

# Neuartige leichtbauoptimierte Doppelstockwagenkastens für UK

# Stahl-Bauweise eines

Robert Höhn<sup>1</sup> (M.Sc.), Dipl.-Ing. Gregor Malzacher<sup>1</sup>, Michael Rehermann<sup>1</sup> (M.Sc), Dr.-Ing Jens König<sup>1</sup>, Dipl.-Ing. Uwe Mückenheim<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), <sup>2</sup> Schweißtechnische Lehr- und Versuchsanstalt (SLV)

## 1 Einleitung

Im Rahmen des „Tomorrow's Train Design Today“-Wettbewerbes des Rail Safety and Standards Board (RSSB) entwickelte das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), gemeinsam und im Unterauftrag von Andreas Vogler Studio (AVS), ein Zugkonzept, den AeroLiner 3000, für die HighSpeed2 (HS2)-Strecke in England. Hauptziele sind hierbei die Reduzierung der Kosten, der CO<sub>2</sub> Emissionen und die Erhöhung der Fahrgastkapazität um mindestens 20 % im Vergleich zum aktuellen Stand der Technik sowie die Verbesserung des Komforts. Eine Anforderung war, dass das Zugkonzept die gültigen Normen erfüllt und in der nächsten Zuggeneration realisierbar ist. Weiterhin soll der Zug für das britische Bestandsnetz mit einer eingeschränkten Bezugslinie geeignet sein. Aufgrund des möglichen Einsatzes des Fahrzeuges auf der HS2-Strecke erfolgte die Konzeption auf eine Betriebsgeschwindigkeit von 400km/h. Zur Reduzierung der Life-Cycle-Costs und zur Erhöhung der Fahrgastkapazität wurde eine umfassende Leichtbaustrategie verfolgt.

Aufgrund der beschriebenen Rahmenbedingungen war eine Beteiligung unterschiedlicher Institute und Abteilungen des DLR notwendig, welche die im Projekt Next Generation Train (NGT) erarbeiteten Erkenntnisse einbrachten. Die Partner innerhalb des DLR legten unter anderem das Zugkonzept, den Fahrgastfluss, die Fahr- und Aerodynamik sowie den Antrieb und die Hilfsbetriebe aus. Ein Schwerpunkt lag bei der systematischen Konzeption und Konstruktion des Wagenkastens und Fahrwerks, wobei der Leichtbau von hoher Relevanz war. Das Forschungsfeld Fahrzeugarchitekturen und Leichtbaukonzepte des DLR Instituts für Fahrzeugkonzepte setzte unterschiedliche Leichtbaustrategien unter Berücksichtigung der relevanten Randbedingungen konsequent um. Die zur Erstellung des Zugkonzepts, des Wagenkastens und des Fahrwerks verwendete methodischen Vorgehensweisen basieren auf Forschungsergebnissen des Projekts NGT [1]. Durch eine neuartige Formgebung des Fahrzeugzwischenbodens wird es ermöglicht, einen Doppelstockzug innerhalb des restriktiven britischen PG1-Profiles [2] zu realisieren.

## 2 Designkonzept

Die Entwicklung des AeroLiner3000 als Zugkonzept, welches sowohl ästhetisch als auch technisch überzeugen soll, erforderte eine enge Zusammenarbeit zwischen Designern von AVS und den Ingenieuren des DLR. Während das Design in einem sich ständig im Wandel begriffenen, evolutionären Prozess entwickelt wird, bedingt die technische Umsetzung schon in einem frühen Stadium festgelegte geometrische Randbedingungen. Die Wechselwirkungen zwischen technischen und gestalterischen Gesichtspunkten müssen vom Beginn des Entwicklungsprozesses an beachtet werden, um ein optimales Endergebnis erzielen zu können.

Die äußere Gestaltung des Fahrzeugs erfolgte unter Berücksichtigung aerodynamischer Gesichtspunkte sowie mit der Intention, die Eleganz vergangener Zuggenerationen [3] in einem zeitgemäßen, zukunftsweisenden Design (Abb. 1) wieder aufzugreifen und aufleben zu lassen.



Abb. 1: Außendesign des AeroLiner3000

Die Herausforderung bei der Gestaltung des Innenraumes liegt darin, trotz der beengten Platzverhältnisse einen angenehmen Raum für die Fahrgäste zu gestalten, in dem das Gefühl von Enge nicht entsteht. Große Fensterflächen und die Verwendung heller, warmer Farben lassen den Fahrgastraum weit und offen erscheinen. Basierend auf den Erfahrungen aus der Gestaltung von Flugzeuginnenkabinen entwarf AVS ein Innenraumdesign mit eleganten Linien und ausgewählten Materialien, welche das Außendesign konsequent fortführt. Ausgehend von den Bedürfnissen der Fahrgäste wird mit Ledersitzen in beiden Klassen, einem Sitzabstand von 830 mm, einem niedrigen Lärmpegel sowie einem Beleuchtungskonzept unter Verwendung organischer Leuchtdioden ein temporärer Wohn- und Arbeitsort für die Passagiere geschaffen (Abb. 2).



