

# Next Generation Train

Entwicklung eines Hochgeschwindigkeitszuges für die übernächste Generation

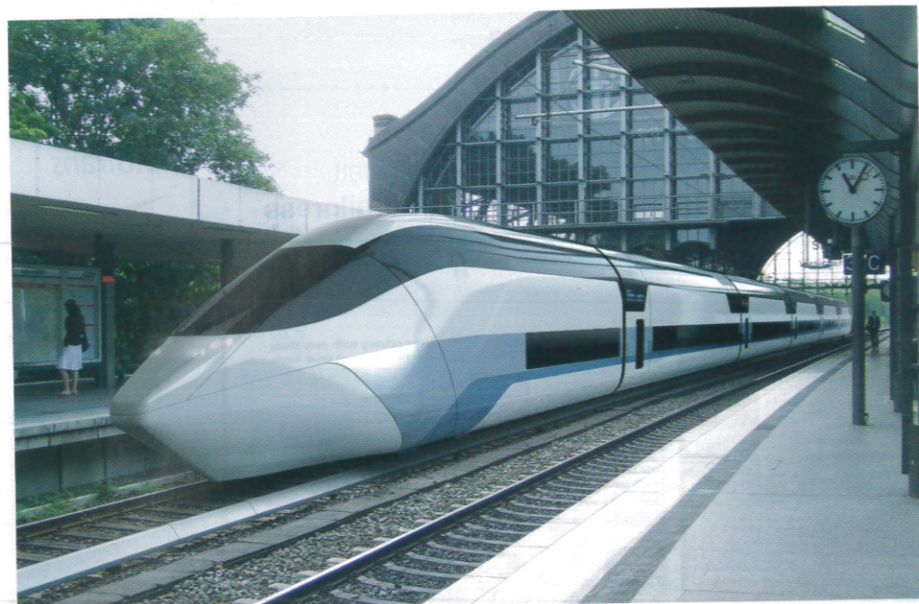


Abb. 1: NGT - Zug der Zukunft in 2035 abfahrtsbereit im Bahnhof Hamburg-Dammtor

Joachim Winter

Seit 2007 arbeiten neun Institute des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) mit 18 Abteilungen an dem Forschungsprojekt „Zug der Zukunft – Next Generation Train – NGT“. Für das Design wurde das Büro iDS Hamburg unterstützend beauftragt. Ein Hauptziel dieses Projektes ist es, der Eisenbahnindustrie die Forschungsergebnisse – auch aus der Luft- und Raumfahrt – zugänglich zu machen, um die Eisenbahn weltweit für die anstehenden Transportaufgaben strategisch zu unterstützen.

## Triebzugkonzept

Für den „Zug der Zukunft“ liegt inzwischen ein vom DLR erstelltes und von einem Schienenfahrzeughersteller geprüftes Lastenheft vor, das die Anforderungen potenzieller Kunden und die vorgeschriebenen europäischen Standards an einen solchen Zug zusammenfasst. In dem zugehörigen

Pflichtenheft beschreibt das DLR seine Konzeptvorstellung von einem möglichen Produkt (Abb. 1).

Im Vordergrund steht eine hohe betriebliche Flexibilität des NGT. Zur Unterstützung einer einfachen Wartung und des Austausches defekter Waggons wird das Einzelwagenprinzip gewählt (Abb. 2). Jeder Waggon ist einzeln rangierbar, was erhebliche Vorteile für die Zugbildung und Wartung hat. Aus acht Mittelwagen und zwei Triebköpfen wird ein über die ganze Länge doppelstöckiger Triebzug zusammengestellt, der 202 m lang ist. Über eine optische Kupplung können mehrere Triebzüge gekuppelt werden.

Die betriebliche Flexibilität wird weiter durch die Möglichkeit gesteigert, dynamisch zu flügeln, d.h., dass die Triebzüge während der Fahrt optisch kuppeln oder entkuppeln können. Nach der Einführung des flexiblen Blockabstandes als Prinzip der Zugsicherung wäre es damit möglich, den Streckendurchsatz deutlich zu erhöhen.

## Untersuchung und Optimierung von Fahrgastwechselzeiten

An Hand von Simulationen mit dem Traffic Oriented Microscopic Simulator (TOMICS), einer mikroskopischen Schnellzeitsimulationssoftware des DLR zur Modellierung einzelner Personenbewegungen in beliebigen Verkehrsräumen, wurden unterschiedliche Fahrzeugkonfigurationen hinsichtlich des Fahrgastflusses untersucht (Abb. 3). Dabei wurden die Ein- und Ausstiegszeiten von Fahrgästen analysiert. Eine wesentliche Rolle spielt bei diesen Vorgängen die Fahrzeugkonstruktion, insbesondere die Verteilung der Türen, deren Anzahl und Breite. In den Simulationen wurden typische Wechselquoten der Fahrgäste im Fernverkehr berücksichtigt.

