

Numerische 1D-Simulation von elektrisch hybriden Antriebssträngen und Nebenaggregaten mobiler Arbeitsmaschinen

E-MOTIVE Expertenforum „Elektrische Fahrzeugantriebe“

Institut für Fahrzeugsystemtechnik (FAST), Lehrstuhl für Mobile Arbeitsmaschinen (Mobima)
Institutsleiter: Prof. Dr.-Ing. Marcus Geimer



Vortragender:

Dipl.-Ing. Frank C. Otto, Lehrstuhl für Mobile Arbeitsmaschinen (Mobima)

Co-Autoren:

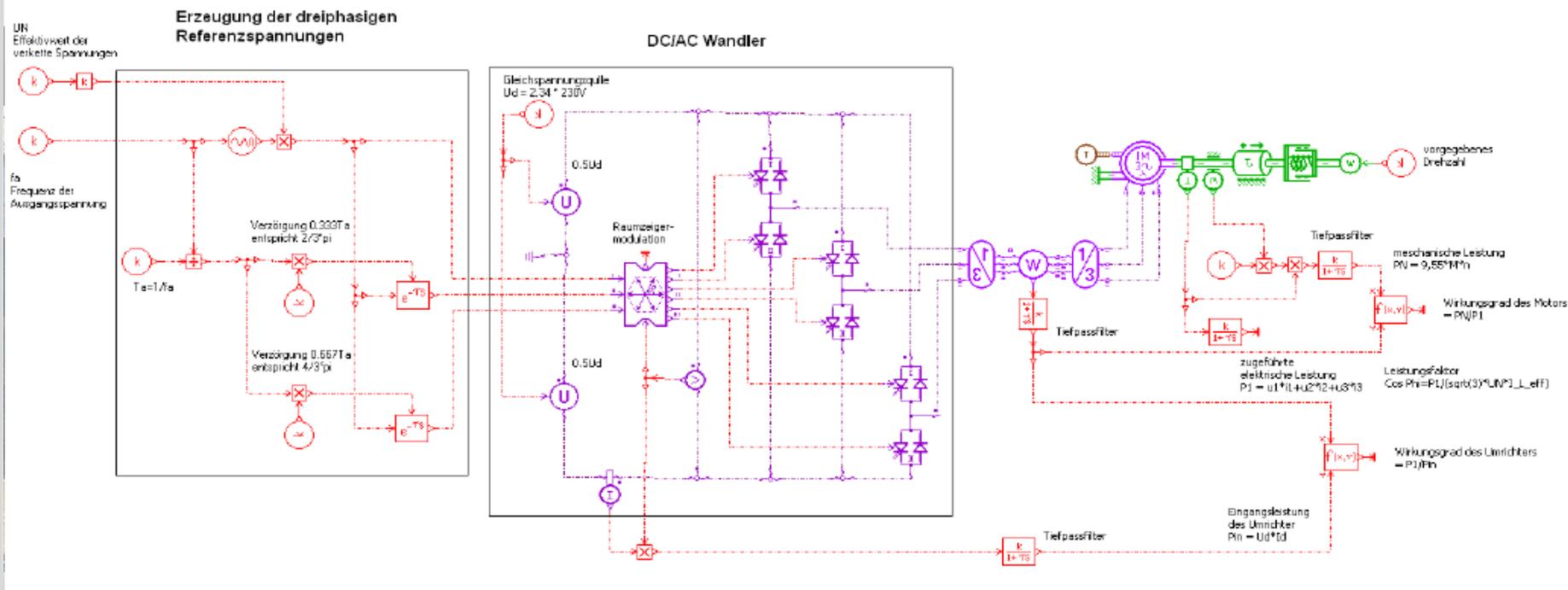
Prof. Dr.-Ing. Marcus Geimer (Mobima),

**Prof. Dr.-Ing. Peter Gratzfeld, Dipl.-Ing. Markus Springmann (Lehrstuhl für
Bahnsystemtechnik BST)**

Institut für Fahrzeugsystemtechnik (FAST), Lehrstuhl für Mobile Arbeitsmaschinen (Mobima)
Institutsleiter: Prof. Dr.-Ing. Marcus Geimer



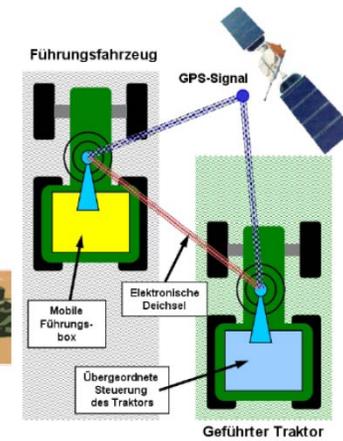
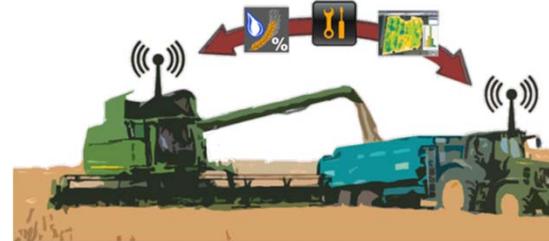
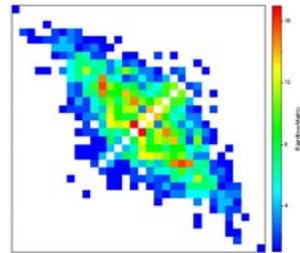
Beurteilung von verlustbehafteten numerischen Modellen käuflicher Simulationssoftware auf Eignung zur Effizienzbeurteilung von Antriebstopologien Mobiler Arbeitsmaschinen



Vorstellung Forschungsschwerpunkte Mobima



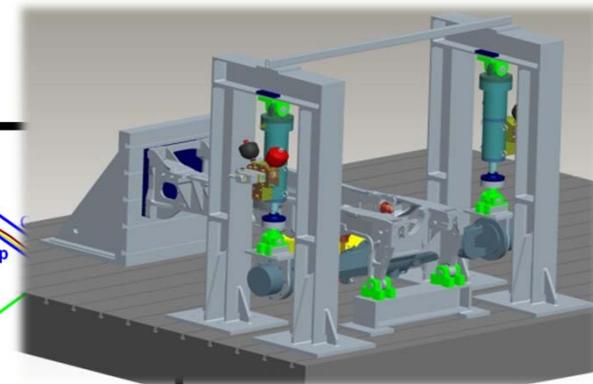
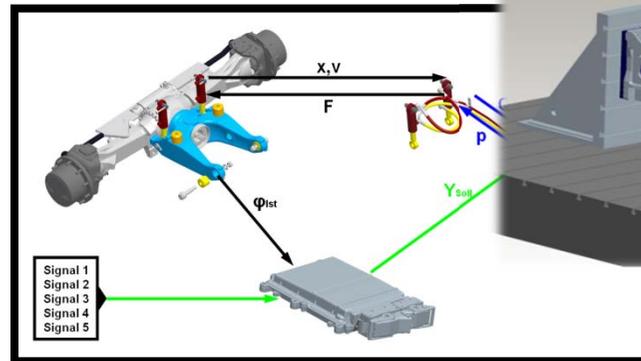
⇒



Antriebstechnik

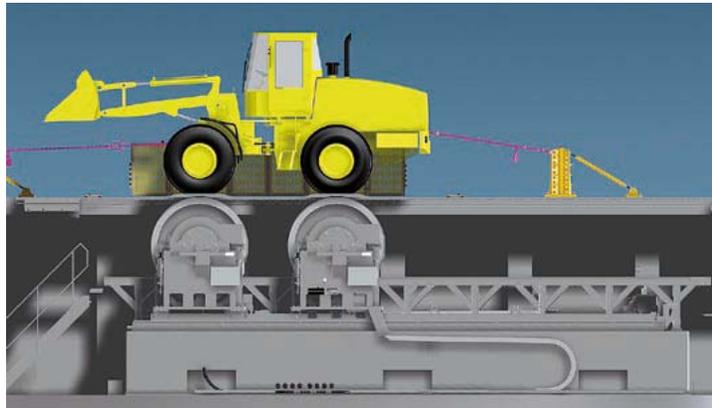
Steuerungskonzepte

Simulation



Vorstellung

Spektrum der Prüfeinrichtungen (nur Mobima)



- Allrad-Akustik-Rollenprüfstand mit 4 einzeln getriebenen Rollen mit je 400 kW
- Hydraulik-Komponentenprüfstand mit 180 kW hydraulischer Leistung
- Aggregate-Prüfstand für Nebenaggregate und Elektromotoren
- Prüffeld für Schwingungs-Prüfungen
- In Beschaffung: neue Hydraulik Zentrale mit über 400 (700) kW Antriebsleistung
- In Beschaffung: 3-Maschinen Antriebsstrangprüfstand für hybride Topologien

Gliederung

1. Ausgangslage
2. Motivation
3. Projektziele
4. Inhalte der Bearbeitung
5. Ergebnisse
6. Zusammenfassung
7. Ausblick

1. Ausgangslage

Mobile Arbeitsmaschinen in Offroad-Anwendungen
verbrauchten 2009 etwa 15,7% des gesamten
Dieselkraftstoffes in D, rund 1,6 Mio. Tonnen

/Kun10/

Kraftstoffverbrauch entspricht bei größeren mobilen
Arbeitsmaschinen bereits 50 % der Life Cycle Cost
und stellen damit ein bedeutendes Kaufkriterium dar

Forderung der EU bis 2020 auch bei mobilen
Arbeitsmaschinen 20 % CO₂ einzusparen

Hybridisierung mobiler Arbeitsmaschinen ist im vollen
Gange. Zu mechanischen und hydraulischen
Komponenten für Hybride liegen bereits validierte
Simulationsmodelle vor (Projekt ANSKO)

/Projekt ANSKO/

1. Ausgangslage

Spektrum der Maschinen



- Kraftstoffverbrauch bis über 1400 Liter am Tag
- Dieselleistung bis über 1000 kW in einem Fahrzeug für Fahr- und Arbeitsantriebe
- Fahrzeug-Gesamtgewicht bis 56 t (auf Strasse transportiert)
- End-Geschwindigkeit bis über 80 km/h (Autobahnzulassung)
- Haken-Zugkraft bis über 400 kN

2. Motivation

Steigerung der Effizienz besitzt insbesondere bei mobilen Arbeitsmaschinen eine große Hebelwirkung aufgrund des prinzipbedingten hohen Kraftstoffverbrauchs.