Abb. 2: Innendesign des AeroLiner3000

### 3 Zugkonzept

Neben einem für möglichst viele Menschen ansprechenden Innen- und Außendesign stand innerhalb des Projekts die technologische Realisierung im Vordergrund. Zur Erreichung der beschriebenen Ziele ist eine optimierte Zugkonzeptgestaltung notwendig. Mithilfe der am DLR entwickelten Methoden zur konstruktionsneutralen Massenabschätzung [4] wird das Leichtbaupotential möglicher Zugkonzepte ermittelt. Dies erfolgt durch Variation der Wagenkastengeometrie sowie der Position und Anzahl der Fahrwerke, bei Berücksichtigung gegebener Randbedingungen, wie z. B. die maximale Wagenkastenlänge. Als Zugkonzept mit dem höchsten Leichtbaupotential wurde ein 200 m langer, doppelstöckiger Gliederzug mit 21 m langen Endwagen und 17 m langen Mittelwagen identifiziert. Die Fahrwerke sind als Einzelrad-Einzelfahrwerke ausgeführt und befinden sich an den Wagenenden. Diese bilden mit dem Fahrwerk des benachbarten Wagens ein virtuelles Jakobs-Drehgestell (Abb. 3). Dieses Zugkonzept ermöglicht die Erhöhung der Fahrgastkapazität im Vergleich zu aktuellen britischen Intercity-Triebzügen um ca. 30 % trotz der deutlich niedrigeren Fahrzeughöhe gegenüber Doppelstockwagen auf dem Festland [5].

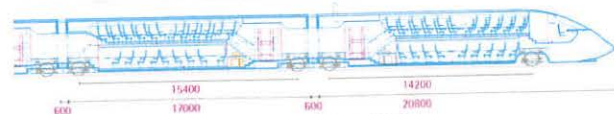


Abb. 3: Zugkonzept des AeroLiner3000

Ausgehend von dem Zugkonzept mit dem größten Leichtbaupotenzial werden die Abmessungen des Wagenkastens für die folgenden Schritte herausgegriffen. Die geometrische Dimension des Wagenkastens ist so gestaltet, dass diese die vorgegebene Bezugslinie in jeder regulären Betriebsituation einhält.

### 4 Topologieoptimierung des Wagenkastens

Auf Basis der geometrischen Dimensionen des Wagenkastens, wird eine Wagenkastenhülle generiert. In dieser sind Aussparungen für die Bauräume des Fahrwerks und der Türen vorgesehen. Die Aussparungen für Fenster werden im ersten Schritt nicht berücksichtigt. Die Fensterposition und deren Geometrie werden in Anlehnung an das Ergebnis der Topologieoptimierung nachfolgend bestimmt. Die Wagenkastenhülle wird vernetzt und in ein Finite Elemente (FE)-Modell zur Topologieoptimierung überführt. Das auf der FE-Methode basierende Berechnungsprogramm dient der Erstellung einer bionisch wirkenden kraftflussgünstigen Tragstruktur. Diese besteht aus Lastpfaden, die sich in Abhängigkeit von den im Vorfeld definierten Randbedingungen und Anforderungen entsprechend des idealen Kraftflusses ausbilden. Als Randbedingung für die Topologieoptimierung dienen Lastbedingungen aus der DIN EN 12663-1. Zudem werden die maximal zulässigen Durchbiegungen an relevanten Stellen (wie dem Unterboden) und die maximal zulässigen Spannungen vorgegeben.

Während der Topologieoptimierung werden virtuelle relative Werkstoffdichten zwischen null und eins variiert. Lasttragende Elemente der Struktur erhalten eine hohe Dichte (Abb. 4 in Rot sowie Gelb bis Grün dargestellt), marginal tragenden Elementen wird eine geringe Werkstoffdichte zugewiesen (Abb. 4 in Blau dargestellt). So wird eine lastpfadoptimierte Struktur ermittelt, die zur

Erfüllung der gegebenen Randbedingungen so wenig Werkstoffmasse wie möglich erfordert (Abb. 4). Das Ergebnis der Topologieoptimierung dient als Grundlage für die kraftflussgerechte Konstruktion der Wagenkastenstruktur. Die aus der Topologieoptimierung resultierenden Kraftverläufe geben Aufschluss über die prinzipiell günstige Anordnung und Gestaltung der strukturellen Komponenten des Wagenkastens. Für die konstruktive Umsetzung der Tragstruktur sind die Interpretation der Lastpfade und die Ableitung einer realisierbaren Bauweise notwendig.

