

DLR Forschungsinfrastruktur NGT-Fahrwerk (NGT-FuN)

Daniel Lüdicke, Gustav Grether, David Krüger, Christian Weber, Andreas Heckmann

Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR)

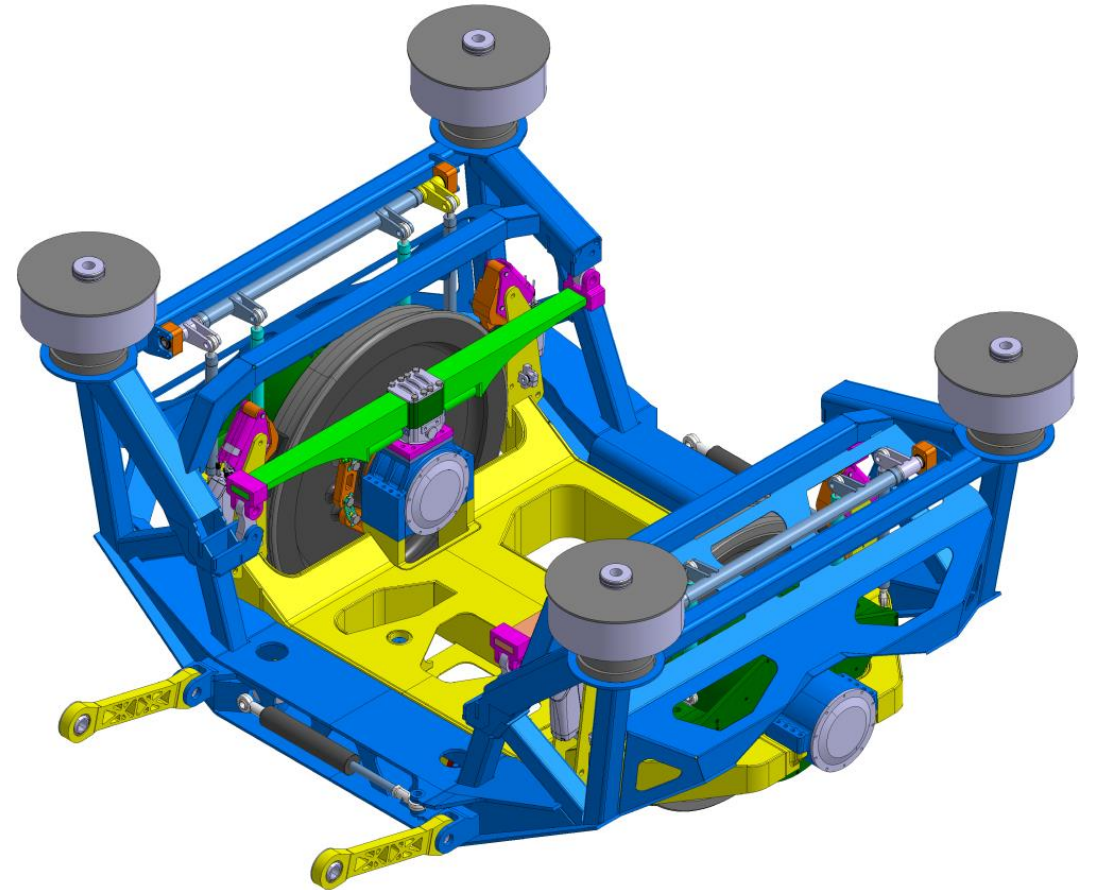


Wissen für Morgen



Inhalt

- Projekt Next Generation Train
- DLR Forschungsinfrastruktur NGT-Fahrwerk (NGT-FuN)
- Hochgeschwindigkeitsfahrwerk NGT HST
- Entwicklungswerkzeuge NGT HST
- NGT-FuN Integrationsprüfstand
- Weitere Forschungsfelder



CAD-Modell des NGT HST (NGT-FuN) Fahrwerkes



DLR Projekt „Next Generation Train“ (NGT)

- Konzentration der DLR-Aktivitäten im Bereich Schienenverkehr
- Entwicklung des „Zug der Zukunft“
- Forschungsprojekt seit 2007
- 11 DLR-Institute aus allen Fachbereichen beteiligt
- Einzel-Technologieentwicklung an Zugkonzepten

- High-Level Ziele des NGT HST Zugkonzeptes:
 - Erhöhung der Betriebsgeschwindigkeit auf 400 km/h
 - Verbesserte Verschleißigenschaften und Lebenszykluskosten
 - 50% geringerer Energieverbrauch pro Fahrgast (vgl. mit ICE 3)
 - 50% mehr Passagiere (vgl. mit TGV Duplex)
 - 30% leichter Wagenkasten (vgl. mit TGV Duplex)
 - Erhöhung des Passagierkomforts
 - 25% weniger Vibrationen (N_{MV})

NGT HST



→ Ultrahochgeschwindigkeitszug, Fahrleistung 16 MW, Betriebsgeschwindigkeit 400 km/h

NGT LINK



→ Zubringerzug, Fahrleistung 2,5 MW, Betriebsgeschwindigkeit 230 km/h

NGT CARGO

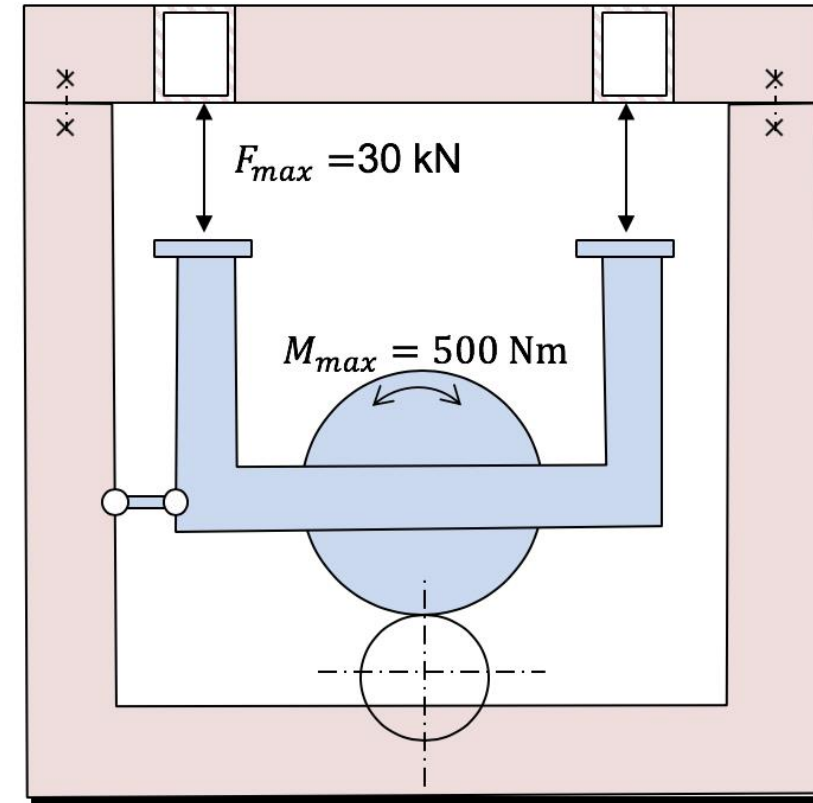


→ automatisch-fahrender Triebwagengüterzug (z.B. für Pakete)

J. Winter: „Next Generation Train – 20 Jahre Forschung für die Eisenbahn“, Eisenbahntechnische Rundschau (ETR) 03 (2019), S. 17–21

DLR Großinvestition „Forschungsinfrastruktur NGT-Fahrwerk“ (NGT-FuN)

- Aufbau eines NGT HST Fahrwerkes im Realmaßstab 1:1 mit Prüfstand
 - Forschung und Entwicklung mehrerer Konzepte seit 2007
- Integrationsprüfstand mit Rolle
 - Inbetriebnahme und Test aller Fahrwerksfunktionen
- Aufbauphase: 3 Jahre (2019-2021), Budget: 2,5 Mio.€
 - DLR Institut für Systemdynamik und Regelungstechnik (SR)
 - DLR Institut für Fahrzeugkonzepte (FK, Stuttgart)
- Nutzung: ab 2022 auf Rollprüfständen und Testzentren
- Flankierendes Forschungsprojekt: NGT BIT, Erweiterungen in Planung
- Weitere Forschungs- und Industrieprojekte sehr erwünscht



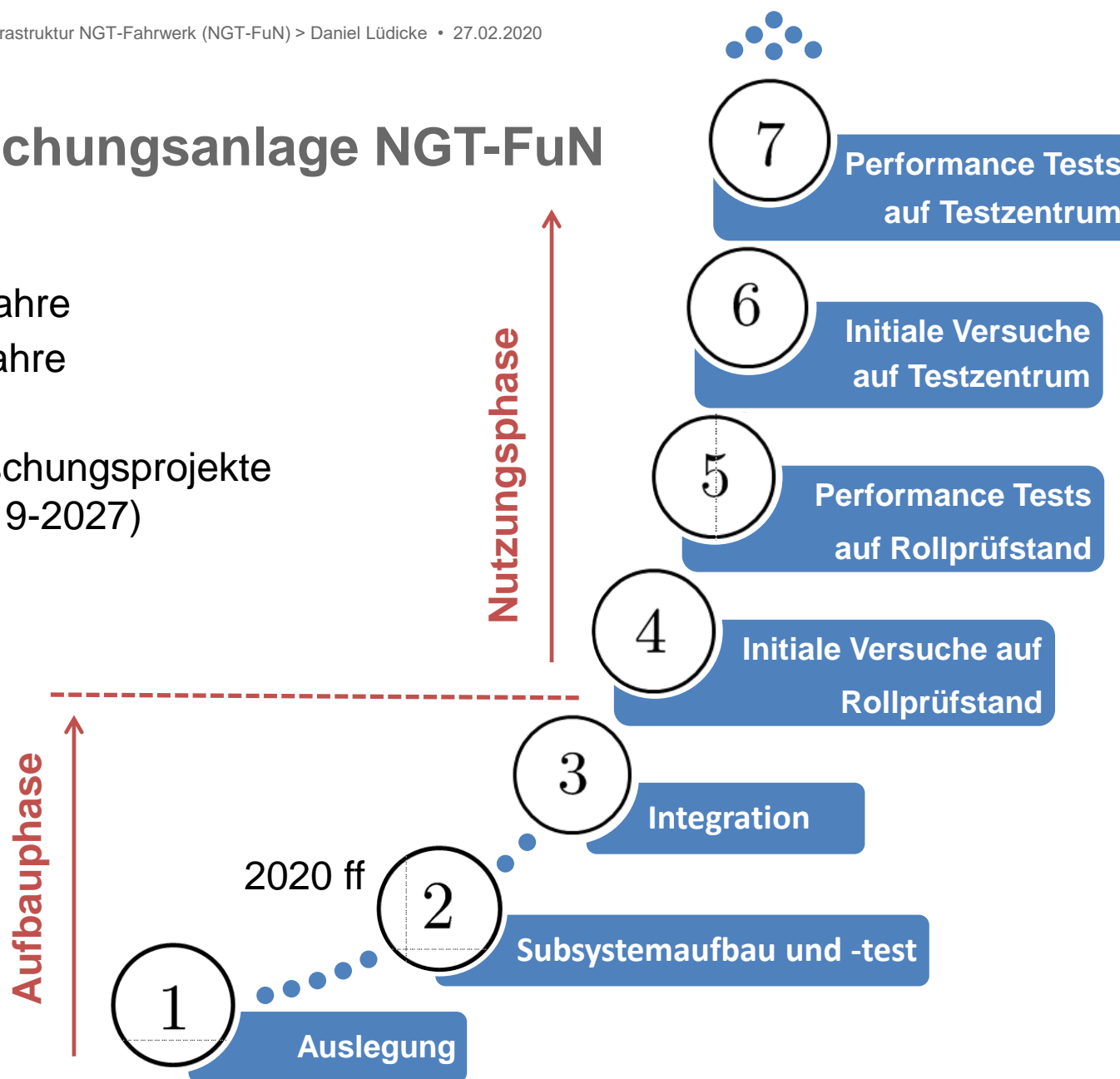
Prüfstandsrahmen mit Fahrwerk (Skizze)



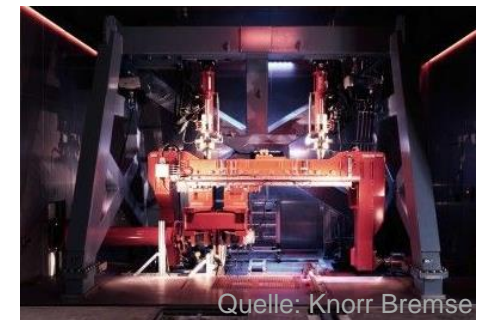
DLR Großforschungsanlage NGT-FuN

- Aufbauphase: 3 Jahre
- Nutzungszeit: 6 Jahre
- Flankierende Forschungsprojekte
 - NGT BIT (2019-2027)
 - ...

