

## Kommunikation von Motor und Getriebe über CAN-Bus

### *Communication Between Engine and Transmission via CAN-Bus*

Dieter Brunotte und Jörg Seeger

Institut für Landmaschinen und Fluidtechnik, Technische Universität Braunschweig

**Kurzfassung:** Bei modernen Traktoren sind die einzelnen Antriebsstrangkomponenten zunehmend elektronisch ansteuerbar. Die Effizienzsteigerung des Gesamtsystems ist in Anbetracht der fehlenden intelligenten Verknüpfung der Komponenten bei weitem noch nicht ausgeschöpft. Im vorliegenden Beitrag wird die Verknüpfung von Motor- und Getriebe-steuerggerät mit einem übergeordneten Mikrocontroller zur Steuerung und Regelung des Gesamtsystems über den CAN-Bus vorgestellt. Motor, Getriebe und Belastungseinheiten sind im Traktormanagementversuchsstand<sup>1</sup> des Instituts für Landmaschinen und Fluidtechnik integriert. Versuchsergebnisse zeigen, daß durch die Regelung der Getriebeübersetzung eines stufenlosen Getriebes über den CAN-Bus, im Vergleich zum Stufengetriebe, die Arbeitseffektivität gesteigert und gleichzeitig der Kraftstoffverbrauch erheblich gesenkt werden können.

**Deskriptoren:** CAN-Bus, Traktormanagement, Regelungsstrategien

**Abstract:** *Usually, single drive-train components of modern tractors are electronically controlled. Increasing efficiency of the overall system using intelligent connection of these components has not yet been exploited completely. The following article presents the connection of engine and transmission controller with a higher level microcontroller for the overall system via CAN-Bus. Engine, transmission and loading units are integrated in the tractor management test stand of the Institute of Agricultural Machinery Sciences and Fluid Power. Results show that it is possible to increase the efficiency and simultaneously decrease fuel consumption.*

**Keywords:** *CAN-Bus, tractor management, control strategies*

### 1 Einleitung

In den letzten Jahrzehnten hat sich der Traktor in der Landwirtschaft immer mehr zu einer zentralen, komplexen Einheit entwickelt. Dabei sind die Anforderungen, die an das Gesamtsystem Fahrer-Traktor-Gerät-Boden gestellt werden, ständig gestiegen. Besonders Komfort und Arbeitseffektivität sind erheblich gesteigert worden. Die Arbeitsergebnisse werden jedoch vor allem durch die Erfahrungswerte und das Geschick des Fahrers beeinflusst. Wegen der Vielschichtigkeit der gleichzeitig zu berücksichtigenden Faktoren und der sich ständig ändernden Betriebszustände ist der Fahrer in der Regel nicht in der Lage, die Betriebspunkte von Motor, Getriebe und Gerät im Verbund optimal einzustellen. Durch die Verknüpfung der Steuergeräte über den CAN-Bus und die Steuerung und Regelung durch ein übergeordnetes Managementsystem kann die Arbeitseffektivität und -qualität weiter gesteigert werden.

Neben der Kommunikation von Motor und Getriebe über den CAN-Bus gehört zu einem vollständigen Traktormanagementsystem auch die Einbindung eines Hubwerkmanagements, auf das hier aber nicht näher eingegangen werden soll.

### 2 Grundlegende Betrachtungen zum optimalen Betriebspunkt von Traktoren

In den vergangenen Jahrzehnten wurde eine Vielzahl von Untersuchungen und Forschungsarbeiten zur Einsatzoptimierung von Traktoren durchgeführt [1 bis 9]. Ein Traktor muß als universelle Arbeitsmaschine eine große Anzahl von unterschiedlichen Arbeiten verrichten, bei denen gerade der Motor in unterschiedlichen Betriebspunkten arbeiten muß. In Bild 1 sind in Anlehnung an Welschhof [10] die aus statistisch ausgewerteten Feldversuchen gewonnenen Betriebspunkte in einem Motorkennfeld dargestellt.

