

Konstruktion und Entwicklungsmethode des leichtbauoptimierten Next Generation Train Fahrwerks

David Krüger, Christian Gomes Alves, Dr.-Ing. Jens König, Dr.-Ing. Gerhard Kopp, Prof. Dr. Horst E. Friedrich, Stuttgart

1 Einleitung

Im Rahmen des Projekts Next Generation Train (NGT) des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) werden zukunftsweisende Methoden, Technologien und Verfahren für den Schienenverkehr der Zukunft entwickelt. Anhand einer Familie von bisher drei Zugkonzepten (Abbildung 1) werden diese Forschungsaktivitäten gebündelt und demonstriert.

Im Bereich des Güterverkehrs wird der NGT CARGO [1], ein automatisch fahrender Triebwagen-Güterzug, entwickelt; für den Personenverkehr entstehen der NGT LINK [2] als Zubringerzug und der NGT High Speed Train (HST) [3] für den internationalen Fernverkehr. Das NGT HST Konzept ist ein 400 km/h schneller, umfassend leichtbauoptimierter, doppelstöckiger Triebwagenzug der auf mittlere Entfernungen zur Dekarbonisierung des Verkehrssektors beitragen soll.

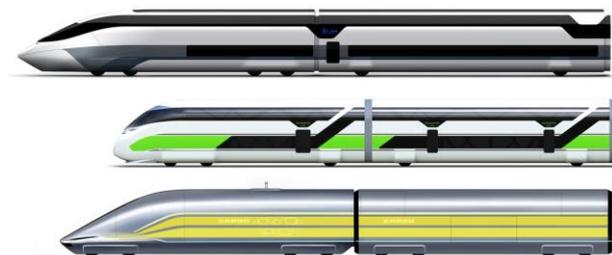


Abbildung 1 – Die Züge der Next Generation Train Familie (v.o.n.u.): NGT HST, NGT LINK und NGT CARGO

Im Zuge des NGT Projekts wird unter anderem ein leichtbauoptimiertes, radial einstellbares, angetriebenes Einzelrad-Einzelfahrwerk (EEF) für die Mittelwagen des NGT HST konzipiert und ausgelegt. Für die Konzeptionierung, Konstruktion und Dimensionierung dieses Fahrwerks wurde eine systematische Methode zur Entwicklung leichtbauoptimierter Fahrwerksstrukturen erstellt und angewandt. Diese Methode stellt einen Prozessablauf dar, mit dem durch die Verkettung unterschiedlicher Werkzeuge und Simulationsschritte Fahrwerkskonzepte mit einem größtmöglichen Leichtbaupotenzial ermittelt werden. Darauf folgend wird das ausgewählte Fahrwerkskonzept in eine fertigungs- sowie leichtbauoptimierte Konstruktion überführt und konstruktiv detailliert. Im Folgenden werden die Ausführung und Funktion, die Leichtbauoptimierung sowie die konstruktive Umsetzung dieses leichtbauoptimierten EEF beschrieben, mit Fokus auf der schweiß- und fertigungsgerechten Gestaltung einer ausgewählten Schweißbaugruppe.

2 Aufgabenstellung

Die übergeordneten Ziele des NGT-Projekts sind den Bahnverkehr der Zukunft schneller, komfortabler und effizienter zu gestalten. Im Rahmen der Forschungsaktivitäten werden zudem pragmatische Anforderungen wie technologische Umsetzbarkeit, Kosten, Robustheit und Fertigung berücksichtigt. Der Einsatz von Leichtbaustrategien ist bei der Umsetzung dieser Ziele ein wichtiger Stellhebel, da infolge einer reduzierten Fahrzeugmasse eine Verringerung des Energiebedarfs bzw. eine erhöhte Zuladung ermöglicht wird.

Das Zugkonzept des NGT HST konnte unter anderem durch den systematischen Einsatz von Leichtbautechnologien mit Einzelfahrwerken für die Mittelwagen ausgeführt werden [4]. Die doppelstöckigen Mittelwagen sind auf beiden Ebenen über die gesamte Länge des Zuges stufenlos begehbar, weswegen konventionelle starre Radsätze auf Grund der erforderlichen Niederflerbauweise im Fahrwerksbereich nicht eingesetzt werden können. Aus diesem Grund werden die Einzelfahrwerke der NGT HST Mittelwagen mit Einzelrädern ausgestattet.

