspannungen erzeugen.

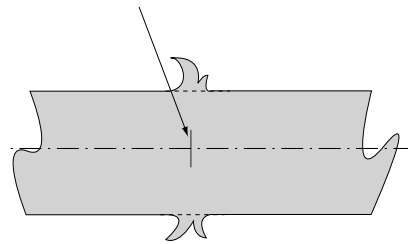
nicht entfernbare Nahtkerbe

Innere Deformation durch Schweißkräfte kann nicht nachgearbeitet werden.



Kerbwirkung an nicht entfernten innenliegenden Graten

Fehlstelle durch ungünstige Reibbedingungen in der Nähe der Drehachse eines vollen Querschnitts.



Von innen ausgehender LCF-Riss und Bruch in der Welle eines kleinen Turbinenrotors im Bereich der Reibschweißung.

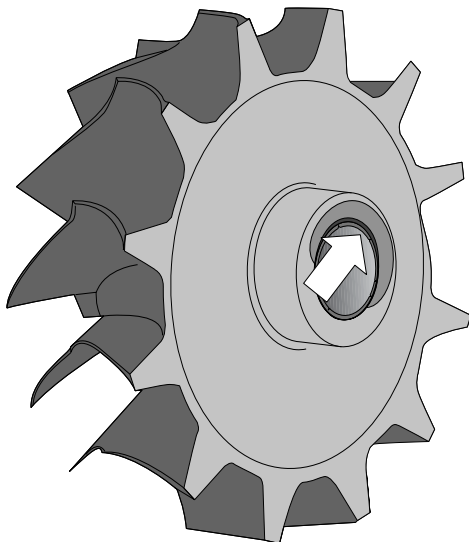


Bild 12.2.1.3.4-6

Besonders bei hochfesten Titanlegierungen besteht die Gefahr, dass Kerben im Wulst während des Schweißens oder verzögert Risse auslösen.

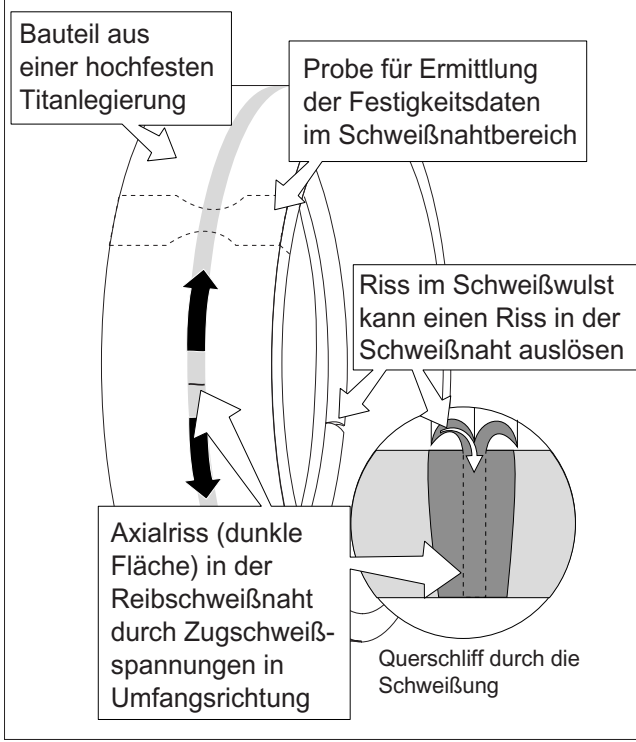
Bauteil aus einer hochfesten Titanlegierung

Probe für Ermittlung der Festigkeitsdaten im Schweißnahtbereich

Riss im Schweißwulst kann einen Riss in der Schweißnaht auslösen

Axialriss (dunkle Fläche) in der Reibschweißnaht durch Zugschweißspannungen in Umfangsrichtung

Querschleiff durch die Schweißung



Bildbeschreibung siehe Seite vorher

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden Reibschweißen

Bild 12.2.1.3.4-7: Besondere Bedingungen gelten für das **Lineare Reibschweißen** (Seite 12.2.1.3.4-1, Lit. 12.2.1.3-1). Dieses Verfahren bietet sich für die Neuteilfertigung und die Schaufelreparatur gelaufener **Blisks** an (Skizze oben). Es befindet sich bereits im Serieneinsatz und bewährt sich hier trotz potenzieller verfahrensspezifischer Probleme hervorragend.