Elektrische Antriebs- und Hybridlösungen versprechen ein hohes Potential zur Effizienzsteigerung

Die numerische 1D Simulation verspricht die schnelle Bewertbarkeit neuer Antriebsstrang-Topologien und Betriebsstrategien unter Berücksichtigung der Einsatzzyklen auf die Gesamteffizienz

Kommerziell erhältliche Simulationstools versprechen schnelle Einarbeitung und einfache Bedienung, deren Modellbibliotheken von verlustbehafteten Komponenten mussten jedoch noch validiert werden

Fast 30 infrage kommende Simulationstools wurden von Mobima identifiziert, selektiert. 5 wurden intensiv erprobt u. bemustert

3. Projektziele

- Basis zur Modellbildung neuer Antriebs-Topologien und Betriebsmanagement schaffen
- Bereitstellen von elektr. Komponentenmodellen für einen Baukasten von neuen System-Topologien (Fahr- und Arbeitsfunktionen, Nebenaggregate)

Gesucht war:

Abbildungsunsicherheit der in den Bibliotheken der käuflichen Tools enthaltenen elektrischen Komponentenmodelle

Bereitstellung validierter elektrischer Komponentenmodelle mit Ausweis der Unsicherheiten der berechneten Verluste

Ausweis der Verbesserungspotentiale der untersuchten Modelle elektrischer Komponenten in den Bibliotheken der Tools

4. Inhalte der Bearbeitung

Untersuchte und validierte bzw. verifizierte Modelle:

E-Motor mit Kennlinien aus Prüfstandsuntersuchungen

- Asynchronmaschine (ASM), ca. 30 kW bei 400 V

E-Generator mit Kennlinien aus Prüfstandsuntersuchungen

- Synchronmaschine (PMSM), ca. 30 kW bei 400 V

Speicher, virtuell aus Literatur

- Li-Ion Batterie und Ultra-Cap

Verifizierung der Modelle anhand Stand der Wissenschaft

Stromrichter mit Kennlinien aus Prüfstandsversuchen

- AC/AC Vector Frequenzumrichter, ca. 30 kW bei 400 V

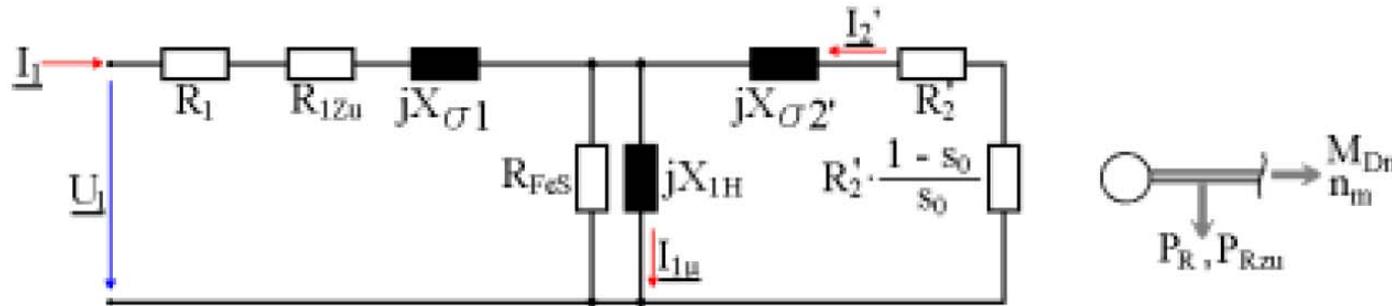
Nebenaggregate: Lüfter, Klimakompressor, Luftpresser, usw.

Antriebsstrang, virtueller Test

- Komponenten im Zusammenspiel eines virtuellen Fahrzeugs

4. Inhalte der Bearbeitung

Beispiel: Grundlagen der Asynchronmaschine



Ersatzschaltbild der Asynchronmaschine mit Kurzschlussläufer aus der Literatur

U1	Strangspannung	
I1	Strangstrom	
R1	Statorwiderstand	f(T = Tkonst Betrieb)
R1Zu	Zusatzverlustwiderstand	f(I1, n, f1, Blechsorte)
Xσ1	Statorstreureaktanz	f(f1)
RFeS	Eisenverlustwiderstand Stator	f(U1, f1)
I1μ	Magnetisierungsstrom	
X1H	Hauptreaktanz	f(I1μ, f1)
Xσ2'	transformierte Rotorstreureaktanz	f(f1)
I2'	transformierter Läuferstrom	
R2'	transformierter Rotorwiderstand	
s0	Schlupf	
PR	Reibungsverluste	
PRzu	zusätzliche Rotorverluste	
nm	Drehzahl	
MDm	Drehmoment	

Abhängig von der Temperatur

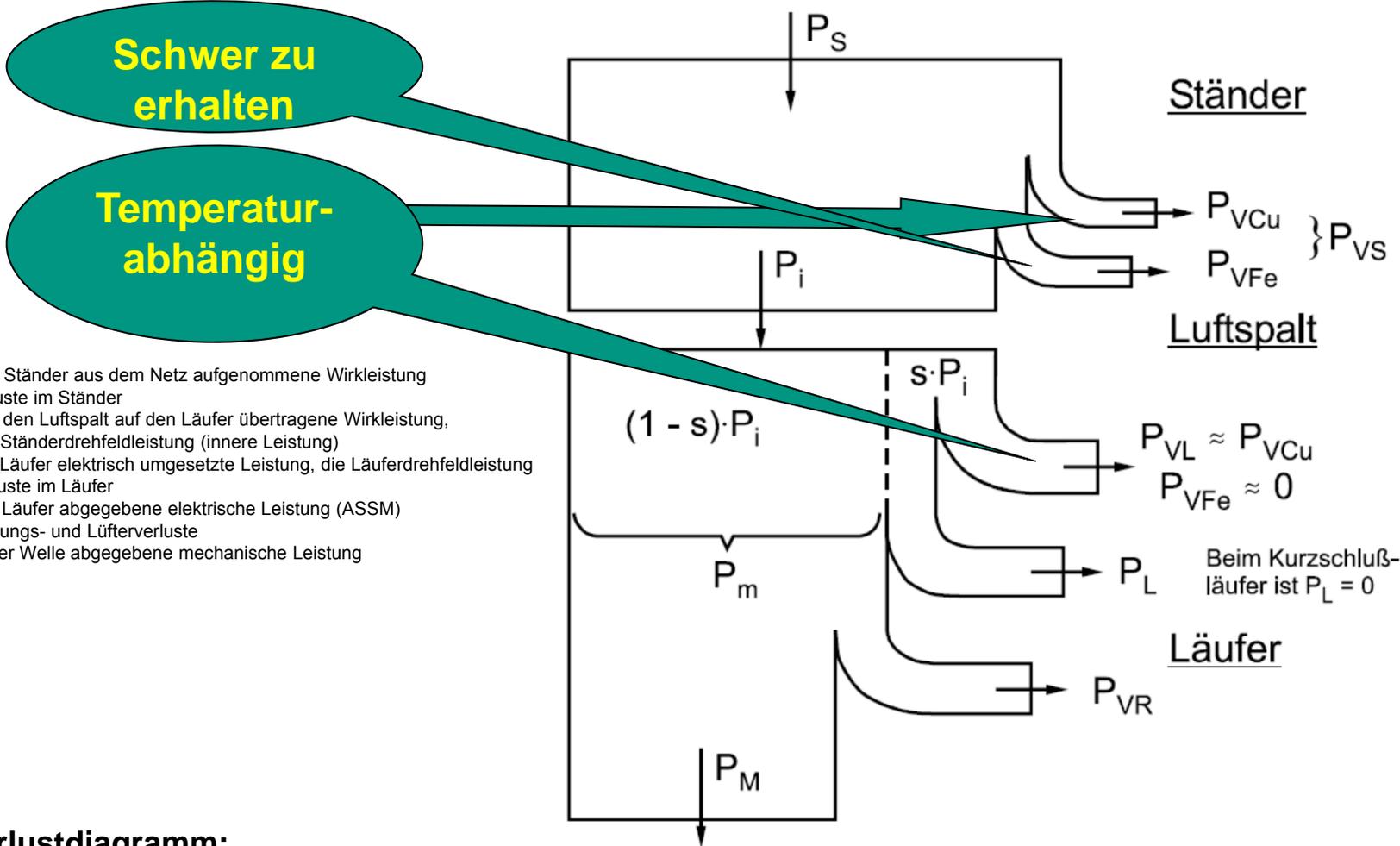
Beeinflussen das dynamische Verhalten sowie die Energiebilanz im Fahrbetrieb erheblich