Die besten Ergebnisse lieferte ein doppelstöckiger Triebzug mit horizontaler Klaseinteilung, der bis zu 790 Fahrgästen in zwei Klassen, einem Bordrestaurant und einem Bereich für mobilitätseingeschränkte Personen Platz bietet. Die Fahrgäste können auf beiden Ebenen einsteigen und an den diagonal gegenüberliegenden Waggonüren aussteigen. Die obere Ebene wird in der Simulation über Rampen erreicht. Die tatsächliche architektonische Lösung könnte Fahrgastbrücken und anderes vorsehen. Ein Leitsystem sorgt dafür, dass die Fahrgäste den optimalen Einstieg nutzen. Die Waggons sind innen auf beiden Ebenen durchgängig. Dadurch entfallen die Treppen im Waggoninneren. Das Gepäck der Fahrgäste wird separat im Triebkopf durch eine Gepäckanlage gehandhabt [1].

## Antriebs- und Bremskonzept

Die Energieversorgung ist zukunftsweisend als im Fahrweg integriert angenommen, wodurch die wartungsintensive Oberleitung mit dem Kettenwerk entfallen kann. Das Antriebskonzept sieht demgemäß eine über die Triebzuglänge verteilte berührungslose Stromaufnahme aus dem Schienenweg vor. An der Herausforderung der hierfür benötigten Komponenten wird ge-

arbeitet. Auf der Fahrzeugseite entfällt daher der geräuschvolle, stark verschleißende Stromabnehmer.

Die Triebköpfe stellen 50% der Antriebsleistung von etwa 18 MW über die Asynchronmotoren der Einzelrad-Doppelfahrwerke zur Verfügung, die restliche Antriebsleistung wird durch hochintegrierte Radmotoren der Einzelrad-Einzelfahrwerke erbracht. Die Beschleunigung des Triebzuges ist dadurch überdurchschnittlich gut. Der doppelstöckige Hochgeschwindigkeits-Triebzug ist fahrplanmäßig 400 km/h schnell und wird für 440 km/h zugelassen. Das Bremskonzept sieht den geschwindigkeitsabhängigen Einsatz verschiedener Bremsen vor. Es wird prinzipiell mit Fahrerassistenz vorausschauend und auf „Ausrollen“ gefahren. Sollte dies nicht ausreichen, wird betrieblich verschleißfrei mit generatorischer Bremse und linearer Wirbelstrombremse verzögert. Bei Hochgeschwindigkeit werden zusätzlich aerodynamische Bremsen aktiviert. Bei niedrigen Geschwindigkeiten können lineare Wirbelstrombremsen oberhalb von 50 km/h eingesetzt werden. Der betriebliche Bremsweg bei 440 km/h kann so gegenüber den in der TSI [2] geforderten 21 km auf 10 km reduziert werden. Das ist im Vergleich zum ICE 3 mit 4 km Bremsweg (bei 300 km/h) immer noch viel.

Für eine Schnellbremsung werden zusätzlich mechanische Bremsen aktiviert. Der Bremsweg ist dann 6,4 km lang.

Eine weitere Verkürzung des Bremsweges ist technisch möglich, bedingt dann aber wahrscheinlich zusätzliche Maßnahmen zur Fahrgastsicherheit.

## Detaillierte Modellierung der Fahrzeug/Fahrweg-Wechselwirkung

Um zukünftige Schienenfahrzeuge nicht nur im Hinblick auf die Fahrdynamik, sondern auch im Hinblick auf Verschleiß und Lärm auszulengen, wurden die bekannten Simulationsmethoden und -modelle weiterentwickelt und ertüchtigt. Gegenüber der üblicherweise verwendeten Modellierung, in der Radsätze und Schienen als starre Körper beschrieben werden und die nur bis etwa 50 Hz gültig ist, berücksichtigt die erweiterte Modellierung auch die Strukturmechanik dieser Komponenten (Abb. 4). Weiterhin enthält das erweiterte Modell eine detaillierte Beschreibung des Rad/Schiene-Kontakts zur Berechnung der dort auftretenden Spannungen.