Fahrwerke machen 15% bis 50% der Gesamtmasse eines Fahrzeugs aus [5]. Zudem treten aufgrund hoher Beschleunigungen in unterschiedlichen Raumrichtungen und rotatorischen Bewegungen große Kräfte, Momente und Impulse auf, die den Fahrwerksmassen einer besonderen Bedeutung zukommen lassen. Der Fahrwerksleichtbau ist folglich essenziell, um den Energiebedarf eines Zuges zusammen mit dem Verschleiß, der Oberbaubeschädigung und den Lärmemissionen zu minimieren.

Zusätzlich zu den funktionellen und konzeptionellen Anforderungen kommen diverse Richtlinien und normative Rahmenbedingungen hinzu, wie z.B. die DVS 1612 [6], DIN EN 15663 [7], DIN EN 13103 [8], DIN EN 15085 [9] und DIN EN 13749 [10]. Eine Herausforderung bei der Realisierung des Fahrwerks besteht in der Beachtung dieser Normen und Richtlinien bei gleichzeitiger fertigungsgerechter Umsetzung der komplexen leichtbauoptimierten Fahrwerksarchitektur. Hinzu kommt das innovative Fahrwerkskonzept des NGT HST Fahrwerks, das nicht immer eine direkte Anwendung vorhandener Normen zulässt, da in bestehenden Normen eine derartige Konzeption nicht oder nur sehr eingeschränkt vorgesehen ist und somit im Detail neu betrachtet werden muss. Beispielsweise werden die Kräfte, die auf das Fahrwerk einwirken teilweise den Normen DIN EN 13103 und DIN EN 13749 entnommen. Die Vorgaben aus der DIN EN 13749 basieren allerdings in der Regel auf konventionellen zwei-achsigen Drehgestellen, während die Fahrzeugmasse beim NGT Fahrwerk nicht auf zwei Federn und zwei Achsen pro Fahrwerk verteilt wird, sondern auf vier Federn und einer virtuellen Achse. Grundsätzlich muss bei der Berücksichtigung der Normen beachtet werden, dass das NGT Fahrwerk mit seinen angetriebenen Losrädern in dieser Bauform eine neuartige Lösung

darstellt, welche in den genannten Normen nicht beschrieben oder vorgesehen wird.

3 Aufbau des Fahrwerks

Die EEF der NGT HST Mittelwagen sind mit einer zweistufigen Federung und einzeln mechatronisch angetriebenen Rädern ausgestattet. Die Position der Räder im Spurkanal wird vom mechatronischen Antrieb durch das differenziale Variieren der Motormomente aktiv geregelt [11].

Die zwei Hauptstrukturkomponenten des Fahrwerks sind der Sekundärrahmen, der als Fahrwerksrahmen dient, und der Radträger, in dem die Räder gelagert sind. Der Radträger führt die Räder und überträgt die Rad-/Schiene-Kräfte in die Primärfederung. Der Radträger läuft ungefedert im Gleis. Der Sekundärrahmen ist durch die Primärfederung einfach gefedert und der Wagenkasten durch die Sekundärfederung zweifach gefedert. Die Primärfederung wird von einer piezoelektrisch-adaptiven Glasfaserverbundblattfeder übernommen, während die Sekundärfederung aus vier Luftfederbälgen besteht (Abbildung 2).

Der Radträger wird zusätzlich zur Primärfeder über Lenker mit dem Sekundärrahmen verbunden. Der Radträger führt alle erforderlichen Lenkbewegungen des Fahrwerks aus, in dem er sich um die Hochachse drehen kann. Die Lenker, die den Sekundärrahmen mit dem Radträger verbinden sind schräg angeordnet, sodass die Lenker für kleine Lenkwinkel einen virtuellen Drehpunkt in der Mitte des Fahrwerks bilden.

