

# TECHNOLOGIE- UND WERKSTOFFENTWICKLUNG FÜR KRYOGENE TREIBSTOFFTANKS BEI MT AEROSPACE

W. Radtke, MT Aerospace AG, 86153 Augsburg, Deutschland

## Zusammenfassung

Für kryogene Treibstofftanks werden neue Bausteine bezüglich Werkstoffauswahl, Fertigung und Prüfung dargestellt, die auf gesteigerte Robustheit, Massen- und Durchlaufzeit-Reduktion sowie Kostendämpfung sowohl in Entwicklung wie in Serie und geringere Abhängigkeit von Nicht-EU-Zulieferern zielen.

### 1. DRÜCKEN VON DOMEN MIT 5,4 METER DURCHMESSER AUS AA 2219 T8 (DLR-GEFÖRDERT)

Die Zentralstufe der ARIANE 5 weist einen Durchmesser von ca. 5,4 m auf. Die Zylinderwände der Kryogentanks stellen zugleich die Außenwand der Stufe dar. Mithin haben die Dome der Tanks annähernd den gleichen Außendurchmesser. Gleiches gilt für die kryogene Oberstufe.

Der Stand der Technik der Domherstellung ist je nach Trägerrakete unterschiedlich.

Die großen kugelabschnittsförmigen Dome der ARIANE 5 werden bei MT Aerospace derzeit in aufgelöster Bauweise gefertigt, bei der jeweils 8 Segmente zu einem Dom geschweißt werden. Die Segmente werden aus Platten im Zustand T37 zunächst im ebenen Zustand auf beiden künftigen Flächen gefräst, dann durch Kugelstrahlen in ihre Domsegmentform gebracht (bei KSA in Aachen) und abschließend auf den Zustand T87 ausgehärtet und dabei auf einer geeigneten Form geometrisch kalibriert. Das Fräsen auf der Vakuumspannplatte erfolgt so, dass die gewünschte Endwanddickenverteilung bereits vor der Umformung fertiggestellt wird. Eine Bearbeitung der mehrfach gekrümmten Flächen im umgeformten Zustand sowie besondere Spannvorrichtungen dafür entfallen also. Allerdings sind pro Dom 8 WIG-Gleichstrom-Schweißnähte mit entsprechender Vorbereitung, zerstörungsfreier Prüfung und gegebenenfalls Reparatur, ebenfalls mit WIG-DC, auszuführen. Danach wird ein polares Interface sowie, an der großen Öffnung, ein Y-Ring mit gleichem Verfahren eingeschweißt, wodurch aus dem Dom ein sog. Bulkhead entsteht. Die soeben erwähnten zusätzlichen Teile werden im Zustand T852/1 eingeschweißt. Aus dem Ablauf folgt, dass der hochfeste Zustand T8 in der Wärmeinflusszone zunichte gemacht wird. Diesem Umstand wird mit Verdickung des Schweißbereichs Rechnung getragen. Die erheblichen Wanddickenunterschiede erschweren die Segment-Umformung. Nach dem Schweißen erfolgt keine Wärmebehandlung. Ein ebenfalls endformgerechtes und alternativ zum Kugelstrahlen früher verwendetes Spannungsrelaxations-Aushärte-Umformen wird nicht mehr eingesetzt.

Eine drastische Reduktion der Zahl der zu fertigenden Einzelteile wird bei der Fertigung der elliptischen Dome mit ca. 4 m Durchmesser für die Kryogentanks der

japanischen Trägerrakete H-IIA erreicht. Auch hier wird die spanabhebende Bearbeitung vor der Umformung im ebenen Zustand bewerkstelligt. Man startet mit extra großformatigen Platten (die nur ein einziger Hersteller weltweit in den USA liefern kann) im Zustand O und formt die Ronde mit Hilfe eines ebenfalls weltweit einzigartigen sog. „konkaven“ Drückprozesses bei MT Aerospace zum Dom um. Dieser Prozess ermöglicht es, dem Hauptteil des Drückens bei erhöhter Temperatur sowie dem Lösungsglühen und Abschrecken ein Recken bei Raumtemperatur anzuschließen, das Voraussetzung für das abschließende Aushärten auf den Zustand T8 ist. Wir nennen diesen endformgerechten Prozess „konkav“, weil sich das Drückwerkzeug auf der konkaven Seite des entstehenden Doms befindet. Das Bauteil wird dabei am Rand gespannt. Eine spezielle Drückform wird bei diesem Prozess nicht benötigt. Nach dem Einschweißen von verschiedenen, auch asymmetrisch angeordneten Flanschen werden die Dome chemisch gefräst, um die endgültige, den Flanschpositionen zugeordnete Wanddickenverteilung einzustellen.

Mit dem konkurrierenden und allgemein bekannten Drückverfahren, das in den USA und in Japan zum Einsatz kommt und bei MT Aerospace als „konvexes“ Drücken bezeichnet und auch praktiziert wird, vermag man keine hinreichenden Reckoperationen auszuführen, da die Ronde polar auf die Drückform gespannt wird. Die Umformung wird im Wesentlichen mittels Biege- und Stauch-Operationen bewerkstelligt und findet vorzugsweise bei höheren Temperaturen als beim konkaven Drücken statt. Ohne Kaltrecken erreicht man nach Lösungsglühen, Abschrecken und Warmaushärtung nur den Zustand T6 mit geringerer Festigkeit. In der Regel wird bei dieser Prozessgestaltung ein aufwendiges spanabhebendes Bearbeiten beider Seiten des umgeformten und wärmebehandelten Domes erforderlich sein, das überdies durch die nach dem Abschrecken eigenspannungsbehaftete Schale, da sie nicht spannungsarm zu recken ist, beeinträchtigt werden kann. Dieser Prozess findet bei der Fertigung der halbkugelförmigen Inneren Dome für die kryogene Oberstufe der ARIANE 5 aus AA 2219 mit 4 m Durchmesser Anwendung, weil das Konzept der integral Orthogrid-versteiften Schale die Applikation des konkaven Drückprozesses ausschließt. Die Roh-Ronde wird aus zwei 70 mm dicken Platten mit Hilfe des EB-Verfahrens geschweißt, da keine Platten ausreichenden Formats verfügbar sind (vgl. den abschließend bearbeiteten Dom, Bild 8).

Mit einem weiteren Verfahren, das in den USA Anwendung findet und bei dem Domsegmente streckgezogen werden, vermag man zwar den Zustand T8 zu realisieren, bis dato jedoch auf Kosten einer aufwendigen allseitigen spanabhebenden Bearbeitung im mehrfach gekrümmten Zustand. Auch hier tritt eine Erweichung im Bereich der Schweißnähte ein.