Berechnungen mit dem erweiterten, detaillierten Modell zeigen bereits für den vergleichsweise „unspektakulären“ Fall des unangelenkten rollenden Radsatzes auf ungestörtem und idealem geraden Gleis, dass die Verformungen von Radsatz und Schiene infolge ihrer Struktur- elastizität einen deutlichen Einfluss auf

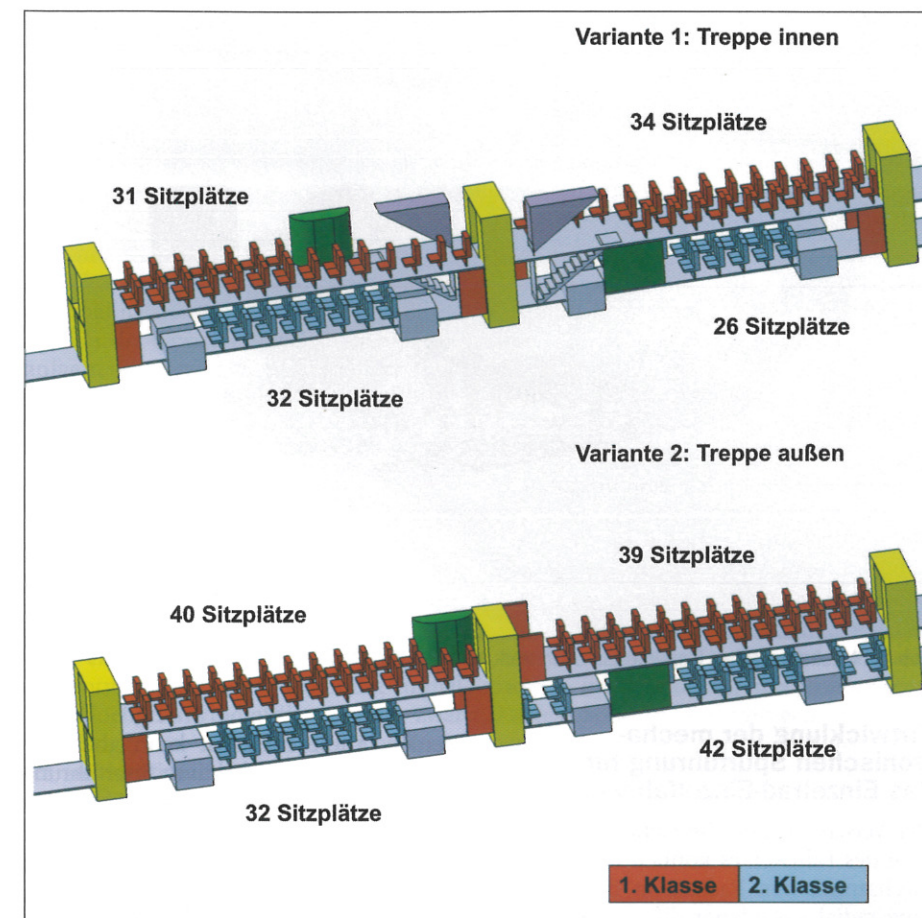


Abb. 3: Untersuchung verschiedener Varianten der Sitzanordnung

die Verteilungen der Spannungen und der Reibleistungsdichte im Rollkontakt haben. Weitere Berechnungen zeigen auch für Querbewegungen des Radsatzes im Spurkanal deutliche Einflüsse der Deformationen von Radsätzen und Schienen. Da der Rad/Schiene-Verschleiß einen wesentlichen Einfluss auf die Lebenszykluskosten (Life Cycle Costs – LCC) des Fahrzeugs hat, lassen sich mit dieser Modellierung Maßnahmen zur Verschleißreduktion und damit zur Optimierung der Wirtschaftlichkeit des Fahrzeugkonzepts

nachweisen. Darüber hinaus ermöglicht die Modellierung von Radsätzen und Schienen als flexible Körper auch die Untersuchung höherfrequenter Phänomene bis hin zur Akustik. Zum einen entsteht Lärm in vielen Fällen durch Struktur-schwingungen, zum anderen werden Strukturschwingungen von Radsätzen und Schienen durch Oberflächenirregularitäten wie Radpolygone oder Schienenriffel ange-regt. Derartige ungleichmäßige Verschleiß-formen können mit dem detaillierten Modell ebenfalls untersucht werden [3].