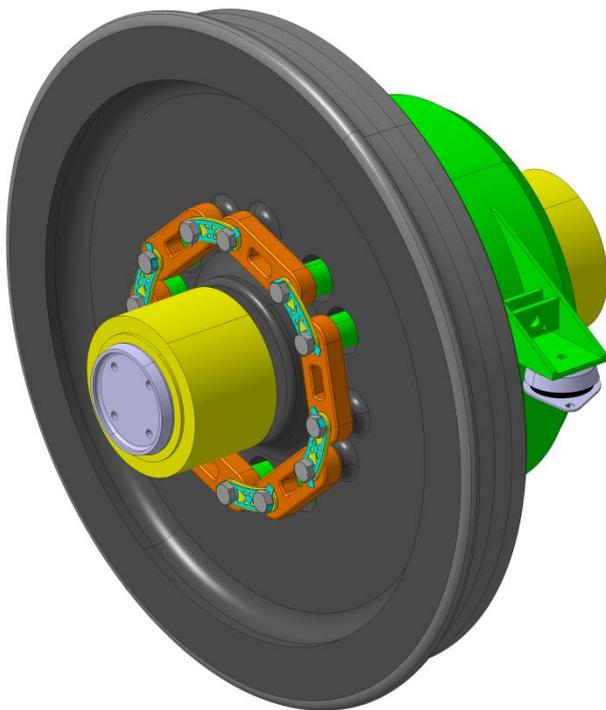


Abbildung 3 – Radbaugruppe mit Motor (grün) und Laschenkupplung (orangefarben)

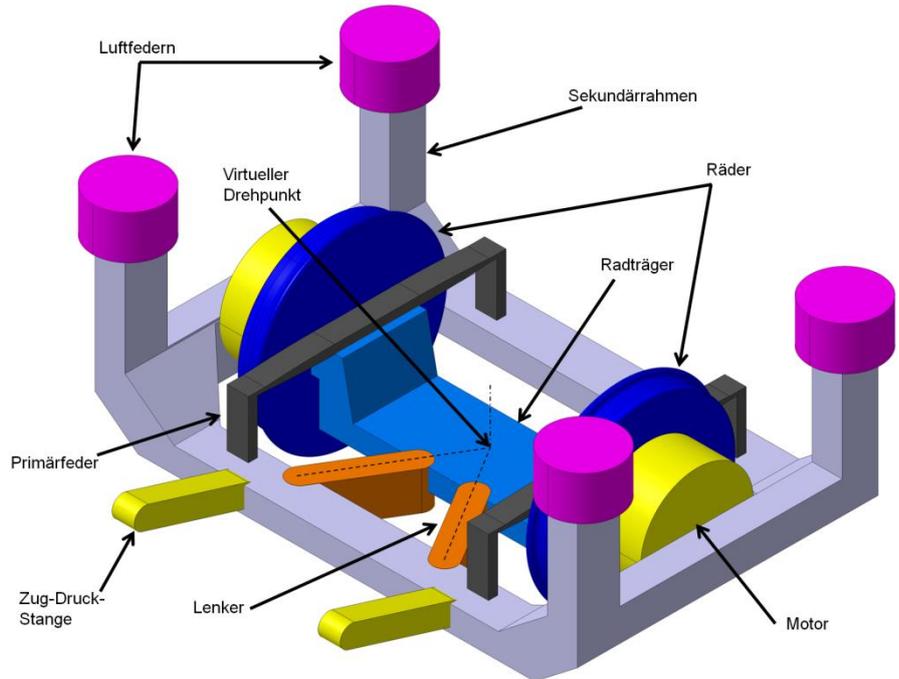


Abbildung 2 – Vereinfachte Prinzip-Darstellung des NGT HST Fahrwerks

Die getriebelosen Direktantriebe stützen sich ebenfalls auf den Radträger ab. Die Motoren besitzen eine Hohlwelle und sind koaxial zur Radwelle angeordnet. Da der Radträger ungefedert im Gleis läuft und die Motoren verhältnismäßig schwere, empfindliche Bauteile sind, werden die Motoren federnd am Radträger befestigt und mit flexiblen Laschenkupplungen mit den Rädern verbunden (Abbildung 3).

4 Systematische Methode zur Entwicklung von leichtbauoptimierten Fahrwerksstrukturen

Um das globale Optimum hinsichtlich Strukturausbildung, Masse und Fahrzeugdynamik für das Fahrwerk des NGT HST bestimmen zu können, wäre nach dem derzeit üblichen Ansatz eine Vielzahl an unterschiedlichen Analysen und Berechnungen notwendig. Diese müssten hinsichtlich dem Packaging und der Gestaltung der Einzelkomponenten optimiert und angepasst werden. Für eine zielgerichtete und effiziente Entwicklung dieses neuartigen, hochbelasteten Fahrwerks ist daher eine systematische Methode zur Entwicklung von leichtbauoptimierten Fahrwerksstrukturen erarbeitet worden, bei der alle Anforderungen hinsichtlich Leichtbau, Funktionserfüllung, Bauraum, Fertigkeitbarkeit und Belastbarkeit erfüllt werden können.