### 1.1. Rührreibschweißen

Um die großen Dome der ARIANE 5 aus einer Ronde mit Hilfe des konkaven Drückprozesses zu formen, bedarf es einer Rohplatte, die wie erwähnt nur von einem einzigen Hersteller weltweit gefertigt zu werden vermag und zudem eine kostentreibende Überdicke aufweist. Um diese Nachteile zu umgehen, wurde die erforderliche Ronde in einem Entwicklungsversuch bei MT Aerospace auf einem konventionellen Bearbeitungszentrum (Bild 1) aus 2 Standard-Platten mit einem üblichen Stift-Schulter-Werkzeug rührreibgeschweißt. Das Rührreibschweiß-Verfahren bietet als einziges die Möglichkeit, die für das Schmelzschweißen von Aluminium typischen Schweißfehler zu vermeiden. Dies ist erforderlich, da jeder Fehler kritischer Dimension, bedingt durch die Streckoperation beim konkaven Drücken, in eine Größenordnung wächst, die zum Versagen während des Drückens oder zu unzulässigen Fehlergrößen am Bauteil führen würde. An Werkstoffproben sowie an verkleinerten Domen mit ca. 1 m Durchmesser wurden die Schweißnaheigenschaften optimiert bzw. in ihrer Eignung für das Drücken nachgewiesen [1]. Nach dem Schweißen und Prüfen wurde die Ronde geeglüht, um die Aufhärtung in der Schweißzone zu beseitigen, und beidseits auf die gewünschte End-Kontur bzw. -Wanddickenverteilung unter Berücksichtigung der drückumformbedingten Ausdünnung gedreht. Dabei konnten auch, wenn überhaupt vorhanden, Wurzelfehler entfernt werden.

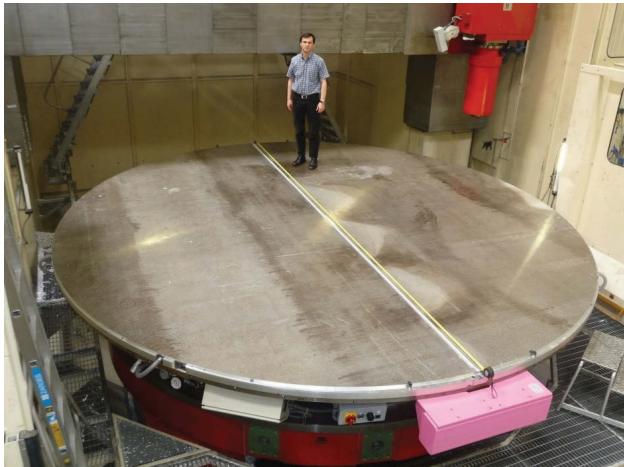


BILD 1. Typische Ronde für ARIANE 5-Experimental-Dom nach Rührreibschweißen

### 1.2. Konkaves Drücken und Wärmebehandlung

Das Drücken findet zur Verbesserung der Umformfähigkeit bei erhöhter Temperatur statt. Dabei wird die ursprünglich ebene Ronde unter Rotation mittels einer Rolle, die in schrittweiser Zustellung den jeweils entstehenden Dom-Meridian ortsfest vom Rand zum Pol in mehreren sog. Schablonen abfährt, bis zu einer Form

umgeformt, die unter Berücksichtigung der gewünschten Fertigteilgeometrie noch das Recken gestattet (Bild 2). Geometriebedingt nimmt der Umformgrad vom Einspannrand ausgehend meridional stetig zu, um bei Annäherung an den Pol ebenfalls stetig abzunehmen. Der höchste Umformgrad tritt demzufolge ungefähr im meridional mittleren Bereich auf. Dabei soll die Schweißnaht samt Wärmeeinflusszone keinen Schaden nehmen und auch nicht bevorzugt ausgedünnt werden. Nach diesem Prozess erfolgt das Lösungsglühen und Abschrecken sowie der Reckschritt, der durch erneutes konkaves Drücken, hier bei Raumtemperatur, bewerkstelligt wird. Schließlich bewirkt die Warmauslagerung die Einstellung der gewünschten Festigkeit, den T8X-Zustand. Bedingt durch den Fertigungsablauf gibt es keinen wesentlichen Unterschied der Eigenschaften in Grundwerkstoff, Schweißnaht und Wärmeeinflusszone, ganz im Gegensatz zu den Resultaten der erwähnten Methoden der Fügung von bereits endwärmbehandelten Domsegmenten.



BILD 2. Drücken der rührreibgeschweißten Ronde

## 2. TANKS UND DOME AUS AA 2195 T8

### 2.1. Stand der Technik

Die AlCuLi-Legierung AA 2195 wird im SLWT des Space Shuttle verwendet und soll auch im ARES I-Oberstufentank fliegen. Eine ähnliche Legierung (AA 2198) wird im Falcon 9 eingesetzt, dessen Bulkheads (mit integralen Y-Ringen) in den USA konvex gedrückt werden. Als Alternative zur segmentierten Basis-

Dombauweise bei ARES I wird bei MT Aerospace eine integral konkav gedrückte Variante entwickelt (§ 2.3).

## 2.2. Tank-Demonstrator (vom DLR gefördert)

Mit Hilfe eines Demonstrators mit 1 m Durchmesser wurden einige der modernen Fertigungstechniken, die mit Verwendung des Werkstoffs AA 2195 zwingend erforderlich oder zumindest wünschenswert und dennoch kurzfristig umsetzbar erscheinen, nachgewiesen. Daneben konnte gezeigt werden, dass dieser Werkstoff über den konkaven Drückprozess zu halbkugelförmigen Domen mit kurzem zylindrischem Ansatz und Endzustand T8 umgeformt zu werden vermag (die Halbkugel stellt gegenüber dem Kugelabschnitt oder dem elliptischen Dom eine drücktechnische Erschwerung dar, da der erforderliche Umformgrad höher liegt). Das auf einer Seite wegen der erforderlichen Anschlüsse vorgesehene polare Interface wurde ebenso wie der zwischen beiden Hemisphären angeordnete Zylinder im Werkstoff AA 2219 ausgeführt: Das Polinterface enthält einige Rohre, die handschmelzschweißtechnisch zu integrieren waren und der Zylinder wurde dazu ausersehen, den Tank mit konventioneller WIG-Technik zu schließen (Bild 4). Rührreibschweißen wurde wegen der bekannten Schmelzschweißproblematik beim Werkstoff AA 2195 vorausgesetzt. Somit waren 2 Rührreibschweißnähte zwischen Dom (AA 2195 T8X) und Zylinder (AA 2219 T87) sowie eine zwischen Dom und Polinterface (AA 2219 T851) zu ziehen (Bild 3). Diese Schweißungen gelangen auf Anhieb ohne Fehler, obwohl die Bauteile als extra angefertigte Einzelteile sowohl hinsichtlich der Passungen als auch der Wanddickenunterschiede Extreme aufwiesen, die weit jenseits dessen lagen, was gegenwärtig in der Serienfertigung für ARIANE 5- Tanks mit WIG-Schweißtechnik toleriert wird.