Steuergrößen:

f1	Strangfrequenz
U1	Strangspannung

4. Inhalte der Bearbeitung

Beispiel: Grundlagen der Asynchronmaschine



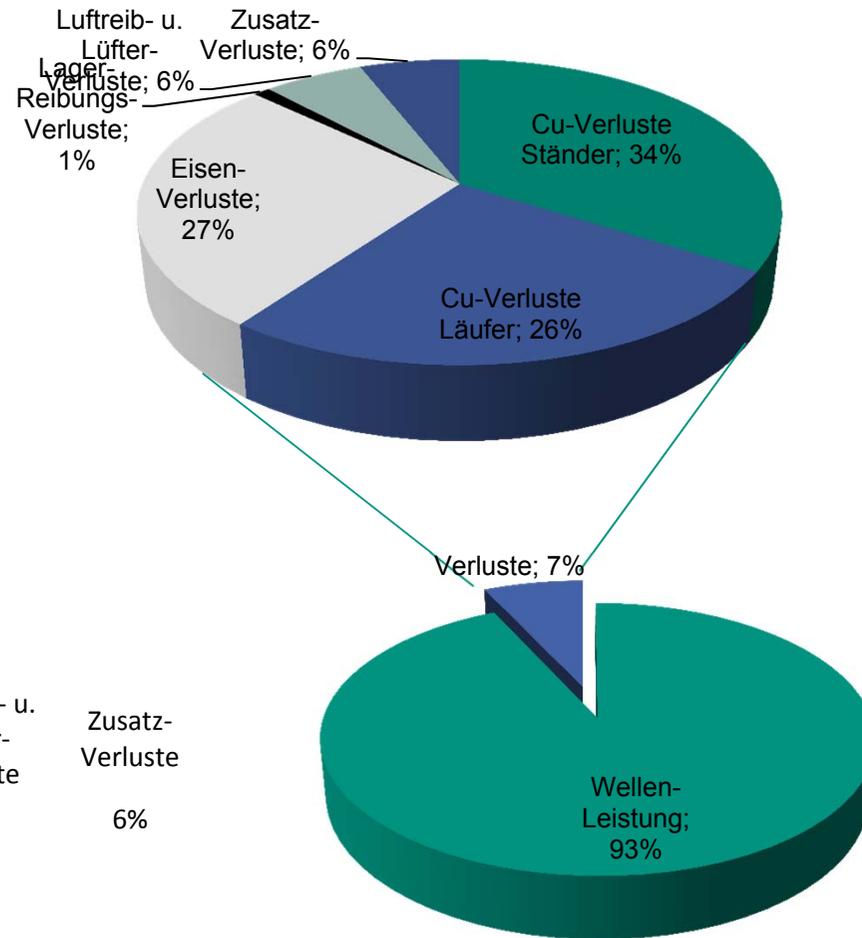
- P_S vom Ständer aus dem Netz aufgenommene Wirkleistung
- P_{VS} Verluste im Ständer
- P_i über den Luftspalt auf den Läufer übertragene Wirkleistung, die Ständerdrehfeldleistung (innere Leistung)
- $s \cdot P_i$ im Läufer elektrisch umgesetzte Leistung, die Läuferdrehfeldleistung
- P_{VL} Verluste im Läufer
- P_L vom Läufer abgegebene elektrische Leistung (ASSM)
- P_{VR} Reibungs- und Lüfterverluste
- P_M an der Welle abgegebene mechanische Leistung

Verlustdiagramm:

qualitative Darstellung der Verlustanteile der Asynchronmaschine aus der Literatur

4. Inhalte der Bearbeitung

Grundlagen der Asynchronmaschine, Verlustanteile



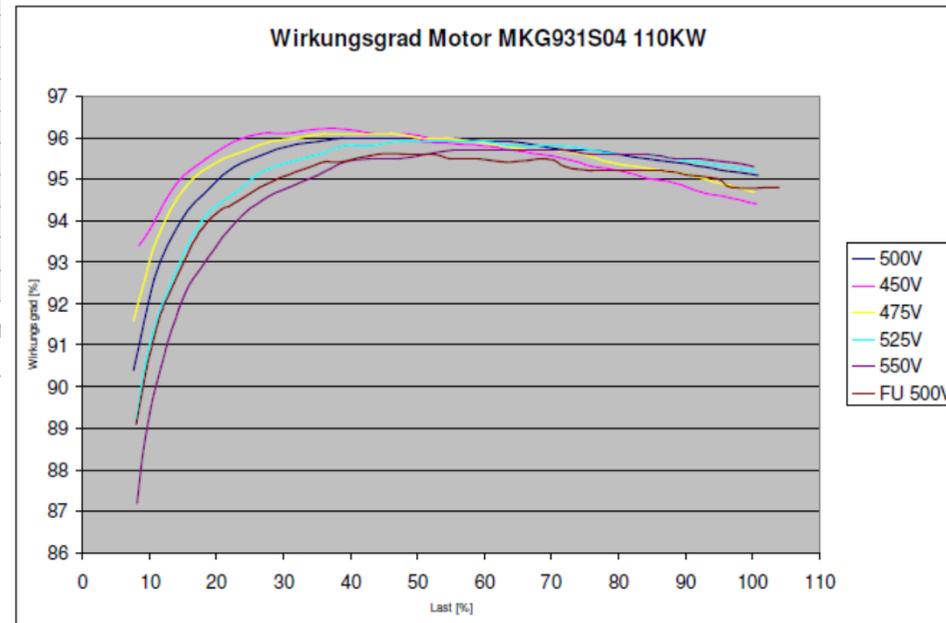
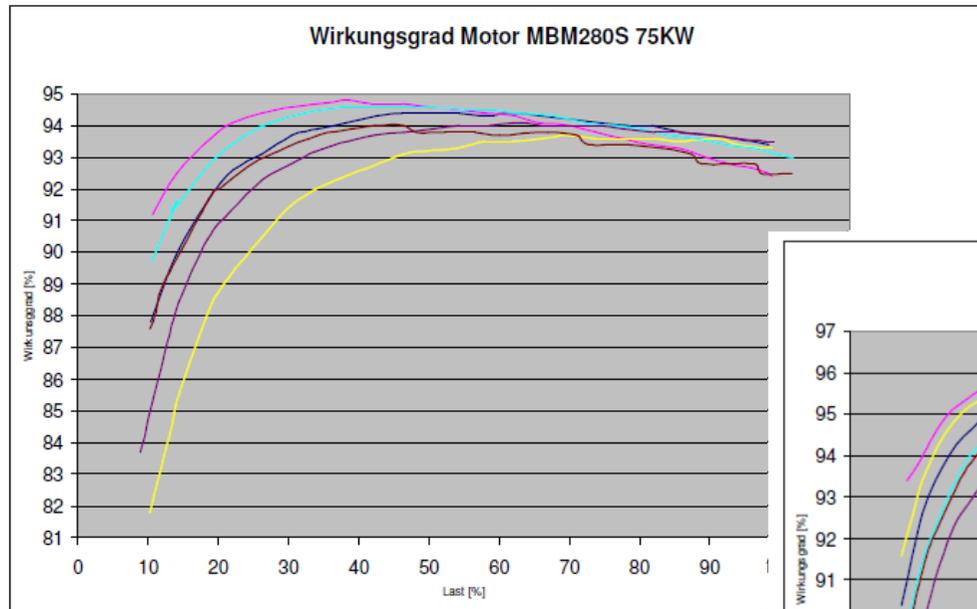
Cu-Verluste Ständer	Cu-Verluste Läufer	Eisen-Verluste	Lager-Reibungs-Verluste	Luftreib- u. Lüfter-Verluste	Zusatz-Verluste
34%	26%	27%	1%	6%	6%

Verlustdiagramm:

qualitative Darstellung der vermessenen Verlustanteile einer Asynchronmaschine 22 kW mit Lüfter

4. Inhalte der Bearbeitung

ASM: Wirkungsgrad Abhängig von der Betriebsspannung



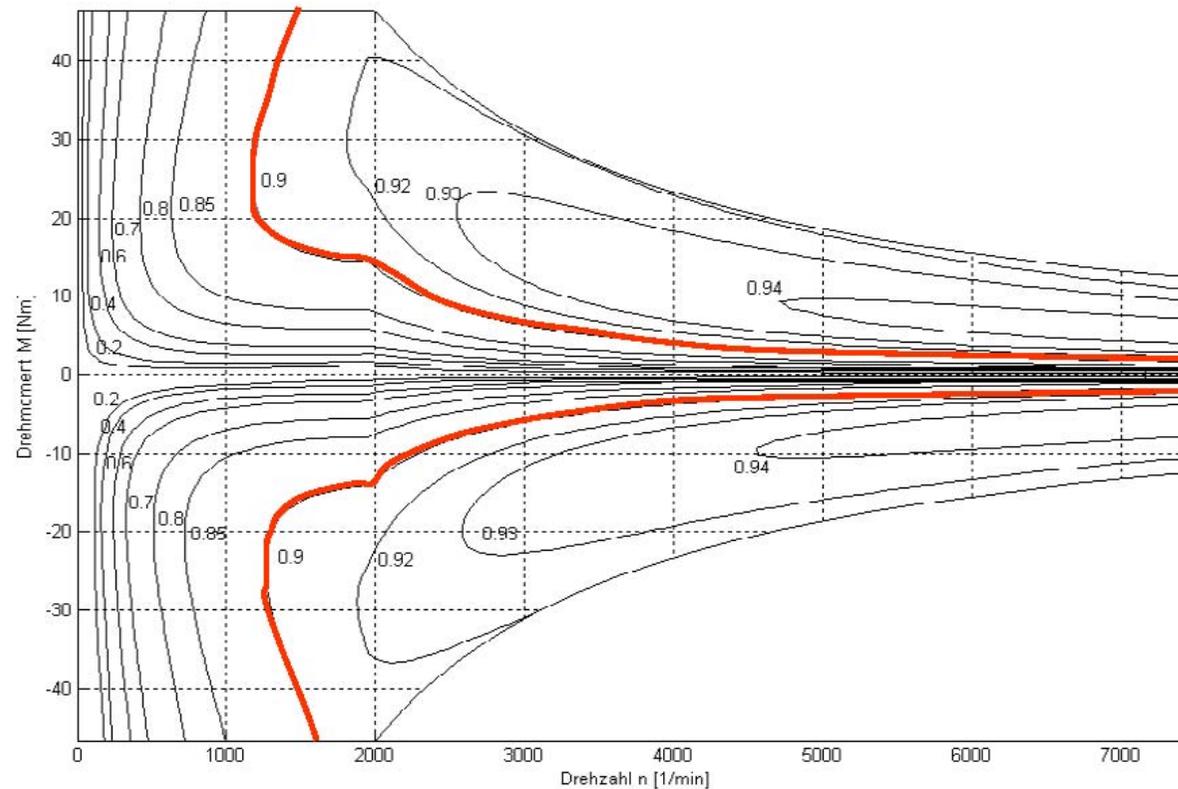
Wirkungsgrad von Industrie-Asynchronmaschinen (ASM):