Wie in [12] detailliert beschrieben, wird bei dieser Methode von den Anforderungen und dem verfügbaren Bauraum im Fahrzeug ausgegangen. Hieraus ergeben sich die mechanischen Komponenten, die im Bauraum untergebracht werden müssen (Motoren, Bremsen, Räder, Lenker, Lager usw.). Durch die geometrische Anordnung der Komponenten und den notwendigen Federwegen, sowie den Fahrwerksbewegungen, ergeben sich Rahmenbedingungen für die Bauräume, die für die Strukturen des Fahrwerks (Radträger und Sekundärrahmen) zur Verfügung stehen.

Für die Hauptstrukturkomponenten des Fahrwerks werden kraftflussgerechte optimierte Topologien mittels der Software Altair OptiStruct abgeleitet. Bei diesen Topolo-

gieoptimierungen, die auf der Finiten-Elemente-Methode basieren, werden Kräfte auf das Finite-Elemente-Modell aufgebracht und die Bereiche des Bauteilvolumens ermittelt, die stärker oder schwächer belastet sind. Über mehrere Iterationen wird die Dichte der stärker belasteten Elemente erhöht, damit diese mehr Last tragen, während die Dichte der schwächer belasteten Elemente im Gegenzug reduziert werden. Dieser Vorgang wird wiederholt bis die gesetzten Zielgrößen (z.B. Masseminimum), unter Beachtung der Belastungen und Restriktionen erlangt werden. Abhängig von den eingestellten Parametern ergeben sich entweder diffuse Körper, die zum Vergleich der Massen verschiedener Varianten herangezogen werden oder definierte Strukturen, die als Konstruktionsvorschlag für die kraftflussgerechte Gestaltung der Fahrwerksstrukturen dienen können.

Während der Konzeptionierung des Fahrwerks sind verschiedene Varianten abgeleitet worden, die sich z.B. in der Anordnung der Primärfedern oder Radlager unterscheiden. Durch die Anwendung von Topologieoptimierungen im Zuge der oben beschriebenen Methode können die Massen dieser Varianten miteinander verglichen und die mit dem höchsten Leichtbaupotenzial ermittelt und weiterverfolgt werden. Ebenso werden kraftflussgerechte topologieoptimierte Strukturen für den Radträger und den Sekundärrahmen ermittelt.

Für den Sekundärrahmen und den Radträger müssen die Ergebnisse der Topologieoptimierung interpretiert werden, bevor fertigungsgerechte Bauweisen für diese Komponenten abgeleitet werden können. Im Falle des Radträgers zeigt die Topologieoptimierung insbesondere, dass der Bereich des Niederflurdurchgangs (zwischen den inneren Radlagern) stark belastet ist und dass eine direkte Verbindung der Radlager zueinander und zu den Primärfederauflagen ein Optimum bezüglich Leichtbau und Steifigkeit bietet (Abbildung 4). Dies unterstreicht die Wichtigkeit dieser Lastpfade für die Erreichung der erforderlichen globalen Biegesteifigkeit des Radträgers und muss bei der konstruktiven Ausarbeitung berücksichtigt werden.

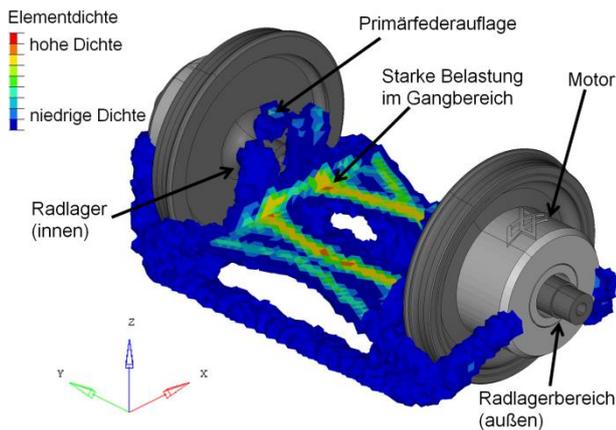


Abbildung 4 – Ergebnis der Topologieoptimierung des Radträgers

Aus diesen Simulationsergebnissen werden im Zuge der Methode Konstruktionsentwürfe für Rahmenstrukturen und Radträger erstellt, die in den weiteren Schritten analysiert und bezüglich Leichtbau und Fertigung optimiert werden. Im Folgenden wird beispielhaft auf die konstruktive Ausführung des Radträgers eingegangen.

