

Thomas Barucki, Meerane

# Auslegung und Optimierung eines Elektroantriebes für Traktoren

*Im Rahmen mehrjähriger Arbeiten wurde am Lehrstuhl Landtechnik der TU Dresden ein Versuchsstand mit einem dieselektrischen Fahrtrieb entwickelt. Die Ergebnisse der ersten Arbeitsphase, deren Schwerpunkt auf der Auslegung des Antriebes und der Entwicklung von Modellen zur Untersuchung des stationären und dynamischen Verhaltens des Antriebes lagen, werden vorgestellt. Erste Versuche zum dynamischen Verhalten des Antriebsstranges zeigen die Realisierbarkeit einer neuartigen, auf der Vorgabe von Drehmomentsollwerten basierenden Steuerung des Antriebsstranges.*

Dipl.-Ing. Thomas Barucki war von 1996 bis 2000 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl Landmaschinen (Leitung: Prof. Dr.-Ing. habil. Bernhardt), Institut für Verarbeitungsmaschinen, Landmaschinen und Verarbeitungstechnik der TU Dresden. Seit 2000 ist er bei der Simec / Ansoft GmbH & Co KG in 09113 Chemnitz, Blankenauer Straße 74, auf dem Gebiet der Modellbildung für das Simulationssystem „Simplorer“ tätig; e-mail: [barucki@simec.com](mailto:barucki@simec.com)

## Schlüsselwörter

Traktortechnik, dieselektrischer Fahrtrieb

## Keywords

Tractor technology, diesel-electric driving gear

Der Elektroantrieb hat an Einfluss auf die Entwicklungstendenzen in der Automobilindustrie gewonnen. Batteriebetriebene, Hybrid- und Brennstoffzellenfahrzeuge benötigen effiziente, kleine und leichte Elektroantriebe. Magnetwerkstoffe mit verbesserten Eigenschaften sowie die ständig wachsende Leistungsfähigkeit der Mikroprozessoren haben zur Realisierung neuer Motorkonzepte mit höheren Wirkungsgraden und geringeren Abmessungen geführt.

Der Einsatz von Elektroantrieben im Traktor würde völlig neue Funktionen des Fahrzeuges ermöglichen. Neben der Realisierung eines bidirektionalen IVT-Getriebes mit einer komfortablen Steuerschnittstelle könnte der Traktor als mobile Drehstromquelle für verschiedene Arbeitsmaschinen genutzt werden. Der Einsatz eines zusätzlichen elektrischen Energiespeichers würde eine kurzzeitige Erhöhung der verfügbaren Antriebsleistung des Fahrzeuges ermöglichen.

Ein vielbeachteter Prototyp eines dieselektrischen Traktors wurde 1998 von der Fa. Schmetz vorgestellt. Bereits vor über 40 Jahren wurde von der Fa. Allis-Chalmers ein brennstoffzellenbetriebener Traktor entwickelt. Sofern sich die Brennstoffzelle als alternative Energiequelle in der Kfz-Industrie durchsetzt, würde sie auch auf dem Gebiet der Landmaschinen eine ernstzunehmende Konkurrenz zum Dieselmotor darstellen.

Am Lehrstuhl Landmaschinen der TU Dresden werden seit 1996 Untersuchungen zu diesel-elektrischen Antriebskonzepten durchgeführt. Nach einer Phase theoretischer

Vergleiche möglicher Antriebskonfigurationen wurde ein Versuchsstand aufgebaut mit dem Ziel, anhand praktischer Versuche Erfahrungen mit dieselektrischen Antrieben zu sammeln und Vergleiche zwischen einer rein elektrischen Leistungsübertragung („Serienhybrid“) und einem leistungsverzweigten Antrieb in Bezug auf deren Wirkungsgradverläufe durchzuführen. Weiterhin wurde eine Regelung für einen dieselektrischen Antrieb entwickelt und auf dem Versuchsstand getestet.