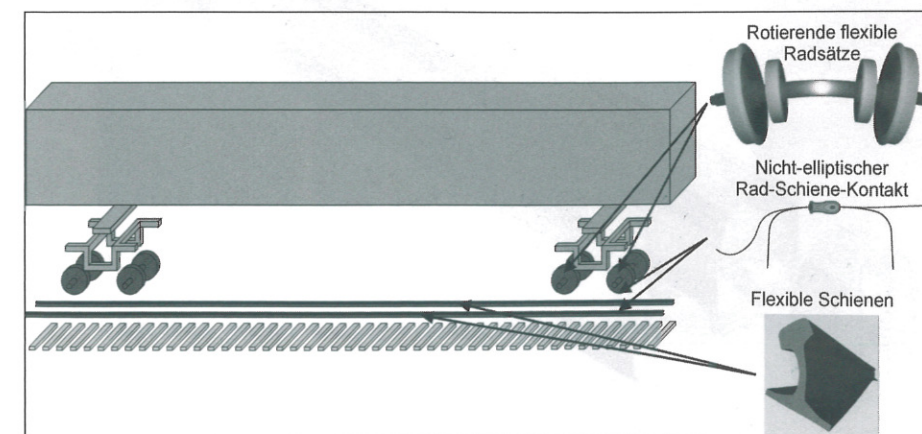


Abb. 4: Fahrzeug-Fahrweg-Modell



Abb. 2: Seitenansicht des NGT-Endwagens und -Mittelwagens



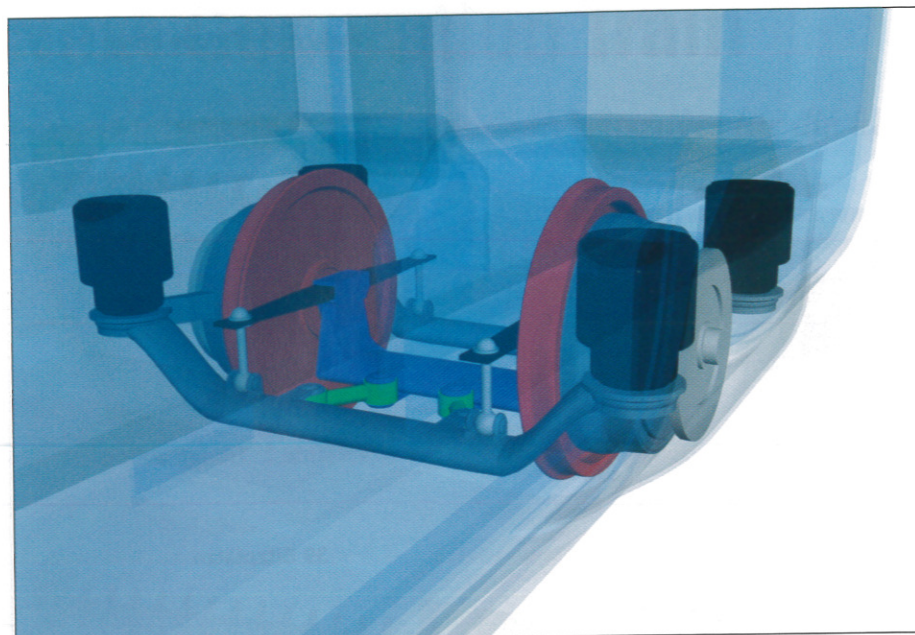


Abb. 5 : Mechatronisches Einzelrad-Einzelfahrwerk mit radnahen Motoren

**Entwicklung der mechatronischen Spurführung für das Einzelrad-Einzelfahrwerk**

Der Verschleiß und die Geräuschentwicklung des Fahrwerkes können durch einen mechatronischen Radsatz in der Ausführung radial steuerbarer differenziell antriebener Einzelrad-Einzelfahrwerke (oder Doppelfahrwerke) verringert werden, der die Radscheiben aktiv bei Bogenfahrt steuert (Abb. 5).

Für diese Vorteile gegenüber dem konventionellen Radsatz muss dessen passiver Selbstzentrierungsmechanismus geopfert

werden. Diese Funktion kann aber beispielsweise von einer aktiven Spurführung mit robustem Sensorkonzept übernommen werden.

Die Weiterentwicklung des „mechatronischen Radsatzes“ erfolgt mit dem Hauptziel, im Vergleich zu konventionellen Radsätzen die gleiche Laufqualität sicherzustellen und des Weiteren eine Verbesserung des Laufverhaltens in den Bereichen zu erreichen, wo konventionelle Radsätze an ihre Grenzen stoßen.

Mit Hilfe von in die Radanbindung integrierten Kraftmomenten-Sensoren wird

indirekt die Position des Fahrwerks auf der Schiene ermittelt. In jedem Rad sind die Aktuatorik (permanent erregte Synchronmotoren) und die restliche Sensorik (Geber, Temperaturfühler) eingebaut. Die Radpaare verfügen über einen Freiheitsgrad um die Hochachse und können bei Bogeneinfahrt so eingestellt werden, dass die auftretenden Schlüpfе und damit auch der Verschleiß minimiert werden. Außerdem kann durch die Geschwindigkeitsentkopplung der Räder auch in sehr engen Bögen sowohl Längs- als auch Querschleif reduziert werden, wodurch die Voraussetzungen für Kurvenquitschen entfallen und eine erhebliche Lärminderung erzielt wird.