5 Die Schweißbaugruppe des Radträgers

Der Radträger wird als geschweißte Stahlblechkonstruktion mit wenigen massiven Stahlguss- bzw. Frästeilen aufgebaut. Als Schweißverfahren werden hauptsächlich Lichtbogenschweißverfahren eingesetzt, wobei auch Laser- und Laserhybridschweißverfahren bei der Fertigung des Radträgers in Betracht gezogen werden.

Die Schweißbaugruppe ist anhand der Topologieoptimierungsergebnisse kraftflussgerecht gestaltet und in Zusammenarbeit mit Experten aus dem Fachbereich des Schweißens bei Schienenfahrzeugen möglichst schweiß- und fertigungsgerecht konstruiert worden.

Fahrwerke gehören zu den Baugruppen mit der höchsten Zertifizierungsstufe CL1 und beinhalten viele Schweißnähte mit hohem Sicherheitsbedürfnis und einem hohen Beanspruchungszustand [9]. Fahrwerkskonstruktionen müssen daher besonders strenge Anforderungen bezüglich Zugänglichkeit und konstruktiver Gestaltung erfüllen. Beispielsweise müssen bei gebogenen Blechteilen, an denen im kaltverfestigten Bereich geschweißt wird, die vorgegebenen Mindestbiegeradien in Abhängigkeit der Blechdicken eingehalten werden. Die Konstruktion des NGT HST Radträgers ist z.B. auf Grund dieser Ausgangssituation so ausgelegt, dass an möglichst wenigen Stellen im kaltverfestigten Bereich geschweißt werden muss.

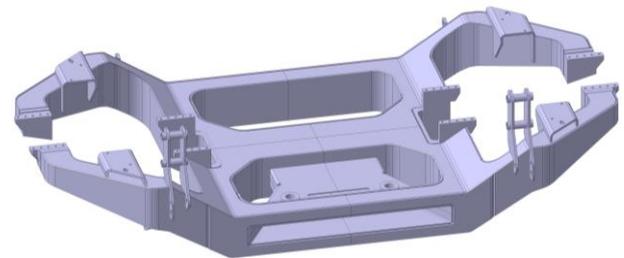


Abbildung 5 – Radträgerschweißbaugruppe

Die größten Kräfte, die auf den Radträger wirken, sind Biegekräfte um die Fahrzeuglängsachse (x-Achse). Um diesen Biegekräften möglichst effektiv standzuhalten wird die Radträgerschweißbaugruppe nach dem Sandwich bzw. Doppel-T-Träger-Prinzip mit einem oberen und einem unteren Deckblech ausgeführt. Diese Bleche sind so weit auseinander angeordnet wie es der verfügbare Bauraum zulässt, um bei minimaler Masse das Flächenträgheitsmoment um die Hauptbiegeachse zu maximieren (Abbildung 6).

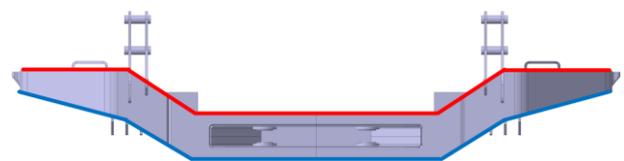


Abbildung 6 – Oberes (rot) und unteres (blau) Deckblech der Radträgerschweißbaugruppe

Die Deckbleche des Radträgers werden durch weitere senkrechte Bleche miteinander verbunden, die als Stege dienen und unter anderem Schubkräfte übertragen. Die gesamte Schweißbaugruppe besteht damit ausschließ-

lich aus geschlossenen Profilen und Querschnitten, wodurch eine (torsions-)steife und feste Struktur für den Radträger entsteht. Korrosion im Inneren wird verhindert, indem die komplette Baugruppe luftdicht geschweißt und außen beschichtet und lackiert wird.