## Antriebskonzeption des Versuchsstandes

Für die Realisierung eines dieselektrischen Antriebes existieren verschiedene Alternativen. Vernachlässigt man Batterieantriebe, ergibt sich eine Unterscheidung zwischen sogenannten „Serienhybriden“ und leistungsverzweigten Anordnungen.

Während beim Serienhybrid die gesamte vom Dieselmotor gelieferte mechanische Leistung in elektrische Energie und zurück gewandelt wird, nutzen leistungsverzweigte Antriebe die mechanische und elektrische Leistungsübertragung. Der Vorteil des Serienhybrid liegt in der einfachen Struktur und den erhöhten konstruktiven Freiheitsgraden aufgrund der frei wählbaren Anordnung der Einheit Dieselmotor-Generator. Im Gegensatz dazu verringert der Einsatz der Leistungsverzweigung die Anforderungen an die Dimensionierung der Elektroantriebe und führt zumindest innerhalb bestimmter Betriebsbereiche zu erhöhten Antriebsstrangwirkungsgraden. Die quantitativen Unter-



Bild 1: Dieselektrischer Traktor der Fa. Schmetz und Brennstoffzellentraktor von Allis Chalmers

Fig. 1: Diesel-electric tractor by Schmetz and fuel cell tractor by Allis Chalmers

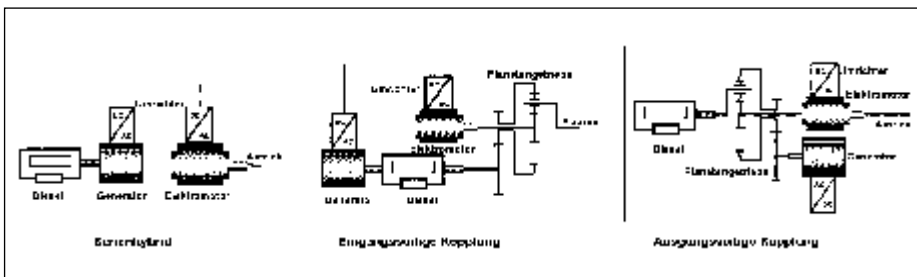


Bild 2: Serienhybrid und leistungsverzweigte Anordnungen

Fig. 2: Serial hybrid and power-split configuration.

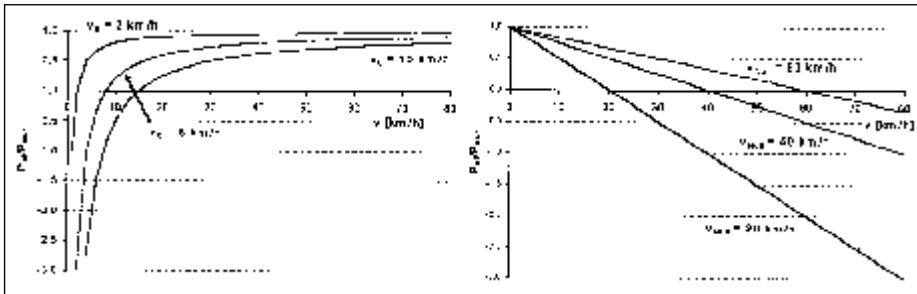


Bild 3: Anteil der elektrischen Leistungsübertragung an der abgegebenen Zugleistung unter Vernachlässigung der Übertragungsverluste (links: eingangsseitige Kopplung, rechts: ausgangsseitige Kopplung)

Fig. 3: Electric power share of the power-split configurations (losses not considered) (left: input coupled; right: output coupled)

schiede und der Geschwindigkeitsbereich mit den größten Unterschieden zum Serienhybrid hängen von der gewählten Getriebe-konfiguration und insbesondere vom Einsatz von Schaltgetrieben ab.

