

Alternative Antriebe für Rangierlokomotiven

EWS TU Berlin
31.01.2022

Johannes Pagenkopf, Victoria Jäger, Marcel Konrad, Mathias Böhm

Institut für Fahrzeugkonzepte
Berlin & Stuttgart



Wissen für Morgen



Tätigkeitsfelder des DLR

- Luftfahrt und Raumfahrt
- **Energie und Verkehr**
- Digitalisierung und Sicherheit
- Planung und Umsetzung der deutschen Raumfahrtaktivitäten
- Projektträger zur Forschungsförderung



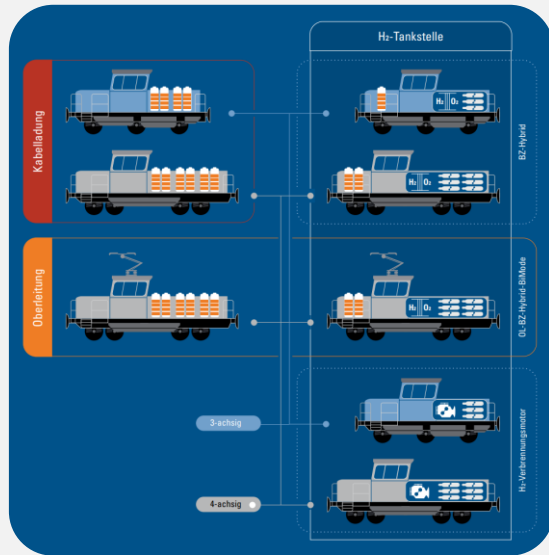
Deutsches Zentrum
für Luft und Raumfahrt
Wissen für Morgen



Agenda

1. NOW-Studie

Eignungsuntersuchung alternativer Antriebsoptionen für verschiedene Einsatzfelder und Typen von Rangierlokomotiven



2. Duisport-Vorstudie (Übersicht)

Machbarkeitsuntersuchung von Brennstoffzellen-Hybrid-Rangierlokomotiven im Hafeneinsatz bei Duisport Rail im Rahmen einer Vorstudie



Machbarkeitsanalyse Rangierlokomotiven mit alternativen Antrieben (NOW-Studie)



**Machbarkeitsanalyse alternativer
Antriebe im Einsatzgebiet
von Rangierloks in Deutschland**

NOW
NOW-GMBH.DE

Urheber: DLR / kursiv Kommunikationsdesign



Studie für die NOW

Machbarkeitsanalyse alternativer Antriebe im Einsatzgebiet von Rangierloks in Deutschland

Projektziele

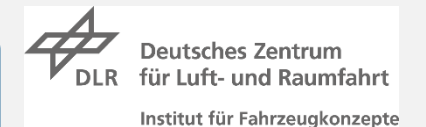
- Status Quo Antriebe in Rangierlokomotiven
- Technisch-betriebliche Anforderungen an alternative Antriebe
- Eignung von (Nullemissions)-Antriebstechnologien für Rangierlokomotiven
- Marktpotentiale

Auftraggeber

- NOW GmbH (Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie)

Projektlaufzeit

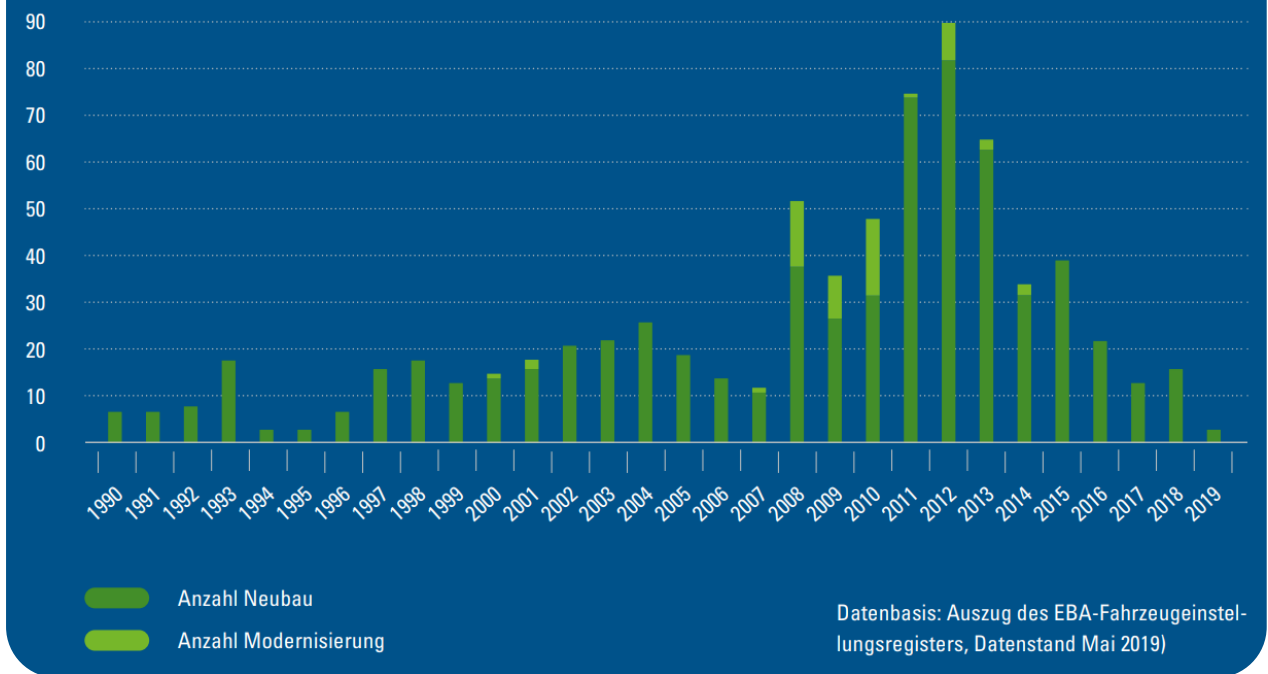
- 2020 - 2021



Markt- / Bestandsanalyse Rangierlokomotiven

- Derzeit ca. 2.800 Rangierlokomotiven in Dtl.
- weit überwiegend Dieselantrieb (im Bestand)
- Hohes Flottendurchschnittsalter (42 a)
- Jüngst vermehrt Dieselhybrid- sowie Oberleitungs-Akku-Hybrid--Lokomotiven