Die weitere Konzeption sieht vor, dass an dieser Schweißbaugruppe vier Lagerschalen für die Wälzlager der Einzelräder an den dafür vorgesehenen Flächen angeschraubt werden (Abbildung 7). Für diese Anschraubflächen werden Stahlteile durch Fräsen bzw. Gießen hergestellt und in die Schweißbaugruppe integriert. Die korrekte Ausrichtung dieser Anschraubflächen bzw. der darauf sitzenden Lagerschalen sind entscheidend für die Funktion des Fahrwerks. Daher werden diese Teile zuerst relativ zueinander positioniert und die restliche Schweißbaugruppe um die weiteren Teile ergänzt.

Diese Montage und Fügereihenfolge hat den entscheidenden Vorteil, dass durch das Vorpositionieren der Anschraubteile Toleranzabweichungen, die durch den Verzug infolge des Schweißens entstehen, minimiert werden. Zusätzlich wird darauf geachtet, dass die Schweißnähte in besonders verzugempfindlichen Bereichen in der Regel symmetrisch zum Schwerpunkt des Profilquerschnitts ausgeführt werden (Abbildung 8).

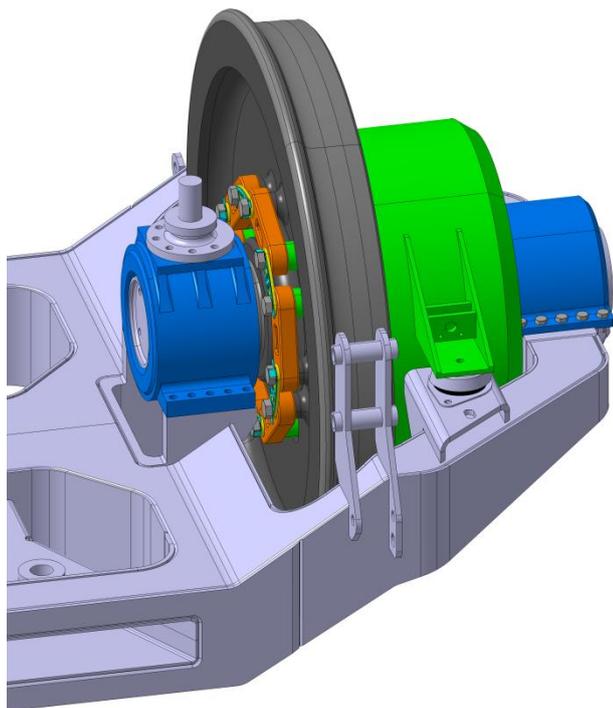


Abbildung 7 – Detailansicht: Radträgerschweißbaugruppe mit Radbaugruppe

Weil sich Schweißverzug nicht vollständig eliminieren lässt, werden des Weiteren an den Anschraubflächen für die Radlager sowie an weiteren Stellen Bearbeitungsaufmaße vorgesehen, um den auftretenden Verzug an diesen wichtigen Stellen zu kompensieren (Abbildung 9). Die Anschraubflächen der Radlager lassen sich in einem Arbeitsgang ohne Umspannen und mit einfacher Zugänglichkeit von oben bearbeiten, um eine ausreichende Positioniergenauigkeit der Räder zueinander zu gewährleisten. Passungen, wie beispielsweise die für die Anbindung der Radträgerlenker, deren Position relativ zu den

Rädern besonders wichtig ist, lassen sich im selben Arbeitsgang herstellen.

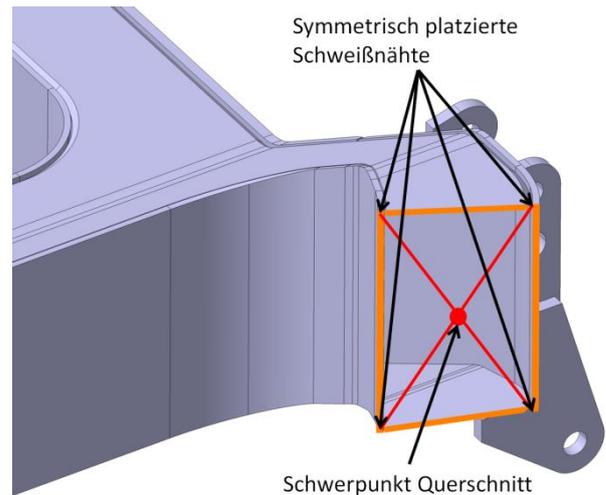


Abbildung 8 – Minimierung des Verzugs durch symmetrisches Schweißen

Die Schweißkonstruktion ist grundsätzlich so ausgelegt, dass fast alle Schweißnähte entweder in einer Wannelage oder leicht steigend geschweißt werden können. Viele Schweißnähte, insbesondere solche, die zur Grundstruktur des Radträgers gehören, haben möglichst gerade Verläufe bzw. einfache Geometrien, die den Konturen CNC-geschnittener Bleche folgen.