In Abhängigkeit von der Anordnung der Elektroantriebe im Antriebsstrang werden leistungsverzweigte Antriebe in eingangsseitig und ausgangsseitig gekoppelte Strukturen unterschieden. Bild 2 zeigt die prinzipiellen Strukturen der Antriebsvarianten.

Der Anteil der auf elektrischem Weg übertragenen Leistung an der abgegebenen Zugleistung leistungsverzweigter Antriebe ist abhängig von der Fahrgeschwindigkeit. Bild 3 zeigt die typischen Kurven des Anteils der elektrischen Leistungsübertragung unter der Annahme einer konstanten Dieseldrehzahl. Bei der eingangsseitig gekoppelten Anordnung erfolgt ein Blindleistungsfluss (erkennbar an den negativen Werten des Leistungsanteils) bei niedrigen Fahrgeschwindigkeiten. Bei ausgangsseitig gekoppelten Anordnungen wird beim Anfahren die gesamte Leistung auf elektrischem Weg übertragen, das gesamte Anfahr Drehmoment muss also vom Elektromotor aufgebracht werden.

Beide Antriebskonfigurationen haben als charakteristische Größe die Fahrgeschwindigkeit, bei der ein Elektroantrieb feststeht und die gesamte Antriebsleistung auf mechanischem Weg übertragen wird. Obwohl auch in diesem Betriebspunkt eine gewisse Verlustleistung in den Elektroantrieben umgesetzt wird, kann bei dieser Fahrgeschwindigkeit ein sehr guter Antriebsstrangwirkungsgrad erwartet werden. Aus Bild 3 ist leicht ersichtlich, dass die Bestwerte des An-

triebsstrangwirkungsgrades der eingangsseitig gekoppelte Leistungsverzweigung im Hauptarbeitsbereich bei relativ niedrigen Fahrgeschwindigkeiten zu erwarten sind, während die ausgangsseitig gekoppelte Anordnung ihr Optimum bei höheren Geschwindigkeiten erreichen sollte.

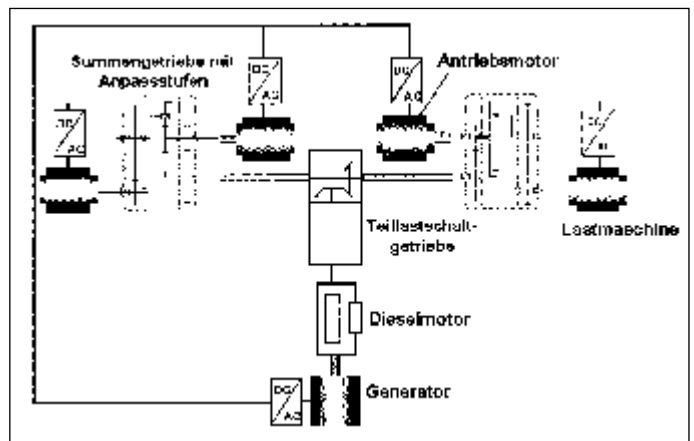
Nach der Analyse der Antriebskonfigurationen wurde am Lehrstuhl Landmaschinen der TU Dresden ein Versuchsstand für die selektische Fahrtriebe entworfen. Die folgende Ziele wurden dabei verfolgt:

- Aufbau eines Versuchsstandes, der in den Betriebsarten „Serienhybrid“ und „Eingangsseitig gekoppelte Leistungsverzweigung“ betrieben werden kann
- Bestimmung des Verlustverhaltens der Antriebskomponenten und Verifikation von Modellen zur Berechnung des Leistungsflusses innerhalb der Antriebsstränge
- Entwicklung einer Ansteuerung für den Versuchsantrieb
- Implementierung eines Controller-Programmes zur Ansteuerung des Versuchsantriebes

Der Aufbau des Versuchsstandes ist in Bild 4 dargestellt.