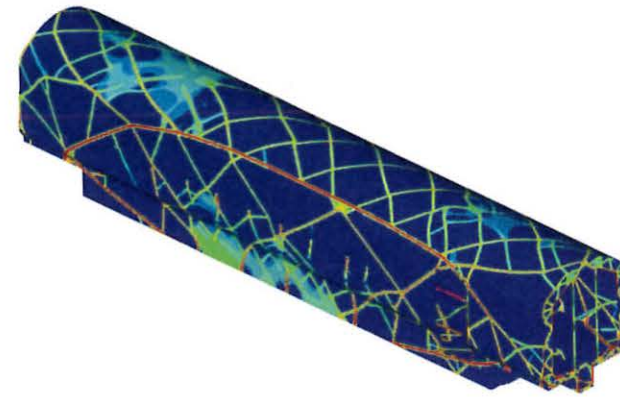


Abb. 4: Ergebnis der Topologieoptimierung

### 5 Wagenkastenkonstruktion

Auf Basis der Topologieoptimierung wird die Konstruktion des Wagenkastens abgeleitet, welche sich an den Kraftverläufen orientiert und die aus dem Designkonzept von AVS resultierende Fensteranordnung ermöglicht. Der Wagenkasten besteht aus acht Modulen und einer mittragenden Beplankung, wobei einige der Module wiederum aus Untermodulen bestehen. Die Konstruktion der Wagenkastenstruktur (Abb. 5) wird aus Profilen und Blechen gefertigt. Diese bestehen aus S700 MC Stahl. Der Unterboden wird als Schweißkonstruktion aus gekröpften I- und Rechteck-Profilen gestaltet. Die Orientierung der Profile entspricht prinzipiell dem Ergebnis der Topologieoptimierung. Um den Leichtbaugrad weiter zu erhöhen, werden dreieckige Ausschnitte in den Stegblechen der I-Profile vorgesehen. Das Modul zur Anbindung der Fahrwerke wird als kraftflussoptimierte Blechkonstruktion ausgeführt. Die Seitenwand besteht, ähnlich der Bauweise des NGT LINK [6], aus diagonalen, den Lastpfaden folgenden dreidimensional gebogenen Rohren mit kreisrundem Querschnitt. Diese werden von longitudinal geteilten Längsträgern umschlossen. Die mittragende Beplankung des Wagenkastens besteht aus Sandwichelementen mit Stahl-Deckschichten und einem Kern aus Kunststoffschäum. Um die Doppelstöckigkeit des Zuges entsprechend dem Designkonzept innerhalb des niedrigen PG-1 Profils zu ermöglichen, ist ein Zwischenboden mit z-förmigem Querschnitt erforderlich.

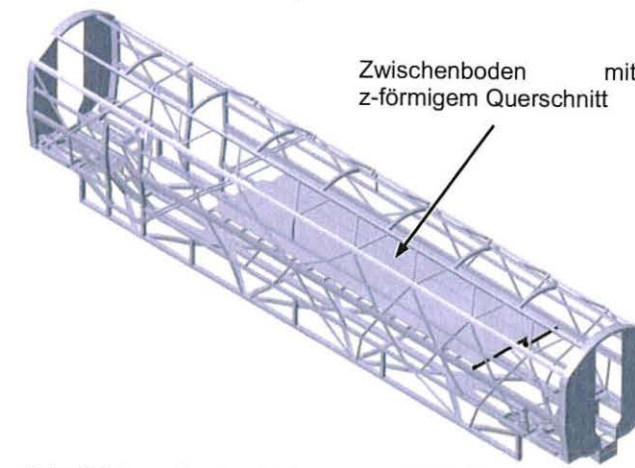


Abb. 5: Wagenkastenstruktur ohne Beplankung

Die Wandstärken der einzelnen Bauteile sind während des Konstruktionsprozesses noch nicht festgelegt. Diese werden in einem weiteren Optimierungsschritt mithilfe einer Wanddickenoptimierung ermittelt. Hierbei werden den ca. 140 unterschiedlichen Komponenten auf Bauteilebene die jeweils ideale Wanddicke derart zugewiesen, dass die resultierende Wagenkastenmasse möglichst gering ist. Zugleich müssen Optimierungsrandbedingungen, wie maximal zulässige Verschiebungen und Spannungen sowie die Lastbedingungen aus der DIN EN 12663-1, eingehalten werden.