Der Forschungsschwerpunkt liegt in der Untersuchung der Praxistauglichkeit des Sensorkonzepts für die Positionserfassung und der Robustheit der Spurführungsregelung gegen Störungen wie Gleislagefehler oder Messrauschen.

Durch die mechatronische Spurführung zusammen mit einer dynamischen Komfortauslegung, die auch die dynamische Verknüpfung der benachbarten Wagen mit einbezieht, gelingt es, die potenziellen fahrdynamischen Nachteile von Einzelachslaufwerken gegenüber Drehgestellen mehr als zu kompensieren [4].

**Innovatives Leichtbaukonzept für den Wagenkasten**

Eine gegenüber dem ICE 3 um 25% gesteigerte Höchstgeschwindigkeit sowie ein um 50% verringerter Energieverbrauch pro Fahrgast erfordern ein innovatives Fahrzeugkonzept, dem unter Berücksichtigung aller Randbedingungen ein Triebzug mit Einzelwagen und verteiltem Antrieb besonders gerecht wird. Bei dieser Anordnung nutzen die Wagenkästen den theoretisch zur Verfügung stehenden Platz optimal aus. Die Stützweite ist bei gleicher Wagenkastenlänge gegenüber einer Jakobs-Anordnung verringert, und aus den Überhängen resultiert ein der Durchbiegung entgegengesetztes Moment. So wird bereits konzeptionell eine Gewichtsreduktion erzielt.

Das gewählte Konzept mit nur zwei Einzelradfahrwerken je Wagen erfordert erhebliche Anstrengungen im Leichtbau, da die zulässigen maximalen Achslasten von 16 t (TSI [2] 17 t) das Fahrzeuggewicht auf 32 t begrenzen. Notwendige Energieeinsparungen bei Beschleunigung, Konstantfahrt und Bremsen, Verminderung der Oberbaubelastung bzw. -schädigung und Verringerung von Umweltbelastungen durch reduzierte Emissionen sind weitere wesentliche Gründe für einen konsequenten Leichtbau.

Das Triebzugkonzept bedient sich einer Mischform aus integraler und modularer

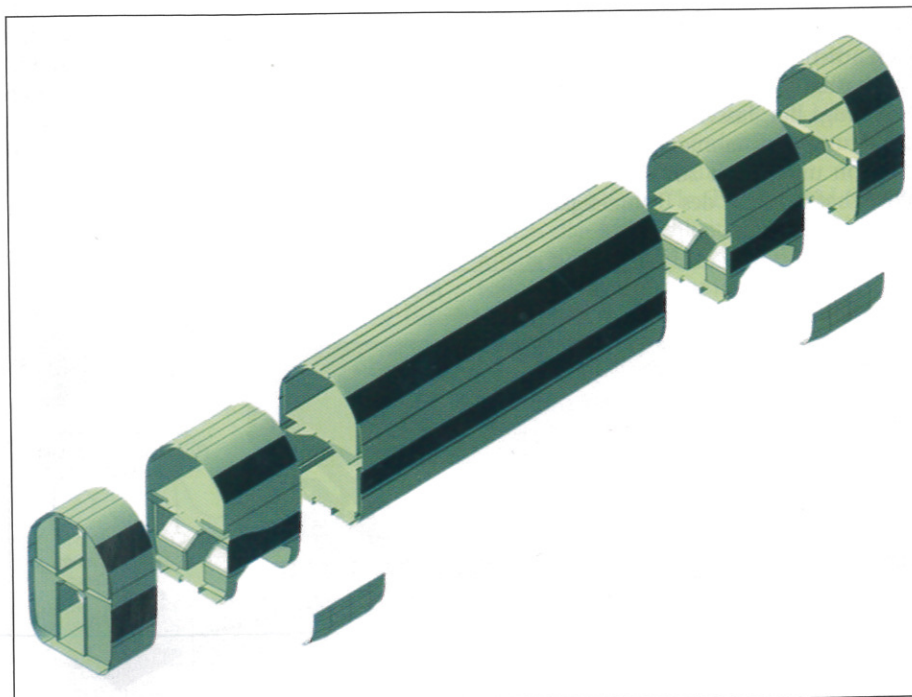


Abb. 6: NGT und modulares Konzept am Beispiel eines NGT-Mittelwagens

Produktarchitektur, um bei großer Differenziertheit mit einer hohen Zahl von Gleichteilen die üblicherweise kleinen Baulose kostengünstig herstellen zu können (Abb. 6).