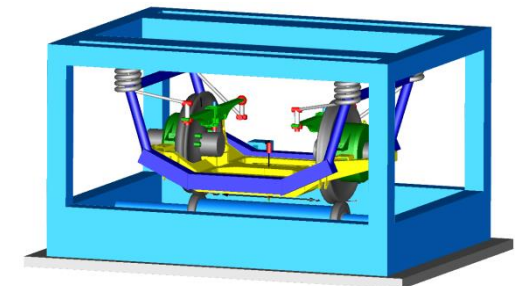
Start:
April 2019



Quelle: Siemens AG
Siemens Prüf- und Validationcenter
in Wegberg/Wildenrath (PCW)



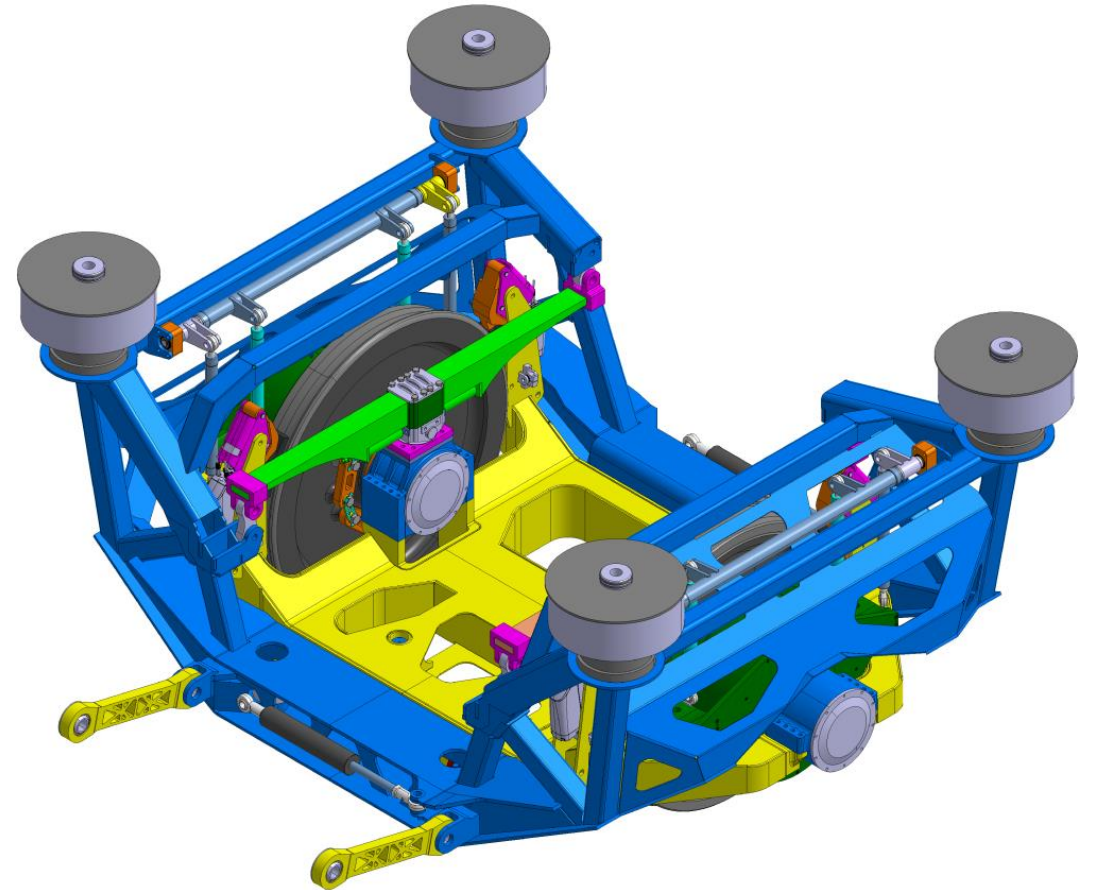
Quelle: Knorr-Bremse
ATLAS-Rollprüfstand
bei Knorr-Bremse in München



Integrationsprüfstand NGT-FuN

Inhalt

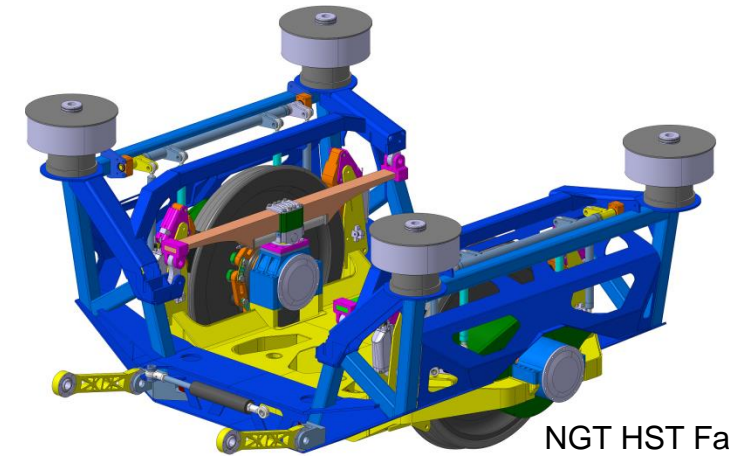
- Projekt Next Generation Train
- DLR Forschungsinfrastruktur NGT-Fahrwerk (NGT-FuN)
- **Hochgeschwindigkeitsfahrwerk NGT HST**
 - Anforderungen
 - Entwicklung, Eigenschaften
- Entwicklungswerkzeuge NGT HST
- NGT-FuN Integrationsprüfstand
- Weitere Forschungsfelder



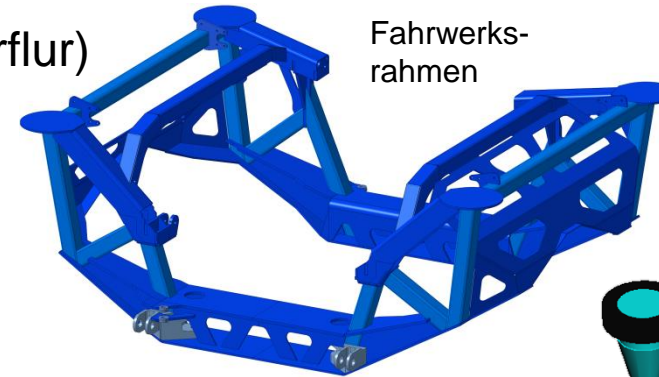
CAD-Modell des NGT HST (NGT-FuN) Fahrwerkes

DLR Projekt Next Generation Train (NGT) NGT High Speed Train (HST) Mittelwagen-Fahrwerk

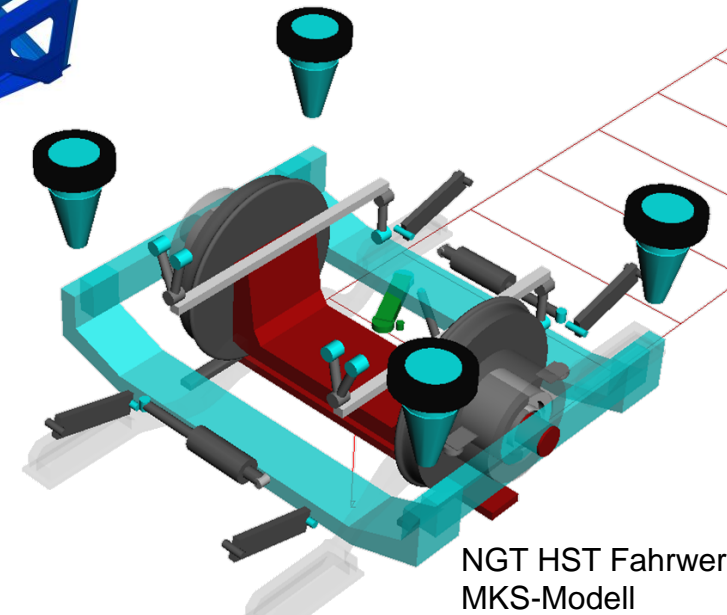
- Mechatronisches Ultrahochgeschwindigkeits-Einzelradfahrwerk
- Geschwindigkeit bis 430 km/h (Betrieb 400 km/h)
- Radnahe Direktantriebe: 180 kW und 2100 Nm pro Rad
- Doppelstock-Wagenkasten mit niveaugleichem Durchgang auf oberer und unterer Ebene (Niederflur)
- Leichtbau-optimiertes Fahrwerkskonzept
- Umsetzung in Stahl-Hybrid-Bauweise
- Mehrkörpersimulationen in Simpack und Modelica
- Aktive Komponenten mit Regelung
- Einzelrad-Einzelfahrwerk (EEF) mit Antrieb
 - Einzelräder (nicht drehzahlgekoppelt)
- Radträger führt Lenkbewegungen aus für Radialstellung und Bogenfahrt



NGT HST Fahrwerk
CAD-Modell



Fahrwerks-
rahmen



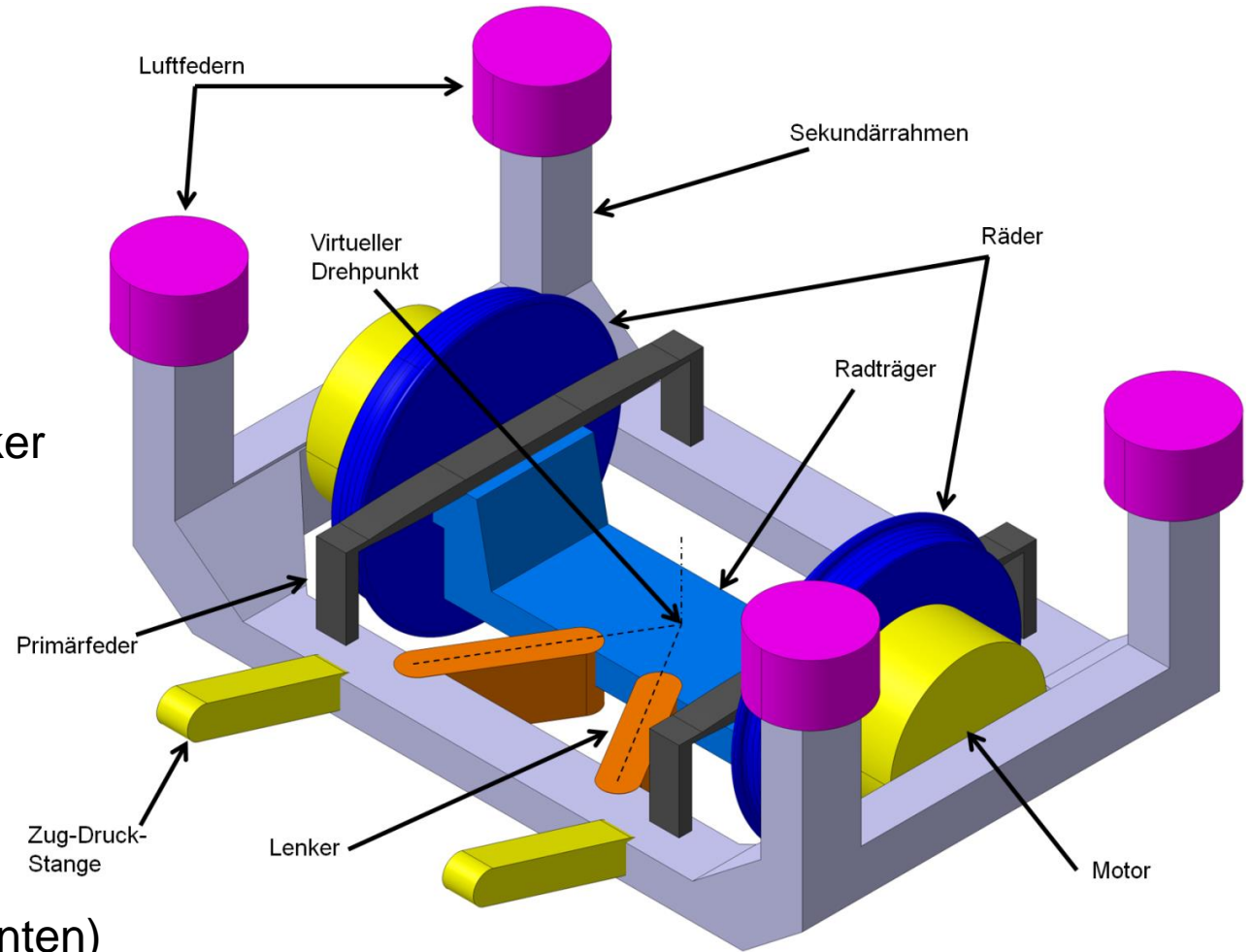
NGT HST Fahrwerk
MKS-Modell



NGT HST Fahrwerk

Konzeptionelle Anforderungen

- Einzelrad-Einzelfahrwerk
- Unabhängig drehende Räder
- Räder sind über Radträger-Baugruppe verbunden
- Radträger und Rahmen über Primärfeder und Lenker miteinander verbunden
- Lenker bilden einen virtuellen Drehpunkt
- Nur der Radträger dreht in den Bogen ein
- Fahrwerksrahmen verbindet Primär- und Sekundärfederung
- Sekundärfederung besteht aus vier Elementen (z.B. Spiralfeder, Luftfeder, (semi-)aktive Komponenten)
- Lenker übertragen die Traktions- und Bremskräfte vom Fahrwerksrahmen an den Wagenkasten