ABBILDUNG 1 Bestand Rangierlokomotiven in Deutschland nach Herstellungsjahr, unterteilt in Neubau (N=684) und Modernisierungen (N=56), für den Zeitraum 1990 bis 2019



Einsatzfelder und Anforderungen an Rangierlokomotiven

Einsatzfelder

- Rangier-/Werkbahndienst
 - Zugbildung/-auflösung
 - Vershub in Anschlussgleise
 - Werkbahnbetrieb
- Streckendienst / Verteilverkehre
 - Übergabefahrten im EWLK
 - Regionaler SGV
 - Baustellendienste
 - Direktzugverkehr

⇒ mittlere Leistung: **gering...mittel**
Energiebedarf: **gering...mittel**

⇒ mittlere Leistung: **mittel...hoch**
Energiebedarf: **mittel...hoch**

- **Anforderungen an alternative Antriebe in Rangierlokomotiven (u.a.):**
 - Robustheit und Langlebigkeit
 - Emissionsfreiheit (z.B. bei Hallenbetrieb)
 - Hohe Zugkräfte
 - Hohe Leistungsabgabe und hohe Energiespeichermenge im Streckenbetrieb

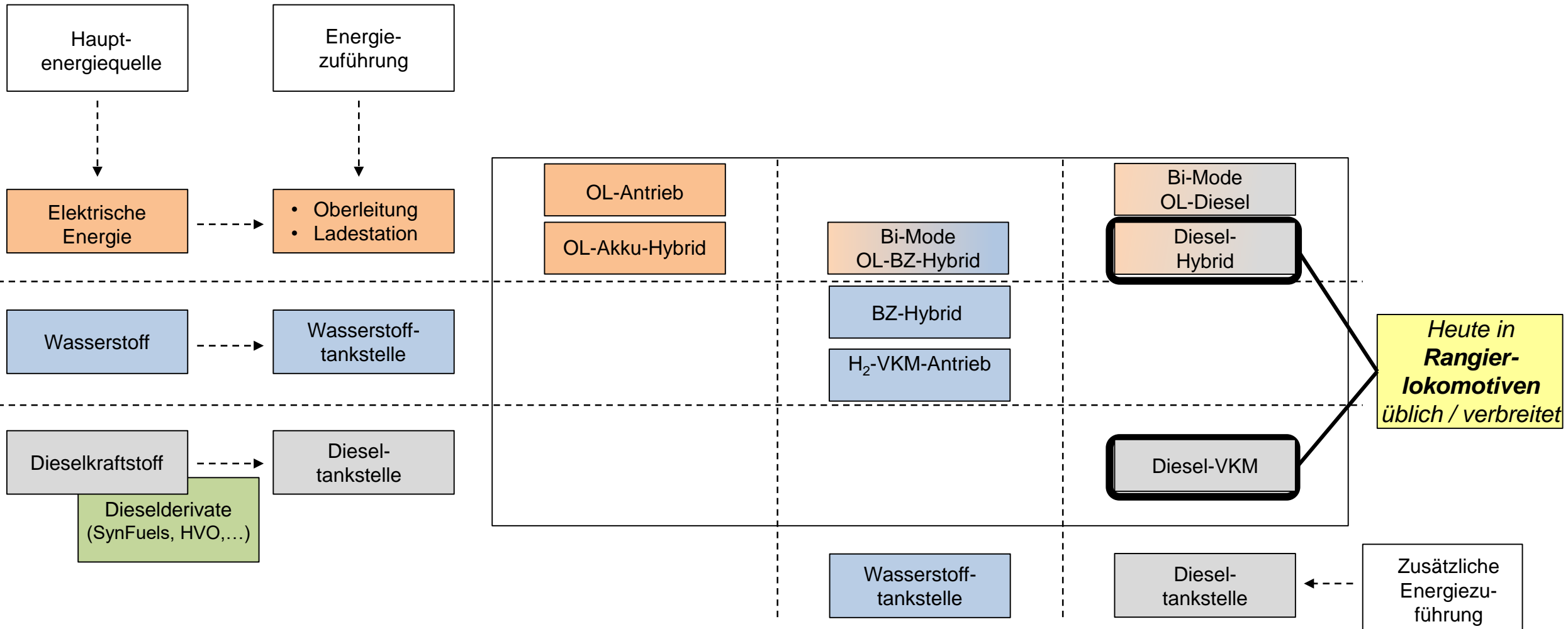
⇒ große Vielfalt an energetischen Anforderungen



Bildquellen: oben: Rangierbahnhof Mannheim von Rhein Neckar. CC BY-NC 2.0);
Mitte: Nahgüterzug (bahn.photos. CC BY-ND 2.0); unten: Railport (Railport Chemnitz)



Fahrzeugantriebs- und Infrastrukturoptionen (Auswahl)



Alternativen zum Diesel in Rangierlokomotiven - (teilweise) schon verfügbar

Dieselhybrid | Übergangstechnologie, schon im Regeleinsatz

 <p>Im Einsatz</p>	 <p>Im Vertrieb</p>	 <p>Bestellt</p>	 <p>Im Einsatz</p>	 <p>Im Einsatz</p>	 <p>Im Vertrieb</p>	 <p>Demonstrator</p>
<p>Alstom H3 Dieselhybrid von Paul Smith. Lizenz: CC BY-NC-SA 2.0</p>	<p>Gmeinder DE60C – Dieselhybrid (© Gmeinder)</p>	<p>Toshiba T-HDB 800 für DB Cargo – Dieselhybrid (Quelle: eurailpress)</p>	<p>CRRC 1004.5 von Bukk. Lizenz: CC-BY-SA-4.0</p>	<p>Gmeinder DE75 BB – Dieselhybrid (© Gmeinder)</p>	<p>Nachrüst-Batteriesatz für Vossloh Locomotives DE 18 (© Vossloh Locomotives)</p>	<p>HELMS von Boilerdoc01. Lizenz: CC BY-SA 4.0</p>