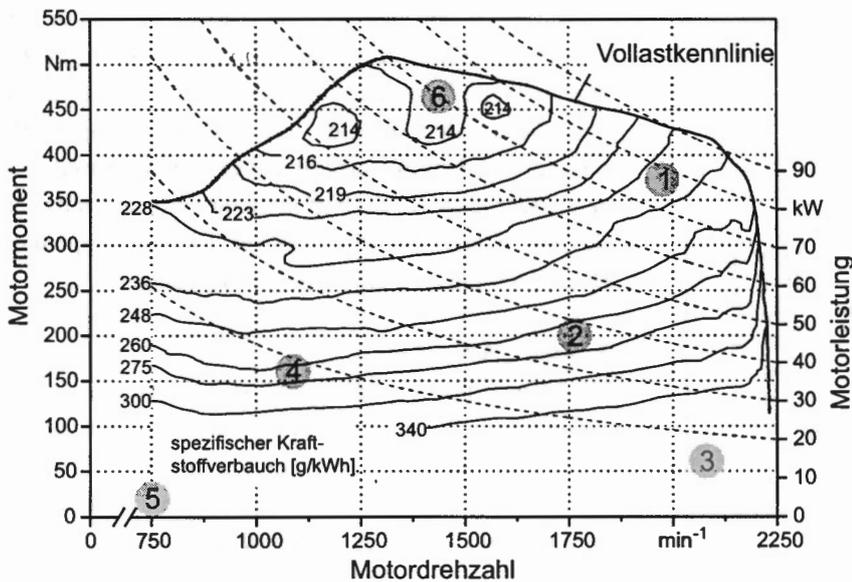


Bild 1: Unterschiedliche Betriebspunkte eines Traktormotors  
 Fig. 1: Various operating points of a tractor engine

Unterhalb der Vollastkennlinie sind die Linien bzw. Bereiche konstanten spezifischen Verbrauchs eingetragen. Im Bereich 1 gibt der Motor annähernd seine maximale Leistung ab, ein typischer Betriebspunkt für schwere Zug- und Zapfwellenarbeit. Im Bereich 2 werden normale Zapfwellenarbeiten und Transporte im Feld durchgeführt, wobei sich die benötigte Motorleistung im Vergleich zum Bereich 1 etwa halbiert. Bei Straßentransporten im Bereich 3 und bei Pflegearbeiten ohne Zapfwelle oder Kriechgangarbeiten im Bereich 4 sinkt die benötigte Motorleistung noch weiter ab. Der Bereich 5 charakterisiert den Leerlaufbetrieb.

Es ist deutlich zu erkennen, daß die meisten Betriebspunkte weit vom Optimum des spezifischen Kraftstoffverbrauchs (Bereich 6) entfernt sind, wohingegen das Optimum der maximalen Leistung bzw. Motorauslastung den Einsatzfällen im Bereich 1 schon relativ nahe kommt. Theoretische Untersuchungen [3; 9] zur Optimierung der Zuordnung von Traktor und Gerät haben nicht nur das Verbrauchskennfeld des Motors, wie in Bild 1 dargestellt, sondern das System "Traktor-Gerät-Boden" einschließlich der Verfahrenskosten betrachtet. Die Untersuchungsergebnisse zeigen, daß zur Minimierung des Arbeitszeitbedarfs nicht unbedingt mit einer 100 %igen Motorauslastung gefahren werden muß. In [4] wird beschrieben, wie sich die Lage des Betriebspunkts kleinster Gesamtkosten im Motorkennfeld je nach Gewichtung von Zeit- und Kraftstoffkosten bewegt. Zur Einstellung des optimalen Arbeitspunkts wurden Fahrerinformationssysteme entwickelt, die charakteristi-

sche Betriebsgrößen ermitteln und dem Fahrer in aufbereiteter Form zur Verfügung stellen. In [6] wird dem Landwirt auf einem Monitor der aktuelle Betriebspunkt des Motors im Drehmomentkennfeld mit eingezeichneten Linien konstanten spezifischen Kraftstoffverbrauchs angezeigt. In [7] wird der Betriebspunkt im Leistungskennfeld mit eingezeichneten Linien konstanten stündlichen Kraftstoffverbrauchs dargestellt. Ein System, bei dem der aktuelle Gang durch eine konstant leuchtende und der berechnete optimale Gang durch eine blinkende Lampe gekennzeichnet ist, wird in [8] vorgestellt.

Die Systeme konnten zwar Leistungssteigerungen nachweisen [1] und gingen auch in Serie, haben sich aber auf Grund der erhöhten Schalttätigkeit nie in bedeutender Weise durchgesetzt.

Neben der Lage der Betriebspunkte der maximalen Leistung und des minimalen Verbrauchs ist auch der Drehmomentverlauf des Motorkennfelds [11; 12] ein wichtiges Kriterium zur Beurteilung des Traktorbetriebspunkts und des Fahrverhaltens.

In Bild 2 sind drei verschiedene Motorkennfelder dargestellt, die für drei Einsatzfälle besonders geeignet sind, da sie unterschiedliche Eigenschaften und Merkmale haben.