Bild 4: Aufbau des Versuchsstandes

Fig. 4: Test-bench structure



Kernstück des Versuchsstandes ist ein Traktor-Torso, bei dem anstelle der Frontzapfwelle ein Generator angekoppelt ist. Da die Frontzapfwellengetriebe entfernt wurde, läuft der Generator mit der gleichen Drehzahl wie der Dieselmotor. Der Umrichter des Generators ist über einen Gleichspannungszwischenkreis mit zwei Motor-Umrichtern verbunden. Die von diesen Umrichtern gesteuerten Asynchronmotoren treiben jeweils das Sonnenrad eines Planetengetriebes. Die Hohlräder der Planetengetriebe sind mit der Hinterachse des Traktortorsos über ein Hochsetzgetriebe verbunden. Um eine möglichst hohe Drehzahl der Hohlräder zu erreichen, wurden im Traktortorso die Endantriebe der Hinterräder entfernt. Bei einem realen Fahrtrieb müsste die Drehzahl der Stegwelle durch ein Getriebe an die Raddrehzahlen angepasst werden. Um jedoch auf dem Versuchsstand die Dimensionierung der erforderlichen Lastmaschinen möglichst gering zu halten, wurde statt dessen ein Hochsetzgetriebe zwischen den Stegwellen und den Lastmaschinen eingesetzt.

Aufgrund der Auslegung der Getriebe konnten die gleichen Asynchronmotoren für die Antriebsmotoren wie auch die Lastmaschinen eingesetzt werden. Sie werden alle von Standard-Industriemrichtern angesteuert. Generator und Generatorumrichter entstammen einer Baureihe, die für den Einsatz in Stadtbussen entwickelt wurde. Die Nennleistung des Dieselmotors von 63 kW kann vom Generator abgenommen werden.

### Berechnung der Wirkungsgrad-Kennfelder

Unter Verwendung der Parameter und Kennfelder der auf dem Versuchsstand eingesetzten Komponenten wurden Wirkungsgrad-, Kraftstoffverbrauchs- und Emissionskennfelder eines „virtuellen Fahrzeuges“ berechnet. Unter dem Begriff „virtuelles Fahrzeug“ wurde dabei ein Traktor verstanden, bei dem die gleichen elektrischen Maschinen, Umrichter und Dieselmotor, aber modifizierte

Getriebekomponenten (Anpassung an reale Raddrehzahlen anstelle der hohen Drehzahlen des Dieselmotors, Verwendung eines einfachen Getriebes zwischen Dieselmotor und Planetengetriebe anstelle des komplexen Lastschaltgetriebes des Versuchsstandes) zum Einsatz kommen.

Die Berechnungen wurden mit dem Programmsystem „Matlab“ durchgeführt. Seine Vorteile liegen in der einfachen Behandlung von Matrizen und komplexen Zahlen sowie der Möglichkeit, das Zusatzmodul „Simulink“ zur dynamischen Simulation des Systems zu verwenden.

Bild 5 zeigt die berechneten Verläufe des Volllast-Antriebsstrangwirkungsgrades für die beiden betrachteten Konfigurationen. Die leistungsverzweigte Anordnung erreicht im Vergleich zum Serienhybrid einen um etwa 7% höheren Wert des maximalen Antriebsstrangwirkungsgrades.

Generell sind die berechneten Wirkungsgrade insbesondere für höhere Fahrgeschwindigkeiten noch nicht befriedigend. Hauptursache dafür sind die zu hohen magnetischen Verluste der Asynchronmotoren. Bei der Verwendung höherwertiger (und damit leider auch teurerer) Eisenwerkstoffe ist eine deutliche Erhöhung des Wirkungsgrades in diesem Bereich möglich. Eine zweite Alternative besteht in der Verwendung von Schaltgetrieben, mit denen der erforderliche Drehzahlbereich der Motoren deutlich reduziert würde.