Bi-Mode Oberleitung-Diesel | in CH im Einsatz

 <p>Konzept</p>	 <p>Im Einsatz</p>	 <p>Im Einsatz</p>	 <p>in Entwicklung</p>
<p>Stadler NG Rangierlok (© Stadler Rail)</p>	<p>Alstom Prima H4 / SBB Aem940 von Joachim Lutz. Lizenz: CC BY-SA 4.0</p>	<p>Stadler Eem923 von bahn.photos. Lizenz: CC BY-ND 2.0</p>	<p>Vossloh Locomotives DM 20 (© Vossloh Locomotives)</p>

OL-Akku-Hybrid | in CH im Einsatz, ab 2024 auch in D

 <p>Im Einsatz</p>	 <p>Bestellt</p>	 <p>Im Einsatz</p>
<p>Stadler Geaf 2/2 von Kecko. Lizenz: CC BY 2.0</p>	<p>Vossloh Locomotives DM 20-EBB (© Vossloh Locomotives / Northrail)</p>	<p>CRRC für RCH (@ J. Grühler / RailBusiness)</p>



Alternativen zum Diesel in Rangierlokomotiven - (teilweise) schon verfügbar

BZ-Hybrid / H2VM | Versuchsträger / in Entwicklung

 <p>Demonstrator</p>	 <p>In Zulassung</p>	 <p>Demonstrator</p>	 <p>Demonstrator</p>
<p>BNSF Fuel Cell Locomotive (© BNSF)</p>	<p>Linsinger MG11 Hydrogen (© Linsinger)</p>	<p>CRRG FC Hybrid (Quelle: globaltimes.cn)</p>	<p>PESA FC Shunter Locomotive (© Pesa)</p>

Akkuloks | im Werksbahneinsatz verbreitet

 <p>Im Einsatz</p>	 <p>Im Einsatz</p>	 <p>Im Einsatz</p>	 <p>Demonstrator</p>	 <p>Im Einsatz</p>	 <p>bestellt</p>
<p>ExpressService ES3000 battery-electric shunter (© ExpressService)</p>	<p>ROTRAC E4 (© Zwiehoff)</p>	<p>Windhoff Telle-Trac RW60AEM (© Windhoff)</p>	<p>Grupa (Zarmen/Alfajet777, RailBusiness)</p>	<p>Zarmen aus © ZAGRO Bahn- und Baumaschinen GmbH, Bad Rappenau, ZAGRO E-MAXI XXL Rangierfahrzeug mit Elektroantrieb</p>	<p>Progress Rail EMD Joule battery electric shunter (Progress Rail)</p>

Alternative Kraftstoffe | In Erprobung



Abb: NOW



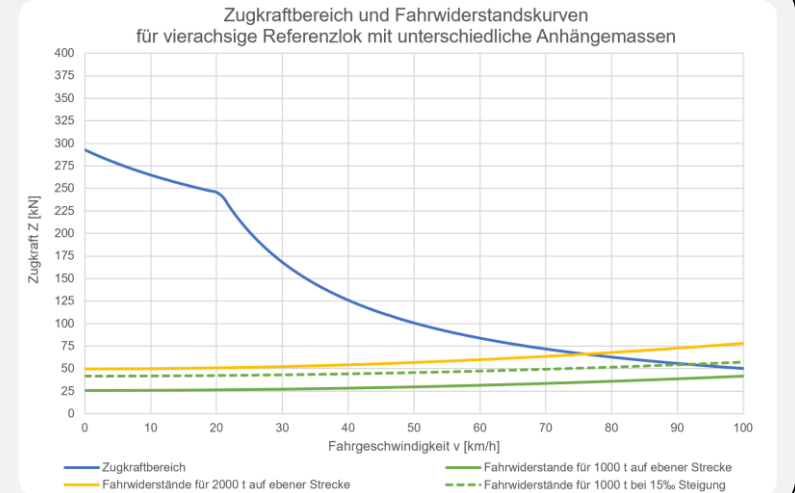
Machbarkeitsuntersuchung | Referenzlokomotiven

- Vierachsige **B'B'-Lok** vergleichbar zu z. B. MaK G 1206
 - 1.500 kW am Rad
 - 280 kN
 - 87 t Dienstmasse



MaK G 1206 – Dieselhydraulische Rangierlokomotive von Hugh Llewelyn. Lizenz: [CC BY-SA 2.0](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.0/) (Bildausschnitt)

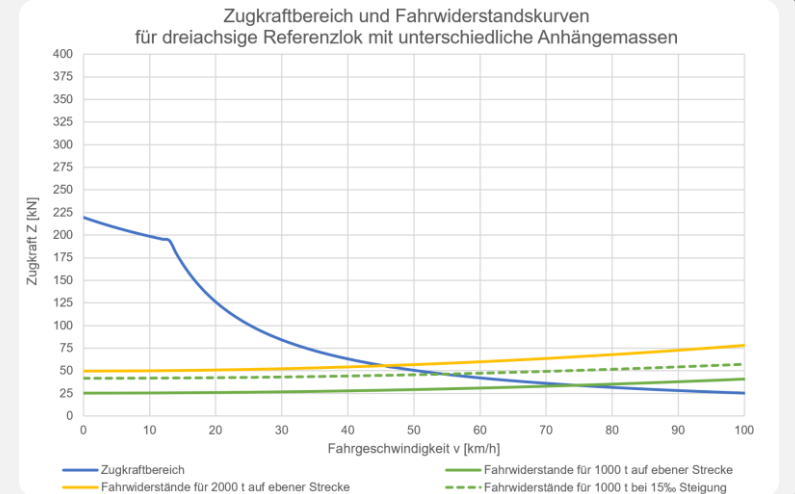
Die MaK G 1206 wurde ausgewählt, da sie weit verbreitet ist und auch im Streckenbetrieb eingesetzt wird.