Die auf diese Weise optimierte Wagenkastenstruktur weist eine Gesamtmasse von 6,1 t auf. Normiert auf die Wagenkastenlänge, entspricht dies einer spezifischen Masse von 360 kg/m. Die Masse des kompletten Mittelwagens konnte im Vergleich zu einem leichtbauoptimierten Wagenkasten in Aluminium-Integralbauweise [7] um ca. 17 % reduziert werden. Diese Reduzierung konnte durch einen konsequenten methodischen und systematischen Ansatz, unter der gesamtheitlichen Betrachtung des Zugkonzepts, der Topologieoptimierung, der Bauweisenentwicklung, der konstruktiven Ausführung und dessen Optimierung sowie der Werkstoffwahl und der Fertigung erreicht werden.

### 6 Montagekonzept für die Wagenkastenstruktur

Das vorliegende Montagekonzept sieht vor, dass die einzelnen Module unabhängig voneinander gefertigt und im finalen Montageschritt zur fertigen Wagenkastenstruktur gefügt werden. So sollen die Taktzeiten reduziert und die zu Verfügung stehenden Ressourcen optimal eingesetzt werden. Um dieses Ziel zu erreichen, ist es notwendig, dass der Montage- und Fügeprozess einen hohen Grad an Automatisierung aufweist.

Das Modul zur Fahrwerksanbindung ist in drei Untermodule aufgeteilt, in die linke und rechte Fahrwerksanbindung sowie dem Gangbereich (Abb. 6). Der Gangbereich besteht aus gebogenen Rechteck-Profilen in Längsrichtung, welche über x-förmige Bleche miteinander verbunden sind. Des Weiteren ist im Gangbereich die Anbindung für die Zug-Druckstangen des Fahrwerks vorgesehen. Das rechte und linke Modul zur Fahrwerksanbindung besteht jeweils aus zwei Blechen, welche Ausschnitte entsprechend den Ergebnissen der Topologieoptimierung aufweisen und durch Stegbleche miteinander verbunden sind.

Im ersten Fertigungsschritt werden entsprechend den Ergebnissen der Topologieoptimierung Ausschnitte mittels Laserschneidtechnik in das Ober- und Unterblech eingebracht und im Anschluss umgeformt. Die Stegbleche

werden entsprechend den Vorgaben zugeschnitten. Für die Montage der linken bzw. rechten Fahrwerksanbindung werden das Oberblech und das Unterblech über Positionierhilfen (beispielweise durch Nut-Feder-Verbindungen) zu den Stegblechen ausgerichtet und im Anschluss mithilfe eines Roboters verschweißt. Im finalen Arbeitsschritt werden der Gangbereich und die beiden Module zur Fahrwerksanbindung zum kompletten Fahrwerksmodul gefügt.

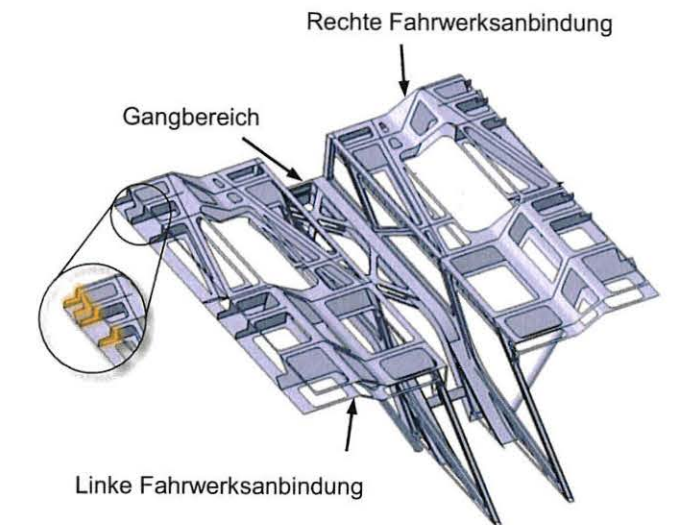


Abb. 6: Modul zur Anbindung des Fahrwerks

Die Montage der Module zur Fahrwerksanbindung mit der restlichen Wagenkastenstruktur (vor allem mit der Seitenwand) soll mit den in Abb. 6 orange markierten Ausschnitten erleichtert werden. Diese Ausschnitte erstrecken sich an der linken sowie rechten Seite über die gesamte Länge des Moduls und nehmen die entsprechenden Längsträger der Seitenwand auf.

Die Seitenwand besteht aus dreidimensional gebogenen Rohren mit kreisrundem Querschnitt und einer Länge von bis zu 6 m, welche von longitudinal geteilten Längsträgern umschlossen werden. Dies ermöglicht darüber hinaus einen Toleranzausgleich, vor allem im Bereich der Rohrenden. Weiterhin werden die umschlossenen Kreuzungspunkte vor Umwelteinflüssen geschützt.