Das Lineare Reibschweißen unterscheidet sich vom normalen Reibschweißen (Bild 12.2.1.3.4-1 durch eine **oszillierende Schweißbewegung**. Das stellt die Schweißtechnik vor besondere Herausforderungen und Probleme (Rahmen unten) mit Fehlstellen als Folge.

Sauerstoffaufnahme: Die oszillierende Schweißbewegung begünstigt Luft-/Sauerstoffzutritt. Diese Gefahr besteht bei **ungenügendem Schutzgasschleier** und besonders bei einem **Kippen** der Kontaktflächen. Ursache für dieses Kippen kann eine nicht ausreichende Steifigkeit der Spannvorrichtungen und/oder der Maschine sein. So gelangt der Sauerstoff mit einer Pumpwirkung (?) zwischen die Kontaktflächen. Das gilt besonders bei **Titanlegierungen**, die in erster Linie bei geschweißten Blisks zum Einsatz kommen. In der Schweißnaht besteht dann **Versprödungsgefahr** (Bild 12.2.1.3.1-18 und Bild 12.2.1.3.1-20).

Maßgenauigkeit: Die notwendigen hohen **Klemmkräfte** und die oszillierende Bewegung mit ihren typischen **wechselnden Krafterrichtungen** erfordern eine hohe **Steifigkeit von Vorrichtungen und Maschine**. Sie beeinflussen das Kippen der Kontaktflächen und die Konstanz der Schweißparameter. Diese sind aber gerade beim Reibschweißen von besonderer Wichtigkeit. Dient doch die **Verfahrensstabilität als Qualitätssicherung**.

Zugänglichkeit des Schweißbereichs: Für die Neuteilfertigung, noch mehr aber für **Bliskreparaturen** muss die Schweißnaht **nachgearbeitet** werden. Dabei ist eine zerspannende An-

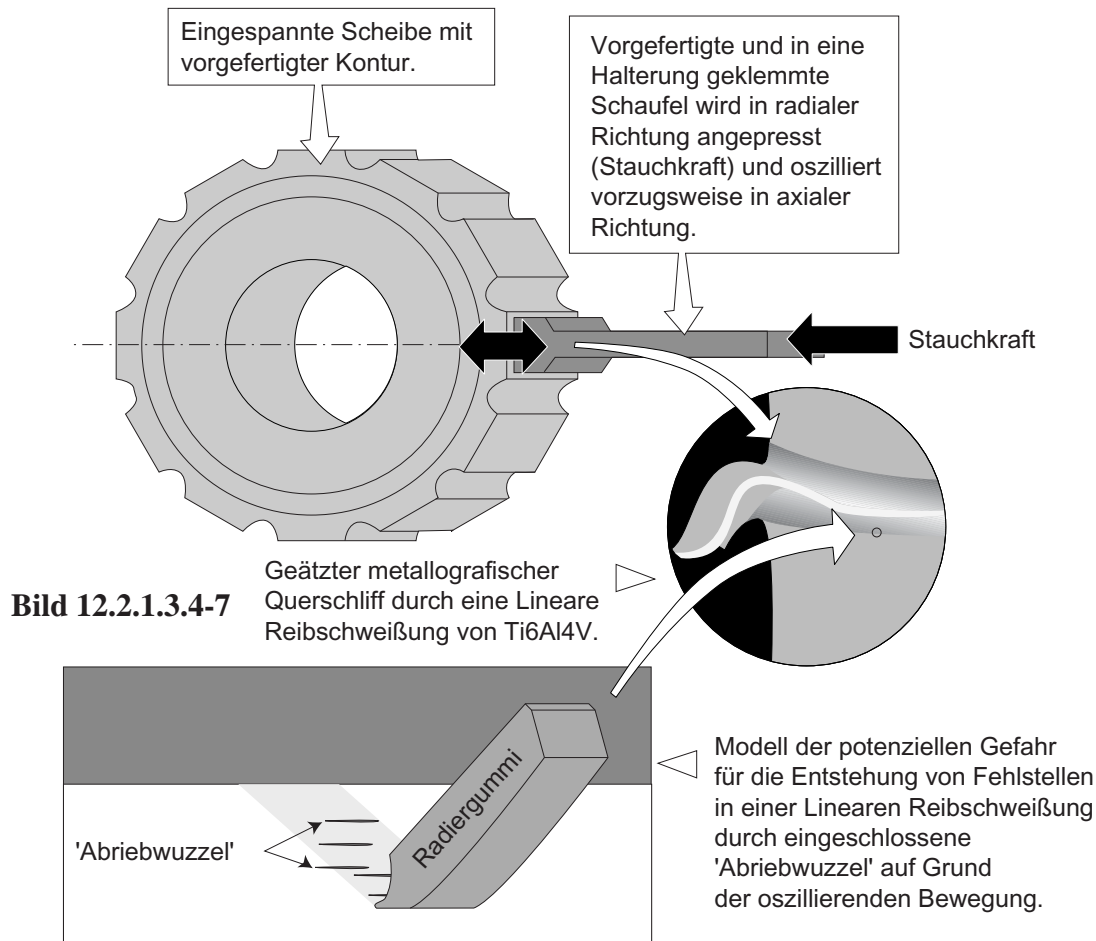
gleichung des Übergangs vom Schaufelprofil in die Scheibe herzustellen. Das erfordert Platz für die Fräser. Zusätzlich ist ein optimales **Verfestigungsstrahlen** zu gewährleisten.