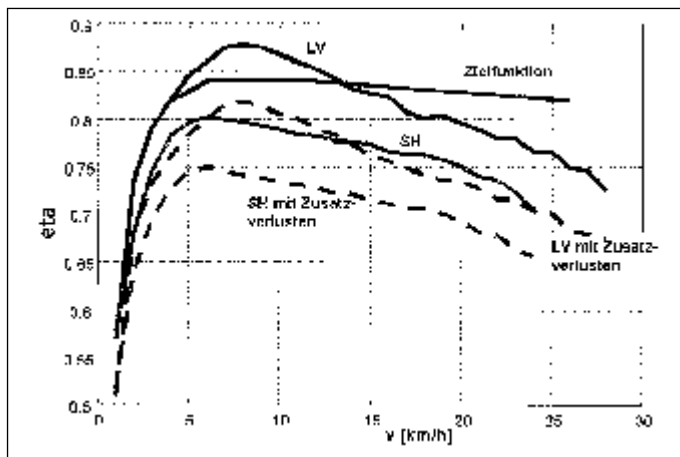


Bild 5: Volllast-Wirkungsgrad des „virtuellen Fahrzeugs“

Fig. 5: Calculated full-load efficiency of the „virtual vehicle“

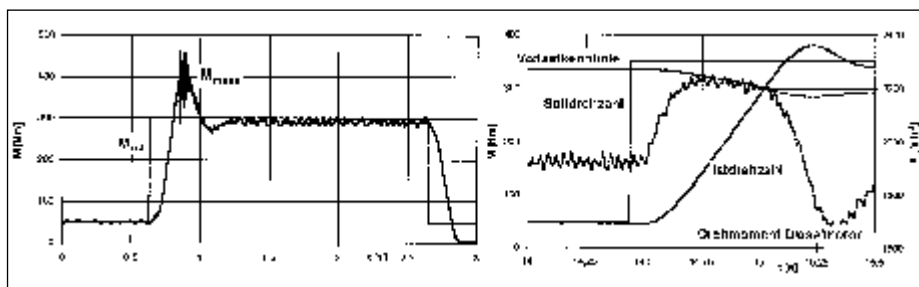


Bild 6: Messungen zur Bestimmung der Dynamik der Elektroantriebe (links) und des Dieselmotors

Fig. 6: Identification measurements of the dynamics of electric drive (left) and of diesel engine

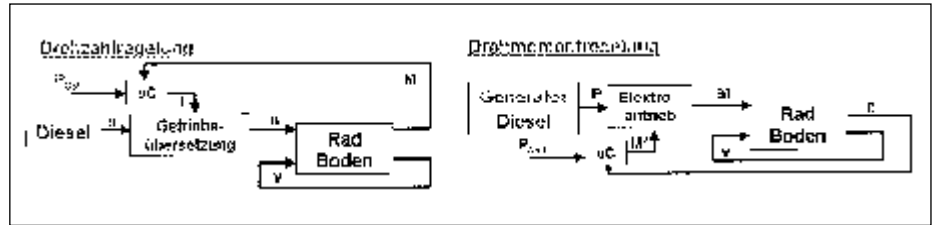


Bild 7: Regelstrukturen basierend auf Drehzahl- und Drehmomentvorgaben

Fig. 7: Comparison of control schemes based on speed or torque commands

Neben dem virtuellen Fahrzeug wurde auch der auf dem Versuchsstand aufgebaute Antrieb modelliert. Der Vergleich dieser berechneten Werte mit den gemessenen Wirkungsgraden zeigte eine gute Übereinstimmung. Beim leistungsverzweigten Antrieb wurde eine maximale Differenz von 4% ermittelt. Für den Serienhybrid, wo die Unterschiede zwischen Versuchsantrieb und „virtuellem Fahrzeug“ geringer sind, waren die Differenzen noch niedriger.

### Untersuchungen zur Dynamik der Antriebskomponenten

Zur Entwicklung einer Ansteuerung für den Antriebsstrang musste zunächst die Dynamik der eingesetzten Komponenten ermittelt werden. Bild 6 zeigt die Ergebnisse der Versuche zur Identifizierung der Dynamik der Elektroantriebe und des Dieselmotors einschließlich Einspritzregelung.