Die dreidimensional gebogenen Rohre weisen variable Radien auf. Dies macht die Fertigung mit konventionellen Biegemaschinen schwierig bis unmöglich. Um den geplanten Biegeverlauf der Rohre zu gewährleisten, soll auf das Freiformbiegen zurückgegriffen werden. Hierbei wird der Biegeverlauf über ein in mehreren Achsen bewegliches, CNC-gesteuertes Werkzeug realisiert. Im Gegensatz zum klassischen Biegeprozess, wo die Biegung durch vordefinierte Biegewerkzeuge erzeugt wird. Dabei sind Biegeverläufe mit verschiedenen Radien nur mit einem vermehrten Werkzeugwechsel realisierbar. Das Freiformbiegen benötigt zur Erzeugung unterschiedlicher Radien in einem Biegeverlauf keinen Werkzeugwechsel. [8, 9]

Die Ausschnitte im Bereich der Kreuzungspunkte und der Positionierhilfen für die Rohre werden mittels eines nachgeschalteten 3-dimensionalen Laserschneidprozess eingebracht.

Die Herstellung der Längsträger erfolgt über das Walzprofilieren. Die vorgesehenen Ausschnitte in den Längsträgern, welche später die Rohre aufnehmen, werden über einen nachgeschalteten CNC-gesteuerten Laserschneidprozess eingebracht.

Die Montage der Seitenwand erfolgt in fünf Schritten (Abb. 7). Zu Beginn werden die inneren Längsträger in die Montagevorrichtung eingelegt. In die zuvor eingebrachten Ausschnitte werden die entsprechenden Rohrprofile eingelegt. Im Bereich der Kreuzungspunkte überlappen zwei Rohrprofile miteinander. Um diese Überlappung zu gewährleisten, sind geeignete Ausschnitte in den Längsträgern und Rohrprofilen vorgesehen. Im anschließenden Schritt werden die Rohre mithilfe eines Schweißprozesses (z. B. ColdArc-Schweißen) an dem innen liegenden Längsträger fixiert. Im Anschluss werden die außenliegenden Längsträger auf den inneren Längsträger gelegt. Beide Längsträger werden an der Trennebene miteinander verschweißt. Im gleichen Arbeitsschritt werden die Rohrprofile mit der Außenseite der Träger verschweißt.

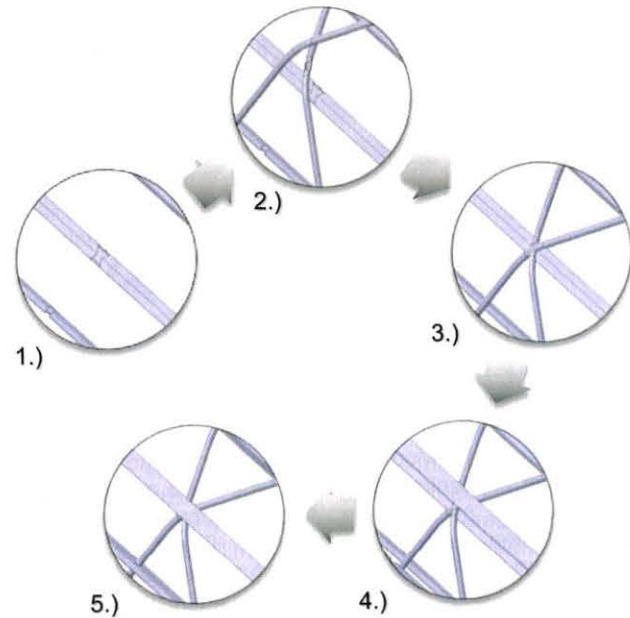


Abb. 7: Montagerihenfolge des Seitenwandfeldes

Die in der Konstruktion vorgesehenen Positionierhilfen sollen den Schweißprozess deutlich vereinfachen und beschleunigen. Fehler während des Montageprozesses können dadurch reduziert werden. Bei den Montage- und Fügeprozessen der Seitenwand, der Fahrwerksmodule sowie der restlichen Wagenkastenstruktur durch Schweißprozesse ist auf Einhaltung der DIN EN 15085 geachtet worden.

## 7 Vom Konzept zum Bauteil

In Zusammenarbeit mit der Schweißtechnischen Lehr- und Versuchsanstalt (SLV) Halle soll ein ausgewähltes Knotenelement der Wagenkastenstruktur gefertigt werden (Abb. 8).

Ziel dieser Zusammenarbeit ist die Darstellung der Machbarkeit und die Umsetzung des vorgestellten Montagekonzeptes am Beispiel der gewählten Knotenstruktur. Darüber hinaus soll die Automatisierbarkeit mittels eines CNC-gesteuerten Schweißroboters insbesondere für Knotenstrukturen gezeigt werden. Zusätzlich werden Aussagen zur Schweißnahtqualität von der SLV Halle getroffen. Weiterhin soll auf Basis einer statischen Versuchsreihe die Wagenkastenauslegung validiert werden.