- Dreiachsige **A'AA'-Lok** vergleichbar zu z. B. Alstom Prima H3
 - 700 kW am Rad
 - 240 kN
 - 67 t Dienstmasse



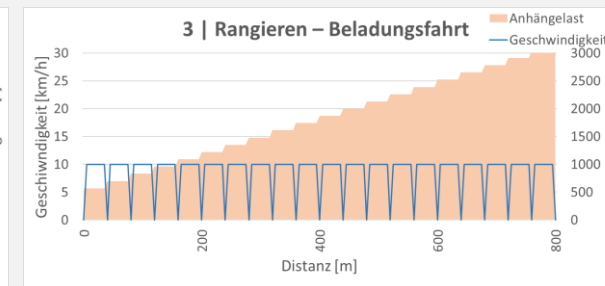
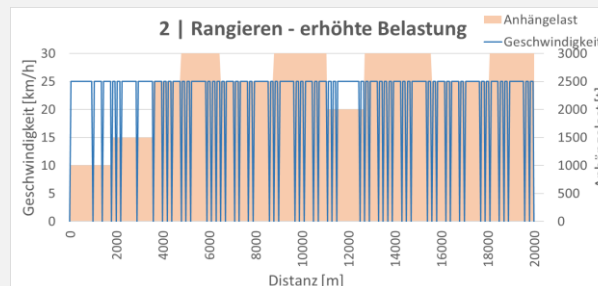
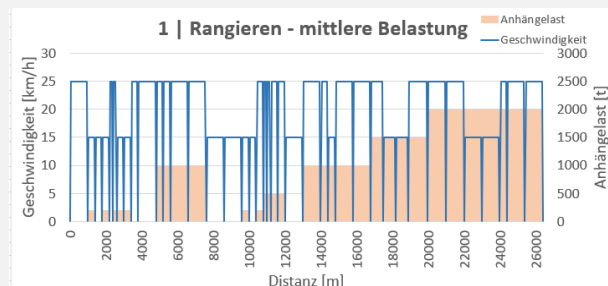
Alstom H3 Dieselhybrid von Paul Smith. Lizenz: [CC BY-NC-SA 2.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.0/)



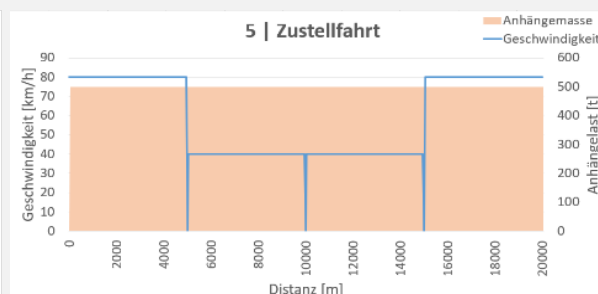
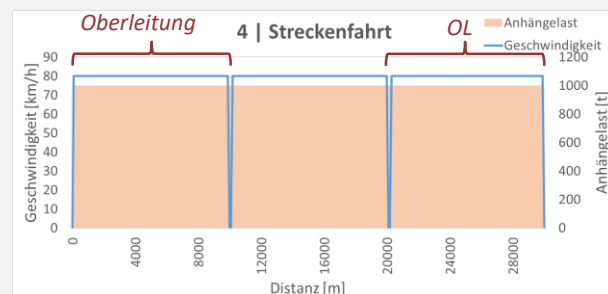
Lastprofile und Szenarien I

- Definition fünf generischer **Lastprofilbausteine** (Basis: Umfrage unter Rangierlokalhaltern)

- **Rangierprofile**



- **Streckenprofile**



- Kombination der Lastprofilbausteine zu **Szenarien**

- **Szenario R** – Rangierbetrieb in Industrie- und Hafenbahnen
- **Szenario Z** – Zwischenwerkverkehr
- **Szenario B** – Bedien-/Zustellfahrt im regionalen Güterverkehr

Loktypen

| BB

| BB

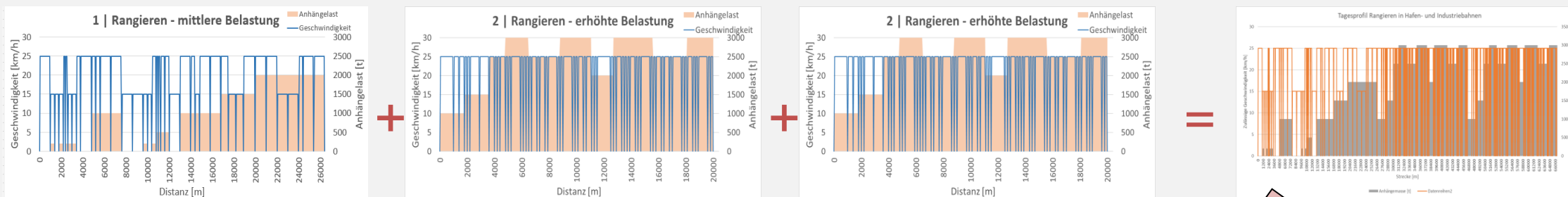
| AAA



Lastprofile und Szenarien II

Kombination der Lastprofilbausteine zu Szenarien

Bsp. Szenario R:



	Baustein 1 Rangierfahrt - durchschnittliche Belastung	Baustein 2 Rangierfahrt - erhöhte Belastung	Baustein 3 Rangierfahrt - Beladungsfahrt	Baustein 4 Streckenfahrt	Baustein 5 Zustell- und Bedienfahrt
entspricht z.B.	Rangierbetrieb (mittel)	Rangierbetrieb (schwer)	Hafen- / Werkseisenbahn	Zwischenwerkverkehr (mittel)	Zwischenwerksverkehr (leicht)
Länge Abschnitt [km]	26,3	20	0,8	30	20
Masse am Zughaken [t]	0...2.000	0...3.000	0...3.400	1.000	500
Erwartete Dauer [h]*	3,77	3,77	2	0,6	0,6
Leerlaufanteil %	30,9	5,3	83,8	<1	<1
Max. Geschwindigkeit [km/h]	25	25	10	80	80
Anzahl Anfahrvorgänge	40	60	20	3	4

*Die tatsächliche kann fahrzeugspezifisch von der erwarteten Dauer abweichen.