Die Elektroantriebe folgen einem Drehmoment-Sollwert. Der Anstieg des abgegebenen Drehmomentes kann im Setup der Frequenzumrichter eingestellt werden. Um einen stabilen Betrieb

des Antriebes (ohne Abschaltung aufgrund von Überströmen) zu gewährleisten, wurde ein Wert von 1500 Nm/s nicht überschritten. Daher wird aus dem Leerlauf das Nenn-drehmoment von 382 Nm innerhalb von 0.25 s eingestellt.

Der Einspritzregler des Dieselmotors erwartet einen Drehzahlsollwert. Es ist zu erkennen, dass nach einer Verzögerung von rund 100 ms das abgegebene Drehmoment des Dieselmotors ansteigt. Nach weiteren 250 ms wird die Volllast-Kurve erreicht. Nach dem Erreichen des Drehzahlsollwertes verringert der Einspritzregler das eingestellte Drehmoment.

In Auswertung der Messungen konnte festgestellt werden, dass die Anregelzeiten der Elektroantriebe ausreichend sind. Probleme ergaben sich aufgrund des Überschwingens des Drehmoments und bei starken Anstiegen der Drehzahlen der Elektromotoren. Aus diesem Grund wurden im Anschluss an die in diesem Beitrag beschriebenen Versuche die eingesetzten Frequenzumrichter mit einer verbesserten Software versehen.

### Regelung des Antriebsstranges

Elektrische Fahrtriebe werden üblicherweise wie auf dem Versuchsstand unter Vorgabe eines Drehmomentsollwertes betrieben. Die Umsetzung einer derartigen Strategie im Traktor führt zu einer Veränderung der gesamten Fahrzeugregelung. Derzeit werden Traktorantriebe unter Verwendung eines drehzahlgeregelten Dieselmotors und eines Getriebes mit verstellbarem Übersetzungsverhältnis betrieben. Die sich damit einstellenden Raddrehzahlen führen bei gegebenen Rad-Boden-Verhältnissen zu den Gegenmomenten an den Rädern, die über das Getriebe bis auf den Dieselmotor zurückwirken. Um eine volle Auslastung der verfügbaren Leistung des Dieselmotors zu erreichen, muss die Getriebeübersetzung entsprechend den Bodenverhältnissen variiert werden.

Eine Regelung auf der Basis von Drehmomentsollwerten ermöglicht die Vorgabe des Sollwertes der Leistungsabgabe des Fahrtriebes. Diese Vorgabe kann aufgrund der Nennleistung des Dieselmotors und des Wirkungsgrades des Getriebes erfolgen. Mit den

verfügbaren Information über die Raddrehzahlen kann die Leistungsvorgabe in Drehmomentvorgaben umgerechnet werden. Damit kann das zu erwartende Lastmoment an der Kurbelwelle bereits berechnet werden, ehe der Drehmomentsollwert an die Frequenzumrichter gesendet wird. Die Raddrehzahlen ergeben sich dann aus den anliegenden Drehmomenten und den Rad-Boden-Verhältnissen. Zusätzliche Algorithmen können im Frequenzumrichter eingebaut werden, um den Anstieg der Raddrehzahlen zu begrenzen (Reduktion des Drehmomentes bei durchdrehenden Rädern).

Bild 7 zeigt die vereinfachten Strukturen der beiden Regelstrategien. Dabei sollte insbesondere darauf geachtet werden, dass im Fall der auf Drehzahlvorgabe basierenden Regelung die nur mit mäßiger Dynamik verstellbare Getriebeübersetzung variiert werden muss, um den Einfluss der sich mit hoher Dynamik ändernden Lastmomente zu kompensieren. Im Gegensatz dazu müssen bei der Vorgabe der Antriebsmomente die Raddrehzahlen überwacht werden, die sich als integrale Größe nur relativ langsam ändern können.