BILD 3. ESAB-Superstir-Anlage mit MT-Aerospace-Spannvorrichtung für die Polnahtschweißung

Zum Schließen wurden diese Umfangsnähte nach Überlapp in den Werkstoff AA 2219 aus der nominellen Schweißnahtebene heraus verzogen. Jedenfalls kann festgestellt werden, dass Mischverbindungen aus AA 2219 und AA 2195 beherrscht werden und auch keine unlösbarer Probleme bei anderen Mischverbindungs-Kombinationen erwarten lassen.

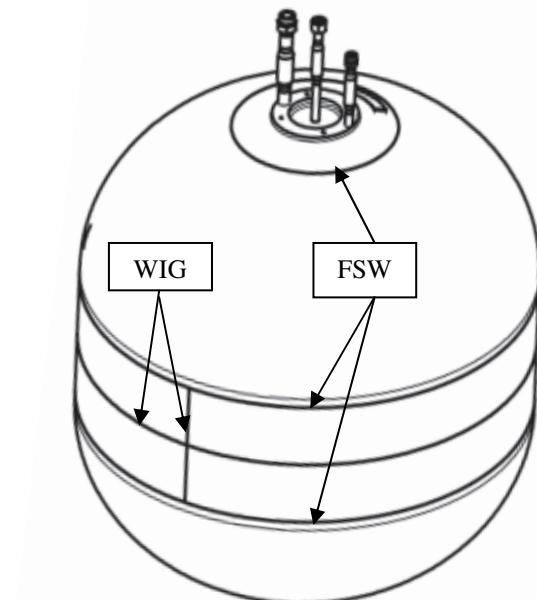


BILD 4. Tankdemonstrator mit WIG- und Rührreibschweiß-Nähten (FSW)

Das Rührreibschweißen wurde auf einer mit entsprechenden Vorrichtungen versehenen hauseigenen ESAB-Superstir-Anlage mittels konventionellen Stift-Schulter-Werkzeugs durchgeführt (Bild 3). Sowohl Prozess- als auch Vorrichtungs-seitig konnten äußerst wertvolle Erfahrungen gesammelt und Nachweise geführt werden, dass Mischnähte unter Einbezug des schweißtechnisch delikaten Werkstoffs AA 2195 auch unter widrigen geometrischen Randbedingungen in großer Prozess-Robustheit gelingen – ein Resultat, das schon beim WIG-Schweißen von AA 2219 alles andere als selbstverständlich ist (vgl. § 6.2.1).

## 2.3. ARES I-Dom (gefördert von Lockheed Martin und NASA)

Die Expertise bei der Rührreibschweiß- und Drückprozess-Anwendung auf große Kryogentankdome (vgl. § 1) veranlasste Lockheed-Martin und NASA dazu, bei MT Aerospace ein Entwicklungsprogramm für Dome der ARES I-Oberstufentanks anzustößen. Die Gründe liegen im Material- und Kosten-sparenden endform-gerechten Prozess, im Wegfall der „weichen“ Meridian-Schweißnähte sowie in der Realisierung des gegen Spannungsrisskorrosion unempfindlichen Zustandes T8.

Trotz der erheblichen Schwierigkeiten, die der Werkstoff

AA 2195 wegen seines extrem inhomogenen Gefüges darbietet, ist es gelungen, rührreibgeschweißte Ronden in Größe und Form der ARIANE 5-Dome (vgl. § 1) konkav zu drücken und auch durch die komplette thermomechanische Behandlung bis zum Zustand T8 zu führen (Bild 5). Die Optimierung der Eigenschaften des Schweißbereichs hinsichtlich seiner Verformungsfähigkeit und des gesamten Doms bezüglich der erreichbaren Werkstoff-Kennwerte ist noch nicht abgeschlossen.



BILD 5. ARES I-Dom aus AA 2195 nach Wärmebehandlung

### 3. ESA TRP-RÜHRREIBSCHWEISSEN UND -WERKSTOFFCHARAKTERISIERUNG (MIT DLR-BEITRAG)

Mit diesem Programm wurden das Rührreibschweißen der ausgehärteten Legierung 2195 und das von Mischnähten aus AA 2219 und AA 2195 entwickelt und die erzeugten Nähte hinsichtlich der erreichten Werkstoffkennwerte charakterisiert. Daneben konnten die Fehlerarmut der Verbindungen demonstriert und die Art potentieller Fehler sowie die geeigneten Maßnahmen der zerstörungsfreien Prüfung beschrieben werden [2][3].

### 4. ARIANE 5 ME (DLR-GEFÖRDERT)

#### 4.1. Werkstoff AA 2219 T8

Aus Gründen der Minimierung der Entwicklungs-Kosten und -Risiken wird vom Kunden derzeit der bewährte Werkstoff AA 2219 im höchstfesten Zustand T8 vorgegeben. Zum Zweck der Massenreduktion stehen je nach Anforderung prinzipiell Werkstoffe mit höherer Festigkeit bzw. Steifigkeit zur Verfügung. Diese Werkstoffe sind jedoch bei erheblicher Leistungssteigerung legierungsbedingt nicht mehr umstandslos schmelzschweißbar. Hier bietet sich das Rührreibschweißverfahren für das Fügen der Tankelemente (Bild 6) als ideale Alternative an.

### 5. ESA TRP-RÜHRREIBSCHWEISSEN UND -WERKSTOFFCHARAKTERISIERUNG (MIT DLR-BEITRAG)

Mit diesem Programm wurden das Rührreibschweißen der ausgehärteten Legierung 2195 und das von Mischnähten aus AA 2219 und AA 2195 entwickelt und die erzeugten Nähte hinsichtlich der erreichten Werkstoffkennwerte charakterisiert. Daneben konnten die Fehlerarmut der Verbindungen demonstriert und die Art potentieller Fehler sowie die geeigneten Maßnahmen der zerstörungsfreien Prüfung beschrieben werden [2][3].