Für „Schwere Zugarbeiten“, bei denen es im allgemeinen auf eine hohe Flächenleistung ankommt, ist es sinnvoll, den Drehmomentanstieg so zu wählen, daß in einem möglichst großen Drehzahlbereich eine konstante Leistung vom Motor abgegeben wird. Bei einem Stufengetriebe ist so die Schalzhäufigkeit klein und Leistungslücken werden vermieden.

Bei „Zapfwellenarbeiten“ ist es wichtig, einen möglichst großen Anstieg des Drehmoments schon bei kleinem Drehzahlabfall zu gewährleisten, da bei zu niedrigen Drehzahlen des Motors die angetriebenen Arbeitswerkzeuge nicht die optimale Qualität liefern.

Für „Transportarbeiten“ ist es vorteilhaft, daß der Motor ein möglichst "elastisches Verhalten" aufweist, um an Steigungen nicht zu oft schalten zu müssen. Dies wird durch einen moderaten Drehmomentanstieg über einen mittleren Drehzahlbereich erreicht.

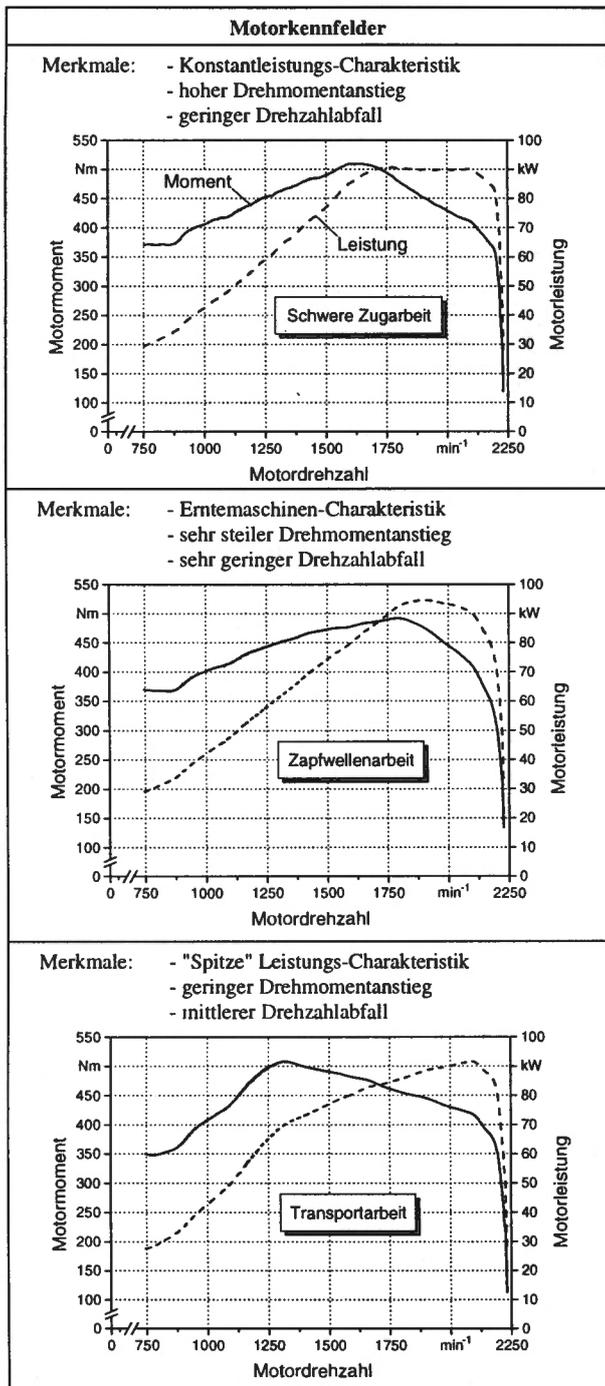


Bild 2: Motorkennfelder für verschiedene Einsatzbeispiele

Fig. 2: Engine characteristics for various applications

Diese unterschiedlichen Beispiele möglicher Drehmomentkurven verdeutlichen neben obigen Ausführungen, daß es für den Traktorfahrer nahezu unmöglich ist, Motor und Getriebe im Verbund so einzustellen, daß sich das Gesamtsystem im optimalen Betriebspunkt befindet. Erst die heutige, weitgehende Verbreitung von Lastschaltgetrieben, die zunehmende Automatisierung der Schaltvorgänge [13 bis 15], der Einsatz stufenloser, lei-

stungsverzweigter Getriebe, die Ausrüstung der Dieselmotoren mit elektronischen Motorreglern und nicht zuletzt die Verknüpfung der Steuergeräte über Bussysteme ermöglichen den Aufbau eines Traktormanagementsystems mit Optimierungsstrategien. Im Gegensatz zu den beschriebenen Fahrerinformationssystemen entlasten sie den Fahrer bei gleichzeitiger Effizienzsteigerung. Hierauf wird in Abschnitt 5 näher eingegangen.