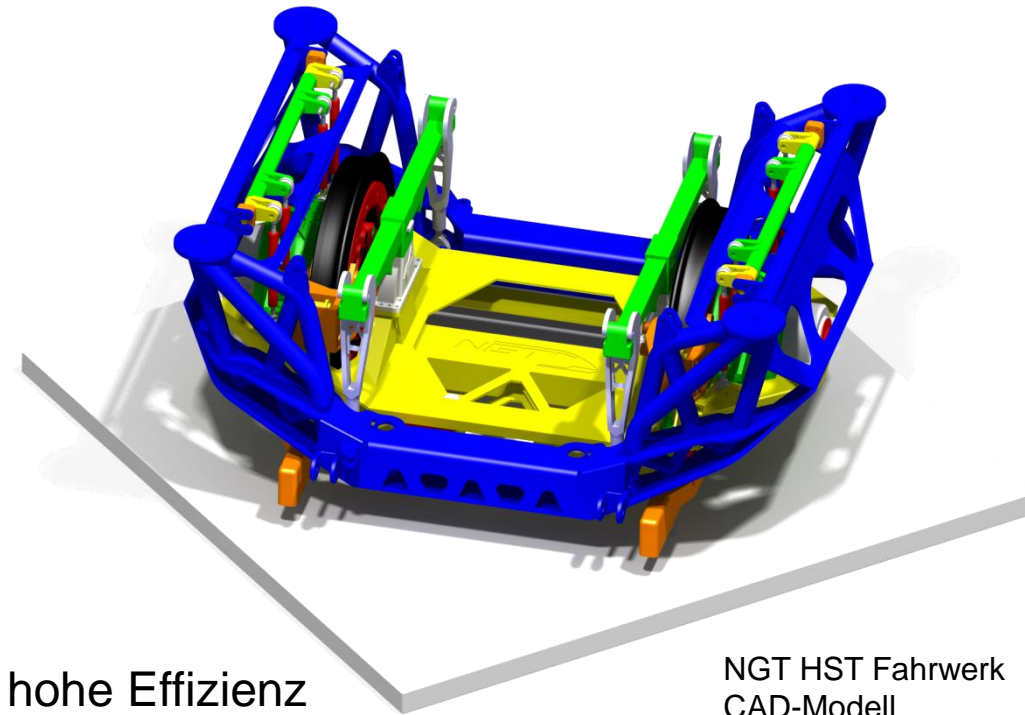


NGT HST Fahrwerk
Schematische Darstellung



Basistechnologien / -innovationen

- Mechatronische Spurführung
 - Reduktion von Verschleiß an Rad und Schiene
 - Reduktion von Lärm in Bögen mit geringem Radius
 - Fahrwerk als ein intelligenter Sensor und Aktor
- Verwendung von Leichtbauprinzipien
 - Mehr Nutzlast und somit mehr Streckenkapazität
 - Nachhaltige Nutzung von Ressourcen
 - Reduktion des Energiebedarfs
- Getriebeloser, radnaher Direktantrieb
 - Primärgefedert
 - Permanent-erregte Synchronmaschine, hohes Drehmoment, hohe Effizienz
 - Geringes Gewicht erhöht die mögliche Nutzlast
 - Reduktion der Lebenszykluskosten

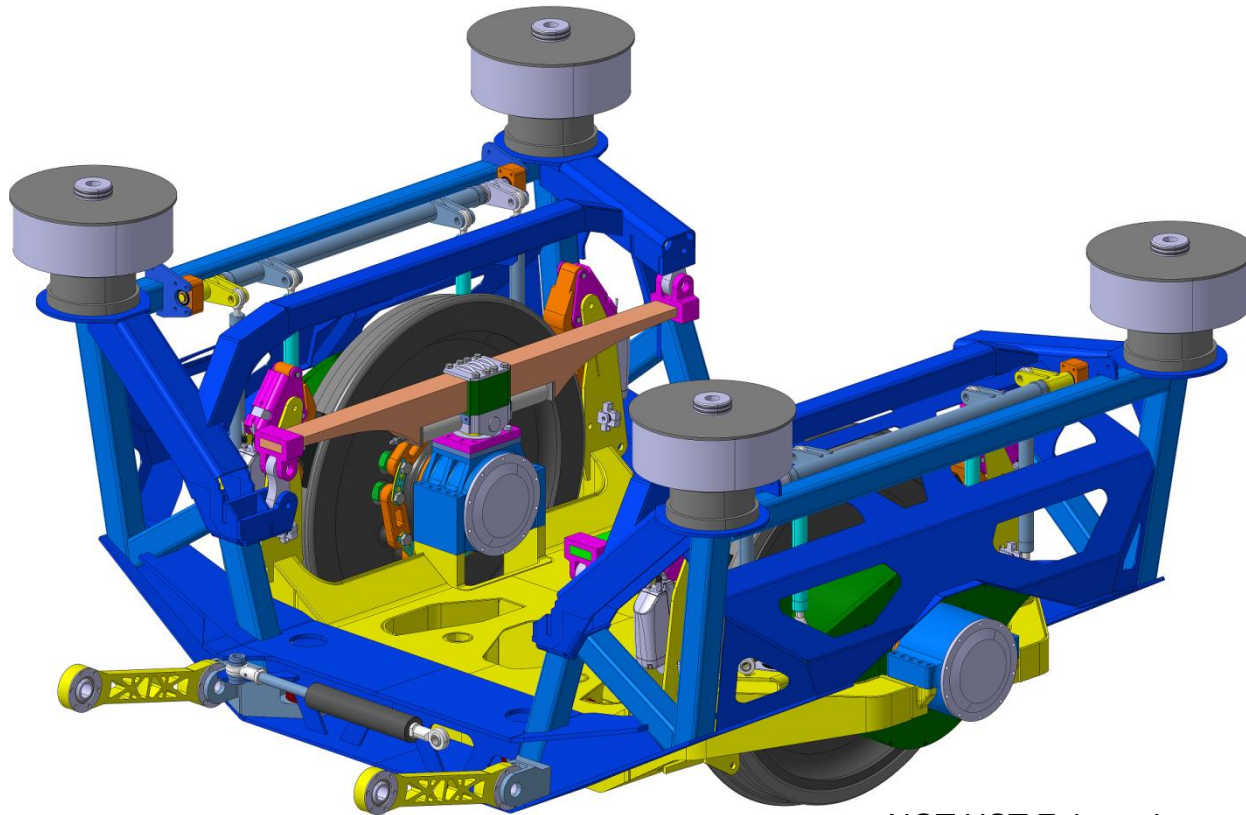


NGT HST Fahrwerk
CAD-Modell



NGT HST Fahrwerk

Leichtbau-optimiertes Fahrwerkskonzept



NGT HST Fahrwerk
CAD-Modell

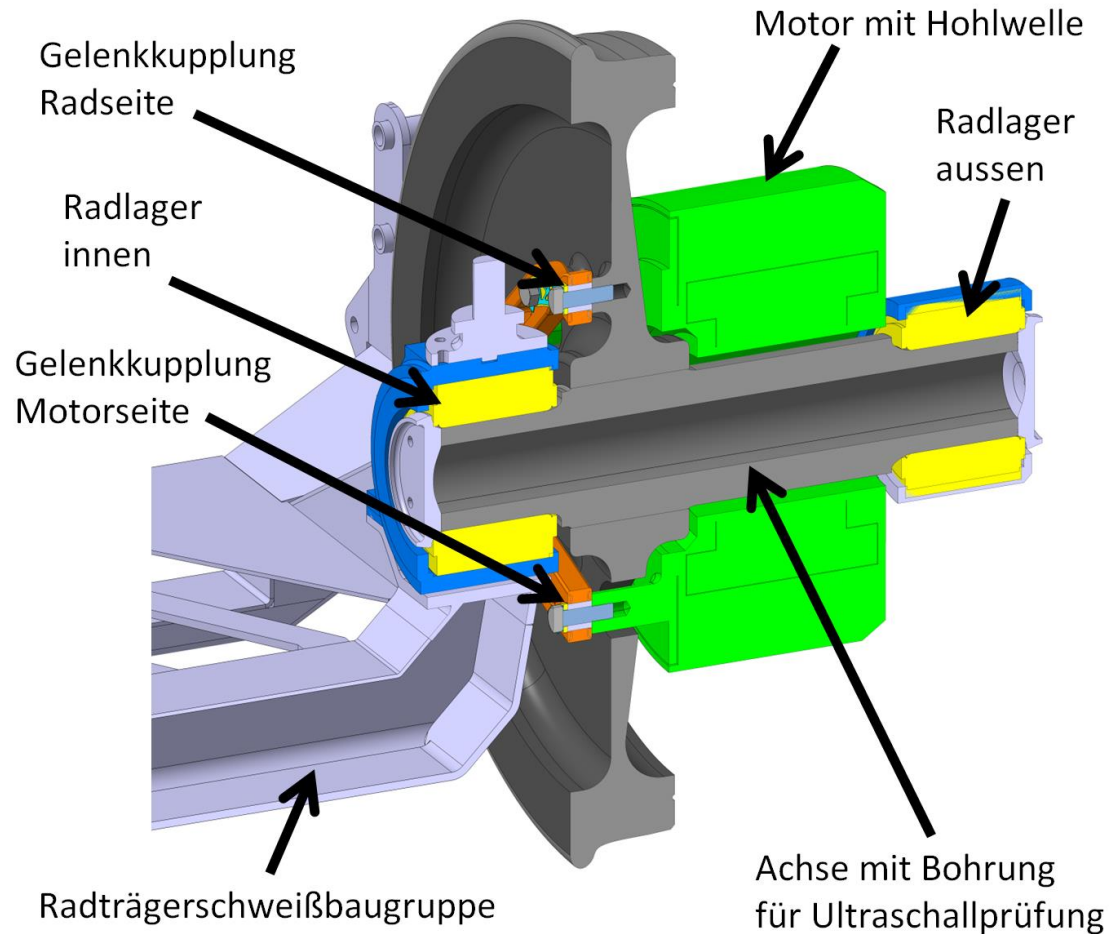
- Mechatronisches Niederflur-Einzelrad-Einzelfahrwerk (EEF) mit Antrieb
- Spurweite: 1435 mm (Normalspur)
- Raddurchmesser: 980...920 mm
- Rad-/Schienenprofil: S1002 / UIC 60 E2 (1/40)
- Laufleistung: 500000 km/a
- Dienstzeit: 30 Jahre
- Radträger Schweißkonstruktion: ca. 310 kg
- Fahrwerksrahmen Schweißkonstruktion: ca. 500 kg
- Ungefederte Masse: ca. 1500 kg
- Gesamtmasse: ca. 2900 kg
- Masse eines vergleichbaren (nicht angetriebenen) Hochgeschwindigkeits-Fahrwerkes: ca. 3000 kg

D. Krüger, C. Gomes Alves, J. König, J. Winter, H. E. Friedrich:

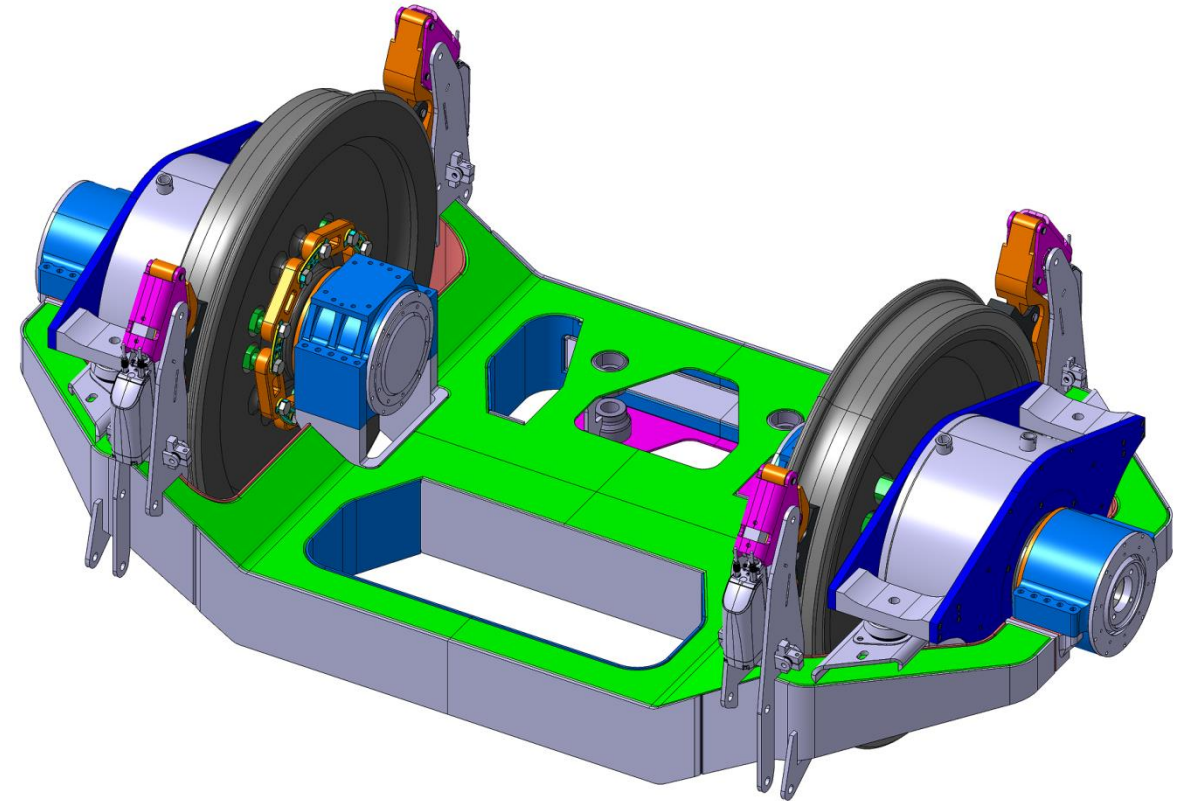
„Next Generation Train Fahrwerk: Ein leichtbau-optimiertes Fahrwerkskonzept für den Hochgeschwindigkeitsverkehr“, ZEVrail - Zeitschrift für das gesamte System Bahn, 3 (2018)