### 6. ARIANE 5 ME (DLR-GEFÖRDERT)

#### 6.1. Werkstoff AA 2219 T8

Aus Gründen der Minimierung der Entwicklungs-Kosten und -Risiken wird vom Kunden derzeit der bewährte Werkstoff AA 2219 im höchstfesten Zustand T8 vorgegeben. Zum Zweck der Massenreduktion stehen je nach Anforderung prinzipiell Werkstoffe mit höherer Festigkeit bzw. Steifigkeit zur Verfügung. Diese Werkstoffe sind jedoch bei erheblicher Leistungssteigerung legierungsbedingt nicht mehr umstandslos schmelzschweißbar. Hier bietet sich das Rührreibschweißverfahren für das Fügen der Tankelemente (Bild 6) als ideale Alternative an.

#### 6.2. Rührreibschweißen

##### 6.2.1. Stand der Technik beim Lichtbogen-Schweißen

Das Lichtbogenschweißen von Aluminiumlegierungen ist trotz jahrzehntelanger Entwicklung und Anwendung in Raumfahrt-Leichtbautanks mit den, zumindest in der europäischen Raumfahrt, sehr kleinen Sicherheitsmargen unverändert als äußerst kritischer Prozess zu beurteilen, da typische porenartige Fehler, hervorgerufen durch wasserstoffhaltige Verunreinigungen aller Art über Keimbildung an immer vorhandenen Oxidhäuten und erleichtert durch die sprunghafte Verringerung der Wasserstofflöslichkeit bei der Erstarrung ebenso wie Gaseinschlüsse offenbar nicht gänzlich zu eliminieren sind. Kann man diese Fehler bei ausreichender Größe noch unschwer mit Hilfe der Röntgenprüfung ermitteln, so führen moderne Erkenntnisse aus der Gießereitechnik zu noch kritischerer Betrachtung der Situation, da demnach alle wie auch immer eingebrachten Oxidhäute sogenannte Doppelfilme darstellen, die keine Festigkeit liefern und zudem wegen der geringen Dicke und der vom Grundwerkstoff ununterscheidbaren Röntgendiffraktionen nicht mit Röntgenmitteln zu finden sind [4]. Diese Theorie findet Bestätigung durch vielfältige Erfahrungen bei MT Aerospace. Die dargestellten Phänomene sind auch Ursache der häufig auftretenden Undichtigkeit der Schweißnähte. Befinden sich im Aluminium-Werkstoff weitere nichtmetallische Einschlüsse, etwa Graphit oder Aluminium-Karbid, eingebracht durch versagende Vorrichtungen in der Aluminium-Gießerei, werden weitere Keimbildner für die Wasserstoff-Porenbildung bereitgestellt. Obwohl Gegenmaßnahmen wie Filtrierung der Schmelze sowie Kontrolle des Gehalts an

nichtmetallischen Einschlüssen mit verschiedensten Methoden Stand der Technik sind, wird davon nicht immer Gebrauch gemacht. Während es sogar Hersteller höchstanspruchsvoller Aluminium-Fabrikate gibt, die auf die Filtration verzichten, wird die Nachweisführung über Art und Gehalt nichtmetallischer Einschlüsse gegenüber dem Kunden von der Aluminium-Industrie prinzipiell und durchgängig nicht gewünscht, obwohl die Wirkung mindestens so katastrophal sein kann wie bei Stählen. In der Stahlindustrie hat man sich allerdings seit eh und je auf Beurteilungsmaßstäbe hinsichtlich nichtmetallischer Einschlüsse geeinigt.

Die chemische Zusammensetzung der Standardlegierung AA 2219 für kryogene Treibstofftanks ist derart gewählt, dass Heißrissbildung bei dünnen Querschnitten und geringer Schrumpfbehinderung allenfalls im Endkrater der Schweißnähte bzw. in Reparaturstellen zu befürchten ist. Allerdings wird bei übergroßer Wärmeeinwirkung die Bildung von niedrigschmelzenden Phasen an den Korngrenzen der nahen Wärmeeinflusszone bewirkt, die unter den vorherrschenden schweißbedingten Spannungen zum Aufreißen neigen. Dieses Phänomen tritt bevorzugt bei grobkörnigem Material mit Kornorientierung parallel zur Schweißnaht sowie ungenügender Homogenität der Verteilung der Legierungselemente im Grundwerkstoff auf. Für das Schmiedevormaterial ist aus Qualitätsgründen eine europäische Lieferbasis derzeit nicht gegeben. Es wird jedoch mit hohem Aufwand versucht, den Diffusions- und aufschmelzbedingten Rissen durch werkstofftechnische Maßnahmen unter Neudeinition der seit Jahrzehnten gültigen Werkstoffnorm im europäischen Rahmen zu begegnen, ohne dass ein Erfolg gesichert zu sein scheint. Jedenfalls ist dieses Rissbildungs-Phänomen bei Schweißprozessen zu vermeiden, die eine Minderung des Wärmeeinflusses versprechen. Diese Maßnahme würde auch eine höhere Robustheit gegenüber Schwankungen der Werkstoffqualität erbringen bzw. weitere Anstrengungen der Neudeinition des Werkstoffs erübrigen und europäische Fertigung des Schmiedevormaterials begünstigen. Rührreibschweißen ist in dieser Hinsicht sicherlich der Fügeprozess der Wahl, da damit sowohl die Streckenenergie als auch die schweißbedingten Spannungen minimiert zu werden vermögen und Flüssigphasen gänzlich vermieden werden können.

Diesen Spannungen ist zum Zweck der Verzugs-Kontrolle bzw. -Minderung nach Lichtbogenschweißen bereits bei der Bauteildefinition, Prozessgestaltung und Vorrichtungskonstruktion Rechnung zu tragen, ohne dass dafür einfache Regeln verfügbar wären. Letztlich bleibt es der Anwendung des Prinzips von Versuch und Irrtum überantwortet, das tolerierbare Maß an Verzug zu realisieren. Die Vielfalt verfügbarer Methoden der Verzugsminderung beim Schweißen und/oder danach spricht in dieser Hinsicht Bände.

## 6.2.2. Stand der Technik beim Rührreib-Schweißen [5] [6]

Nach fast zwei Jahrzehnten der Entwicklung des Prozesses, vielerlei seriengerechter Anwendung in der aluminiumverarbeitenden Industrie sowie prominenter Applikation beim Schweißen von Trägerraketentanks aus Aluminium (Delta, Shuttle SLWT, Falcon, H-IIB, ARES

könnte man meinen, dass man sich auch in Europa den äußerst vielversprechenden Prozesses des Rührreibschweißens mit Nachdruck angelegen sein ließe. Leider werden jedoch bis dato unter Verweis auf die erfolgreiche Serienanwendung des WIG-Schweißens von AA 2219 bei der ARIANE 5 zu viele programmatische Risiken einer Einführung gesehen. Es werden deshalb nachfolgend einige technische Diskussionspunkte behandelt, die immer wieder zu Ungunsten des Rührreibschweißverfahrens ins Feld geführt werden. Kosten- und Termin-Betrachtungen werden nicht angestellt, da sich diese als abgeleitete Größen von selbst mit der technischen Klärung erledigen.