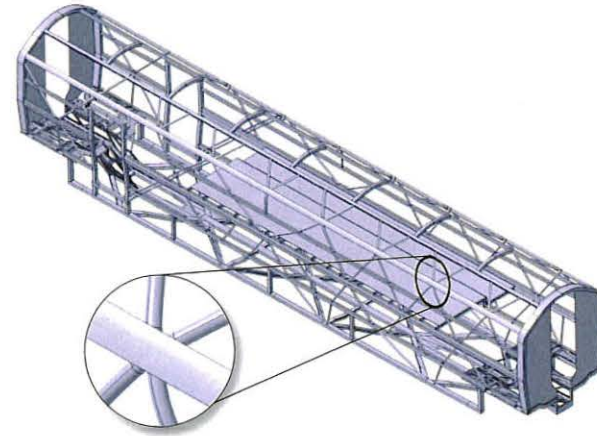


Abb. 8: Ausgewählter Knoten der Wagenkastenstruktur

Die für den Prototyp geeignete fertigungsgerechte Umsetzung der Knotenstruktur und somit des Montagekonzeptes erfordert unterschiedliche geringfügige Anpassungen. Diese beinhalten zum einen konstruktive Modifikationen insbesondere hinsichtlich der Geometrie des inneren Längsträgers sowie die Werkstoffauswahl und der Wanddicke. Bei der konstruktiven Anpassung sind bei den Querschnitten des innen- und außenliegenden Längsträgers ein Teil der gekrümmten Bereiche (Abb. 9 in Grün) ganz bzw. zu einem Teil durch gerade Bereiche (Abb. 9 in Orange) ersetzt worden. Durch diese Maßnahme konnten die Kosten und der Aufwand der prototypischen Bauteile deutlich reduziert werden. Ebenso soll durch diese Maßnahme die Montage sowie der Schweißprozess vereinfacht werden. Der Innenraum wird durch diese konstruktive Anpassung nicht beeinträchtigt.

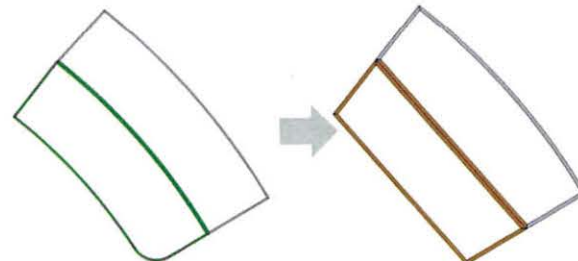


Abb. 9: konstruktive Anpassung der Längsträger der Knotenstruktur. In Grün dargestellt der Ausgangsquerschnitt der Längsträger und in Orange dargestellt der vereinfachte Querschnitt

Der für das Wagenkastenkonzept vorgesehene Werkstoff S700 MC war in den hier notwendigen geringen Mengen nicht möglich zu beziehen. Aus diesem Grund wurde als Werkstoff für die Längsträger auf einen bainitischen Stahl in der Qualität SZBS800 zurückgegriffen. Dieser weist bezüglich Steckgrenze, Bruchdehnung, Kaltumformbarkeit sowie Schweißbarkeit ähnliche Eigenschaften wie der S700 MC auf und wurde für diesen Zweck von der Salzgitter Mannesmann Forschung GmbH zur Verfügung gestellt. Aufgrund des Stahlsortenwechsels wurde die Wandstärke von 1 mm auf 2 mm erhöht.

Da bei der Fertigung des Knotenelements auch die im Wagenkastenkonzept vorgesehenen Fertigungsmethoden berücksichtigt werden sollen, war es auch bei den Rohrprofilen notwendig, einen alternativen Werkstoff sowie eine größere Wanddicke zu verwenden. Als Werkstoff für die Rohrprofile ist auf einen Stahl mit der Güte E355 (nach DIN EN 10305-2+C) und einer Wanddicke von 2 mm zurückgegriffen worden. Die Ausgangswandstärken lagen bei 1 mm bzw. 2,5 mm. Die Wahl des E355 liegt darin

begründet, dass für den vorgesehenen Biegeprozess eine adäquate Genauigkeit für Rohre vorliegen muss. Die benötigte Genauigkeit kann aber für Rohrprofile aus SZBS800 nicht ohne vertretbaren Mehraufwand realisiert werden.

Die beschriebenen Ausschnitte innerhalb der Rohrprofile und den Längsträgern im Bereich der Knoten werden mittels eines 3-dimensionalen Laserschneidprozesses realisiert. Dies hat den positiven Nebeneffekt, dass die Kosten für die Fertigung reduziert werden können.