NGT HST Fahrwerk – Komponenten Motoranbindung und -federung



NGT HST Radträger mit Rad und Motor (Schnitt), CAD-Modell



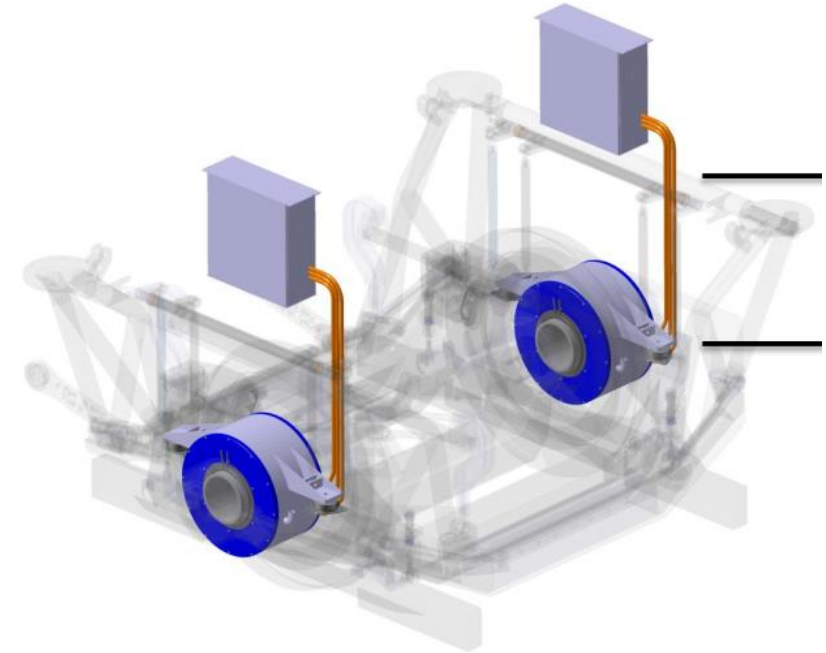
NGT HST Radträger CAD-Modell

- Drehzahl: max. 2500 U/min
- Drehmoment: max. 2100 Nm
- Motorleistung: max. 180 kW
- Auslenkung Motoraufhängung: max. 5 mm (x, y, z)
- Umgebungstemperatur: -30°C ... 60°C
- Lebensdauer: 30 Jahre



Motor und Umrichter

- Teilabgefederter Direktantrieb pro Rad
 - Maschinenlager und Kupplung
- Synchronmaschine mit Wasserkühlung
 - Hohe Leistungs- und Drehmomentdichte
- Umrichter im Wagenkasten verbaut
 - Leistungstransistoren mit Siliciumcarbid (SiC) Halbleitermaterial
- Auslegung und Design von Motor und Umrichter
 - MATLAB-Toolbox für Motordesign
 - Simulation von Elektro-mechanik, Magnetik, Thermik
- Messung und Verifikation auf Motorprüfstand



Motoren und Umrichter am NGT HST Fahrwerk



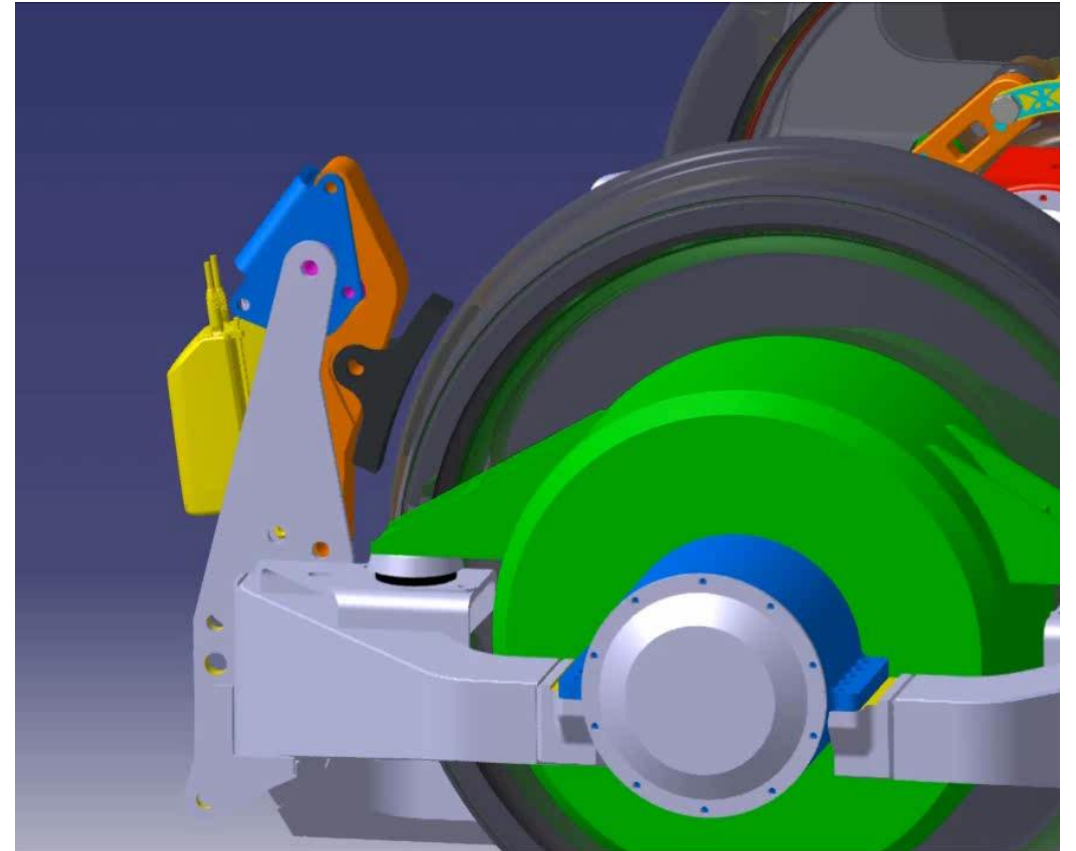
Motoren und Umrichter auf der InnoTrans 2018



NGT HST Fahrwerk

Mechanische Park- und Putzbremse

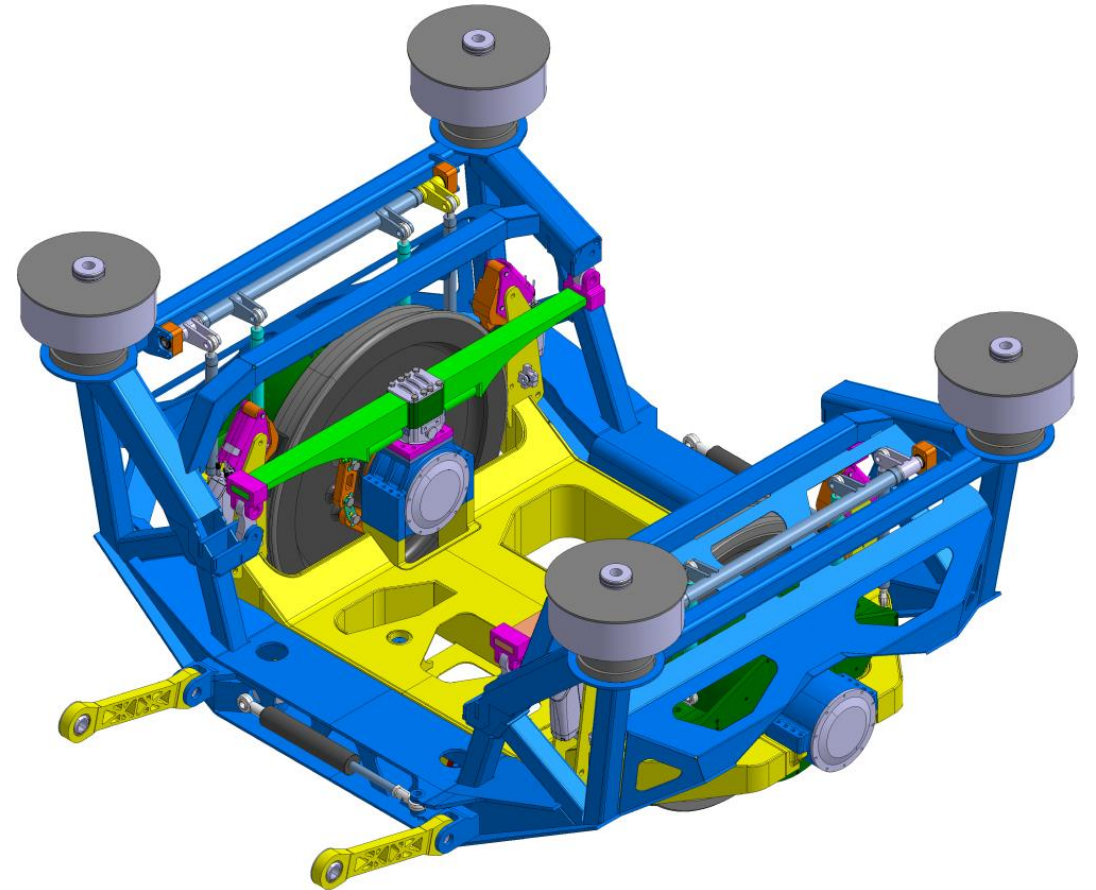
- Klotzbremse als Parkbremse und Putzbremse
- Traktions- und Bremsmomente über Elektromotoren und lineare Wirbelstrombremse
- Keine Bremsscheibe notwendig
- Kunststoffbremsklotz mit geringer Verschleißreserve
- Kompakter Mechanismus
- Alle Drehgelenke mit geraden Lagern
- Elektrischer Aktor (5kN)
- Mechanische Übersetzung ca. 3:1



NGT HST Radträger mit Bremse, CAD-Modell

Inhalt

- Projekt Next Generation Train
- DLR Forschungsinfrastruktur NGT-Fahrwerk (NGT-FuN)
- Hochgeschwindigkeitsfahrwerk NGT HST
- **Entwicklungswerkzeuge NGT HST (Laufdynamik)**
 - **Simpack, Dymola/Modelica, 1:5 Rollprüfstand**
- NGT-FuN Integrationsprüfstand
- Weitere Forschungsfelder

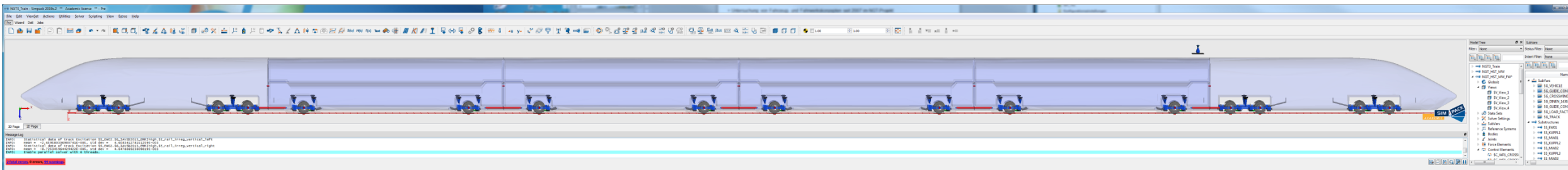
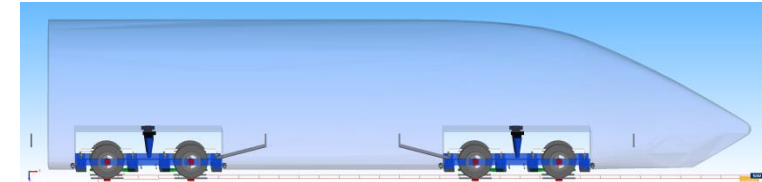
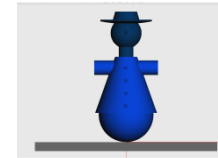
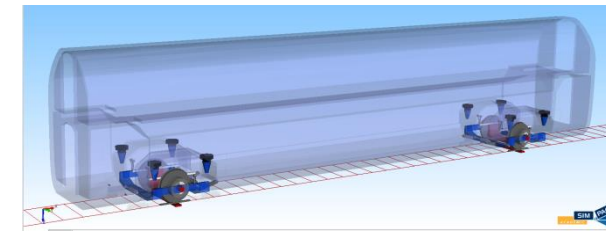
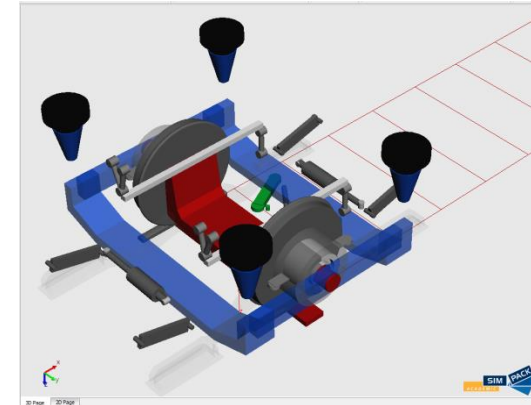


CAD-Modell des NGT HST (NGT-FuN) Fahrwerkes



Mehrkörpersimulation Simpack

- Untersuchung von Fahrzeug- und Fahrwerkskonzepten seit 2007
 - Funktionseigenschaften
 - Standardisierte Vermessungen z.B. DIN EN 12299, DIN EN 14363, DIN EN 14067-6, ...
- Referenzmodell mit höchstem Detailgrad
- Dynamik Fahrwerksauslegung, Optimierung Fahrwerksregelung
- Entwicklungsprozess mit Schnittstelle zur Konstruktion
- Größere Algorithmen (z.B. Regler) als FMU eingebunden
- Co-Simulation mit Simulink (Simpack SIMAT)