## 6.2.3. Prozessgestaltung

Grob umrissen bewegt man sich bei den geplanten Schweißnähten der neuen Oberstufe der ARIANE 5 im Wanddickenbereich von 1 bis 10 mm, wenn man von Sonderfällen absieht (vgl. § 6.4.1.2). Hierfür ist das konventionelle Stift-Schulter-Werkzeug mit Axialkraft-Regelung nicht nur völlig ausreichend, sondern unter dem Gesichtspunkt der Robustheit die Lösung der Wahl. Das durch die Reibungswärme plastifizierte Werkstoffvolumen wird von der Unterlage, dem umgebenden Grundwerkstoff sowie von der Schulter eingeschlossen. Die Axialkraft ist so zu bemessen, dass (bei zu großer Kraft) nicht zu viel plastifiziertes Material aus der Kammer an der Schulter vorbei herausgedrückt wird und (bei zu kleiner Kraft) keine Ungänzen in der Schweißnaht entstehen.

## 6.2.4. Werkzeugwahl

Bei einem Tankdurchmesser von 5,4 m müssen Umfangsnähte von ca. 17 m Länge ohne wesentliche Veränderung der Nahtegenschaften über deren Länge sowie ohne Versagen des Werkzeugs industriell gefertigt werden können. Dies ist mit dem Stift-Schulter-Werkzeug gewährleistet. Dabei verbleibt an in sich geschlossenen Schweißnähten ein Endloch, das mit anderen Mitteln beseitigt werden muss. Der Hinweis auf Werkzeuge mit zurückziehbarem Stift als Lösung dafür kann nicht überzeugen, da die Funktion des komplexen Rückzugsmechanismus erst am Ende des langen Schweißweges abgerufen wird, dann aber sicher funktionieren muss. Es kommt hinzu, dass Verfahren verfügbar sein müssen, um Fehler, auch am Ende der Schweißnaht, reparieren zu können. Diese Funktionalität kann mit der Lochschließfunktion kombiniert werden. Derzeit wird bevorzugt an die Applikation des Friction Spot Welding gedacht, ohne dass manuelles WIG-Schweißen (allerdings nur bei AA 2219) oder Friction Plug Welding als Alternativen vergessen werden.

Es ist in diesem Zusammenhang zu erwähnen, dass exotische Werkzeugkonzepte patentiert sind und die meisten ITAR unterliegen.

## 6.2.5. Vorrichtungen

Es wird häufig ins Feld geführt, dass man beim Rührreibschweißen im Gegensatz zu den bekannten Lichtbogenschweißverfahren mit sehr viel höheren Prozesskräften zu rechnen habe und dass mithin sehr viel höherer Aufwand bei Konzeption und Bau von Spannvorrichtungen getrieben werden müsse. Diese

Vorstellung bezieht sich auf den eigentlichen Schweißprozess und es ist auch gar nicht zu bestreiten, dass die Elektronen des Lichtbogenschweißprozesses verglichen mit der axial drückenden Rührrebschweiß-Schulter eine vernachlässigbare Kraft ausüben. Der in Vorschubrichtung wirkenden Kraft, hervorgerufen durch das sich ins Material hineinschiebende Werkzeug, muss beim Rührrebschweißen ebenso Rechnung getragen werden wie der Querkraft (diese Kräfte wirken im Gegensatz zur Werkzeugaxialkraft in der Schweißebene). Zumindest bei der Querkraft gibt es ähnlich wirkende Effekte wie beim Schmelzschweißen, da die Wärmeausdehnung unter der Wirkung der Schweißwärme die zu verschweißenden Teile ganz unabhängig von der Schweißprozesswahl auseinanderzutreiben trachtet. Deutlich geringere Wärmeeinbringung beim Rührrebschweißen (ca. 1/3 der Wärmeeinbringung bei WIG) sowie additiv die materialverdrängende Wirkung des Werkzeugs wird keine wesentlich unterschiedlichen Querkräfte im Vergleich zum WIG-Schweißen bewirken.

Allerdings wurden bei bisheriger Betrachtung die bei weitem überwiegenden Kräfte gar nicht diskutiert, die in der Regel die Dimensionierung der Spannvorrichtungen determinieren. Dies sind die Ausrichtekräfte und die Schrumpfkräfte. Während letztere (und mithin auch die zu erwartenden Schweißverzüge) wegen der höheren Streckenenergie beim WIG-Schweißen ca. den dreifachen Wert des nach Rührrebschweißen zu erwartenden Niveaus erreichen können, sind die Ausrichtekräfte gar nicht schweißprozessabhängig. Sie hängen einzig und allein davon ab, welchen linearen und Winkelversatz der Schweißnähte man seitens der Strukturauslegung zulassen will und wie weit man sich diesem Ideal in den vorgelagerten umformenden und spanabhebenden Fertigungsprozessen technologisch anzunähern bereit bzw. in der Lage ist. Jedenfalls stellen die Ausrichtekräfte nach aktuell realisiertem Stand der Technik der Tolerierung der Einzelteile und Schweißnähte bei den ARIANE 5-Tankkomponenten ein ganzzahliges Vielfaches der rührrebschweißbedingten Prozesskräfte dar. Als Ergebnis dieser Betrachtungen ist also festzuhalten, dass das Rührrebschweißen keine höheren Anforderungen an die Spannmittel als das bekannte WIG-Schweißen stellt.

Aus den genannten Gründen erübrigt sich auch die Betrachtung von komplexen und nicht gerade als robust zu bezeichnenden Sonderwerkzeugen wie etwa Gegenschulterwerkzeugen, die ohne ausreichende Spannmittel den genannten Geometrie-Anforderungen auch nicht zu genügen vermögen. Prozesstechnisch gesehen werden diese Werkzeuge erst dann interessant, wenn z.B. vorzugsweise werkstofftechnisch getriebene Erfordernisse ausgeglichenen Wärmeflusses eine zweite Schulter vorteilhaft erscheinen lassen.