### 3 Der CAN-Bus

Das „Controller Area Network“ (CAN) wurde von der Firma Bosch für den Kfz-Einsatz entwickelt und genügt den Forderungen der Kfz-Technik nach hoher Zuverlässigkeit bei geringen Kosten. CAN ist international genormt in ISO 11898. In der Zwischenzeit hat CAN eine über den Einsatz in Kraftfahrzeugen hinausgehende Bedeutung für die Vernetzung dezentraler intelligenter Systeme in einer Vielzahl industrieller Anwendungen gefunden [16; 17]. Für einen modularen, dezentralen Aufbau eines Gesamtsystems werden elektronische Steuergeräte zunehmend mit dem CAN-Bus ausgerüstet [18; 19]. Der serielle Datenaustausch erfolgt bei CAN mit hoher Übertragungsgeschwindigkeit und Datenübertragungssicherheit. Auf Grund unterschiedlicher Einsatzbereiche (Komfort-Bus, Antriebsstrang-Bus) wird fahrzeugintern zwischen Low-Speed- (<125 kBaud) und High-Speed-Kommunikationssystemen (125 - 1000 kBaud) unterschieden. Die Erkennung verfälschter Nachrichten, die durch elektromagnetische Störeinstrahlung hervorgerufen werden können, wird durch einander ergänzende Fehlererkennungsmechanismen mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit erreicht. Erkannte Fehler führen zu einer automatischen Nachrichtenwiederholung. Der entstehende Zeitverlust ist durch die kurzen Datenpakete (max. 8 Bytes pro Botschaft) nur gering.

Die Anzahl der Teilnehmer pro Netz ist nicht durch das Protokoll begrenzt, sondern abhängig von der Leistungsfähigkeit der eingesetzten Bustreiber. Die bei einer bestimmten Datenrate maximal mögliche Netzausdehnung ist durch die auf dem Busmedium erforderliche Signallaufzeit begrenzt. Bei 1 MBaud ist eine Netzausdehnung von 40 m, bei 80 kBaud eine Netzausdehnung von 1000 m möglich.

CAN ist ein echtzeitfähiges „Multimastersystem“ mit Linien-Topologie. Der Datenaustausch im CAN-Protokoll erfolgt nicht durch die Adressierung des Nachrichtempfängers, sondern durch Kennzeichnung einer übertragenden Nachricht (z. B. Drehzahl, Temperatur etc.) mit einem eindeutigen Identifier. Anhand des emp-

fungenen Identifiers prüft jeder Netzknoten, ob die Nachricht für ihn relevant ist (Akzeptanzfilterung). Dadurch kann jede Nachricht gleichzeitig von mehreren oder allen Netzknoten übernommen werden (Broadcasting, Multicasting) so daß Anwendungsprozesse synchronisiert werden können. Der Identifier bestimmt gleichzeitig die Priorität einer Nachricht bezüglich des Buszugriffs. Jeder Netzknoten kann mit dem Senden einer Nachricht beginnen, sobald der Bus nicht belegt ist. Der Netzknoten mit der höchstprioritären Nachricht erhält das Buszugriffsrecht (Vermeidung eines Buszugriffskonflikts durch verlustlose, bitweise Arbitrierung). Aus diesem Grund müssen bei der Vergabe der Identifier Sicherheitskriterien, Prozessabläufe und Informationsabläufe mit einbezogen werden. Bei der Konzeption des Busses stehen zwei Botschaftsformate zur Auswahl: das Standard-Format (11-Bit Identifier, CAN Spezifikation 2.0 A) und das Extended-Format (29-Bit Identifier, CAN Spezifikation 2.0 B). Für den Anwendungsbereich in Nutzfahrzeugen empfiehlt die SAE (Society of Automotive Engineers) den Einsatz von CAN und definiert ein für diesen Einsatzbereich spezifisches Schicht-7-Protokoll in Verbindung mit einem entsprechenden Anwendungsprofil.