Bausteine zur Generierung Tagesprofil	Szenario Rangierbetrieb (R) Mittlerer bis schwerer Rangierbetrieb	Szenario Zwischenwerkverkehr (Z) Rangierfahrt, Beladungsfahrt und Streckendienst	Szenario Zustell- / Bedienfahrt im regionalen Güterverkehr (B)
1 - mittlerer Rangierdienst	1x	1x	1x
2 - schwerer Rangierdienst	2x	-	-
3 - Beladungsfahrt	-	1x	1x-
4- mittlerer Streckendienst	-	3x	-
5- Zustellfahrt	-	-	1x
Resultierende voraussichtliche Einsatzzeit [h]	11,3	7,6	6,4
Rangierfahrt gesamt [km]	66,3	27,1	27,1-
Streckenfahrt gesamt [km]	-	90	20
Tägliche Distanz gesamt [km]	66,3	117,1	47,1



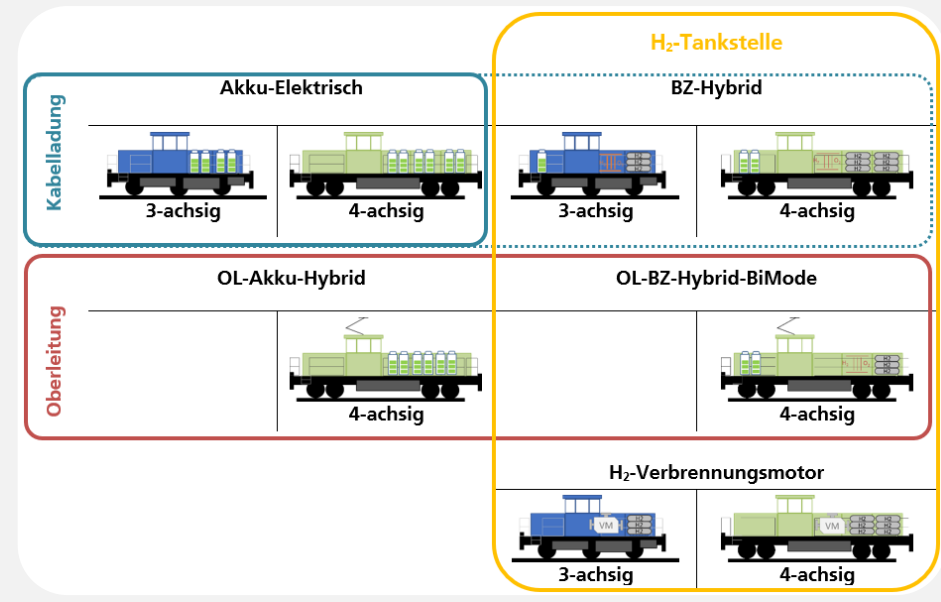
Antriebssysteme und Simulation

Fünf Antriebssysteme analysiert:

- Akku mit externer Nachladefunktion *(nicht 15 kV/16,7Hz-Oberleitung)*
- Oberleitungs-Akku-Hybrid
- Wasserstoff-Brennstoffzellen-Hybrid
- BiMode-Oberleitungs-H₂-Brennstoffzellen-Hybrid
- Wasserstoff-Verbrennungsmotorantrieb

| Varianten mit Ausrüstung für OL-Betrieb nur für BB-Lok |

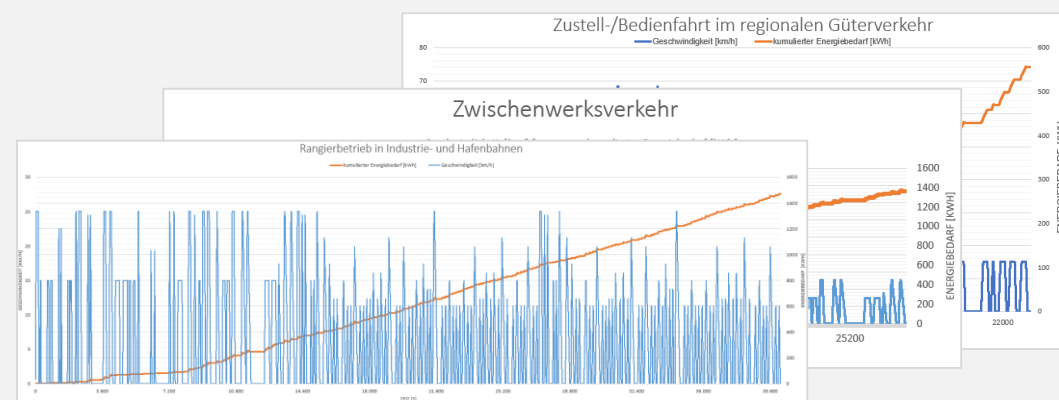
| Dieselhybrid nicht untersucht (keine Emissionsfreiheit) |



Längsdynamiksimulation für Szenarien R, Z, B

(DLR-Trajektorienplaner, All-Out-Fahrweise)

→ Ergebnis: Trajektorien und Leistungsverlauf (P_{Rad})