Um maximale Leichtbaupotenziale auszuschöpfen, wird als grundlegendes Prinzip das Multi-Material-Design verfolgt, bei dem die jeweiligen Werkstoffe dort eingesetzt werden, wo sie ihr optimales Potenzial entfalten können. Insbesondere kommen faserverstärkte Kunststoffe und Leichtmetalle zum Einsatz, um die geringen Strukturgewichte zu realisieren. Das modulare DLR-Konzept besteht aus einer Fachwerkstruktur mit tragenden Ausfachungen in Faserverbundleichtbauweise, die den Wagenkasten durch definierte Spanten in verschiedene parallel fertigmögliche Sektionen gliedert.

Die Zielsetzung besteht darin, mit der konsequenten Anwendung der Multi-Material-Design-Philosophie und der neuartigen Spant/Panel-Bauweise eine Gewichtsreduzierung von bis zu 30% im Vergleich zu metallischen Bauweisen zu erreichen.

Es wird soviel Funktionalität wie möglich in die Wagenkastenstruktur integriert, um das durch den Lichtraum G2 begrenzte In-

nenraumvolumen bestmöglich auszunutzen. Die größten Komponenten sind die radial steuerbaren differenziell angetriebenen Einzelrad-Einzelfahrwerke [5].

**Aerodynamik**

Das Verbundthema Aerodynamik berührt Aspekte des Fahrzeuges, der Infrastruktur und des Betriebes und ist deshalb sehr komplex. Mit zunehmender fahplanmäßiger Geschwindigkeit der Züge sind in der Praxis immer wieder Effekte aufgetreten, deren fahrdynamische und strömungstechnische Verhältnisse man mit den vorhandenen mathematischen Methoden nicht simulieren und in den Windkanälen nicht verifizieren konnte. Hier leistet das Projekt teilweise Pionierarbeit.

Beispielsweise kann die Kopfwelle des Triebzuges durch einen großen Schlankheitsgrad reduziert werden. Für den NGT wird ein mittlerer Schlankheitsgrad der Kopfform angesetzt, weil zukünftig Tunnel auf Hochgeschwindigkeitsstrecken zwar einröhrig, aber mit einem Einlauftrichter zur kontinuierlichen Luftverdrängung gebaut werden. Die Unempfindlichkeit gegen Seitenwind wird trotz der leichten

End- und Mittelwagen des NGT-Triebzuges durch aktive Steuerelemente nachhaltig sichergestellt.

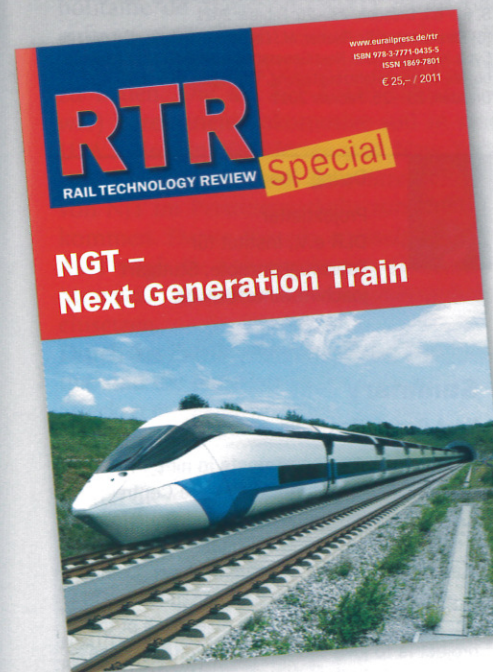
Zur Untersuchung beider Phänomene hat das DLR im Oktober 2010 den weltweit einzigen speziellen Windkanal hierfür in Betrieb genommen. Hier können die Strömungsverhältnisse sowohl für die Kopfwelle im Tunnel als auch für den Seitenwind bei Tunnelaustritt mit anschließender Brückenquerung an rollfähigen 1:50-Fahrzeugmodellen gemessen werden.

**Industrial Design**

Im Rahmen der gemeinsamen Entwicklung des NGT-Innenraum-Konzepts mit den Auswirkungen auf das äußere Erscheinungsbild des Triebzuges werden die Faktoren der Mensch-Maschine-Schnittstelle, der Marktakzeptanz und zukünftige Gestaltungskriterien erarbeitet (Abb. 1).

Dazu werden Trends und Szenarien in den europäischen Hochgeschwindigkeitsnetzen in Verbindung mit zukünftigem Fahrgastkomfort, Erwartungen an Raumpfinden, Produktästhetik, Funktionssicherheit und selbsterklärendem Design für zukünftige Produktzyklen von 30, 40 oder mehr Jahren berücksichtigt.