Beispiele von ASM Wirkungsgraden in Abhängigkeit von Last und Spannung

[Quelle: Baker]

4. Inhalte der Bearbeitung

ASM: Wirkungsgrad abhängig von Drehzahl und Last



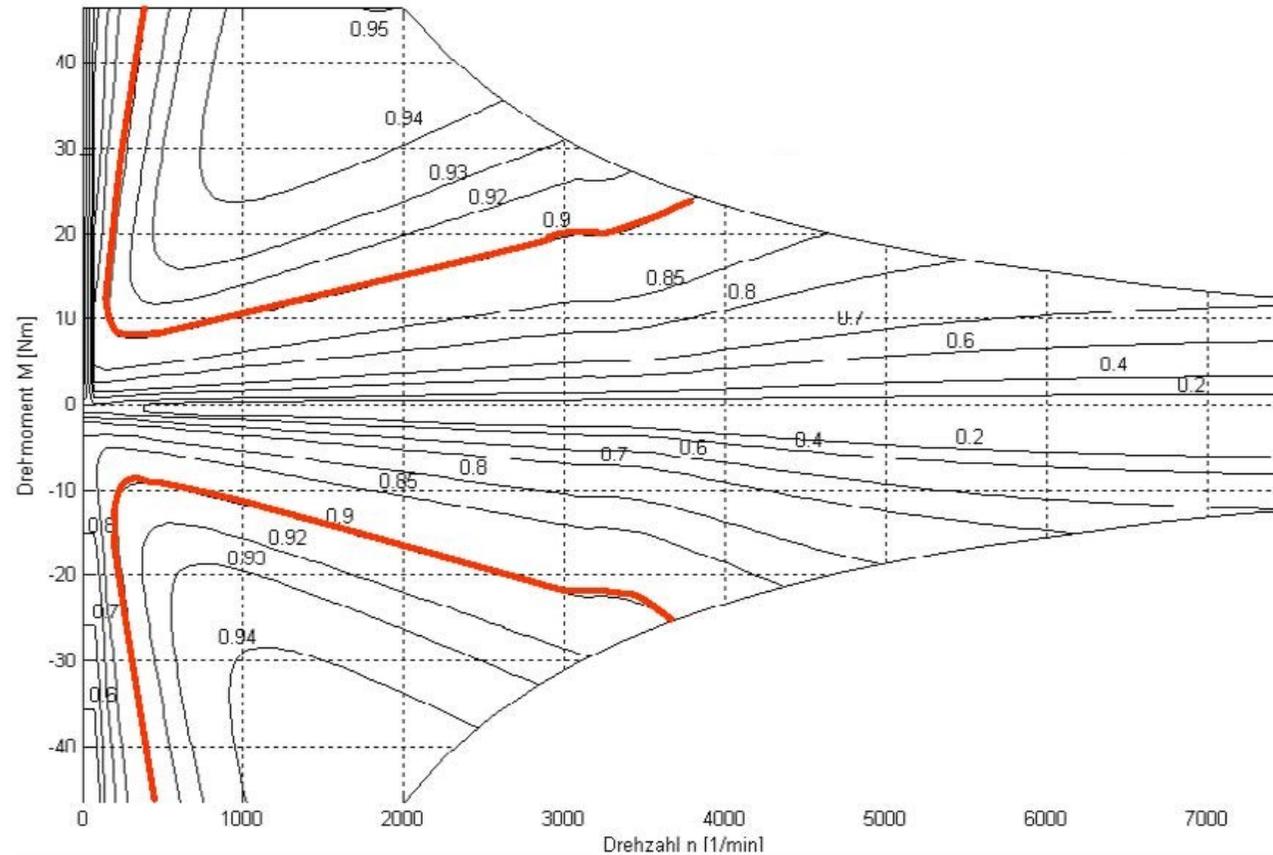
Wirkungsgrad von Traktions-Asynchronmaschinen (ASM):

Beispiel einer 8 kW ASM, Wirkungsgrade in Abhängigkeit von Drehzahl und Last

[Quelle: Prof. W.-R. Canders, IMAB Braunschweig]

4. Inhalte der Bearbeitung

PMSM: Wirkungsgrad abhängig von Drehzahl und Last



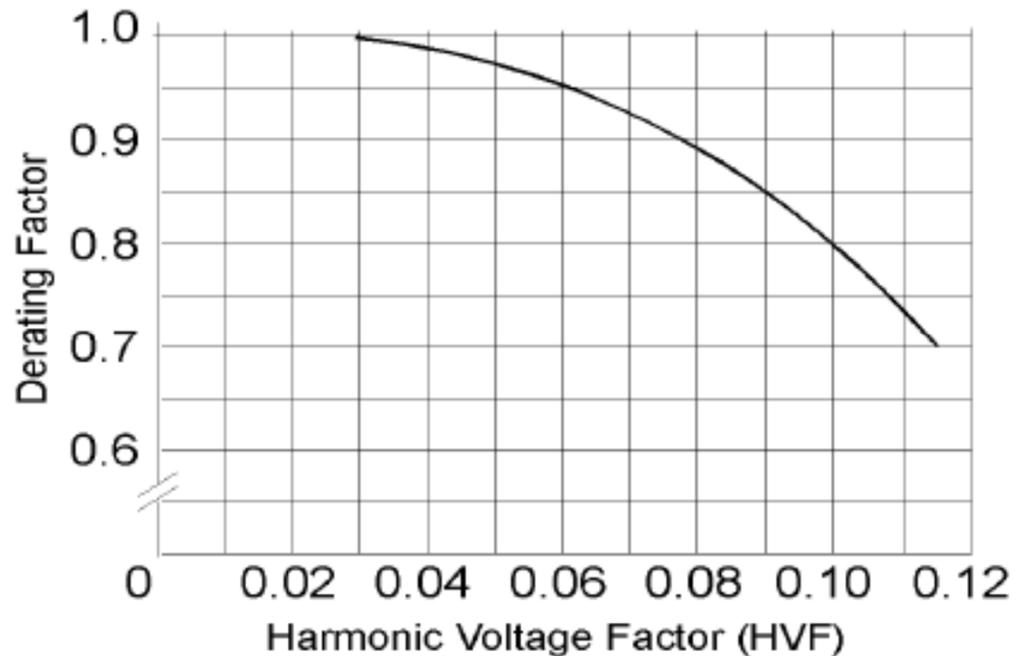
Wirkungsgrad von Traktions-Synchronmaschine (PMSM):

Beispiel einer 8 kW PMSM, Wirkungsgrade in Abhängigkeit von Drehzahl und Last aus der Literatur

[Quelle: Prof. W.-R. Canders, IMAB Braunschweig]

4. Inhalte der Bearbeitung

ASM: Wirkungsgrad abhängig von Oberwellenanteil des Frequenzumrichters

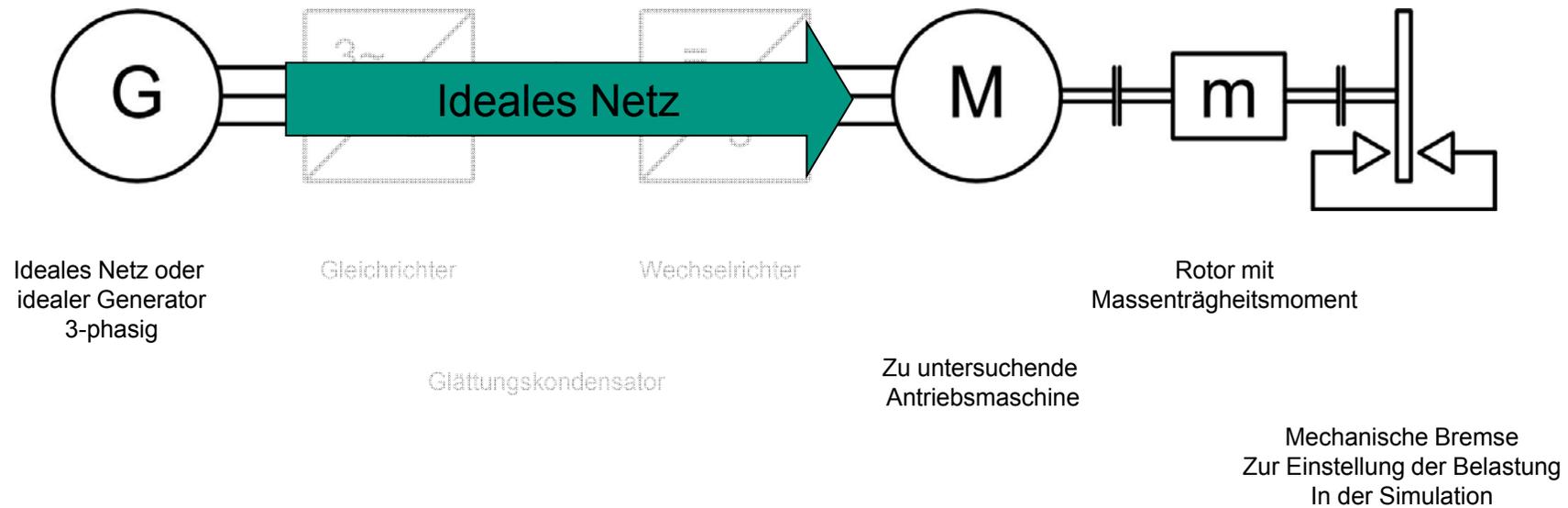


Quantitative normierte Darstellung der empfohlenen Leistungsminderung aufgrund von Spannungsüberschwingungen (HVF) der speisenden Quelle einer Asynchronmaschine /Nema10/