## 6.2.6. Schweißnahteigenschaften

Rührreibgeschweißte Nähte zeichnen sich durch außergewöhnlich gute mechanische und bruchmechanische Kennwerte sowie, zumindest bei den Tanklegierungen, sehr hohe Spannungsrisskorrosions-Beständigkeit aus. Versatz und Winkelfehler, Eigenspannungen und Verzug sind erheblich geringer als bei WIG-geschweißten Teilen. Im Lichte der vom Kunden

geforderten statistischen Auswertung der mechanischen Kennwerte resultiert aus der geringen Streuung der Kennwerte zusätzlicher Margen-Gewinn. Die sich ergebenden mechanischen Eigenschaften nach Schweißen im Zustand T8 sind nach Feststellungen in MT Aerospace höchst unempfindlich gegenüber Parameter-Variation.

Aluminium-Legierungen, die gemeinhin als nicht schmelzschweißbar gelten und solche mit besonderen Eigenschaften bieten nach allgemeiner und eigener Erkenntnis der Anwendung des Rührrebschweißens kein Hindernis dar. Daraus ergibt sich die Möglichkeit, Legierungen mit sehr hohem Li-Gehalt, die entsprechend hohen E-Modul bei verringelter Dichte aufweisen, sowie Mischverbindungen mit AA 2219 zu schweißen.

## 6.2.7. Skirts

Die Schürzen stellen Schubstrukturen im Anschluss an die Y-Ringe aus AA 2219 dar, die keine Treibstoffvolumina umschließen und bei denen nur geringe Festigkeits-Eigenschaften gefordert werden, weshalb man diese Ringe bei MT Aerospace in der Vergangenheit auch aus gebogenen und EB-geschweißten Segmenten gefertigt hat. Durch die Umform- und Schweißoperationen bedingte Eigenspannungen ließen es jedoch geraten erscheinen, zur Einhaltung sehr anspruchsvoller Toleranzen zu nahtlosen Ringen zurückzukehren. Unter dem Zwang zur Massenreduktion wäre es allerdings erwägenswert, diesen Ansatz mit Legierungen hohen Li-Gehalts mit entsprechend hoher spezifischer Steifigkeit unter Anwendung des Rührrebschweißens erneut zu prüfen. Die Verbindung mit den Y-Ringen ebenfalls mittels Rührrebschweißen zu realisieren würde wertvolle Serienerfahrung mit diesem Fügeverfahren liefern und, wegen des verringerten Verzugs, komplexe Shim-Operationen auf Stufenebene erübrigen. Die entsprechende Schweißmaschine würde zudem derart zu gestalten sein, dass die Ebenheit der Integrationsflansche nötigenfalls durch eine letzte spanabhebende Bearbeitung zu gewährleisten wäre, die für die Schweißnaht-Vorbereitung sowieso vorausgesetzt ist.

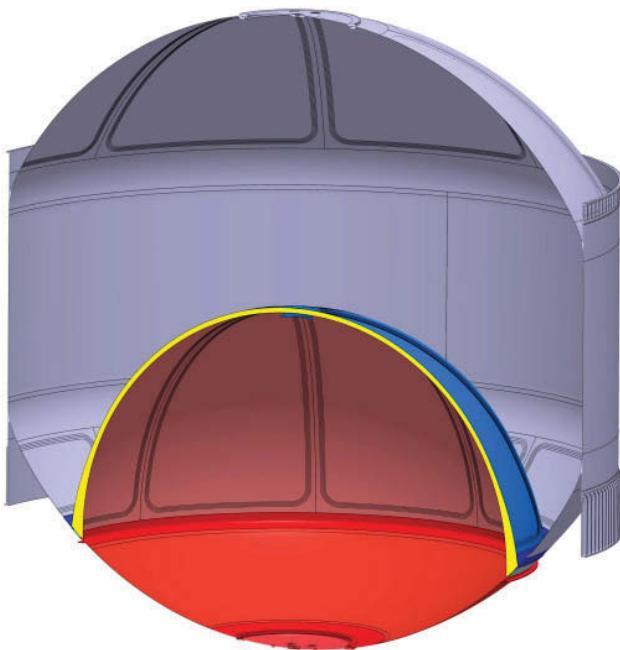


BILD 6. Geplantes Oberstufentankdesign für ARIANE 5 ME mit den Volumina für LH<sub>2</sub> (blau) und LOX (rot)

### 6.2.8. Potentielle Fehler

Die Vermeidung der flüssigen Phase beim Schweißen bringt alle Fehler zum Verschwinden, die den Aluminium-Schweißer ohne Unterlass beschäftigen, vgl. § 6.2.1. Allerdings erscheinen beim Rührreibschweißen neuartige Fehler, die durch geeignete Maßnahmen vermieden werden müssen. Prinzipiell sind diese Fehler durch geeignete Wahl der Schweißparameter zu unterdrücken. Die wesentlichen Einflussgrößen bei vorgegebenem Grundwerkstoff, Wärmebehandlungs-Zustand und Querschnitt sowie definierter Werkzeuggeometrie sind Drehzahl, Vorschub-Geschwindigkeit und Axialkraft des Werkzeugs. Durch die Überprüfung der Unempfindlichkeit gegenüber Parameter-Variation innerhalb von sog. Arbeitsfeldern wird Fehlerfreiheit sichergestellt.

### 6.2.9. Damage Tolerance

Bei AA2195 T8X konnte im Rahmen eines ESA-TRP-Programms [2][3] festgestellt werden, dass selbst im nahezu höchstfest wärmebehandelten Werkstoff für Grundwerkstoff und Rührreibschweißnähte die in der Literatur veröffentlichten Ergebnisse bezüglich Ermüdungsfestigkeit, Rissfortschritt und Bruchzähigkeit bei Oberflächenrissen zumindest bestätigt werden. Exzellentes Schadenstoleranz-Verhalten kann für die Auslegung zugrundegelegt werden.

### 6.2.10. Zerstörungsfreie Prüfung

Während die zerstörungsfreie Prüfung bei voluminösen Fehlern auf das bewährte Röntgen-Verfahren zurückgreifen kann, sind flächige, insbesondere auch innere Fehler nach Rührreibschweißen nur mit weiterentwickelten Prüfverfahren [7] zu finden (auf die hohe Reproduzierbarkeit fehlerfreier Nähte nach

sorgfältiger Parameter-Selektion wurde in § 6.2.8 hingewiesen). Das Vorkommen Rührreibschweiß-typischer flächiger Fehler stellt nach Überzeugung des Verfassers keinen Nachteil des Rührreibschweiß-Verfahrens gegenüber dem WIG-Schweißen dar, da auch WIG-Schweißen zu flächigen inneren Fehlern führen kann. Der aktuell geübte Verzicht auf eine Prüfung auf innere flächige Fehler bei den ARIANE 5-Tankschweißnähten mag sich allzu optimistischer Beurteilung in der Vergangenheit oder nahegelegten Kostenerwägungen verdanken – nach schweißtechnologischen Maßstäben ist er nicht gerechtfertigt, wie bereits in § 6.2.1 ausführlich erläutert wurde.