Die auf der Vorgabe von Antriebsdrehmomenten basierende Regelung wurde auf dem Versuchsstand implementiert. Zur Ansteuerung des gesamten Versuchsstandes wurde das System „dSpace“ verwendet. Dieses „Windows“-basierte System ermöglicht die Verwendung eines in „Matlab/Simulink“ aufgebauten Blockschaltbildes, das automatisiert in einen echtzeitfähigen Code für einen DSP umgewandelt wird. Aufgrund dieser Schnittstelle zu „Matlab/Simulink“ ist es möglich, den gesamten Antriebsstrang, seine Ansteuerung und vorgegebene Lastzyklen zunächst in der Simulation zu untersuchen. Wenn die Simulationen zu zufriedenstellenden Ergebnissen geführt haben, können die Modelle der Antriebskomponenten durch die real auf dem Versuchsstand vorhandene

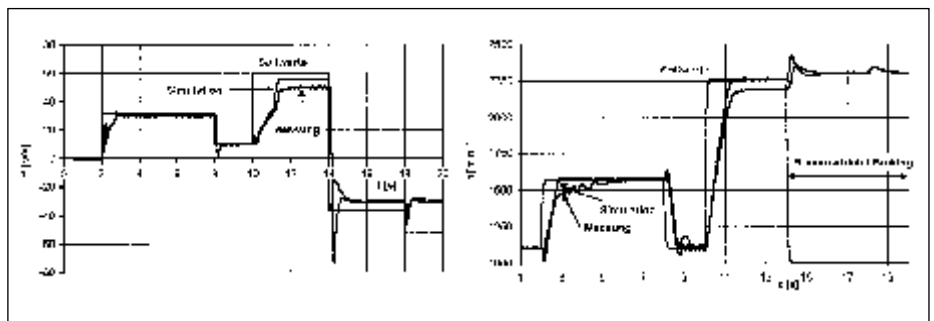


Bild 9: Simulations- und Messergebnisse – Radantriebsleistung (links) und Dieseldrehzahl

Fig. 9: Simulation and measurement results for wheel power (left) and diesel engine r.p.m.

Hardware ersetzt werden („Hardware in the loop“). In diesem Stadium wird lediglich die Belastung der Rädern innerhalb von Simulationsmodellen berechnet und als Drehmomentvorgabe an die Frequenzumrichter der Lastmaschinen gesandt.

Obwohl die grafische Eingabe einer Reglerstruktur in „Simulink“ bei einfachen linearen Systemen sehr komfortabel zu handhaben ist, erkennt man doch bei komplizierteren Strukturen schnell die Grenzen dieser Arbeitsweise. Insbesondere die vielfach erforderlichen Fallunterscheidungen lassen sich in einer Hochsprache wie „C“ schneller als im Blockschaltbild umsetzen. Aus diesem Grund wurde der Kern der Antriebsregelung unter Nutzung der C-Schnittstelle von „Simulink“ implementiert.

Bild 8 zeigt den vereinfachten Signalflussplan des Versuchsstandes. Die Vorgaben des Fahrers (Zug- oder Bremskraft, Solldrehzahl des Dieselmotors) und die Informationen der Komponenten des Antriebsstranges werden von einem Sollwert-Rechner verarbeitet. Wenn der Fahrer einen Sollwert für die Drehzahl des Dieselmotors vorgegeben hat, wird dieser vom Sollwert-Rechner nicht überschrieben. Wurde kein Sollwert vorgegeben, kann der Sollwert-Rechner eine (in Bezug auf Kraftstoffverbrauch, Emissionen oder erforderliche Zugkraftreserve) optimierte Dieselmotordrehzahl berechnen. Eingangsgrößen dieser Berechnung sind die eingestellten Raddrehzahlen und die Sollwerte der Antriebsmomente. Aus dem Vergleich des vom Generator abgeforderten Lastmomentes an der Kurbelwelle und dem von der Einspritzregelung eingestellten abgegebenen Drehmomentes des

Dieselmotors kann auf die Belastung des Dieselmotors durch Nebenverbraucher geschlossen werden. Letztere Funktion konnte jedoch auf dem Versuchsstand nicht implementiert werden, da die Signale der Einspritzregelung nicht genau genug waren. Neuere Systeme sollten jedoch in der Lage sein, die erforderlichen Informationen bereitzustellen.