Aufmaße im Schweißbereich: Diese sind erforderlich, um verfahrensbedingte **Stauchvorgänge** und **Materialverschiebungen** auszugleichen. Auch die nötige Steifigkeit sowie der Kontakt der Schweißflächen ist sicherzustellen. Die Nacharbeit der Übergänge ist ohne Überstände nicht gewährleistet. Ein besonderes Problem stellen Reparaturen von Blisks dar. Hier wird das scheibenseitige Aufmaß vom Querschnitt des abgetrennten Schaufelblatts bestimmt. Deshalb ist auch die Anzahl von Reparaturen für dieselbe Schaufel eng begrenzt.

Störender Abrieb: Die oszillierende Bewegung ermöglicht bei ungenügenden Schweißparametern wie Andruck und Relativbewegung die Bildung von Abriebröllchen ('Abriebwuzzeln' ähnlich einem Radiergummi) auf der Kontaktfläche. Oxidieren diese, ist mit Bindefehlern in der Schweißung zu rechnen.

Betriebsbeanspruchung: Die Schaufeln gehen im Bereich der Schweißung in die Scheibe des Blisk über. Hier ist von den **höchsten dynamischen Belastungen** im Betrieb durch eine Grundbiegeschwingung auszugehen. Außerdem wirkt eine relativ hohe Mittelspannung als Folge des Blattgewichts. Aus diesem Grund sind verfahrensbedingte Schwachstellen (zulässige Fehler) sehr klein festzulegen. Das erhöht die Wahrscheinlichkeit des Fehlerdurchschlupfs bei zerstörungsfreien Prüfungen (Band 4, Bild 17.3.1-3.1).

Herstellung der Beschau felung eines 'Blisk' durch Lineares Reibschweißen (schematisch).



Probleme des Linearen Reibschweißens:

- Sauerstoffaufnahme im Nahtbereich, besonders bei einem eventuellen Kippen der vorgearbeiteten Schaufel.
- Ungenügende Maßgenauigkeit (Fluchten) der Bauteile und Vorrichtungen unter den hohen Schweiß- und Spannkraften und verfahrensbedingten plastischen Verformungen.
- Zugänglichkeit für die Nacharbeit.
- Ausreichende Aufmaße, besonders im Randbereich.
- Fehlstellen durch 'Abriebwuzel' (siehe Modell oben).
- Lage in der im Betrieb dynamisch hochbeanspruchten Bauteilzone stellt höchste Anforderungen an die Qualität.

Bildbeschreibung siehe Seite vorher