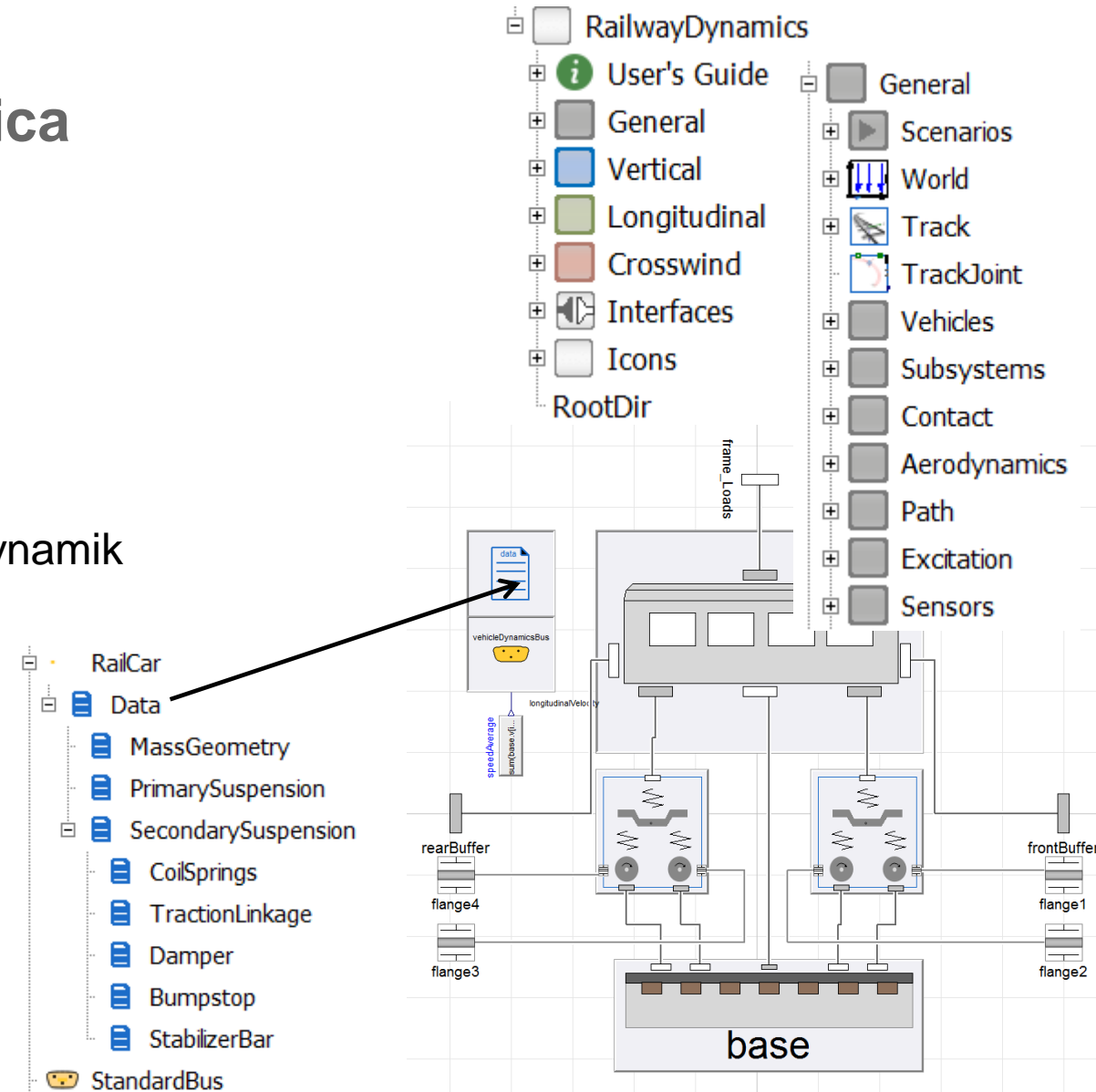


Simpack-Simulationsmodelle des NGT HST Zugkonzeptes

Mehrkörpersimulation mit Dymola/Modelica

DLR RailwayDynamics Bibliothek

- NGT HST Mittelwagen, AVMZ-Wagen, NGT-FuN, ...
- Modelle für Regler- und Beobachterentwicklung
- Voll-, Halb- und Viertelfahrzeugmodelle
- „General“ Subpackage
 - 3D Vollfahrzeugmodelle für Traktion, Komfort, Laufdynamik
 - Fahrweg und Rollprüfstand
- 3 spezialisierte Subpackages
 - „Vertical“ ⇒ Komfort
 - „Longitudinal“ ⇒ Traktion
 - „Crosswind“ ⇒ Seitenwind Beurteilung
- Vorlagen für Modellteile (templates)
 - Fahrweg, Fahrwerk, Wagenkasten, ...



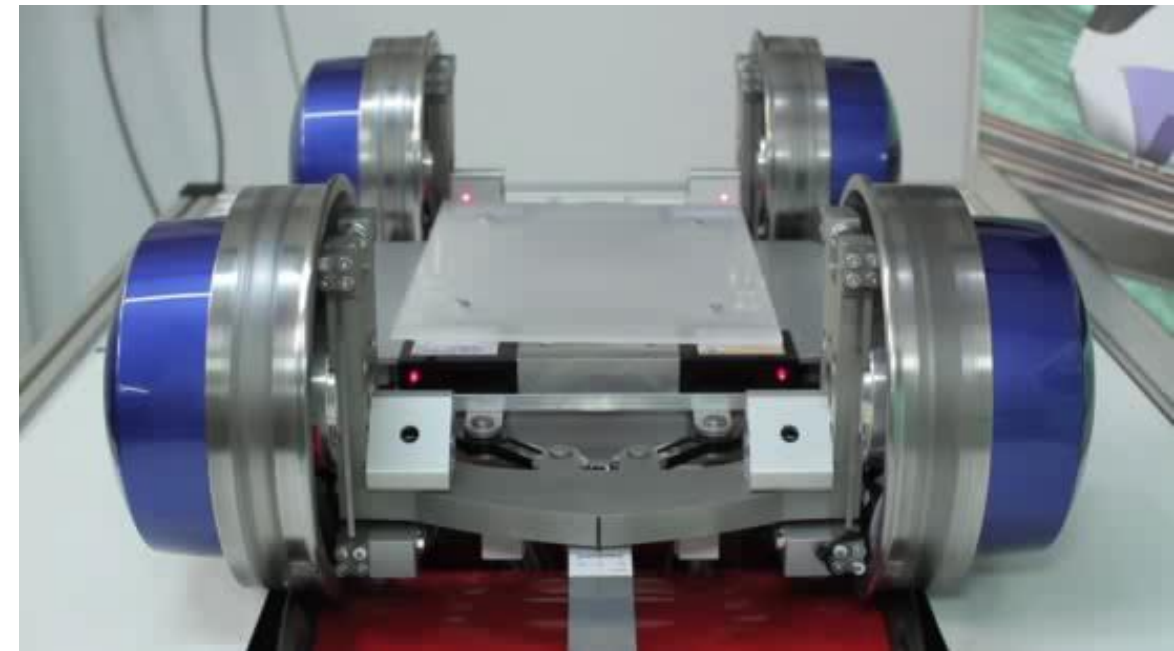
A. Heckmann, M. Ehret, G. Grether, A. Keck, D. Lüdiche, C. Schwarz: „Overview of the DLR RailwayDynamics Library”, Proceedings of the 13th International Modelica Conference, Regensburg, Germany, 4.-6. März 2019, Linköping University Electronic Press, S. 323–332

DLR 1:5 Rollprüfstand

- Aufbau seit 1984 von M. Gretzschel und A. Jaschinski
- Validierung von Mehrkörpersimulationen (Simpack)
- Radsatz- und Einzelrad-Fahrwerke

- Aktuell: NGT Fahrwerk
- Spurführungsregelung über Differenzdrehmomente
- Radnahe Motoren als Direktantriebe pro Rad

- Automatisierung mit MATLAB Simulink Realtime (xPC)
- Schnittstellenkarten von National Instruments, Quatech (RS485), Softing (2x CAN)
- Laser-Abstandssensorik, Encoder, Kraft-Momenten-Sensoren (KMS), IMU, Gierwinkel (Laser)

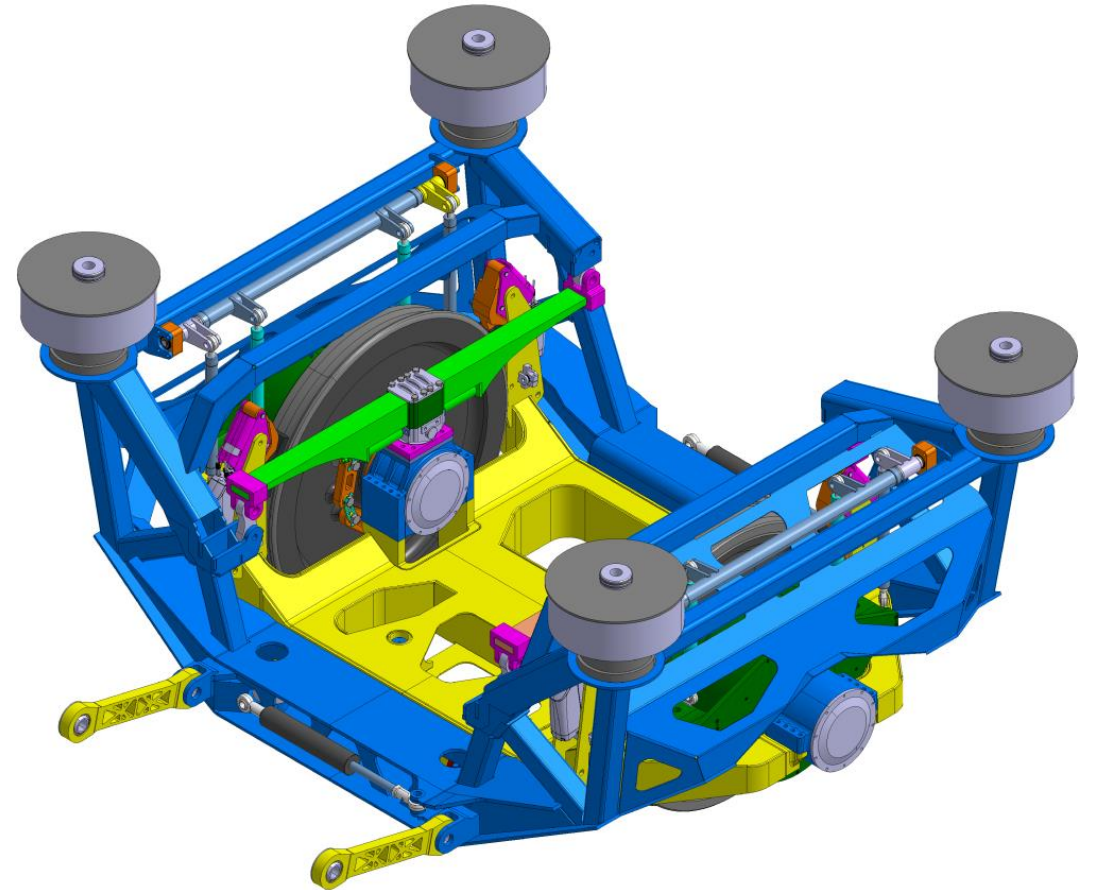


NGT HST Fahrwerksdemonstrator, Maßstab 1:5, auf Rollprüfstand



Inhalt

- Projekt Next Generation Train
- DLR Forschungsinfrastruktur NGT-Fahrwerk (NGT-FuN)
- Hochgeschwindigkeitsfahrwerk NGT HST
- Entwicklungswerkzeuge NGT HST
- **NGT-FuN Integrationsprüfstand**
- Weitere Forschungsfelder

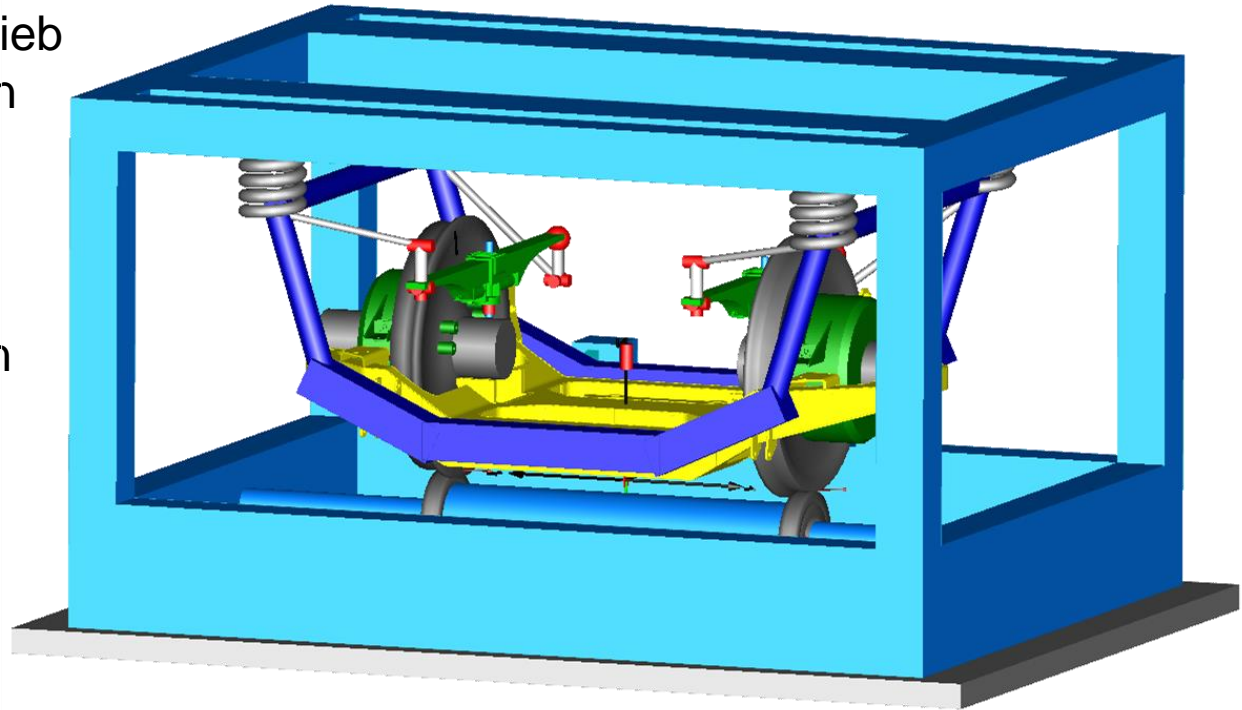


CAD-Modell des NGT HST (NGT-FuN) Fahrwerkes



NGT FuN Prüfstandskonzept

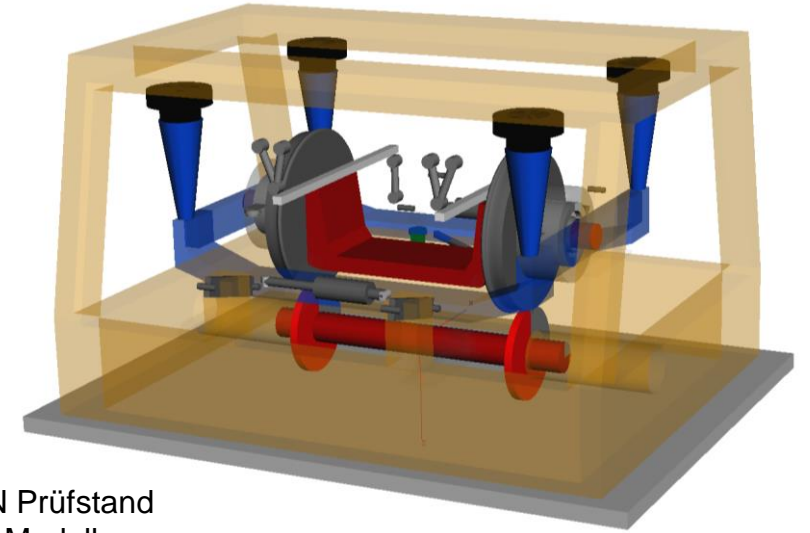
- Integrationsumgebung
 - Hilfsgestell für Zusammenbau und Inbetriebnahme
 - Arbeitsumgebung für Fahrwerks-Aufbau und Betrieb
 - Versuchsvorbereitung zwischen Messkompagnien
- Systemumgebung für NGT HST Fahrwerk
- Schnittstelle zu Wagenkasten und Schiene nachbilden
- Automatisierung von Fahrwerk und Prüfstand
- Büroumgebung zur Prüfstandsbedienung
- Trennung zwischen Fahrwerk und Prüfstand (Integrations-Labor)