Auslegungsansatz

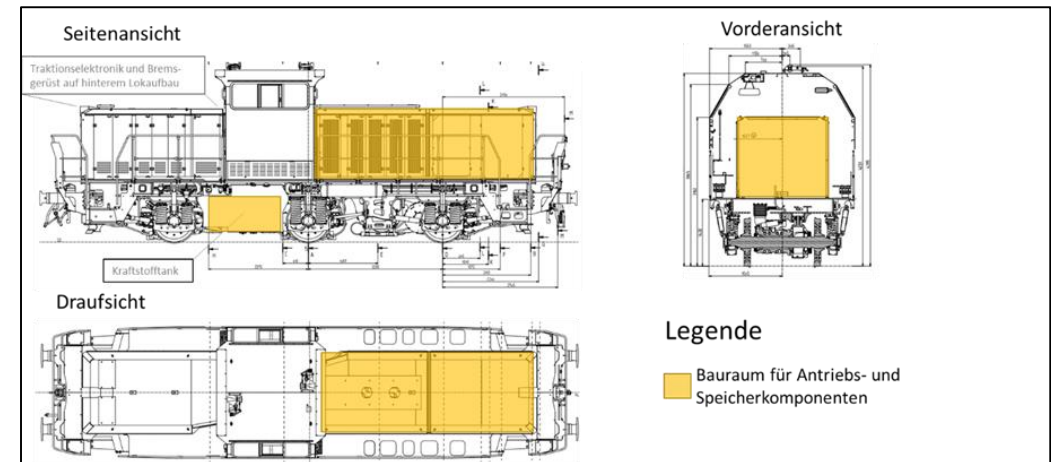
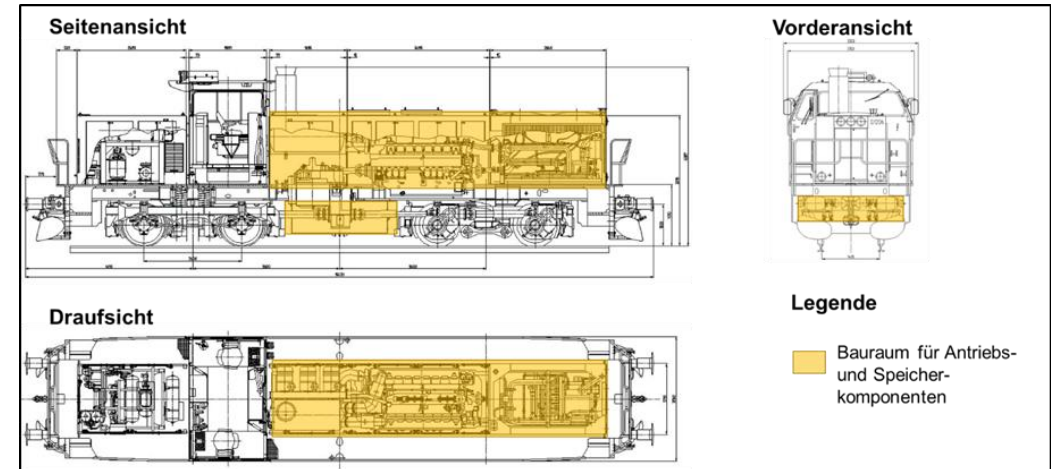
Input: Leistungstrajektorien am Rad
aller Szenarien

1. Antriebsspezifische Betriebsstrategien
(Leistungsverteilung)

2a) Ermittlung P und E der Wandler- & Speicherkomponenten
(1 x tgl. Betankung/Nachladen oder unter OL)
2b) Auslegung Hauptbaugruppen je Szenario (statische Wirkungsgrade)

3. Integration Baugruppen auf Lokomotiven
(Prüfkriterien: Massebilanz, Bauraum)

Bauräume für Antriebs-/Speicherkomponenten



Keine detaillierte Betrachtung bestehender Leistungsübertragungsanlagen bei Bauraumanalyse

Auslegungsergebnisse und Komponentenanordnung – BB-Lok

Antriebskonzept und Details	Komponentenanordnung
<p>Akku-Lok Szenario R + Z*</p> <ul style="list-style-type: none"> – Batteriespeicher: 1.766 kWh 	<p>Seitenansicht</p>
<p>BZ-Hybrid Auslegung Szenario R*</p> <ul style="list-style-type: none"> – Brennstoffzellenleistung: 600 kW – Batteriespeicher: 146 kWh – Wasserstoffvorrat: 109 kg H₂ 	
<p>BZ-Hybrid Auslegung Szenario Z*</p> <ul style="list-style-type: none"> – Brennstoffzellenleistung: 1.170 kW – Batteriespeicher: 204 kWh – Wasserstoffvorrat: 109 kg H₂ 	<p>um 3,1 m verlängertes Fahrzeug (17,8 m)</p>

Antriebskonzept und Details	Komponentenanordnung
<p>OL-Akku-Hybrid</p> <ul style="list-style-type: none"> – Batteriespeicher: 662 kWh 	<p>Seitenansicht</p>
<p>OL-BZ-Hybrid-BiMode Szenario R*</p> <ul style="list-style-type: none"> – Brennstoffzellenleistung: 360 kW – Batteriespeicher: 375 kWh – Wasserstoffvorrat: 108 kg H₂ 	<p>um 2 m verlängertes Fahrzeug (16,7 m)</p>
<p>OL-BZ-Hybrid-BiMode Szenario Z*</p> <ul style="list-style-type: none"> – Brennstoffzellenleistung: 360 kW – Batteriespeicher: 375 kWh – Wasserstoffvorrat: 54 kg H₂ 	