Der Sollwertrechner wandelt den Zugkraftsollwert in einen Drehmomentsollwert und überprüft, ob dieser Drehmomentsollwert realisierbar ist. Aus zwei Gründen kann es erforderlich sein, diesen Sollwert zu reduzieren: Zum einen kann die Umsetzung eines Drehmomentsollwertes bei gegebenen Raddrehzahlen zu einer Leistungsanforderung an den Dieselmotor führen, die dieser selbst bei Einstellung seiner Maximaldrehzahl nicht erfüllen kann. In diesem Fall muss eine dauerhafte Reduktion des Drehmomentsollwertes erfolgen. Eine kurzzeitige Reduktion des Drehmomentsollwertes kann erforderlich sein, wenn eine Anpassung (Erhöhung) der Dieseldrehzahl an die Leistungsanforderung erfolgen soll. Bei einer sprunghaften Änderungen des vom Fahrer vorgegebenen Zugkraftsollwertes muss der Dieselmotor möglichst schnell auf eine erhöhte Drehzahl gebracht werden.

Der im Sollwertrechner umgesetzte Ansatz folgt der Idee des „verfügbaren Kurbellendrehmomentes“. Um den Dieselmotor schnell auf eine Solldrehzahl zu beschleunigen, muss eine ausreichend große Differenz zwischen dem vom Dieselmotor aufgebrauchten Drehmoment und dem an der Kurbelwelle wirksamen Lastmoment vorhanden sein. Das Lastmoment ergibt sich aus der Summe von Generator Drehmoment und den Drehmomenten der Nebenverbraucher. Nach dem Erreichen der Solldrehzahl darf das Generator Drehmoment nicht das maximal verfügbare Drehmoment überschreiten. Um diese Bedingungen zu erfüllen, werden unter Verwendung der Wirkungsgradkennfelder der Elektroantriebe, des Generators und der mechanischen Komponenten das maximal zulässige Drehmoment der Elektroantriebe berechnet. Diese Größe wird zur Begrenzung des Drehmomentsollwertes verwendet.

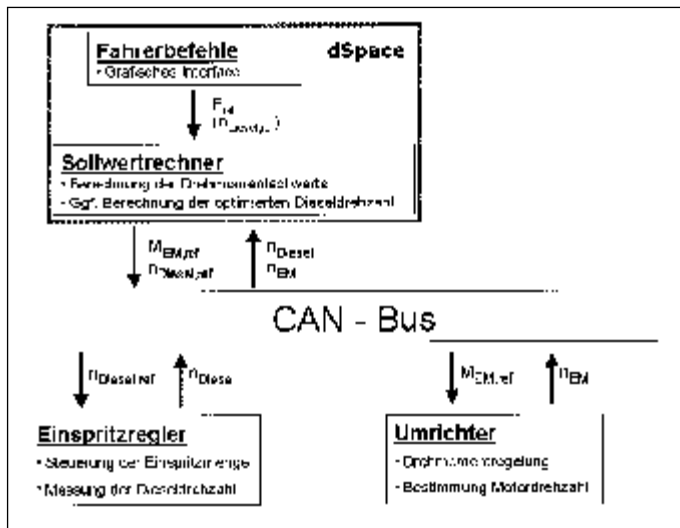


Bild 8: Vereinfachte Regelstruktur des Versuchsantriebs

Fig. 8: Simplified control scheme of the drive train at the test-bench

Fortsetzung auf Seite 442