### 6.3. Konkaves Drücken

Das konkave Drücken bietet neben den bereits erwähnten Vorteilen des flexiblen, endformgerechten Verfahrens und der Erreichbarkeit des hochfesten und schadenstoleranten Zustandes T8 selbst im Bereich umgeformter Schweißnähte weitere nützliche Besonderheiten. Dazu zählen die durch das Kaltrecken bewirkte Eigenspannungsarmut und Formtreue, die Prinzipiell bedingt geringe Versagens-Neigung bei der Umformung sowie die Möglichkeit, im Verhältnis zum Durchmesser sehr geringe Wanddicken zu realisieren. Bei sehr großen Domen, wie sie in heutigen Trägerraketentanks vorliegen, spielt sicherlich auch die durch das Verfahren gegebene Möglichkeit der Reduktion der Teilezahl und Schweißnähte in wirtschaftlicher Hinsicht eine Rolle, vom Wegfall diverser, komplexer Vorrichtungen gar nicht zu sprechen.



Bild 7. Common Bulkhead mit Schaumisolation (gelb) und Schürze zwischen den Ringen

### 6.4. Common Bulkhead

Der geplante Common Bulkhead soll in ähnlicher Weise wie der aktuelle Inner Dome unter bewusster Verletzung der bei Drucktanks aus Struktureffizienzgründen sinnvollen innendruckstabilisierten Anordnung auch von

der konvexen Seite bedrückt werden können. Darüberhinaus soll er die beiden Treibstoff-Volumina trotz der damit optimalen Tankschachtelung thermisch so isolieren, dass kein übergroßer Abdampfverlust auf der Wasserstoffseite durch Wärmetransport von der Sauerstoffseite her erfolgt. Auch wenn die Verfolgung dieses Grund-Konzepts ein erhebliches Ausmaß an Entwicklung, Serienkosten und Strukturmasse erwarten lässt, sollen nachfolgend die derzeit diskutierten Optionen aus Material- und Fertigungssicht beleuchtet werden.

Zur Sicherstellung ausreichender Wärmeisolation ist Vakuum erforderlich, da selbst die bei den vorherrschenden Temperaturen nicht kondensierten Gase Wasserstoff (der je nach Temperatur allerdings nur bei ausreichend verringertem Druck gasförmig ist) und Helium ausgezeichnete Wärmeleiter sind. Soll die Isolation auch mechanische Kräfte übertragen können, muss sie aus möglichst gering wärmeleitfähigem Werkstoff minimalen Querschnitts bestehen. Schäume und Wabenstrukturen können diese Anforderung wohl erfüllen, zumal die gasförmigen Schaumtreibmittel im kryogenen Temperaturbereich austreten und mithin keinen konvektiven Beitrag zur Wärmeleitung zu leisten vermögen (Bild7).

#### 6.4.1. Optionen

Derzeit werden bei MT Aerospace verschiedene Varianten des Common Bulkhead untersucht, die sich deutlich bezüglich der Masse und umgekehrt proportional dazu hinsichtlich des Entwicklungsaufwands unterscheiden.

##### 6.4.1.1. Vakuum-Isolation

Ausgangspunkt für die übersichtlichste, aber schwerste Variante ist der heutige Inner Dome der ARIANE 5 in Orthogrid-Bauweise (vgl. Bild 8), der um eine dünnwandige Schale auf der LOX-Seite ergänzt wird. Diese Schale soll den LOX-Tank-Druck aufnehmen und auf dieser Seite den Vakuumraum begrenzen (vgl. § 6.4.2.1).

##### 6.4.1.2. „Nasse“ Isolation

Unter Verzicht auf diese dünne Schale ist in einer zweiten Variante der Orthogrid-Dom auf der LH<sub>2</sub>-Seite zu isolieren. Zur Isolationseffizienz dieser sog. „nassen“ Isolation vgl. §§ 6.4 und 6.4.2.3. Im Unterschied zur heutigen ECA-Applikation steht dieser Dom im Betrieb nicht mehr nur unter Druckspannung, sondern unterliegt Zugspannung, was die bisher erreichten EB-Schweißnahteigenschaften des Doms (mithin typische Schweißfehler und die zugehörige zerstörungsfreie Prüfung ebenso wie die erreichte Bruchdehnung, aber auch die Festigkeit nicht nur im Nominalnahtbereich, sondern auch an Reparaturstellen) in neuem Licht erscheinen lässt. Die Schweiß-Reparatur an solcherart Domen ist Prinzip-bedingt dramatisch erschwert, da die konstruktiv erwünschte hohe Gestaltsteifigkeit der Schale den Schweißschumpf auf den engeren Schweißbereich einschränkt und mithin heftige Heißrissbildung provoziert. Die hohe vierstellige Anzahl der Orthogrid-Taschen erzwingt zudem extrem hohen Aufwand bei der Rissprüfung.

Übergang von der EB-Schweißung zur Rührreib-Schweißung würde die Fehlerproblematik sowohl im Nominal- wie auch im Reparaturfall entschärfen. Die gesicherte industrielle Verschweißung von 70 mm dicken Platten ist jedoch noch nicht nachgewiesen.



Bild 8. Schweißvorrichtung für den ARIANE 5 ECA Inner Dome

Es kommt hinzu, dass der mit der bisherigen Fertigungsweise erreichbare Zustand T62 unter Zugspannung nicht optimal struktureffizient ist. Alternativ kann daran gedacht werden, den Dom aus umgeformten Segmenten im Zustand T3 oder T8 durch Rührreibschweißen zu fügen. Dabei könnte die Nahtdicke je nach Fertigungsablauf (spanabhebende Bearbeitung vor oder nach dem Schweißen) gegenüber dem aktuellen Ablauf mehr oder weniger drastisch verringert werden. Schweißen im Zustand T3 und nachfolgendes Aushärten auf den Zustand T8 würde einen gewissen Abbau der Schweißeigenspannungen ebenso gestatten wie eine Erhöhung der Festigkeit im Schweißnahtbereich.