#### 4 Versuchsstandaufbau

**Bild 3** zeigt den Aufbau eines Versuchsstands für ein Traktormanagementsystem, wie er am Institut für Landmaschinen und Fluidtechnik der TU Braunschweig realisiert worden ist [20 bis 22]. Der Versuchsstand besteht aus folgenden Komponenten:

- Dieselmotor mit elektronischem Motorregler (EMR), Abgasturbolader mit Ladeluftkühlung und Ladedruckregelung
- Elektronisch verstellbares hydrostatisch-mechanisch leistungszweigiges Lastschaltgetriebe
- Elektronisch verstellbare hydrostatische Einheiten für die Belastung von Antriebsstrang und Zapfwelle
- Elektrohydraulisch betätigte Arbeitshydraulik und Hubwerksregelung mit entsprechenden Belastungseinheiten (im Bild 3 nicht dargestellt)
- Traktormanagementsystem-Controller (TMS-Controller) zur Verknüpfung von Motor- und Getriebesteuergerät

- Rechneinheit zur Belastungssimulation und Meßdatenerfassung mit CAN-Bus-Ankopplung zu TMS-Controller, Getriebe- und Motorsteuergerät

#### 4.1 Der elektronische Motorregler

Die Elektronik in Dieselmotoren trägt wesentlich zu kundenrelevanten Verbesserungen und zur Einhaltung neuer gesetzlicher Abgasvorschriften bei. Für den optimalen Betrieb des Traktormotors hinsichtlich Kraftstoffverbrauch, Emission und Geräuschentwicklung sind eine möglichst genaue Dosierung der Einspritzmenge und die korrekte Wahl des Einspritzdrucks und -zeitpunkts erforderlich. Bei der Kraftstoffdosierung müssen zu den Forderungen für eine optimale Gemischbildung noch motorbedingte Betriebsgrenzen wie z. B. Rauchgrenze, Verbrennungsdruckgrenze, Abgastemperaturgrenze, Drehzahl- und Drehmomentgrenze berücksichtigt werden. Um diesen Anforderungen zu genügen, ist am Versuchsstand der Motor mit einer elektronisch geregelten Einspritzpumpe ausgerüstet. Der von der DEUTZ AG zusammen mit HEINZMANN entwickelte EMR verfügt in dieser Anwendung über folgende Funktionsbereiche:

- Leerlaufdrehzahlregelung, die die Motordrehzahl im Leerlauf abhängig von Temperatur und Warmlaufzeit einstellt
- Drehzahlbegrenzung, die die Motordrehzahl unabhängig von der Gaspedalstellung nach dem Erreichen der Drehzahlgrenze begrenzt
- Überwachungsfunktionen, die eine ständige Komponentenüberwachung durchführen

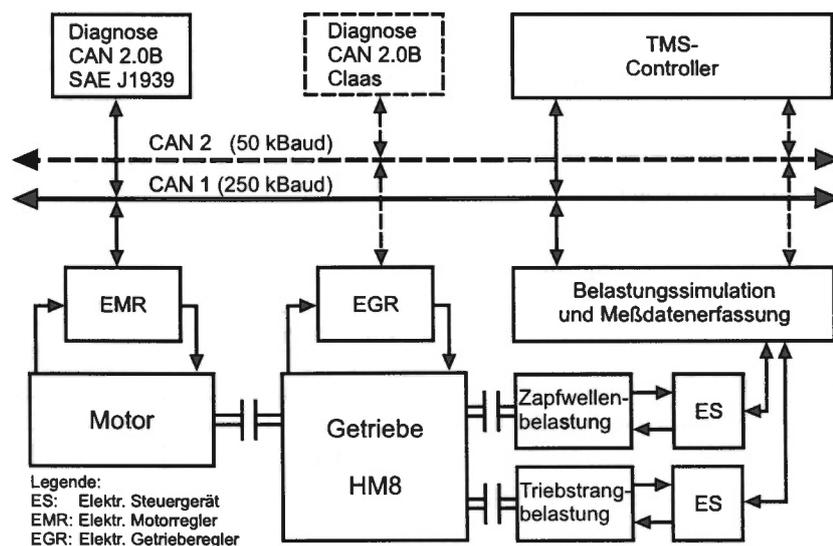


Bild 3: Aufbau des Traktormanagementsystems

Fig. 3: Structure of the tractor management system

- Schutzfunktionen, die nach motorspezifischen Randbedingungen für eine automatische Leistungsbegrenzung sorgen
- Fehlerreaktionsfunktion, die funktionskritische Zustände vermeidet und Notfunktionen der Motorsteuerung sicherstellt
- Diagnosefunktionen, die den Zugriff externer Geräte auf Fehlerspeicher und geräteinterne Funktions- und Regelparameter ermöglichen
- Regelung über umschaltbare, je nach Einsatzfall wählbare Motorkennfelder z. B. Drehmoment/Leistungsbegrenzung, Konstantleistung usw., die im Steuergerät gespeichert sind und mit Hilfe der Bandende-Programmierung ersetzt werden können
- Rauchbegrenzung als Funktion der Drehzahl und des Ladeluftdrucks
- CAN-Schnittstelle nach SAE J1939 zur Kommunikation mit anderen Steuersystemen