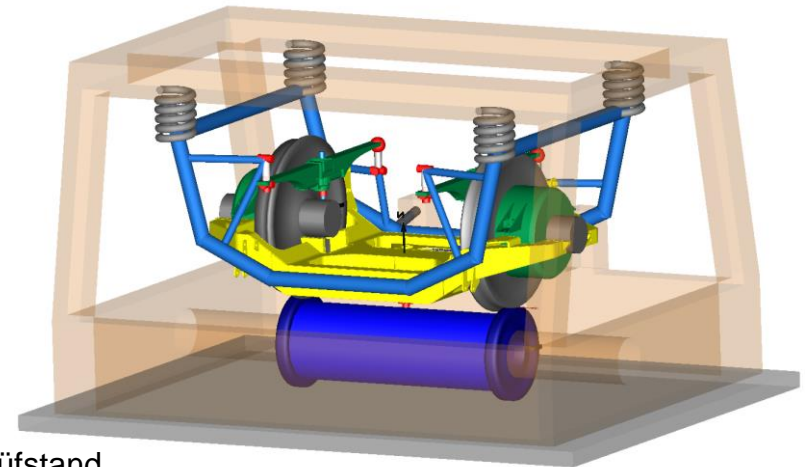
NGT HST Fahrwerkes mit Prüfstandsrahmen (Konzept)
Visualisierung des Dymola/Modelica Simulationsmodells

Integrationsprüfstand Mehrkörper-Simulationsmodelle

- Untersuchung der Variante mit einer Rolle
- Abgleich der beiden Simulationsmodelle
- Simpack-Mehrkörpermodell
 - Fahrwerksmodell aus Fahrzeug-/Zugsimulation abgeleitet
 - Visualisierung mit vereinfachten Körpern
 - Untersuchung der Fahrdynamik
 - Umgebungsmodell für Co-Simulation mit MATLAB (SiL)
- Dymola/Modelica Mehrkörpermodell
 - Basiert auf DLR RailwayDynamics Bibliothek
 - Visualisierung mit CAD-Modellen
 - Multiphysikalische Modellierung
 - Weiterentwicklung als Echtzeitmodell, FMU in RCP-System (HIL)



NGT-FuN Prüfstand
Simpack-Modell

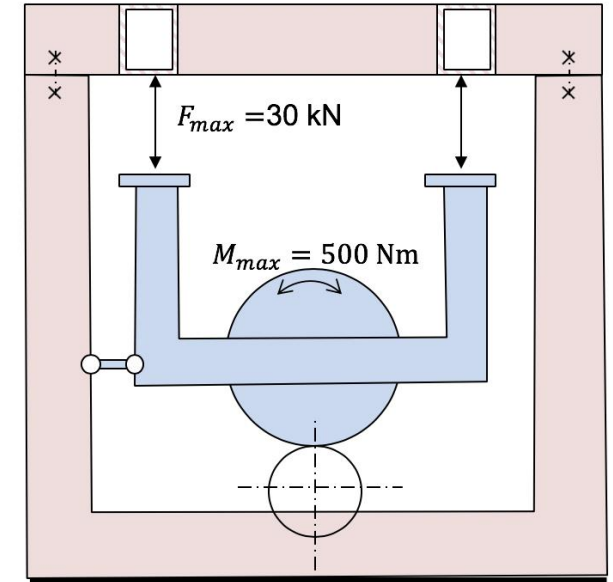


NGT-FuN Prüfstand
Dymola/Modelica-Modell

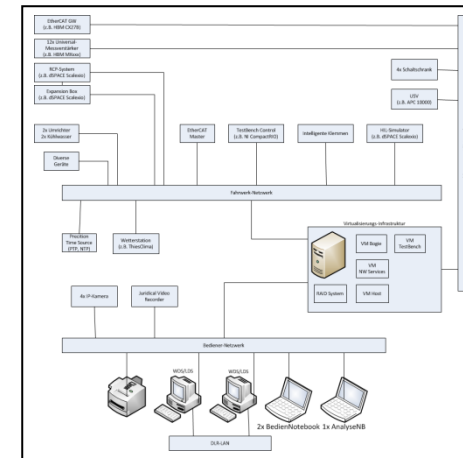


NGT FuN Integrations-Labor

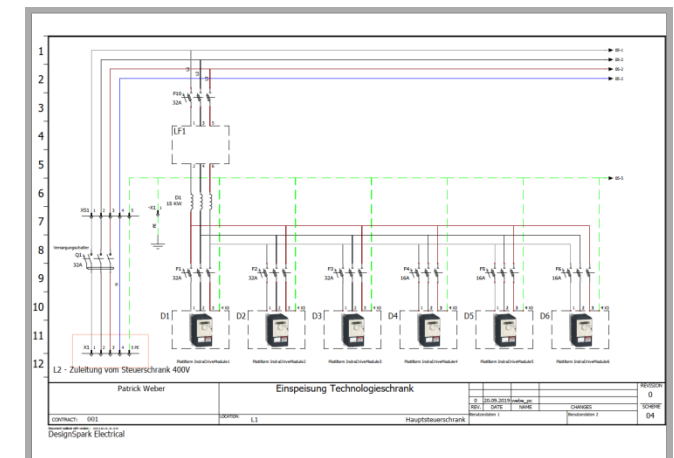
- Mechanischer Aufbau des „Käfig“
 - Auslegung, Entwicklungsprozess, Konstruktionsentwurf
 - Externe Detailkonstruktion und Fertigungszeichnungen
 - Externe Mechanische Fertigung
- Elektrischer Aufbau des Prüfstandes
 - Verkabelung und Schaltschränke
 - Spannungsversorgungen 1000V ... 5V
 - Dokumentation in Elektro-CAD
- Prüfstandsautomatisierung
 - Separate Echtzeitrechner-Plattform RCP/SPS
- Prüfstandsvernetzung, IT-Infrastruktur
 - Vernetzung RCP und Messequipment
 - Separates Büronetzwerk mit Server



Prüfstandsrahmen mit Fahrwerk (Skizze)



NGT-FuN Netzwerkarchitektur

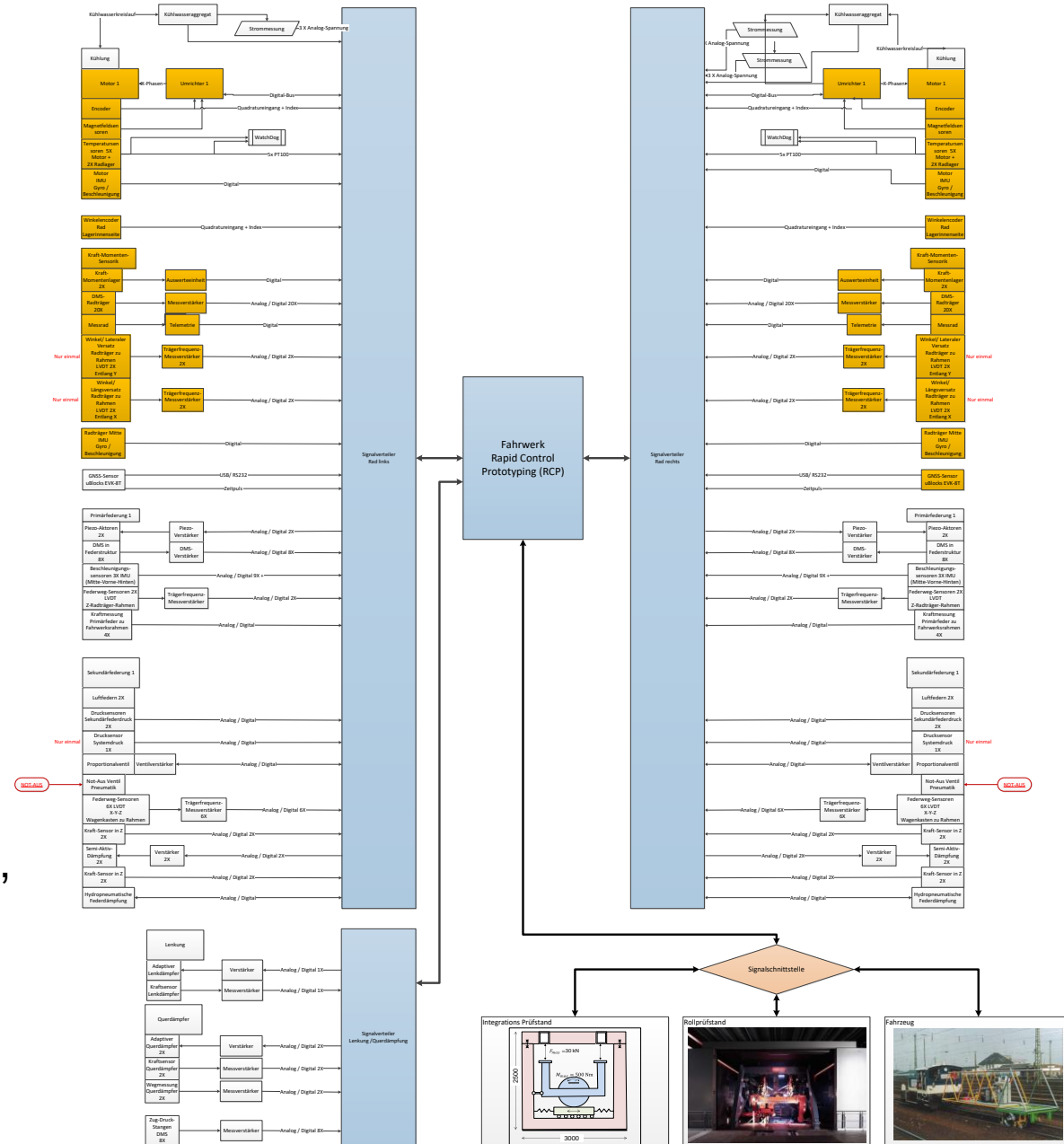


Schaltplan im Elektro-CAD (Beispiel)