Die gefertigten Einzelteile der vorgestellten Knotenstruktur werden mithilfe einer entsprechenden Positionierhilfe positioniert und mittels Schweißen gefügt (Abb. 10). Hierbei sollte die angestrebte Schweißspaltbreite zwischen den einzelnen Bauteilen nicht mehr als 1 mm betragen. Dies erfordert eine hinreichende Genauigkeit von den Fertigungsprozessen. Für die mittels Freiformbiegen gebogenen Rohrprofile kann beispielsweise eine Genauigkeit von  $\pm 0,5$  mm erzielt werden.

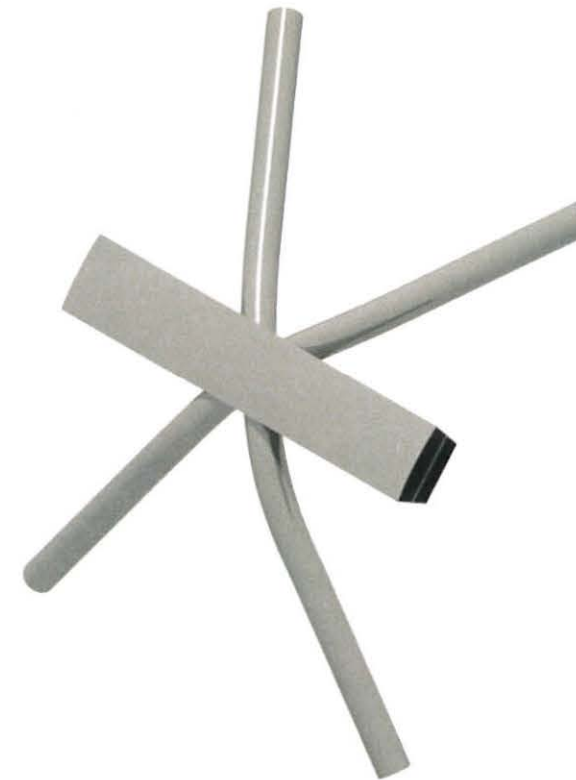


Abb. 10: Darstellung der zu fertigenden Knotenstruktur

## 8 Schweißtechnische Umsetzung

In Bezug auf die Montagerihenfolge (Abb. 7) ergeben sich 3 Arbeitsschritte für die schweißtechnische Umsetzung an den Versuchsknoten. Im ersten Schritt erfolgt die Schweißverbindung zwischen Rohrprofilen und dem inneren Längsträger. Nachfolgend wird der äußere Längsträger aufgelegt. Wieder ergeben sich auszuführende Verbindungen zwischen Rohrprofilen und äußerem Längsträger. Abschließend ist die Verbindung der Längsträger zueinander auszuführen.

In Bezug auf die Festigkeiten der Grundwerkstoffe von Rohrprofil und Längsträger ist vorerst folgender Zusatzwerkstoff ausgewählt worden:

DIN EN ISO 14341-A-G 3Si1;  $\varnothing 1,0 / 1,2$  mm

Da die Längsträger höhere Festigkeiten wie die Rohrprofile aufweisen ist z.B. auch ein Zusatzwerkstoff nach Bezeichnung DIN EN ISO 16834-A-G Mn4Ni2CrMo denkbar. Als Schutzgas wird ein Mischgas der Klasse M21 verwendet.

Im ersten Schritt müssen für die vorliegenden Stoßarten geeignete Schweißprozessparameter ermittelt werden, um die angestrebten Nahtqualitäten zu erfüllen. Aufgrund der begrenzten Versuchsknoten erfolgt dies teilmechanisch mit einer typgleichen Stromquelle wie sie am CNC-gesteuerten Schweißroboter eingebunden ist. Die hierbei verwendete Inverterstromquelle der Fa. EWM bietet eine breite Auswahl an verschiedenen Prozessvarianten bzw. Lichtbogenarten. Dies ist hierbei nicht unwichtig, da der Wärmeinput bei den Wandstärken von 2 mm begrenzt bzw. berücksichtigt werden muss.

Parallel zur Ermittlung der schweißtechnischen Prozessparameter erfolgt die Programmierung der Schweißnahtverläufe des CNC-gesteuerten Schweißroboters. Für die Bauteilaufnahme wird ein Dreh-Kipp-Positionierer verwendet, welcher in die CNC-Steuerung des Arbeitsplatzes integriert ist. Somit kann das Schweißen ggf. in einer günstigen Arbeitsposition, wie PA (Wannenposition), aber auch die Überprüfung der Machbarkeit in Zwangslagen, wie in der realen Fertigung erfolgen (Abb. 11).