**New book release**



**NGT Next Generation Train**

ISBN 978-3-7771-0435-5, 70 pages  
Price 25,- (incl. VAT, excl. postage)



Order your copy now: [www.eurailpress.de/ngt](http://www.eurailpress.de/ngt)



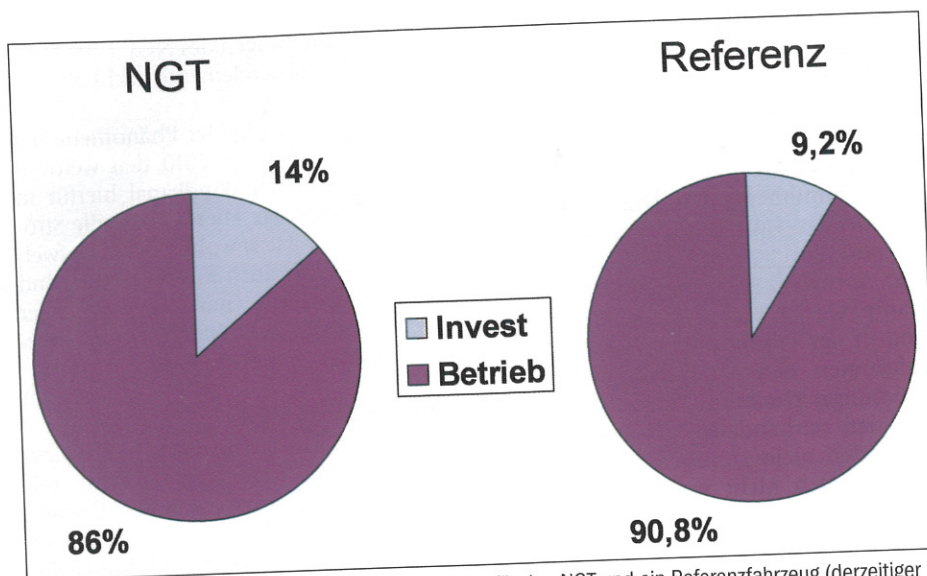


Abb. 7: Verhältnis von Investitions- zu Betriebskosten für den NGT und ein Referenzfahrzeug (derzeitiger Stand)

Im Innenraumbereich werden für unterschiedliche Fahrgastgruppen und Reiseansprüche variable und modulare Konzepte entwickelt und demonstriert. Besondere Schwerpunkte sind der Ein- und Ausstieg als „Visitenkarte“ der öffentlichen Verkehrssysteme und die Kabinengestaltung für PRM (Passagiere mit Reduzierter Mobilität) und Senioren sowie der sichere Transport von Kindern.

Durch unterschiedliche Inhaltsangebote in verschiedenen Mittelwagen und spezieller Nutzung der Doppelstock-Anordnung mit separaten Zugängen, Fahrstuhl und möglichst großzügiger Raumverglasung wird ein neuer Schienenfahrzeug-Fahrgastkomfort angeboten.

Das Außendesign wird in enger Verbindung mit den aerodynamischen Forschungen des DLR, den spezifischen Bauweisen, der optimierten Mensch-Maschine-Schnittstelle und der ästhetischen Außenwirkung auf Menschen, Architektur und Umwelt ausgelegt.

### Modellierung der Life Cycle Costs

Aufgrund der hohen Investitionskosten und der langen Lebensdauer spielen die Lebenszykluskosten bei der Einführung innovativer Schienenfahrzeuge in den Markt eine entscheidende Rolle. Einsparungen bei Unterhalts- und Instandhaltungskosten können in vielen Fällen höhere Einkaufspreise nach kurzer Zeit egalisieren. Eine zuverlässige Methode zur Quantifizierung von Produktkosten über den gesamten Lebensweg stellt die LCC-Analyse dar. So können die ökonomischen Vorteile neuer Technologien quantifiziert und mit konventionellen Fahrzeugen verglichen werden.

Bei der Betrachtung der unterschiedlichen Kosten für den Einsatz des NGT im Vergleich zu einem heutigen Schienenfahrzeug

müssen nicht nur die Fahrzeuge selbst betrachtet werden, sondern auch die verschiedenen Rahmenbedingungen, in denen sich die Fahrzeuge bewegen. Aus dem veränderten Betrieb ergeben sich zum Beispiel auch unterschiedliche Kosten für Personal und Instandhaltung der Infrastruktur. Fahrzeugseitig sind neben unterschiedlichen Herstellungskosten für das Fahrzeug selbst auch der Energieverbrauch und die Instandhaltungskosten relevant. Zudem ergeben sich andere Anforderungen an die Infrastruktur. Dies betrifft unter anderem die Art des Fahrwegs und die Auswahl verschleißanfälliger Komponenten.