Sensorik- und Messtechnikkonzept

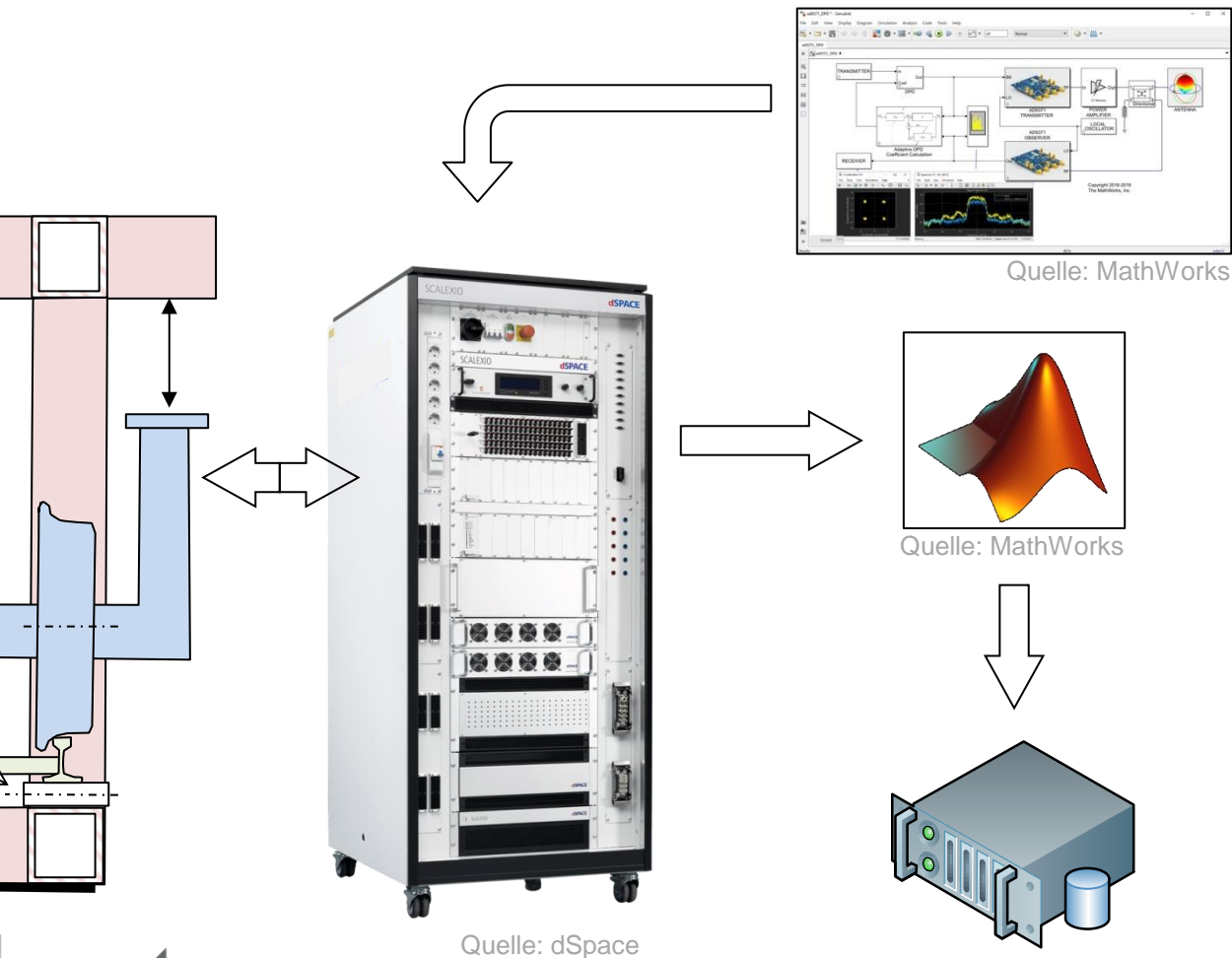
- Operative Sensorik, aktive Nutzung in Applikationen
- Referenzsensorik
- Trennung von Messdatenerfassung und Verarbeitung
- Hardware zur Messdatenerfassung und Digitalisierung
 - Von RCP-Systemhersteller
 - Separate Messdatenerfassung
 - Intelligente Klemmen
- Hohe Kanalanzahl (rd. 200 Messkanäle)
- AI (70x), AO (20x) LVDT (30x), DMS (50x), PT100 (10x),
- Encoder (4x), DI (10x), DO (10x), RS232 (10x), RS485 (4x) , CAN (2x),
- Ethernet (2x), EtherCAT Master, FireWire (2x)



Bildquelle: Knorr Bremse, RWTH Aachen



Informationsverarbeitung

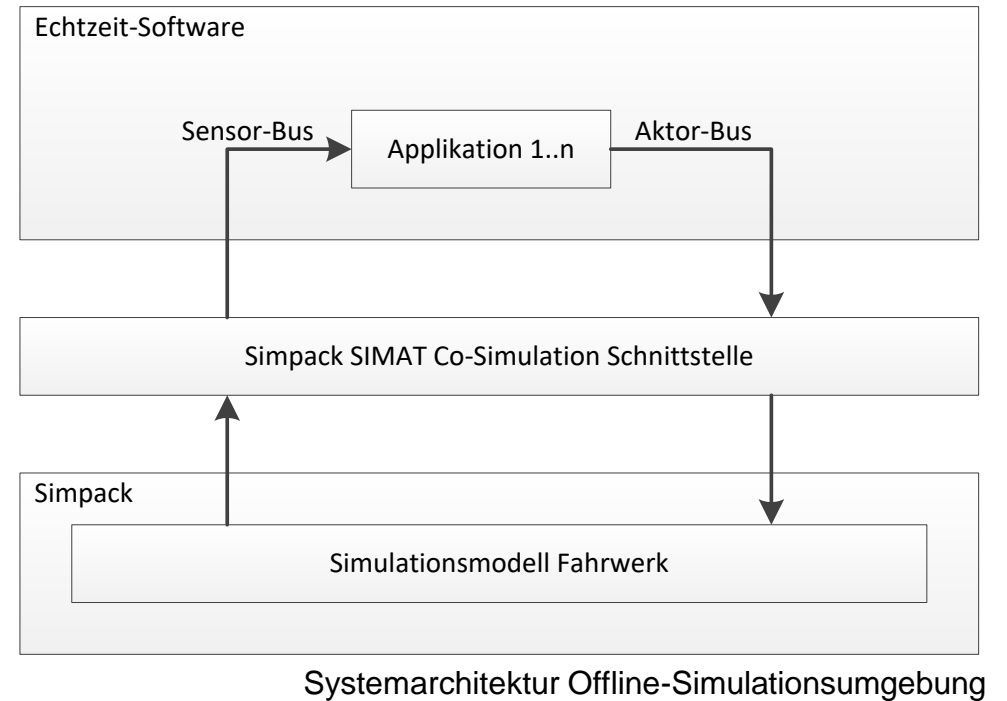


- Echtzeit-Informationsverarbeitung
 - Rapid-Control-Prototyping System (RCP) zur Automatisierung des Fahrwerkes
 - RCP Software-Framework
- Rohdaten-Logging System, automatisiertes Post-Processing, Messdaten-Management
- Erfassung aller Sensorsignale am Fahrwerk
- Sensorfusion und Beobachter
 - Referenzsensoren zu Referenz-Messgrößen
 - Längs-, Lateral-, Vertikalbeobachter
- Regelung Längs-, Lateral-, Vertikaldynamik
- Simulationsumgebung Fahrwerk+Prüfstand
 - Echtzeitsimulation von Umgebungsmodellen



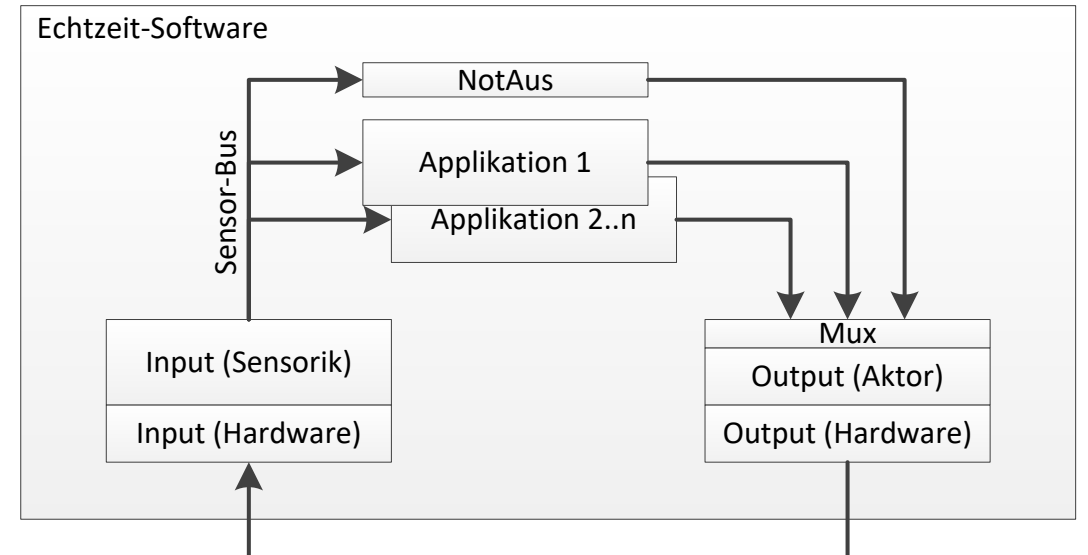
Echtzeit-Programmierung in Offline-Simulationsumgebung Software-in-the-Loop (SiL)

- Entwicklung der Echtzeit-Programme
 - Zusammenfassung und Strukturierung der Algorithmen
- Definition der Software-Schnittstellen
- Kopplung mit einer Simulationsumgebung
 - Bildet RCP-System und den Prüfstand mit Fahrwerk ab



Echtzeitsoftware auf RCP-System

- Messdaten Erfassung (Hardware-Input)
- Berechnung der Sensorsignale aus Rohdaten (Input)
 - Best-mögliche Online-Signale der Sensoren
 - Sensor-Bus steht allen Applikationen zur Verfügung
- Applikationen
 - Aktivierbare Anwendungsprogramme
- Zusammenfassung der Ausgabesignale
 - Aktive Applikation zu Ausgang
 - Konvertierung von physikalischen zu technischen Signalen

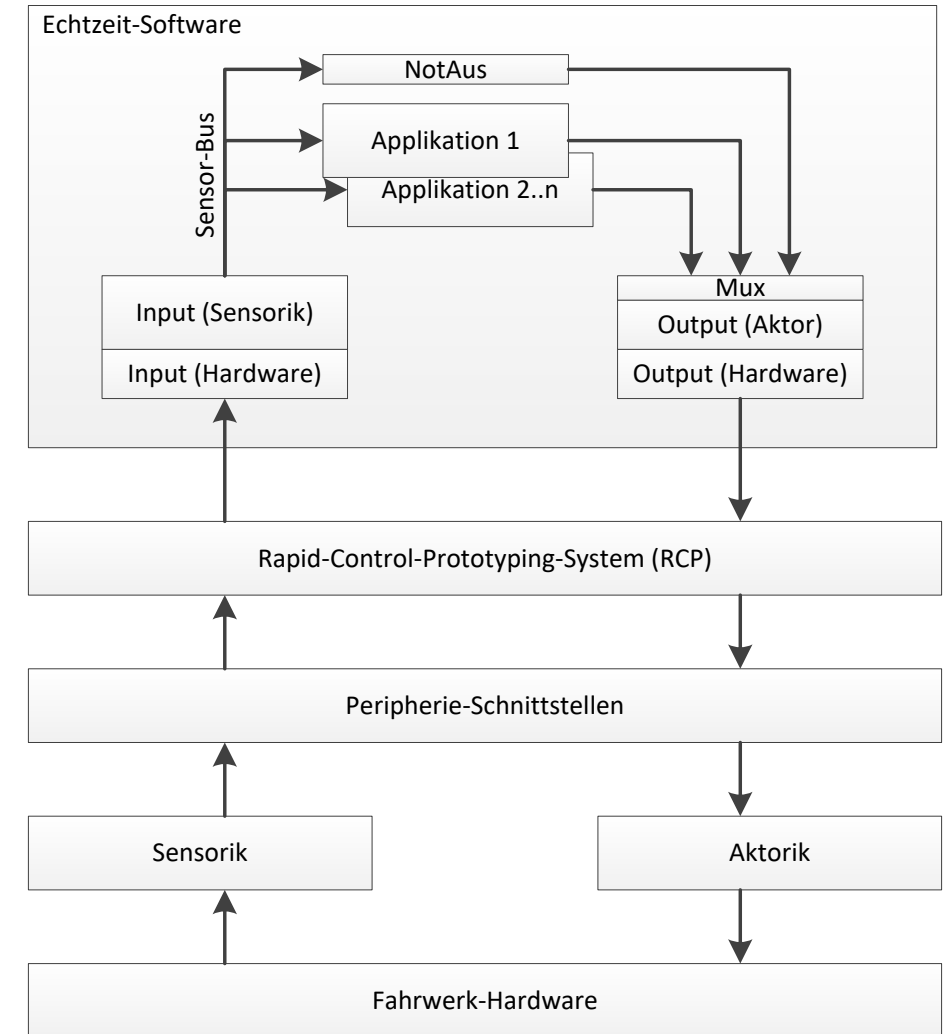


Architektur der Echtzeitsoftware auf dem RCP-System



Echtzeitverarbeitung mit Rapid Control Prototyping Hardware

- Modellbasierte Softwareentwicklung
- Migrationsschritte von Offline-Simulation zu RCP
- Rapid-Control-Prototyping-System (RCP)
 - Recheneinheit: Multi-Core Rechner
 - Core-Aufteilung nach Berechnungsaufwand
 - Peripherie-Schnittstelle
 - Echtzeitfähige digitale Datenübertragung
 - Zentrale/Dezentrale Messverstärker
- Schnelle Task: 1000Hz
- Langsame Task: 10Hz, 50Hz, 100Hz



Systemarchitektur Rapid-Control-Prototyping-System



Anwendungen

- Fahrwerksanwendungen
 - Regelung: Spurführung, Traktion, Primärfeder, Sekundärfeder, Querzentrierung, Roll- u. Nickkompensation
 - Beobachter: Lateraldynamik, Traktion, ...
 - Pfadplanung: Lateral, Vertikal
 - Zustandsüberwachung (Condition monitoring)
 - Externe Kommunikation
 - Rohdaten Streaming
- Simulationsumgebung
 - Software-in-the-Loop: Softwareentwicklung mit Simulationsmodell (Simpack/Dymola)
 - Hardware-in-the-Loop: Fahrwerk mit Restfahrzeugsimulation, TCN-Netzwerk
- Identifikation des Fahrwerkes
- Validierung der Simulationsmodelle