#### 4.2 Der elektronische Getrieberegler (EGR)

Das elektronisch verstellbare, hydrostatisch-mechanisch leistungsverzweigte Lastschaltgetriebe bietet eine optimale Anpassung von Motordrehmoment und Motordrehzahl an die Erfordernisse des Traktorfahrwerks im realen Einsatzfall ohne Lastunterbrechung. Das Steuergerät des Getriebes hat neben der Grundfunktion zur Gangschaltung und -umschaltung auch weitere Funktionsbereiche: Kommunikation mit anderen elektronischen Steuergeräten und Diagnose-, Regel- und Sicherheitsfunktionen. Für die Kommunikation des Getriebe-steuergeräts mit anderen Steuergeräten am Traktor steht eine CAN-Schnittstelle mit herstellereigenem Protokoll zur Verfügung. Das Getriebe-steuergerät bietet herstellerseitig definierte Strategien, die im Folgenden lediglich benannt werden sollen und deren Erklärungen in [23] nachgelesen werden können:

- Fahrhebelstrategie
- Leistungsstrategie
- Gaspedalstrategie
- Konstantgeschwindigkeitsstrategie

In der Fahrhebelstrategie wählt man über die Fahrhebelposition die Übersetzung stufenlos vor. In den drei letzten Strategien regelt der EGR die Motordrehzahl oder die Fahrgeschwindigkeit durch die Veränderung des Übersetzungsverhältnisses.

#### 4.3 Kommunikation über CAN-Bus

Für die Realisierung der Verknüpfung des Kommunikationspfads zwischen EGR und EMR sollte der CAN-Bus in beiden Systemen zum Tragen kommen. Während die CAN-Schnittstelle des EMR in Hardware und Software entsprechend der SAE J1939 realisiert worden ist, arbeitet der EGR nach einem herstellereigenen Protokoll. Im Folgenden soll auf die beiden Protokolle näher eingegangen werden.

##### 4.3.1 SAE J1939

Die SAE J1939 unterbreitet Empfehlungen und Anwendungsvorschläge, die ein reibungsloses Zusammenwirken von signalübertragenden Bauteilen ermöglicht.

Da die bisher lediglich von Interessengemeinschaften bestimmter Industriezweige für alle Anwendungen im Feldbereich notwendige Anwendungsschicht intern standardisiert ist, legt die SAE J1939 alle im Nutzfahrzeugsbereich zweckmäßigen Signale fest. Die Nachrichtenfülle führt zu einem 29-Bit-Identifizierer, wobei der Nachteil einer höheren Latenzzeit (längerer Nachrichtenrahmen) und Verschlechterung der Protokolleffektivität in Kauf genommen wird. Neben der prioritätsorientierten Identifizierergabe enthält die SAE J1939 eine verarbeitungsorientierte. Anwendungsspezifische Nachrichten werden zu sogenannten Nachrichtengruppen zusammengefaßt. Durch die Codierung von Nachrichtengruppen, Nachrichtenfunktionen, Quell- oder Zielknoten in Bitgruppen des Identifizierers ist die Weiterverarbeitung des CAN-Objekts möglich (Tabelle 1). Die Anwendungsschicht betrachtet ein CAN-Objekt als PDU (Protocol Data Unit). Die PDU enthält sieben Felder, nämlich ein Prioritätsfeld, ein Reserviertfeld, ein Datenseitenfeld, ein PDU-Formatfeld, ein PDU-spezifisches Feld, das die Zieladresse oder eine Gruppenzuordnung enthalten kann, ein Quelladressfeld und das Datenfeld. Die ersten sechs Felder sind dem 29-Bit-Identifizierer einer CAN-Nachricht zugeordnet.