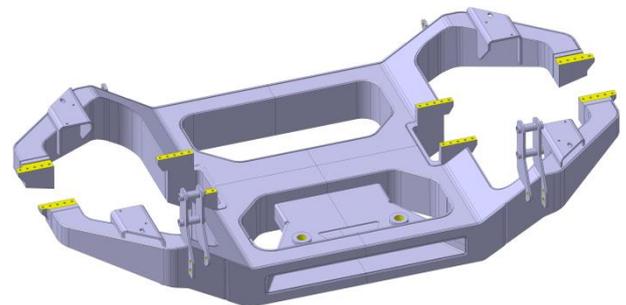


Abbildung 9 – Radträgerschweißbaugruppe mit bearbeiteten Anbindungsflächen (gelb)

Für das Forschungsprojekt NGT werden bei der Entwicklung des EEF insbesondere auch neuartige bzw. hochautomatisierte Schweißverfahren untersucht, um deren Potential für zukünftige Einsatzzwecke bewerten zu können. Hierzu zählen automatisiertes Lichtbogenschweißen, Laserschweißen und, insbesondere an Stellen mit großen Bauteildicken, Laserhybridschweißen. Um die Konstruktion bezüglich der eingesetzten Fügetechnologie möglichst flexibel zu gestalten, ist es wichtig, sie mit Blick auf eine mögliche Automatisierung zu konstruieren. In dieser Hinsicht sind die oben beschriebenen einfachen Geometrien besonders vorteilhaft.

6 Komplettierung der Mechanischen Architektur des NGT Fahrwerks

Unter Beachtung der bisher beschriebenen Anforderungen, Ziele und Vorgehensweisen werden die restlichen Komponenten des Fahrwerks aufgebaut. Hierzu zählen neben den Sekundärrahmen auch Komponenten wie die

Radträgerlenker, Zug-Druckstangen und Stabilisatoren, die verschiedene Kräfte und Momente abstützen, so dass die Funktionsanforderungen des Fahrwerks erfüllt werden.

Für den Sekundärrahmen, wird, wie oben für den Fall des Radträgers beschrieben, eine Bauweise abgeleitet die gleichzeitig die Topologieoptimierungsergebnisse berücksichtigt und den geforderten Funktionen mit möglichst geringem Fertigungsaufwand und hohem Leichtbaugrad umsetzt. Für die räumlich ausgeprägte Struktur des Sekundärrahmens wird ein Hybrid aus einer Gitterrohrbauweise und einer Blech-Gussbauweise angewandt (Abbildung 10). Die Struktur besteht aus Hohlprofilen und Blechen mit Gussknoten die die Krafteinleitungsstellen bilden und die restlichen Bauteile miteinander verbinden. Eine abschließende Optimierung des Sekundärrahmens bezüglich Leichtbau und Fertigungsgerechtigkeit wird im weiteren Verlauf des Projekts durchgeführt.