Weitere Forschungsfelder

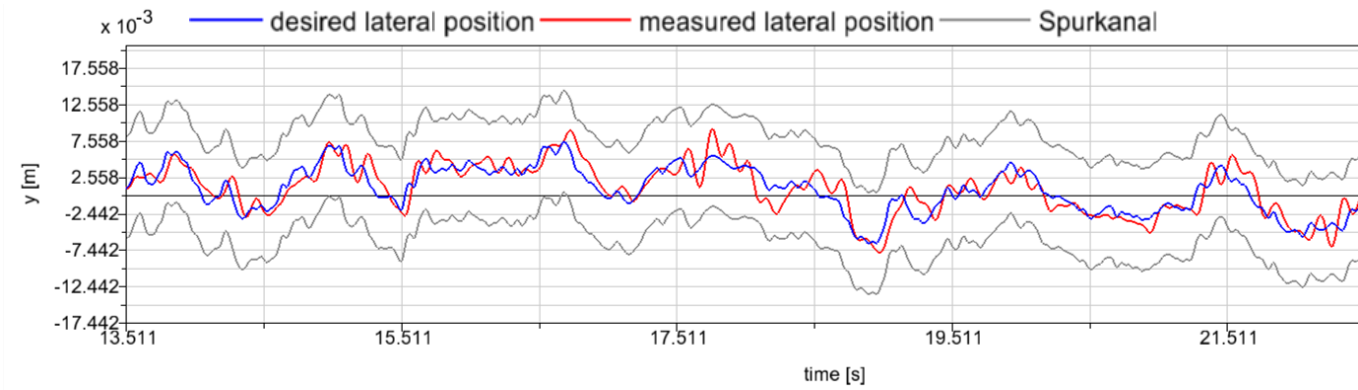
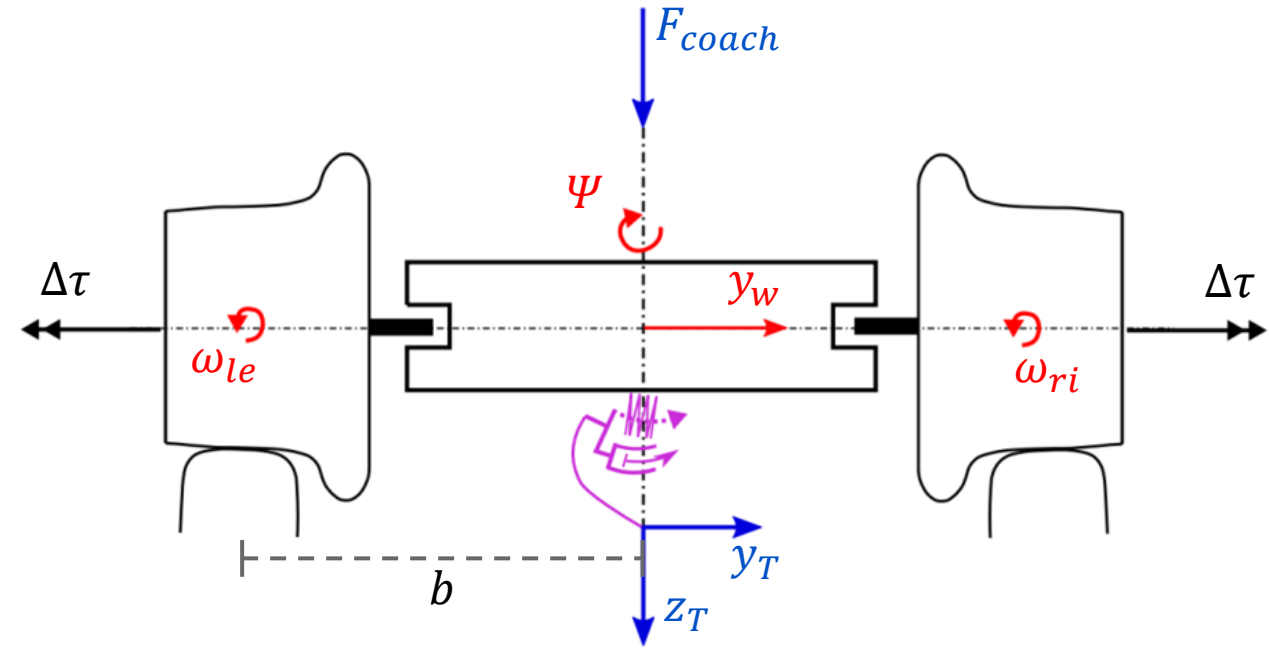
- **NGT-FuN als Plattform für weitere Anwendungen aus Forschung und Industrie**
 - Gemeinsame kleine bis große Projekte
- Rad-Schiene Themen
 - Kontakt, Verschleiß, Reibeigenschaften, Traktion, Bremse
 - Traktions-/Bremsregelungen, Schleuder-/Gleitschutz
- Neue/ungewöhnliche Sensorik, Messtechnik
- Mechatronische Systeme
- Spezielle Themen für Einzelradfahrwerke

- Konstruktion / Leichtbau / neue Werkstoffe / Produktionsverfahren
- Wartung, Data Science
- Praktischer Eisenbahnbetrieb ...
- Normative Arbeiten
 - Weiterentwicklung von Vorschriften, Risikoorientierte Ansätze



Spurführungsregelung

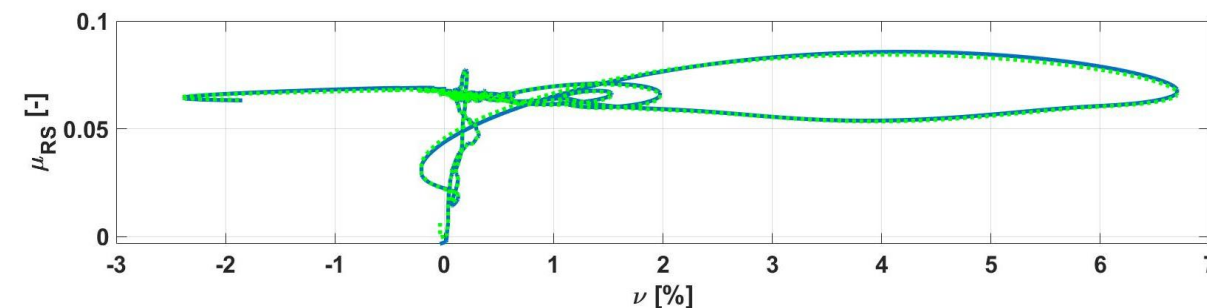
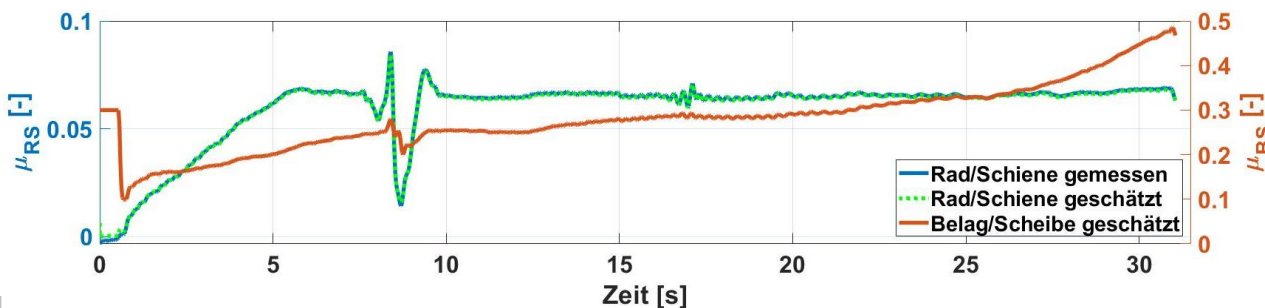
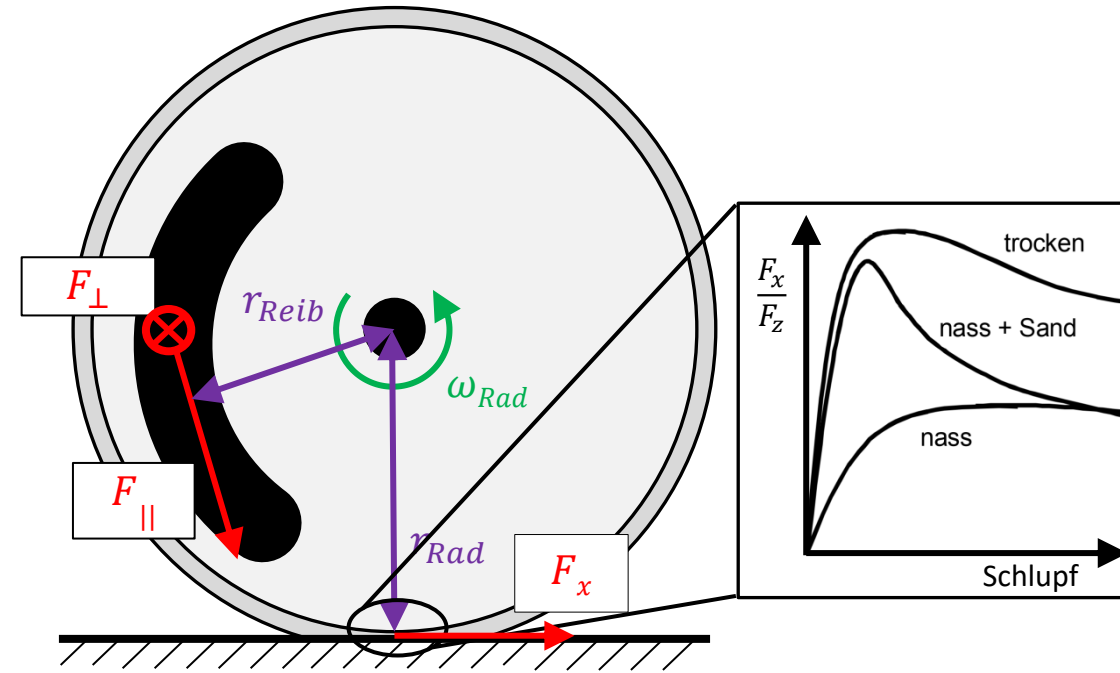
- Mechatronisches Einzelradfahrwerk
 - Radpaar mit unabhängig voneinander drehenden Rädern
 - Reduktion von Rad- und Schienenverschleiß
- Benötigt Spurführungsregelung
 - Komplexes nichtlineares System
 - Robuste Regelung, unterschiedliche Szenarien
 - Unterschiedliche Geschwindigkeiten, Fahrweganregung, Bögen, Verschleißprofile
- Reglerdesign mit „feedback linearization“
 - Explizite Behandlung von Nichtlinearitäten
 - Veränderliche operative Bedingungen



Technologieanwendung: Beispiel DynoRail

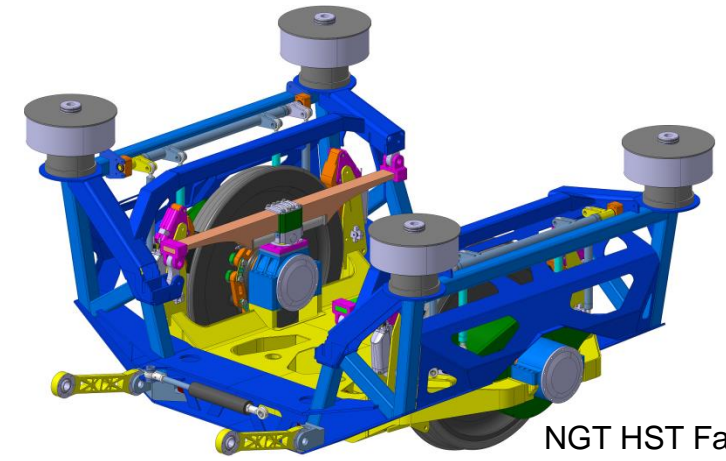
Reibwert-Beobachter

- Identifizierung des Reibzustandes
 - Am Rad-Schiene-Kontakt
 - Zwischen Bremsbelag und Bremsscheibe
- Vorteile
 - Adhäsions-basierte Traktionsregelung möglich
 - Überwachung von Motor- und Bremssequipment
- Implementierung
 - Fusion bahnüblicher Sensoren
 - Nichtlinearer Kalman Filter
 - Berücksichtigung der phys. Reibwertgrenzen

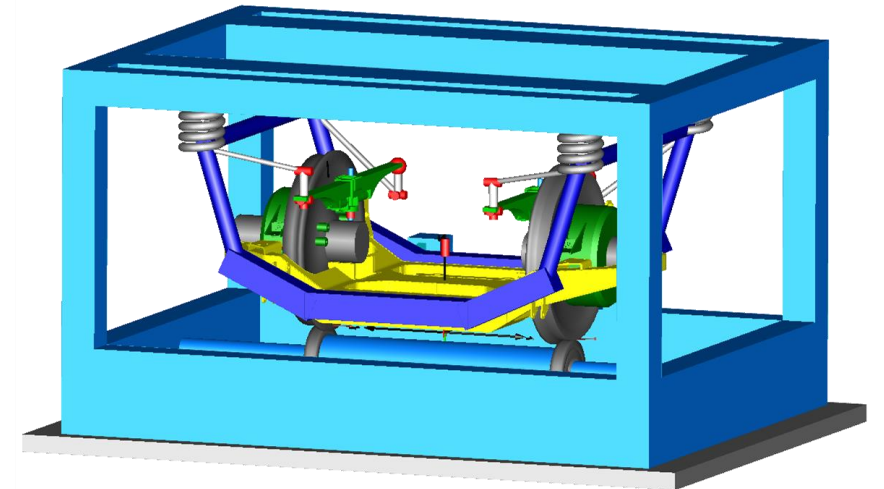


Zusammenfassung

- Projekt Next Generation Train
- Hochgeschwindigkeits-Zugkonzept NGT HST
- DLR Forschungsinfrastruktur NGT-Fahrwerk (NGT-FuN)
 - Fahrwerksentwicklung
 - Integrationsprüfstand und Labor
 - Messtechnik und Informationsverarbeitung
 - Weitere Forschungsfelder



NGT HST Fahrwerk
CAD-Modell



3x Radträger-Schweißkonstruktion gefertigt





Vielen Dank!

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR)

Dr. Daniel Lüdicke, Gustav Grether, Dr. Andreas Heckmann

Institut für Systemdynamik und Regelungstechnik

Abteilung: Fahrzeug-Systemdynamik

Münchener Str. 20

82234 Weßling/Oberpfaffenhofen

Telefon: +49 (0) 8153 28 {-1131|-2537|-1699}

E-Mail: {daniel.luedicke|gustav.grether|andreas.heckmann}@dlr.de



Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR)

David Krüger¹, Christian Weber²

Institut für Fahrzeugkonzepte

¹Abteilung: Fahrzeugarchitekturen und Leichtbaukonzepte

²Abteilung: Alternative Energiewandler

Pfaffenwaldring 38-40

70569 Stuttgart

E-Mail: {david.krueger|christian.weber}@dlr.de