Abb. 11: CNC-gesteuerter Schweißroboterarbeitsplatz

Unter Zugrundelegung der ermittelten schweißtechnischen Prozessparameter erfolgt die Erprobung bzw. Durchführung einer automatisierten Herstellung der Versuchsknoten in ausgewählten Arbeitspositionen. Neben einer optischen Bewertung der Schweißergebnisse werden an festgelegten Stellen Schliffe für makroskopische Werkstoffuntersuchungen entnommen um mögliche innere Unregelmäßigkeiten und die Anbindung der Bauteile zueinander zu beurteilen.

## 9 Zusammenfassung und folgende Schritte

Die im Rahmen des „Tomorrow's Train Design Today“ – Wettbewerbes der RSSB gesteckten Ziele konnten innerhalb des AeroLiner3000-Projekts realisiert werden. So konnte die Fahrgastkapazität um ca. 30 % gegenüber aktuellen britischen Intercity-Triebzügen gesteigert werden. Darüber hinaus ist es durch einen methodischen und systematischen Ansatz gelungen, die Masse des Wagenkastens mit einer Tragstruktur aus Stahl um ca. 17 % gegenüber einem Wagenkasten in der leichtbauoptimierten Aluminium-Integralbauweise zu senken. Die Wagenkastenstruktur ist aus acht Modulen zusammengesetzt und besteht prinzipiell aus einer Tragstruktur aus Stahl und einer mittragenden Beplankung. Neben dem Leichtbauaspekt wurde bei der Konstruktion auf eine zeitnahe Umsetzbarkeit und die Automatisierbarkeit in der Fertigung geachtet. Die für das Konzept errechnete Radsatzfahrmasse des AeroLiner3000 beträgt 16 t und liegt somit unter der nach der Technischen Spezifikation zur Interoperabilität (TSI) zulässige Radsatzfahrmasse von 17 t. Durch das verwendete PG1-Profil konnte sichergestellt werden, dass der AeroLiner3000 ebenfalls auf den Bestandsstrecken in Großbritannien eingesetzt werden kann. Trotz des dort vorherrschenden relativ kleinen Profils konnte durch große Fenster und helle Farben ein Fahrgastraum geschaffen werden, der dem Fahrgast eine offene und leichte Wirkung bietet.

Durch die gewählten Fertigungs- und Montagekonzepte des Wagenkastens, die auf Technologien basieren, die in gleicher oder ähnlicher Form in anderen Industriezweigen bereits eingesetzt werden, wird eine Umsetzbarkeit in der nächsten Zuggeneration forciert. Dies bezieht sich vor allem auf die Fertigung der dreidimensional gebogenen Rohre der Seitenwand der Wagenkastenstruktur, die mittels Freiformbiegen hergestellt werden.

Derzeit werden entsprechende Bauteile im Bereich eines Knotens gefertigt. Diese werden im Anschluss von der SLV Halle verwendet, um einen automatisierten Schweißprozess zu erstellen und die Bauteile zu fügen. Im Anschluss daran erfolgen die Analyse der Schweißnähte sowie die statischen Untersuchungen zur Validierung der Wagenkastenstruktur.

## 10 Schrifttum

- [1] Winter, J. (Hrsg.): NGT – Next Generation Train, RTR Special, Eurailpress, Hamburg, 2011
- [2] RSSB: Railway Group Standard GE/RT8073 Requirements for the Applications of Standard Vehicles Gauges, Issue 3, 2015
- [3] Kache, M.: Schienenfahrzeug Design-Klassiker, Eisenbahn Ingenieur Kalender, (2016), S. 139-162
- [4] König, J., Friedrich, H., Winter, J. und Schön, M.: Neuartige Leichtbau-Konzepte und Bauweisen für Wagenkästen von Schienenfahrzeugen, ETR Eisenbahntechnische Rundschau, 7/8 (2014), S. 56-61
- [5] Rogers, A. et al.: Development of Class 800/801 High-speed Rolling Stock for UK Intercity Express Programme, Hitachi Review 63, 10 (2014), S. 38-46
- [6] Krüger, D. und Winter, J.: NGT LINK: Ein Zugkonzept für schnelle doppelstöckige Regionalfahrzeuge, ZEVrail 138, 10 (2014), S. 442-449
- [7] Thibedore, T.: Le TGV Duplex: D'une série à une grande famille en évolution constant, La Revue Générale des Chemins de Fer 232, 11 (2013), S. 22-42
- [8] Werner M.: Flexibles Biegen in Hoffmann, H.; Neugebauer, R.; Spur, G.: Handbuch Umformen, Carl Hanser Verlag, München, 2012 S.656f
- [9] N.N.: Neu Freiformbiegen, <http://www.neu-gmbh.de/site/de/produkte/biegen/nissin/cnc-freiform-biegemaschinen.php>, 09.02.2017