4. Inhalte der Bearbeitung

Vergleichende Analyse Prüfstandsergebnisse zu Simulation

E-Maschinen im Fahrzeug, Topologie in der Simulation

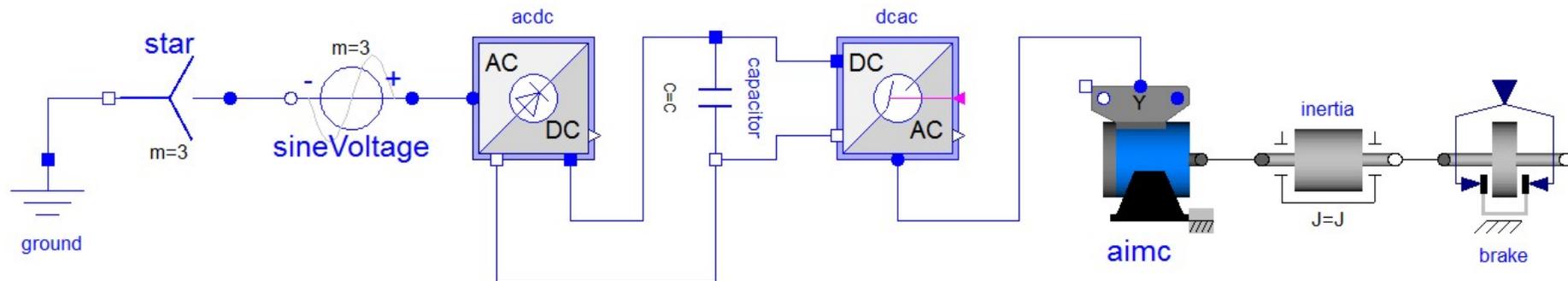


Aufbau Spannungsquelle und belastete Asynchronmaschine

4. Inhalte der Bearbeitung

Vergleichende Analyse Prüfstandsergebnisse zu Simulation

E-Maschinen am Wechselrichter, Asynchronmaschine

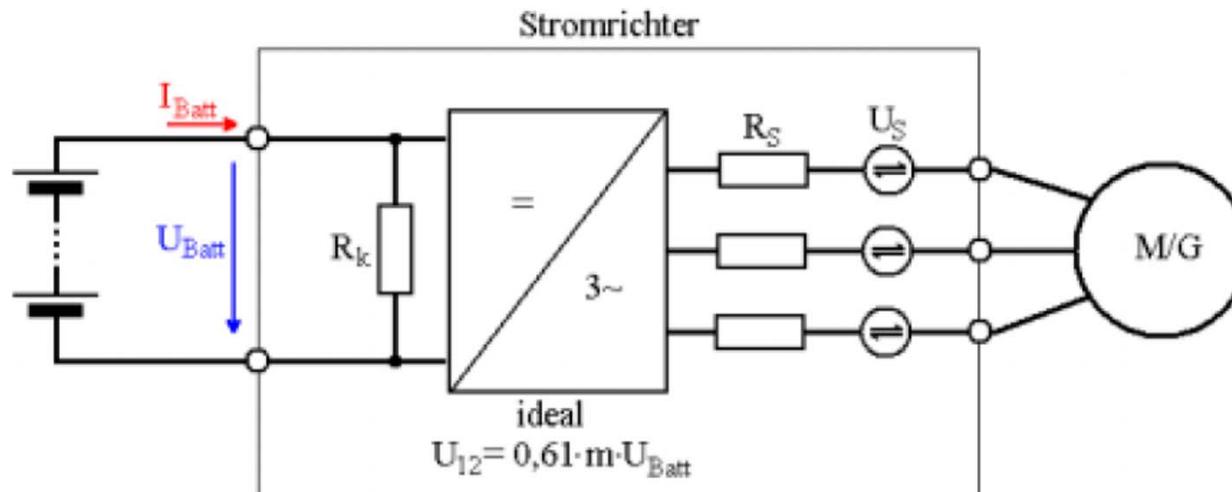


Modelle von Spannungsquelle, Umrichter und Asynchronmaschine in einem knotenorientierten Modell in einer offenen Programmierumgebung auf der Basis der Modellierungssprache Modelica (in Dymola)

Einfache Bedienung und kurze Einarbeitung als Forderung führen heute zu Vernachlässigung der schwer erhältlichen Parameter – Fehler 10 bis 20 %

4. Inhalte der Bearbeitung

Vergleichende Analyse Umrichter-Modelle Prüfstands- ergebnisse zu Simulation



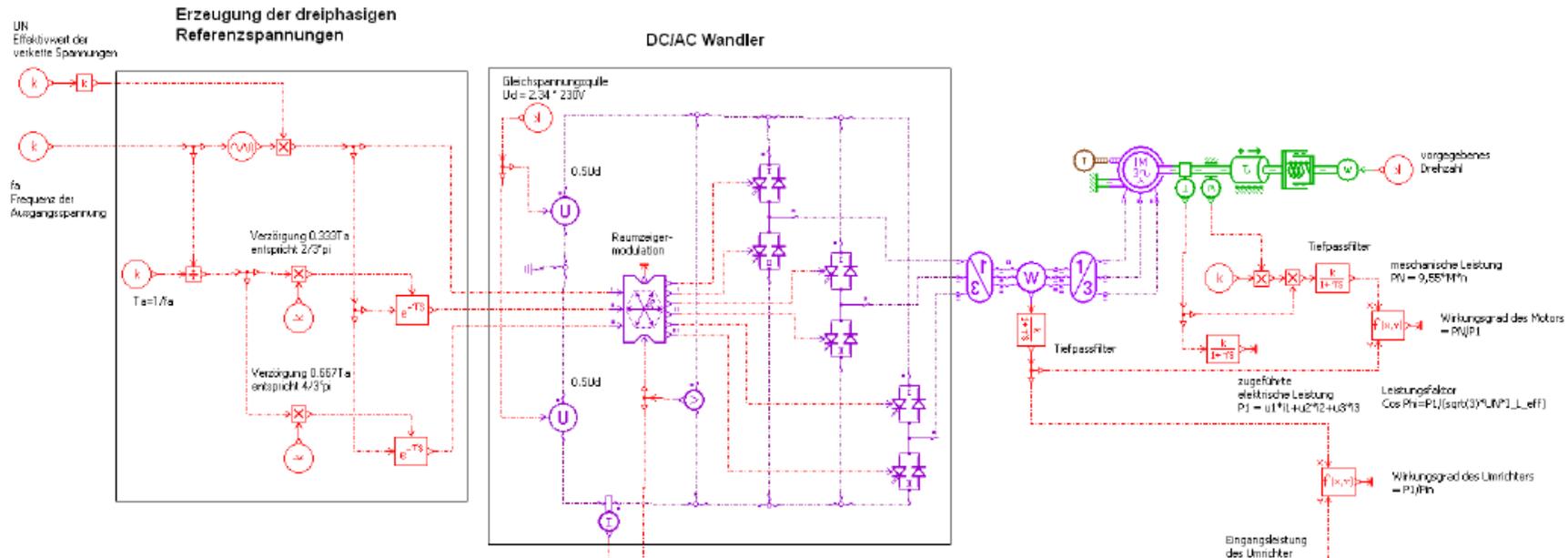
Ersatzschaltbild eines Wechselrichters (WR) aus der Literatur

U _{Batt}	Batteriespannung	
I _{Batt}	Batteriestrom	
R _k	Kommutierungsverluste	f (U _{Batt} , I ₁ , f ₁)
R _s	Differenzieller Ersatzwiderstand	
U _s	eingeprägte Ersatzspannung	f (U _{Batt} , I ₁)
m	Strangzahl	

4. Bearbeitung

Vergleichende Analyse Umrichter-Modelle Prüfstands- ergebnisse zu Simulation

E-Maschinen am Wechselrichter, Asynchronmaschine



Verifikation der WR-Modelle:

Sowohl ideale als auch verlustbehaftete Bauelemente sind aktivierbar.

Die Halbleiterdaten können in den Simulationstools individuell verlustbehaftet parametrisiert werden

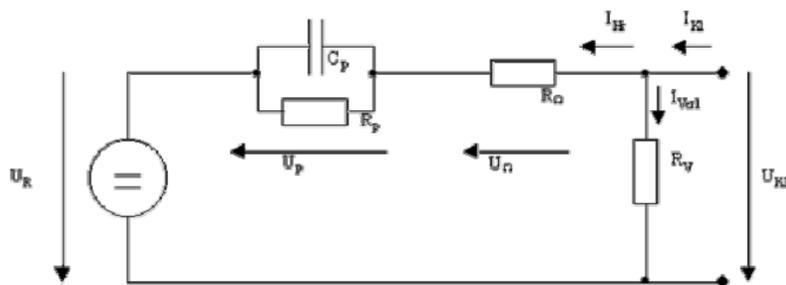
Abbildungsunsicherheit ist vernachlässigbar

Modell von Spannungsquelle, Umrichter und Asynchronmaschine in AMESim

4. Bearbeitung

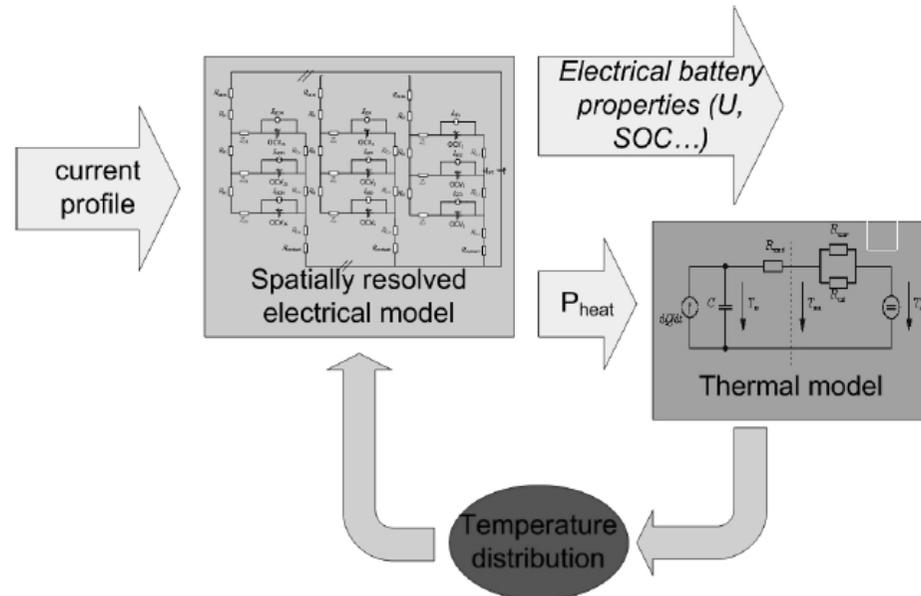
Verifikation Batterie-Modelle

Ortsaufgelöstes Kombi-Batteriemodell aus der Literatur



Einfaches Modell einer Batteriezelle ohne induktive Überspannungen

Quelle: ISEA, RWTH Aachen



Ortsaufgelöstes thermo-elektrisches Lithium-Ionen Batteriemodell
Spatially resolved combined thermal & electrical lithium-ion battery model