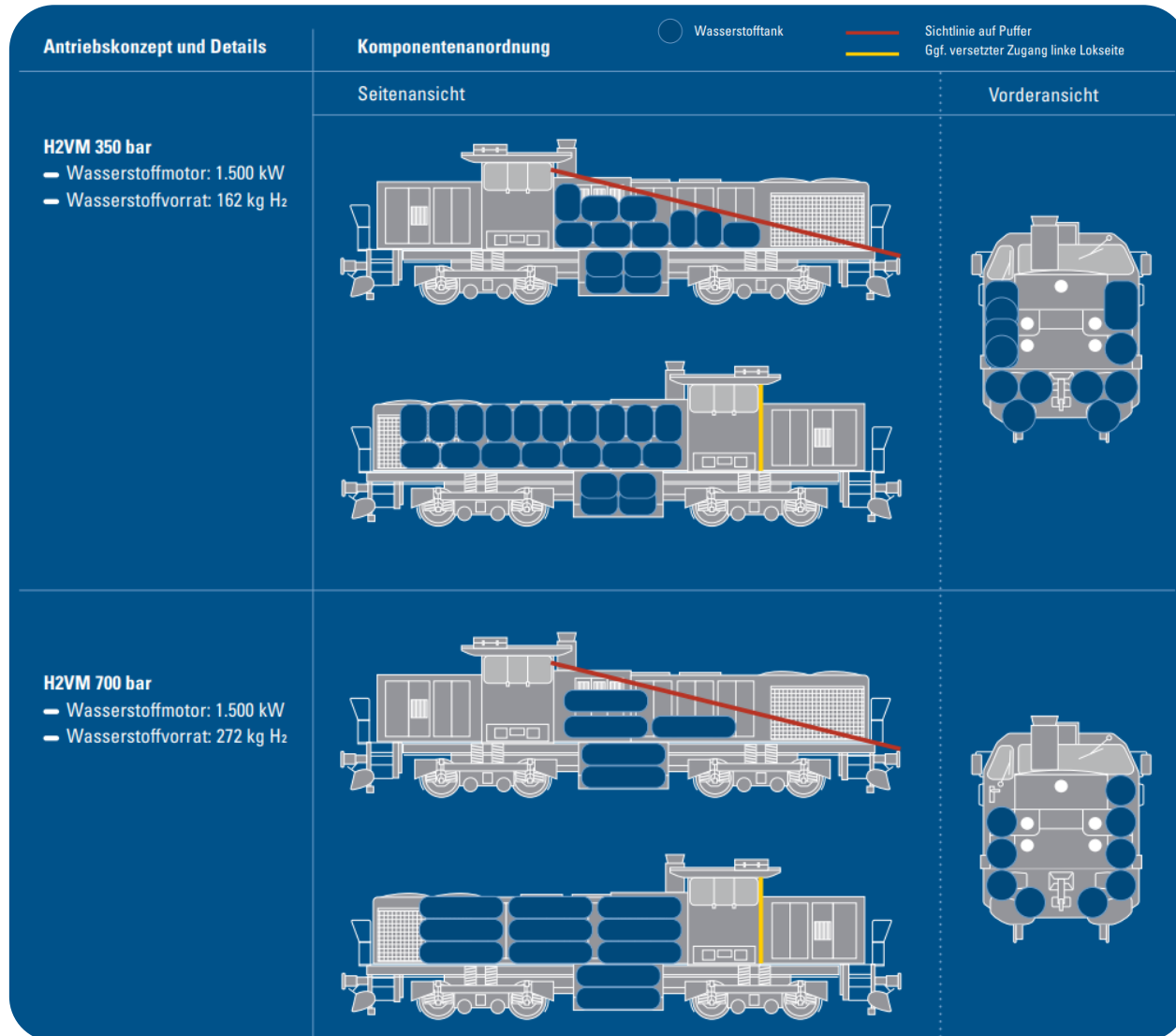


Batterieanlage	Kühlanlage f. Brennstoffzellen	Netz- und Antriebsstromrichter, DC/DC-Wandler inkl. Kühlung
Kühlanlage f. Batterien	DC/DC-Wandler	Trafоеinheit
Brennstoffzellen	Wasserstofftanks	Pantograph u. HV-Ausrüstung

Hintergrundquellen: in Anlehnung an Vossloh Locomotives



Auslegungsergebnisse und Komponentenanordnung – BB-Lok

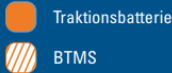



H₂-Verbrennungsmotorantrieb:



- Bauraum für H₂-Tanks limitiert
 - *Ansatz Umrüstung: Beibehaltung Verbrennungsmotor und Leistungsübertragungsanlage*
- Daher hier: Anordnung H₂-Tanks auch auf Umläufen



Auslegungsergebnisse und Komponentenanordnung – AAA-Lok

Antriebskonzept und Details	Komponentenanordnung	
Akku-Lok Szenario B* – Batteriespeicher: 773 kWh	Seitenansicht	Vorderansicht
	Draufsicht	 <ul style="list-style-type: none"> Traktionsbatterie BTMS
BZ-Hybrid Auslegung Szenario B* – Brennstoffzellenleistung: 300 kW – Batteriespeicher: 245 kWh – Wasserstoffvorrat: 38,5 kg H ₂	Seitenansicht	
	Draufsicht	 <ul style="list-style-type: none"> Batterieanlage (NMC) Kühlanlage f. Batterien Brennstoffzellen Kühlanlage f. Brennstoffzellen Gleichspannungswandlerandler Wasserstofftanks

* Szenario B: Zustell-/Bedienfahrt

Antriebskonzept und Details	Komponentenanordnung	
H2VM 350 bar – Wasserstoffmotor: 700 kW – Wasserstoffvorrat: 98 g H ₂	Seitenansicht	Schnittansicht
	Draufsicht	 <ul style="list-style-type: none"> Wasserstofftank Sichtlinie auf Puffer Ggf. versetzter Zugang linke Lokseite
H2VM 700 bar – Wasserstoffmotor: 700 kW – Wasserstoffvorrat: 107 g H ₂	Seitenansicht	
	Draufsicht	 <ul style="list-style-type: none"> Wasserstofftank Sichtlinie auf Puffer Ggf. versetzter Zugang linke Lokseite

Hintergrundquellen: in Anlehnung an Alstom

Zusammenfassung

Generelle Erkenntnisse:

- emissionsfreie Antriebsoptionen für Rangierlokomotiven teilweise verfügbar
 - Aber: BiMode-Streckenloks und Zweiwege-Rangierroboter ersetzen vermehrt Rangierlokomotiven
- Spektrum an Einsatzprofilen im Rangierlokbereich ist sehr breit → Erfüllungsgrad der Anforderungen variiert
 - Grundsätzlich: anwendungsspezifische Prüfung der bestgeeigneten Technologie notwendig