Tabelle 1: Protocol Data Unit

Table 1: Protocol Data Unit

PDU							
Bezeichnung	Priority	Reserved	Data Page	PDU-Format	PDU-Specific (Destination-address or Group Extension)	Source-address	Data Field
Bitzahl	3	1	1	8	8	8	0..64

Die Baudrate der CAN-Schnittstelle im EMR ist mit 250 kBaud konfiguriert. Für die Botschaften lassen sich die Zykluszeiten, Prioritäten, externe Knotenadressen und die Knotenadresse des EMR konfigurieren.

Die **Tabelle 2** zeigt die im EMR implementierten Botschaften, die zur Zeit vom TMS-Controller zur Meßwert-erfassung und Steuerung des EMR genutzt werden. Hierbei werden sowohl SAE J1939-Standard-Botschaften, als auch herstellerspezifische CAN-Botschaften auf Basis von SAE J1939 verwendet. Um die CAN-Objekt-Filterung zu vereinfachen, hat der Motorhersteller Signale aus Standard-Botschaften in herstellerspezifische Botschaften gelegt. Folgende Werte sind im EMR konfiguriert: Externe Knotenadresse = 3, EMR-Adresse = 0. Hieraus ergeben sich die in Tabelle 2 gezeigten Identifier, entnommen aus den CAN-Spezifikationen für den EMR der DEUTZ AG. Ist der EMR für die Sollwertvorgabe über CAN konfiguriert, läßt sich die Drehzahl des Motors vom TMS-Controller in einem 20 ms Zeitraster über die Botschaft „TSC1“ verstellen. Die Botschaft „Funktionsumschaltung“ bietet z. B. die Möglichkeit, bei Änderung der verrichteten Tätigkeit auf eine andere Dachkurve umzuschalten. Weiterhin ist es möglich, zwischen zwei Steigungen (P-Grad) des Abregelzweigs umzuschalten. Die beiden Dachkurven und die Werte des P-Grads werden bei der Bandende-Programmierung im EMR abgespeichert.

Noch nicht vom Motorhersteller implementiert ist das Herunterladen einer Dachkurve über die CAN-Schnittstelle, was für den TMS-Controller größeren Spielraum

bieten würde, weil die Motorcharakteristik für die Tätigkeiten „Schwere Zugarbeit“, „Transportarbeit“, „Zapfwellenarbeit“ anderen Anforderungen genügen muß. In Abschnitt 5 wird darauf näher eingegangen. Eine Kontrollmöglichkeit für das erfolgreiche Herunterladen bietet die Norm-Botschaft „Engine Configuration“, die als Dateninhalt das Motorkennfeld beinhaltet.

#### 4.3.2 Das Getriebeprotokoll

Der EGR-Hersteller hat bei der Implementierung der Anwendungsschicht für die CAN-Schnittstelle ein eigenes Protokoll verwendet. Die Baudrate beträgt 50 kBaud. Das Protokoll berücksichtigt verschiedene CAN-Knoten wie z. B. das Getriebe, die Hubwerksregelung und den Instrumentenmonitor. Verwendet wird das 11-Bit Standard-Frame-Format nach CAN 2.0B. Die Identifier sind in Funktionsgruppen unterteilt. Gemäß ihrer Priorität werden die Identifier aufsteigend den Basisbotschaften, Alarmmeldungen, Sollwerte, Istwerte, Seriennummern, Fehlerspeicher, Meldungen, Diagnose und Testausgaben zugeordnet. **Tabelle 3** zeigt die zur Zeit vom TMS-Controller verwendeten Botschaften. Die Strategie, der Anfahrang und die Soll-Fahrhebelposition können vom TMS-Controller vorgegeben werden. Für die Untersuchung und Entwicklung von eigenen Antriebsstrangstrategien wird die Getriebe- auf die Fahrhebelstrategie eingestellt. Der TMS-Controller sendet über den CAN-Bus die Soll-Fahrhebelposition an den EGR und kann somit direkt auf das Übersetzungsverhältnis Einfluß nehmen.

Tabelle 2: Verwendete EMR CAN-Botschaften

Table 2: Used EMR CAN-Messages

Botschafts-name	ID	Datenlänge [Byte]	Zykluszeit [ms]	Botschaftsinhalte	EMR sendet/ Norm
EEC1 (Electronic Engine Controller)	0x0CF00400	8	20	Status Drehmomentsollwert[%]/Mdmax Drehmoment[%]/Mdmax Motordrehzahl	ja/ja
EEC2	0x0CF00300	8	50	Pedalposition Drehmoment[%]/Mdmax(n)	ja/ja
Fuel Economy	0x18FEF200	8	100	Kraftstoffverbrauch [l/h]	ja/ja
Messwerte	0x18FF0400	8	200	Motordrehzahl, Ladeluftdruck, Pedalposition, Kühlmitteltemperatur, Öldruck	ja/nein
TSC1 (Torque/Speed Control)	0x0C000003	8	20	Kontroll-Byte Soll-drehzahl Drehmomentgrenze[%]/Mdmax	nein/ja
Funktionsumschaltung	0x0CFF0203	8	500	Dachkurve, P-Grad, Drehzahlwahl Regler-Umschaltung	nein/nein
Motorschutz	0x0CFF0303	8	100	Leistungsreduktion (Absenkung der Dachkurve)	nein/nein