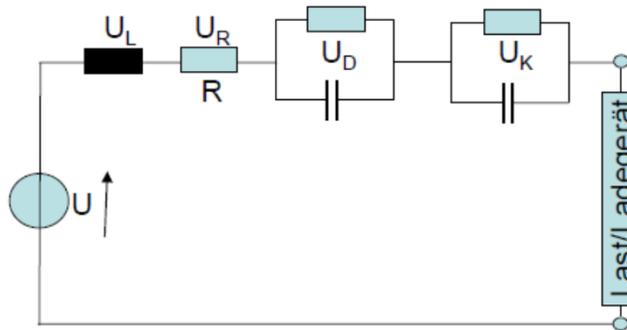
ortsaufgelöstes Kombi-Modell einer Lithium-Ionen Batterie

Quelle: ISEA, RWTH Aachen

4. Stärken u Schwächen der Komponentenmodelle

Verifikation Batterie-Modelle

Dynamisches Batteriemodell



- U_D Elektroden-Elektrolyt Konzentrationsgradient
- U_K Diffusions- und Ausgleichsprozesse
- U_R Spannungsabfall am inneren Widerstand
- U_L Induktiver Spannungsabfall

Dynamisches Ersatzschaltbild einer einzelnen Batteriezelle für den ms-Bereich mit Modellierung des induktiven Anteils (10 bis 100 nH pro Zelle)

Quelle: Prof.-Dr. Heinz Wenzl, IEE TU Clausthal

Die angegebenen Parameter sind variabel und hängen vom Ladezustand, dem Batteriealter, der Stromstärke und der Temperatur ab. Ferner ist zu berücksichtigen, dass die Parameter von der Stromrichtung abhängig sind. In der Regel wird für jedes Bauelement des Batterie-Ersatzschaltbildes ein Kennfeld zu hinterlegen sein, welches empirisch ermittelt wurde.

Wenn nur das grundsätzliche Batterieverhalten interessiert, können die angebotenen Standard-Kennfelder für verschiedene Batterietypen aus der Bibliothek von AMESim übernommen werden. (Blei-Säure, NiMH, Li-Ion)

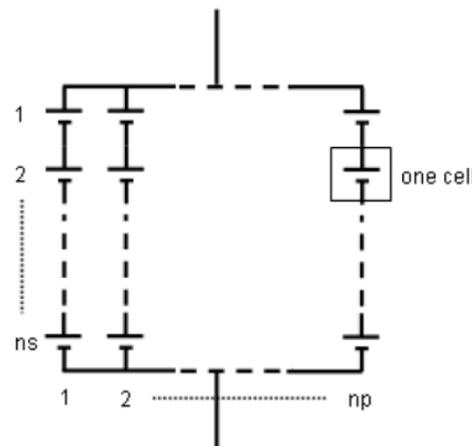
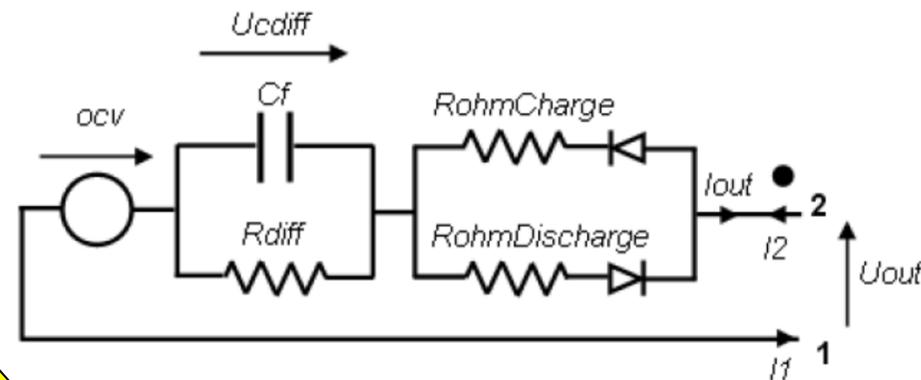
4. Bearbeitung

Verifikation Batterie-Modelle und Super-Caps

Batteriemodell in AMESim

Von allen Tools bietet AmeSim mit diesem Modell eines an, das vermutlich geeignet ist für den Lastwechsel-Zeitbereich 5 bis 10 s

Damit ist auch dies kein dynamisches Modell für den Betrieb an DC/ DC Wandlern



Ersatzschaltbild einer einzelnen Batteriezelle und Batterie

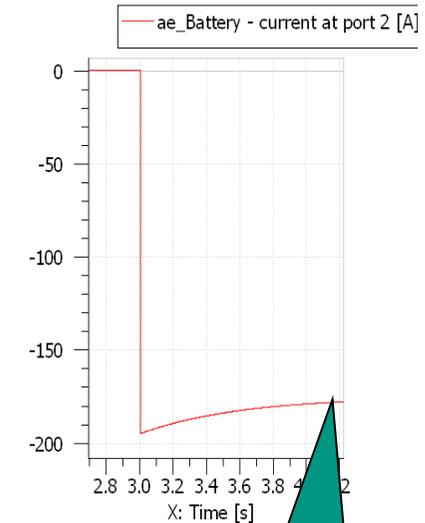
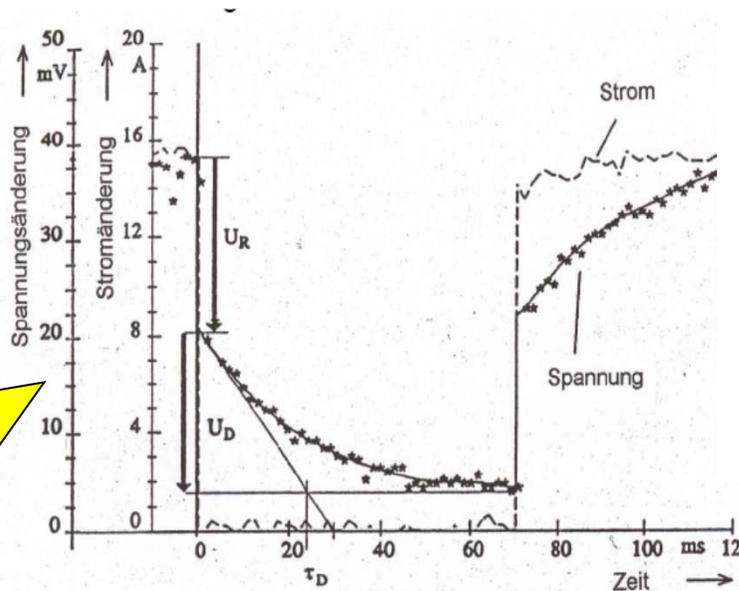
AEBAT11 – Erweitertes AMESim Modell mit Diffusion u. Filterung, basierend auf Kennfeldern

4. Bearbeitung

Verifikation Batterie-Modelle

Zeitverhalten von Ladestrom und Zellenspannung

Dieses Zeitverhalten von Strom und Spannung bei einem Lastsprung an einer realen Batterie bildet derzeit keines der in den Tools vorhandenen Modelle auch nur näherungsweise ab



Stromverlauf bei Lastsprung im besten verfügbaren Modell der untersuchten Tools

Ladestrom und Zellenspannung nach Lastsprung an einer Li-Ion Zelle

Quelle: Prof.-Dr. Heinz Wenzl, IEE, TU Clausthal

5. Ergebnisse

Verifikation Batterie-Modelle

Abschließende Gegenüberstellung
Batteriemodelle aus der Forschungsliteratur gegen Simulationstools

Unterschiedliche Aufgabenstellungen → erfordern unterschiedliche Modelle

Kennfelder der einzelnen Parameter müssen empirisch ermittelt werden, sehr komplex

für hochdynamische Anwendungen, wie z.B. Elektrofahrzeuge und Elektrowerkzeuge,
reichen die oben beschriebenen Modelle nicht aus

Hochdynamische Modelle benötigen deutlich mehr Rechenleistung, Spezialsoftware
existiert für die Batteriesimulation (Kosten im 6-stelligen Bereich)