Antriebstechnologien im Einzelnen:

Akku	Hohe Effizienz, häufige/lange Nachladevorgänge erforderlich → Eignung insb. für lokalen Rangier- & Zugbildungseinsatz (kein Strombezug aus 15-kV-Fahrdraht), sofern Nachladezeit im Betriebsablauf realisierbar
BZ-Hybrid	Breites Spektrum an Leistungen & Speicherkapazitäten mgl., aber: Bauraumlimitationen insb. im Streckeneinsatz → Eignung für regionalen Verteiler- und Rangierverkehr
H2VM	Hohe Dauerleistung, aber stark verringerte Reichweite durch Bauraumlimitationen → Eignung für regionalen Verteiler- und Rangierverkehr, insb. bei Umrüstung
OL-Akku-Hybrid + BiMode-BZH-OL	OL-Betrieb ermöglicht Vergrößerung Aktionsradius/Reichweiten, aber Limitation im OL-freien Modus → Eignung bei häufigen Streckendiensten (unter OL) bzw. bei Nachlademöglichkeit auch im Rangier-/Werksverkehr → Variante mit BZH-Einheit: höhere Produktivität aufgrund schnellerer Nachtankmöglichkeit für OL-freie Rangiertätigkeiten
e-Fuels & Bio-KS	Vergleichbare Leistungsfähigkeit & Flexibilität wie Diesel-Loks, aber Gesamteffizienz gering im Fall von e-Fuels & Schadstoffemissionen → prinzipiell in allen Einsatzbereichen technisch-betrieblich geeignet





Vorstudie Wasserstoffrangierlokomotive (Duisport-Vorstudie)

Ziel:

Untersuchung der **Machbarkeit** und
Umsetzbarkeit von **Brennstoffzellen-
Hybrid-Rangierlokomotiven** im
Hafeneinsatz bei **Duisport Rail**



duisport©Frank-Reinhold

Studie ist aktuell (01/2022) noch in Arbeit





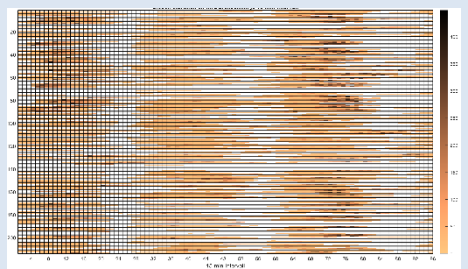
Vorstudie Wasserstoffrangierlokomotive | Überblick

1. Messdatenauswertung (7 Monate)

- einer Vossloh Locomotives DE 18 der Duisport Rail
- Einteilung Messdaten in Fahrzyklen

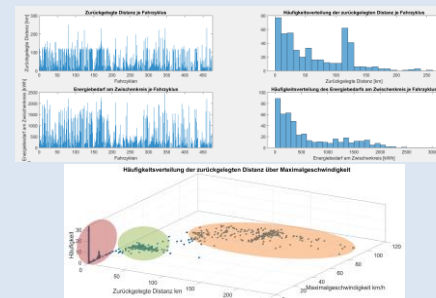


loks-aus-kiel.de - Foto Vossloh 5502428. © Rolf Alberts



2. Analyse Fahrzyklen

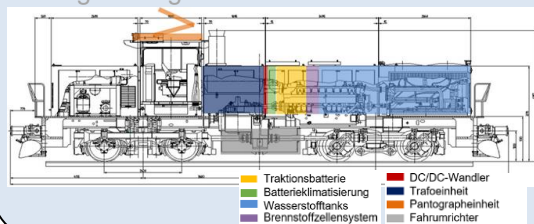
- Leistungs- und Energieanforderungen ermitteln
- Gruppierung der Fahrzyklen



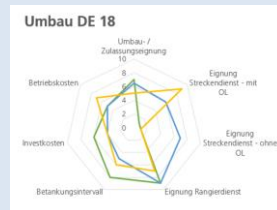
4. Auslegungskonzepte für Fahrzyklus-Gruppen

- Bauraumoptimierte Dimensionierung der Antriebssysteme
- Umbau- & Neubaukonzept für MaK G 1206 & Vossloh DE 18
- Bewertung, Handlungsempfehlungen

Streckenregionalverkehr (unter OL) + Rangierlastiger Mischbetrieb

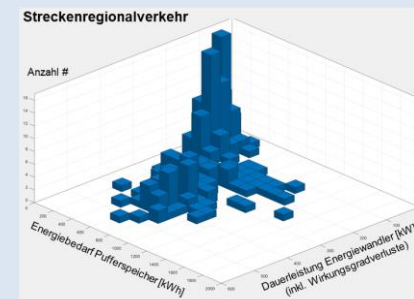
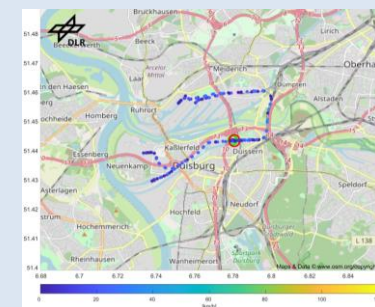


- Traktionsbatterie
- Batterieklimatisierung
- Wasserstofftanks
- Brennstoffzellensystem
- DC/DC-Wandler
- Trafoeinheit
- Pantographeneinheit
- Fahrnrichter



3. Fahrzyklenfeine Antriebsauslegungen

- Hybridisierungsstrategie für Brennstoffzellenhybrid
- Dimensionierung je Fahrzyklus von BZ, Akku, H₂-Bedarf



Ausblick

Broschüre mit Kernergebnissen der NOW-Studie erscheint in Kürze



Duisport-Vorstudie wird ebenfalls veröffentlicht



Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR)
Institut für Fahrzeugkonzepte | Rutherfordstraße 2 | 12489 Berlin

Johannes Pagenkopf | Fahrzeugsysteme und Technologiebewertung
Telefon 030 67055-7957 | johannes.pagenkopf@dlr.de
www.DLR.de/FK