Die Analyse verschiedener Kombinationen von Kostenelementen auf die Lebenszykluskosten wird mit einem eigens entwickelten NGT-LCC-Werkzeug durchgeführt. Der NGT weist einen niedrigeren Energieverbrauch als ein heutiges, konventionelles Fahrzeug auf, was sich zusätzlich zu ökologischen Effekten positiv auf die Betriebskosten auswirkt. Der Vergleich der Energiekosten für den Betrieb des NGT und eines Referenzfahrzeugs kann beispielsweise auf Basis des UIC-High-Speed-Serviceprofils (bei 300 km/h) erfolgen. Die Kosten sind dabei auf einen Betriebsbeginn im Jahre 2020 und eine Betriebsdauer des Fahrzeugs von 30 Jahren bezogen. Bei der Berechnung der Gesamtkosten ist eine Inflationsrate von durchschnittlich 1,8% berücksichtigt worden. Durch den um etwa 27% geringeren Energieverbrauch pro Zugkilometer lassen sich über die gesamte Betriebsdauer Einsparungen von durchschnittlich ca. 500 000 EUR pro Jahr erzielen. Bezogen auf den Sitzplatz werden 50% Energie eingespart, wie als Auslegungsziel vorgegeben. Vorläufige Berechnungen haben gezeigt, dass durch die innovativen Technologien, die im NGT eingesetzt werden, zwar die

Investitionskosten gesteigert werden, allerdings auch die Betriebskosten gesenkt werden können (Abb. 7). Dadurch gelingt es dem NGT, gegenüber herkömmlichen Schienenfahrzeugen, über den gesamten Lebenszyklus Kosteneinsparungen zu erzielen. Quantitative Angaben werden erst gegen Ende der Projektlaufzeit in 2013 möglich sein [6].

### Zusammenfassung

Der NGT zeichnet sich durch einen vergleichsweise niedrigen Energieverbrauch, geringe Lärmentwicklung, angenehme Klimatisierung, innen optimierten Fahrgastfluss, ein zukunftsweisendes Außen- und Innen-Design sowie niedrigen Verschleiß am Rad/Schiene-Kontakt aus. Als Messlatte für die Zielerreichung dient der deutsche Hochgeschwindigkeitszug ICE 3.

Da das DLR auch in Zukunft keine Züge bauen wird, ist für das Projekt NGT die Kooperation mit der Bahnindustrie und den Bahnbetreibern besonders wichtig.

### LITERATUR

- [1] Popa, A.: Simulation of passenger flows for the next Next Generation Train, RTR Special: NGT – Next Generation Train, DVV Media Group Hamburg, 2011, S. 13–15
- [2] Hochgeschwindigkeitsbahnsystem, Technische Spezifikation für die Interoperabilität (TSI) des Teilsystems „Fahrzeuge“, Europäisches Amtsblatt : 84/132 vom 21.02.2008
- [3] Kaiser, I.: Hochdetaillierte Modellierung der Fahrzeug-Fahrgast-Wechselwirkung, 12. Internationale Schienenfahrzeugtagung, Tagungsband S. 115–117, Dresden, 23.–25. Februar 2011
- [4] Valente, L.; Kurzeck, B.: Entwicklung der mechatronischen Spurführung für das Einzelrad-Einzel-Fahrwerk des Next Generation Train (NGT), 12. Internationale Schienenfahrzeugtagung, Tagungsband S. 64–66, Dresden, 23.–25. Februar 2011
- [5] Nickel, J.; König, J.: Innovatives Leichtbaukonzept für den Wagenkasten des NGT und Möglichkeiten zur Leichtbaubewertung, 12. Internationale Schienenfahrzeugtagung, Tagungsband S. 61–63, Dresden, 23.–25. Februar 2011
- [6] Ehrenberger, S.; Fischer, M.; Legat, R.: Modellierung der Life Cycle Kosten für den Next Generation Train (NGT), 12. Internationale Schienenfahrzeugtagung, Tagungsband S. 130–132, Dresden, 23.–25. Februar 2011



Dr.-Ing. Joachim Winter  
Projektleiter  
DLR e.V., Institut für  
Fahrzeugkonzepte, Stuttgart  
joachim.winter@dlr.de

### Summary

#### Next Generation Train

Since 2007, 18 departments in nine institutes of the German Aerospace Centre (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt – DLR) have been working on the “Next Generation Train – NGT” research project. Design support is being provided by consultants iDS Hamburg. One of the major objectives of the project is to give the railway industry access to research findings – including from the aerospace sector – so as to provide strategy support to the railways in meeting the transport demands of the future.