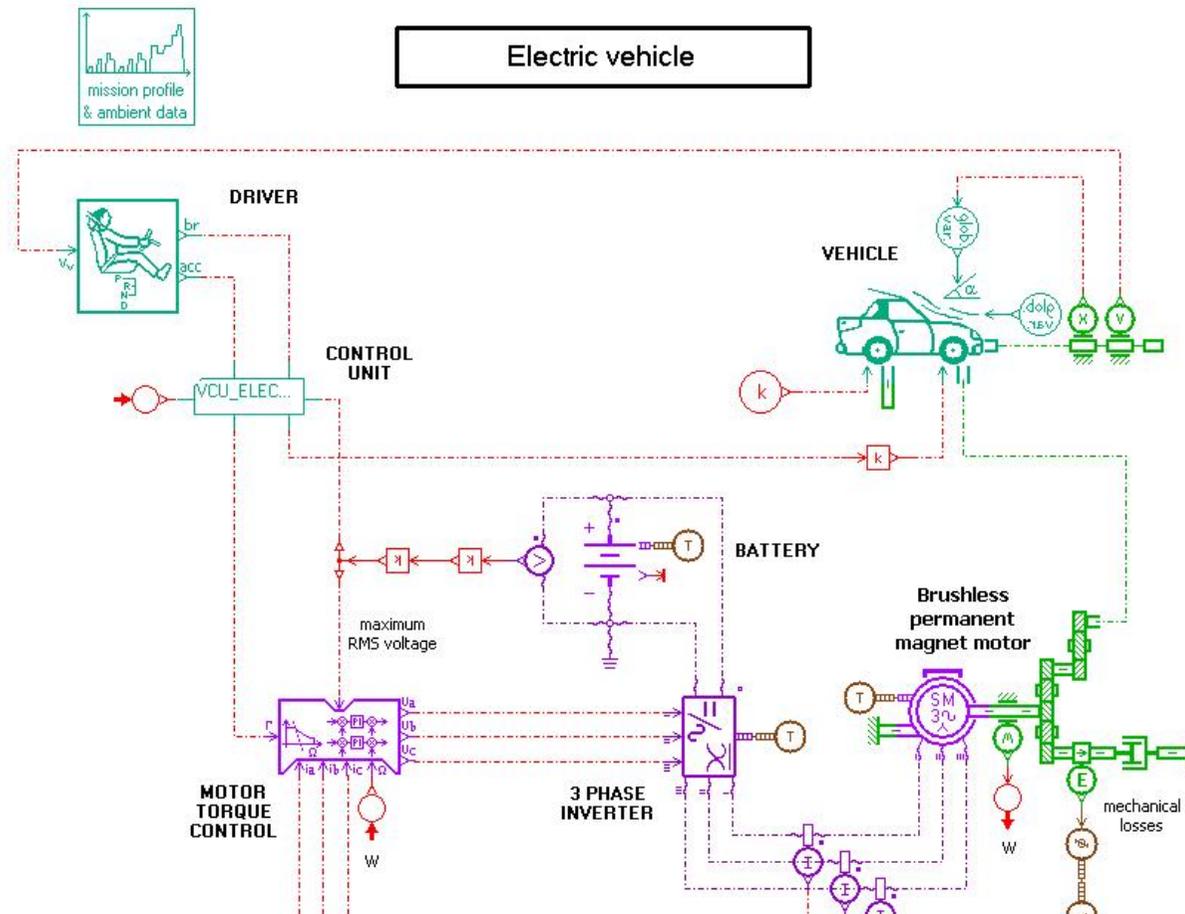
Quelle: Prof.-Dr. Dirk Uwe Sauer, ISEA, RWTH Aachen

**Unsere Untersuchungsergebnisse (Stand März 2011):
Eine Aussage zu Qualität und Simulations-Unsicherheit der in den Tools
enthaltenen Batteriesimulation ist ohne individuelle Messungen und
Validierungen des Batterie Individuums nicht möglich**

4. Stärken u Schwächen der Komponentenmodelle

Zusammenfassung zur Qualität der Modelle

- Modell eines Antriebsstranges eines Elektrofahrzeuges der PKW Klasse in AmeSim



Ohne Vermessung der Einzelkomponenten und Parameterbestimmung daraus erscheint uns heute keine sinnvolle Verlustsimulation möglich

5. Ergebnisse

Zusammenfassung zur Qualität der Modelle

E-Maschinen:

- Es werden bei den E-Maschinen nur sehr einfache T-Modelle modelliert, **in allen Tools identische Modelle. Nicht alle Verlustquellen sind enthalten.**
- **Eisensättigung** kann modelliert werden, dazu sind aber Messergebnisse notwendig
- **Hysteres- und Wirbelstromverluste** werden nicht berücksichtigt
- **Dynamische Effekte** werden im nächsten Projekt überprüft
- **Oberschwingungen** des speisenden Netzes werden nicht hinreichend berücksichtigt
- **Oberwellen** (durch Nutung) sowie **Stromverdrängung** in den Maschinen werden nicht berücksichtigt
- **Spannungsunterschiede** in den Wicklungen werden nicht berücksichtigt
- **Lüfterverluste, Luft- und Lager-Reibungsverluste** werden als linear mit der Drehzahl steigend angenommen
- **Erwärmungs-Abhängigkeit der Verluste** wird nicht ohne weitere Codierung bzw. Modellierung berücksichtigt

5. Zusammenfassung

Zusammenfassung zur Qualität der Modelle in den Tools

Maschinen:

- Asynchronmaschine
- Permanent erregte Synchronmaschine PMSM



Es ist noch unklar, mit welcher Genauigkeit die thermische Rückführung, Eisenverluste und Dynamik abgebildet werden. Abweichung heute 10 bis 20 % zwischen den Messungen und der Simulation.

Speicher:

- Li-Ion Batterie
- Doppelschichtkondensator



Modelle mit math.-physikalischen Grundlagen verglichen. Unsicherheit vor allem im transienten u. dynamischen Betrieb (taktende DC/DC Wandler, ständige Last- und Ladewechsel). Die Größenordnung ist noch nicht verifiziert.

6. Zusammenfassung

Modelle von elektr. Antrieben und Stromrichtern wurden gegen vermessene Individuen verglichen

Modelle von Speichern in den Tools wurden mit dem Stand der Wissenschaft verglichen

Relativ große Fehler bei den Verlust-Modellierungen der rotierenden elektr. Maschinen wurden festgestellt

Eisensättigung, Speisung mit Spannungsoberwellen und Erwärmung stellen noch eine Herausforderung für die Komponenten in den Bibliotheken der käuflichen Simulationsprogramme dar

Vereinfachungen bei den Modellierungen der Speicher festgestellt, die sich auf die Simulationsungenaugigkeit bei dynamischem Betrieb mit unbekannter Unsicherheit auswirken.

6. Ausblick

Aktuelle Projektarbeit für Mobima und BST

Ständig wechselnde Betriebspunkte bei mobilen Arbeitsmaschinen erfordern eine Lupe auf die Verlust-Abbildung von dynamischen Belastungsänderungen in den Modellen

Modelle um zusätzliche Verlustanteile ergänzen:

- **Thermischen Einfluss auf die Verluste** berechnen und zurück führen und somit Veränderung der Daten mit der Temperatur einführen. Dazu auch einfache **thermische Modelle der Maschinen erstellen und validieren** und eine Methode zur Gewinnung der Parameter validieren
- **Nichtlineare Eisensättigung** berücksichtigen u. Einfluss auf die Verlustaussagen bei **Dynamik validieren**
- Einrechnen der Verluste in Abhängigkeit der Harmonischen der speisenden Quelle
- **Batterien, Power Caps** im dynamischen sowie im transienten Betrieb **validieren** (Betrieb auch am DC/DC Wandler)

6. Offene Punkte u. Diskussion

Vorschlag für eANSKO III

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Noch Fragen bitte?

Kontaktadresse für Fragen:

KIT, Karlsruhe Institute of Technology
Mobima, Lehrstuhl für Mobile Arbeitsmaschinen
Frank C. OTTO
www.fast.kit.edu/mobima
Mail: Otto(at)kit.edu
Fon: 0721 608-45178



Fahrzeugsystemtechnik

Sicherheit

Energieeffizienz

Benutzerfreundlichkeit

Kosteneinsparung

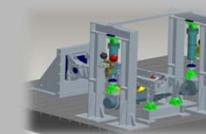
Pkw & Nutzfahrzeuge

Prof. Dr. rer. nat. Frank Gauterin



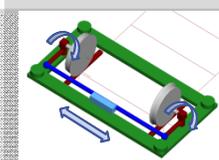
Mobile Arbeitsmaschinen

Prof. Dr.-Ing. Marcus Geimer



Schienerfahrzeuge

Prof. Dr.-Ing. Peter Gratzfeld



Leichtbau

Prof. Dr.-Ing. Frank Henning

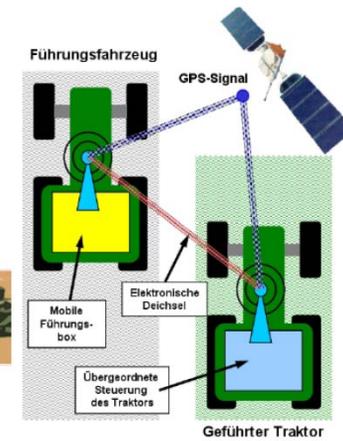
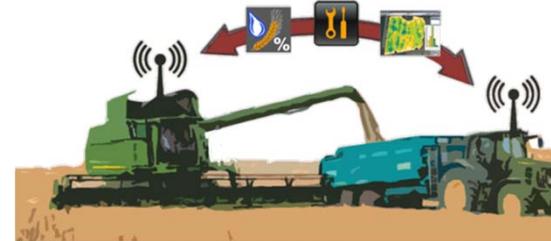
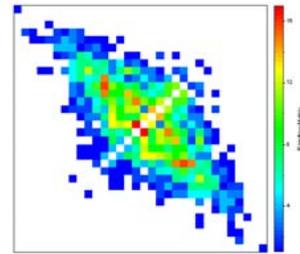
Fahrer-Fahrzeug-Interaktion

N.N.