##### 6.4.1.3. Sandwich-Dome

Diese dritte Variante zeichnet sich dadurch aus, dass Stabilität und Festigkeit durch eine Sandwich-Konstruktion gewährleistet werden sollen, bei der zwei dünne Domschalen mit der dazwischen liegenden Schaum- oder Waben-Isolation mechanisch stabil verklebt werden [8]. Diese Variante weist theoretisch die bei weitem höchste Struktureffizienz auf. Allerdings befindet sich eine Reihe von Fragen noch in Entwicklung, die sich um ausreichende Schaumfestigkeit unter statistischer Absicherung, gesichertes Fügen von Schaum und Schalen unter Berücksichtigung der vorherrschenden

mechanischen und thermischen Belastungen, Reparaturverfahren sowie den Nachweis der Eignung spezifischer zerstörungsfreier Prüfverfahren drehen. Alternativ werden Lösungen unter Verwendung von Waben untersucht.

#### 6.4.2. Technologien

##### 6.4.2.1. Herstellung dünner Schalen

Bei unversteiften Schalen sowie speziell bei den Sandwich-Schalen wird eine möglichst dünne Wand mit einer Dicke von bis zu minimal ca. 1 mm angestrebt, um Masse zu sparen. Bei der Segmentbauweise (vgl. § 1.1) sollen kugelgestrahlte Elemente analog zum heutigen Domdesign zur Halbkugel geschweißt werden. Der bei derart dünnem Querschnitt zu erwartende Verzug nach WIG-Schweißen könnte eine industriell praktikable Walzeinrichtung nötig machen, die den Schweißschrumpf ähnlich wie bei heute praktizierten Hämmer-Operationen rückgängig machen und auch die mechanischen Eigenschaften der Schweißnaht verbessern würde. Die für eine derartige Lösung erforderliche Investition wäre sicherlich nicht geringer zu veranschlagen als die für eine Applikation des Rührreibschweißprozesses, die von vornherein eine wesentliche Reduktion der schweißbedingten Verzüge ohne Nachwalzen gestatten würde. Die für die genannten Meridian-Schweißoperationen erforderlichen aufwendigen Spannvorrichtungen könnten bei Rückgriff auf den konkaven Drückprozess wegfallen, da die Drückeinrichtungen flexibel einsetzbar sind. Auch Kugelstrahlumform- und Spannungsrelaxations-Aushärtungs- und Kalibrier-Vorrichtungen für Segmente wären dann überflüssig.

##### 6.4.2.2. Wärmebrücken

Auf welche Weise auch immer der Common Dome die beiden Treibstoffvolumina letztlich thermisch voneinander trennen mag, eine direkte Lastübertragung über die den Gesamtank umschließende Haut und mithin zwischen den beiden Dom-Basisringen ist erforderlich. Um den damit ermöglichten Wärmefluss zwischen den Ringen und somit Wärmetransport vom LOX- zum LH<sub>2</sub>-Kompartiment zu minimieren, wird an eine Verbindungsschürze aus gering wärmeleitfähigem, hochfestem bzw. hochsteifem Werkstoff gedacht, der aus diesem Grund sehr dünn und mithin mit geringem wärmeleitendem Querschnitt ausgeführt zu werden vermag. Aushärtbare austenitische Chrom-Nickel-Stähle wie etwa die Legierung A 286 erfüllen daneben auch die Forderung nach Kryotauglichkeit sowie nach einem möglichst hohen, dem von Aluminium angenähert entsprechenden Wärmeausdehnungskoeffizienten zur Minimierung von Wärmespannungen [8]. Eine Alternative zur Schürze bestünde in einer aufwendigen Innenisolation des LH<sub>2</sub>-Kompartiments im Bereich des dann ungehinderten Wärmeflusses vom LOX-Tank her.

##### 6.4.2.3. Dichten

Die Isolationswirkung des Common Dome steht und fällt mit der Güte und Aufrechterhaltung des Vakuums in seinem Inneren. Um den Bereich der soeben skizzierten Schürze abzudichten, aber auch für den Fall der

Anwendung einer sog. „nassen“ Isolation steht erneut das Rührreibschweißverfahren als Fügeverfahren zur Verfügung, mit dessen Hilfe dünne und gasdichte Aluminium-Folien auf die umgebende Aluminium-Substruktur hermetisch dicht geschweißt werden können.

## 7. DANKSAGUNG

Die Erarbeitung der dargestellten Ergebnisse wurde mit finanziellen Mitteln aus dem Hause MT Aerospace sowie von DLR, ESA, NASA und Lockheed Martin ermöglicht. Allen Unterstützern wird herzlich gedankt, wobei der wesentliche Beitrag des DLR besonders gewürdigt wird.

Die Darstellung fußt auf vielen Arbeiten von Mitarbeitern des Hauses MT Aerospace. Insbesondere zu nennen sind die Herren M. Windisch, Dr. N. Eigen, Dr. E. Nold, Dr. A. Klett, Dr. J. Hegels, H. Masny, M. Kahnert, M. Mestek.

## 8. SCHRIFTTUM

- [1] A. Klett, J. Hegels, G. Bartesch, U. Glaser, E. Nold, W. Radtke, Spinforming of Friction Stir Welded AA2219 for Ariane 5 Main Stage Tank Bulkheads, DVS-Berichte Band 229, Düsseldorf 2004
- [2] M. Windisch, U. Glaser, G. Sinnema, K.-H. Trautmann, P.M.S.T. de Castro, E. Sattler, Damage Tolerance Characterization of 2195 Base Material and Friction Stir Welds, *11th European Conference on Spacecraft Structures, Materials and Mechanical Testing*, Toulouse, France, 15 - 17 September 2009
- [3] N. Eigen, U. Glaser, G. Sinnema, P.M.G.P. Moreira, J. Schneider and E. Sattler: Microstructure and Properties of AA 2195 Base Material and Friction Stir Welds, *11th European Conference on Spacecraft Structures, Materials and Mechanical Testing*, Toulouse, France, 15 - 17 September 2009
- [4] J. Campbell, *Castings*, 2<sup>nd</sup> ed., Butterworth Heinemann, Oxford 2003
- [5] N. Eigen, M. Kahnert, H. Masny, M. Windisch, W. Radtke, Properties of Friction Stir Welds for Cryogenic Tanks of Space Launchers, 8<sup>th</sup> Int. Friction Stir Welding Symp., Timmendorfer Strand, May 20<sup>th</sup>, 2010
- [6] M. Kahnert, J. Hegels, W. Radtke, M. Mestek, H. Masny, N. Eigen, Use of Friction Stir Welding in the Net-Shape Production of Spinformed Domes for Launcher Systems, 8<sup>th</sup> Int. Friction Stir Welding Symp., Timmendorfer Strand, May 20<sup>th</sup>, 2010
- [7] D.S. Caravaca, C.R. Bird, K.A. Beamish, S.J. Maddox, Correlation of Phased Array Inspection and Fatigue Performance of FSW Joints, 908/2008, The Welding Institute, October 2008
- [8] DE 10 2008 050 404 A1