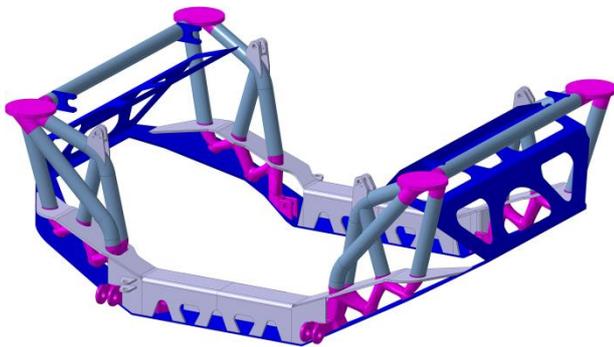


Abbildung 10 – Konstruktion des Sekundärrahmens

7 Zusammenfassung und Ausblick

Die Konstruktion des NGT HST Mittelwagenfahrwerks ist im Zuge der Entwicklung des ultrahochgeschwindigkeits-Personenzugs NGT HST entstanden. Die hier dargestellten Baugruppen sind das Ergebnis der Anwendung einer Entwicklungsmethode, die speziell für die Entwicklung leichtbauoptimierter Fahrwerke und deren lasttragenden Komponenten erstellt wurde. Die Methode beschreibt die Schritte, die für den Aufbau einer gesamtheitlich leichtbauoptimierten Fahrwerkskonstruktion notwendig sind, von der ursprünglichen Bauraumableitung bis hin zur abschließenden Leichtbauoptimierung der detaillierten Konstruktion. Während des Prozesses wurden die Funktions- und Fertigungsanforderungen berücksichtigt. Im Fall des hier beschriebenen Radträgers ist auf die Umsetzung einer kraftflussgerechten Konstruktion anhand der Ergebnisse der Topologieoptimierung geachtet worden, bei gleichzeitiger Berücksichtigung einer möglichst einfachen, schweißgerechten Gestaltung.

In den nächsten Jahren wird ein vollständiger, funktionsfähiger Prototyp im Maßstab 1:1 gefertigt. Als erstes erfolgen die prototypische Fertigung des Radträgers und die finale Detaillierung der restlichen Fahrwerkskomponenten. In den darauffolgenden Schritten wird das NGT Fahrwerk vollständig gefertigt und dann auf Prüfständen und bei Fahrten auf realen Gleisen erprobt. Während des gesamten Prozesses werden die gesammelten Daten und Erfahrungen in das NGT Projekt einfließen, um schließlich dazu beizutragen, die nächste Generation von Zügen schneller, leiser, effizienter und komfortabler zu machen. Das NGT HST Mittelwagenfahrwerk beschreibt

dabei in vielen Bereichen Neuland, sei es bei der mechanischen Regelung des Antriebs, der Topologie der Antriebsmotoren oder bei den leichtbauoptimierten Strukturen der mechanischen Architektur des Fahrwerks.

8 Danksagung

Wir danken den Kollegen der SLV Halle GmbH für den engen Austausch und die sehr gute Kooperation im Bereich der spezifischen Schweißanwendungen für Schienenfahrzeuge.

9 Schrifttum

- [1] Winter, Joachim, Böhm, Mathias, Malzacher, Gregor und Krüger, David. NGT CARGO - Schienengüterverkehr der Zukunft. Internationales Verkehrswesen. 2017, 2.
- [2] Krüger, David und Winter, Joachim. NGT LINK: Ein Zugkonzept für schnelle doppelstöckige Regionalfahrzeuge. ZEVrail. Oktober, 2014, Bd. 138, 10.
- [3] Winter, Joachim et al. NGT - Next Generation Train. Rail Technology Review Special. 2011.
- [4] König, Jens. Dissertation: Neuartige Leichtbaukonzepte und Bauweisen von Schienenfahrzeugen im Hochgeschwindigkeitsverkehr unter besonderer Berücksichtigung des Wagenkastenleichtbaus. Stuttgart : Universität Stuttgart, 2016.
- [5] König, Jens, Winter, Joachim, Kopp, Gundolf und Friedrich, Horst. Konsequente und neuartige Leichtbauansätze bei Schienenfahrzeugen des Personenverkehrs. ZEVrail. 2016, Bd. 140, 10 Oktober.
- [6] DVS1612 Gestaltung und Dauerfestigkeitsbewertung von Schweißverbindungen im Schienenfahrzeugbau. Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2014.
- [7] DIN EN 15663 - Bahnanwendungen - Fahrzeugmassedefinitionen. Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2009.
- [8] DIN EN 13103 - Bahnanwendungen - Laufradsatzwellen - Konstruktions- und Berechnungsrichtlinie. Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2012.
- [9] DIN EN 15085-2 - Bahnanwendungen - Schweißen von Schienenfahrzeugen und -fahrzeugteilen. Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2007.
- [10] DIN EN 13749 - Bahnanwendungen - Radsätze und Drehgestelle - Festlegungsverfahren für Festigkeitsanforderungen an Drehgestellrahmen. Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2011.
- [11] Bernhard, Kurzeck et al. Potenziale aktiv geregelter Losradfahrwerke im Hochgeschwindigkeitsverkehr- Ergebnisse aus dem DLR-Projekt "Next Generation Train". ZEVrail. 2014, Bd. 138, August.
- [12] Krüger, David et al. Next Generation Train Fahrwerk: Eine neuartige Methode für die Leichtbauoptimierung von Schienenfahrzeugfahrwerksstrukturen. ZEVrail. 2017, Bd. 141, Juni-Juli.