Forschungsschwerpunkte Mobima



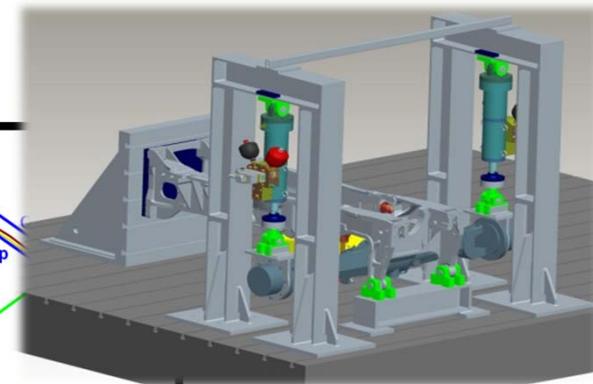
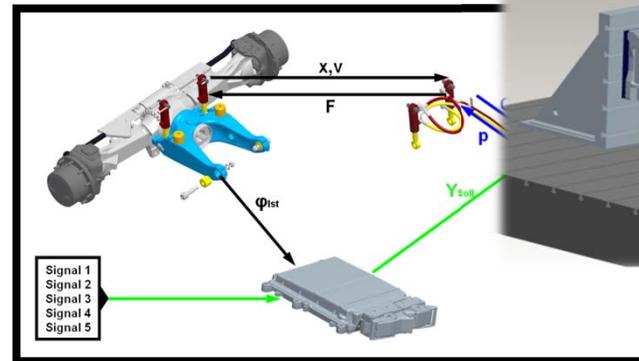
⇒



Antriebstechnik

Steuerungskonzepte

Simulation



Standorte



Infrastruktur

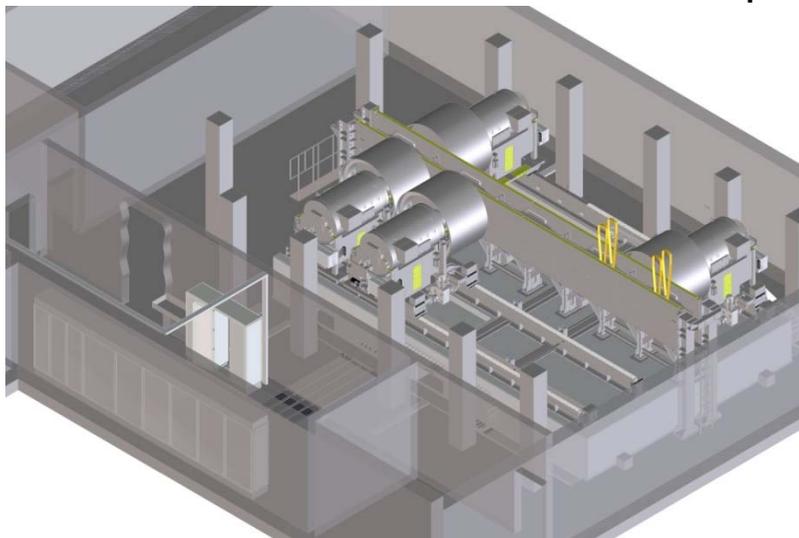


Fasanengarten

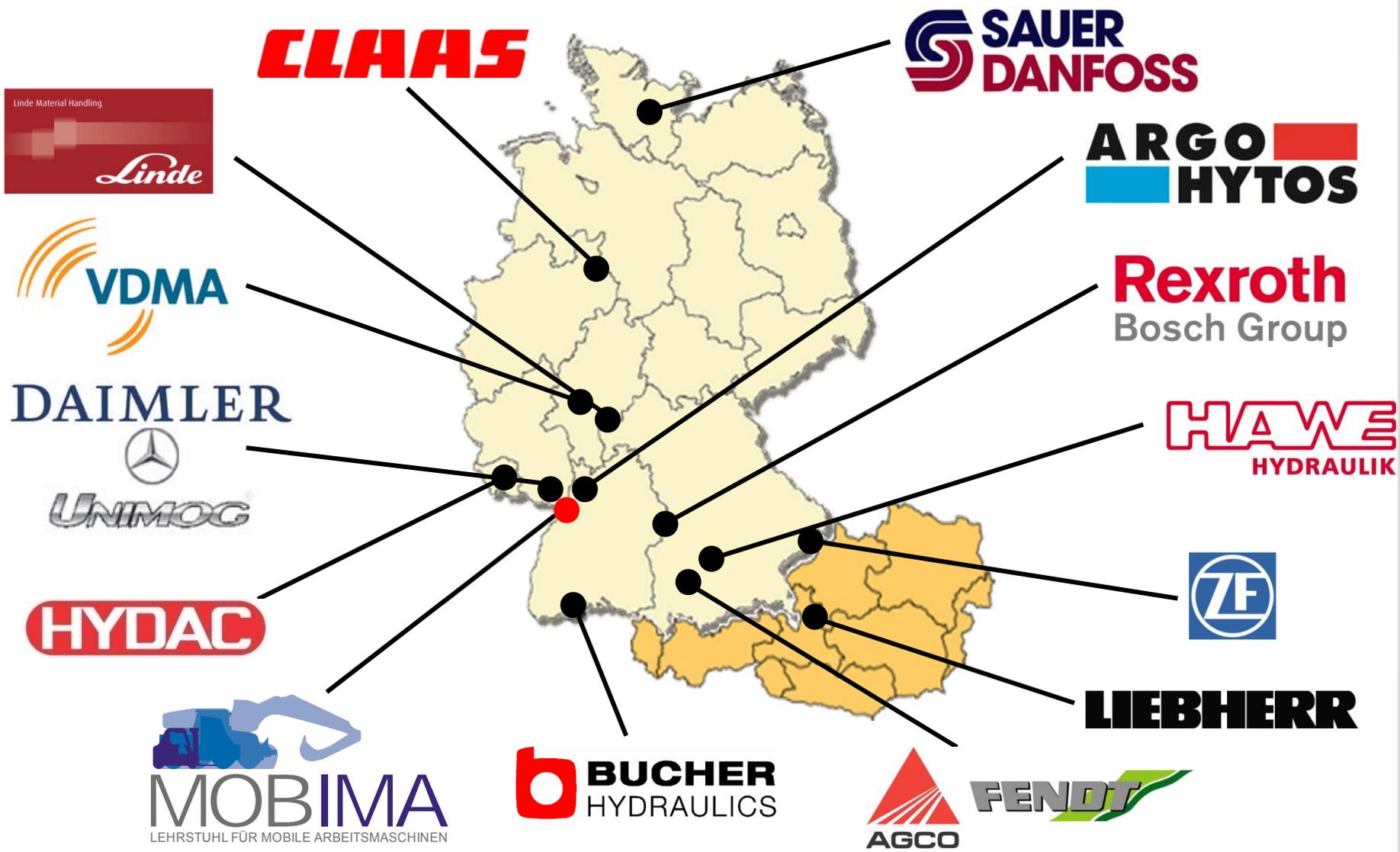


Versuchsgelände in Hochstetten (TMB)

Campus Ost



Stiftungsverein MOBIMA e.V.



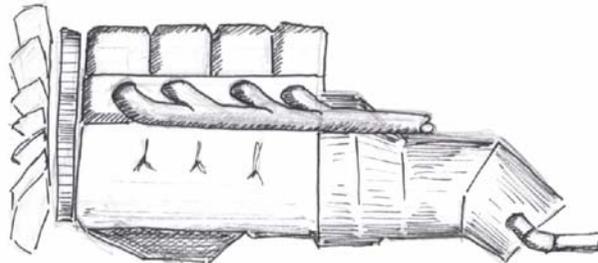
- Hard- und Software zur Implementierung von Bus Steuerungen für Mobile Arbeitsmaschinen, z.B. CAN, ISOBUS
- Simulationsprogramme für Mechanik, Hydraulik, Elektrotechnik und Steuerungsaufgaben
 - z.B. ProE, Simpack, DSH, Matlab/Simulink, AMESim, Dymola
- A-ARP Allrad-Akustik-Rollenprüfstand für mobile Arbeitsmaschinen und Nutzfahrzeuge mit bis zu 1400 kW Antriebsleistung und 440 kN Zugkraft an 4 einzelnen direkt und hochdynamisch getriebenen Rollen
- Spanntisch mit 20 m² Versuchsfläche und zentraler Druckversorgung
- Vorderachsfederung zur Verifikation von Simulationsmodellen
- Versuchsfahrzeuge:
 - Versuchstraktoren ausgerüstet mit Messtechnik
 - Teleskoplader zur Aufnahme von Lastkollektiven
 - Radlader mit telemetrischer Messtechnik

**Kolloquium
Mobilhydraulik**

**Braunschweig /
Karlsruhe**



**Fachtagung
Hybridantriebe
für mobile
Arbeitsmaschinen**



**MobileMachines
Sicherheit und
Fahrerassistenz
für
Arbeitsmaschinen**





The screenshot shows a web browser window titled "Mobile Arbeitsmaschinen - Windows Internet Explorer". The address bar contains "http://www.fast.kit.edu/mobima/index.php". The page content includes a navigation menu with "HOME", "IMPRESSUM", "SITEMAP", "FAKULTÄT MASCHINENBAU", and "KIT". Below this is a header with "KIT" logo and "Karlsruher Institut für Technologie". A horizontal menu lists "BAHNSYSTEMTECHNIK", "FAHRZEUGTECHNIK", "LEICHTBAUTECHNOLOGIE", and "MOBILE ARBEITSMASCHINEN". A banner image shows a car, a train, a truck, and a tractor. The main content area features a search bar, a sidebar with navigation links like "Unser Profil", "Mitarbeiter", "Forschung", "Studium und Lehre", "Prüfungen", "Tagungen", "Studien-/Diplomarbeiten", "Bachelor-/Masterarbeiten", "Stellenangebote", "Aktuelles", "Mechanische Werkstatt und Elektrotechnisches Labor", and "So finden Sie uns!". The central text reads "3. Fachtagung 'Hybridantriebe für mobile Arbeitsmaschinen' Hier online anmelden!". Below this is a welcome message: "Willkommen am Lehrstuhl für Mobile Arbeitsmaschinen". A paragraph describes the "Stiftungs-Lehrstuhl für Mobile Arbeitsmaschinen 'Mobima' des KIT" and its international recognition. An image of a green tractor is shown. On the right, there is a "MOBIMA" logo and contact information for the "Lehrstuhl für Mobile Arbeitsmaschinen" at Gotthard-Franz-Str. 8, 76131 Karlsruhe, with phone and fax numbers.