Tabelle 3: Verwendete EGR CAN-Botschaften  
 Table 3: Used EGR CAN-Messages

Sender	Botschaftsinhalte
EGR	Sollübersetzung, Istübersetzung, Fahrgeschwindigkeit, Strategie, Fahrhebelposition, Impulsanzahl Abtrieb
EGR	· Motordrehzahl, Fahrhebeltaster, aktueller Anfahrang
EGR	Alarmnummer, Alarm ein/aus
TMS	Strategie
TMS	Anfahrang
TMS	Soll-Fahrhebelposition

#### 4.4 TMS-Controller

**Bild 4** zeigt den notwendigen funktionellen Aufbau des TMS-Controllers als Bridge bei der Verwendung von zwei CAN-Protokollen und seine Bedienung.

Das Kernstück bildet der leistungsfähige 16-Bit Mikrocontroller C165 (Siemens). Der Programmcode wird per Softwaredownload über die serielle Schnittstelle RS232 im Flash-EEPROM abgelegt. Danach fungiert die RS232 als Kommandoingabeschnittstelle via Bedienterminal. Kennlinien, Parameter, Kalibrierdaten oder Umrechnungsfaktoren können in einem nichtflüchtigen Speicher

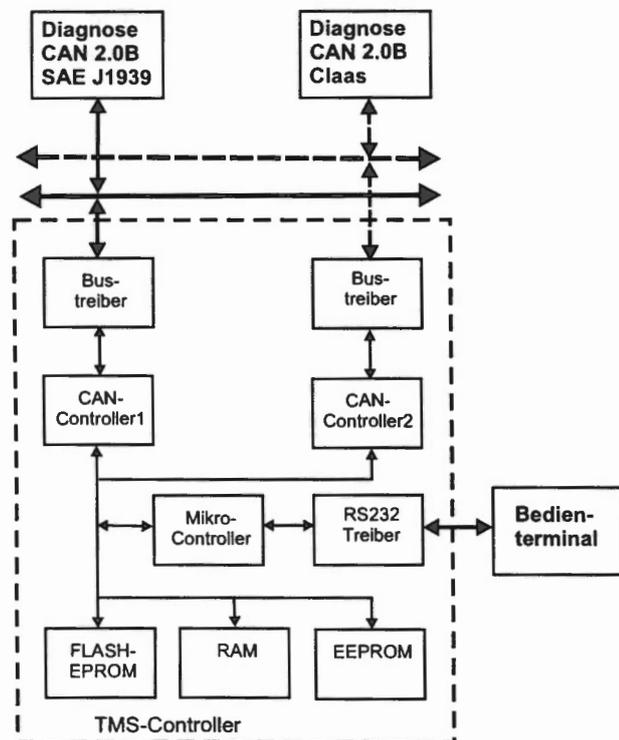


Bild 4: Aufbau des TMS-Controllers  
 Fig. 4: Structure of the TMS-Controller

(EEPROM) abgelegt werden. Um den Datenaustausch mit anderen intelligenten Systemen zu ermöglichen, sind zwei CAN-Bus-Schnittstellen nach CAN Spezifikation 2.0B vorhanden, die sowohl das Standard- als auch das Extended-Format unterstützen. Als physikalische Anschaltung an den Bus wird in beiden Fällen der Bustreiberbaustein PCA82C250 (Philips) nach ISO11898-12V (kurzschlußfest für den Einsatz in 12V Systemen) mit einer max. Übertragungsrate von 1 Mbaud verwendet.

#### 4.5 Signalverarbeitung des TMS-Controllers

Der TMS-Controller benötigt für die Interpretation der auf dem CAN-Bus übermittelten Botschaften eine Referenz, die den Aufbau der CAN-Botschaften beschreibt. Auf diese Weise lassen sich Daten, die in binärer Form vorliegen, als einheitenbehaftete Signale darstellen. Es zeigt sich aber, daß die Datenfestlegung auf dem CAN-Bus nicht statisch ist. Im Zuge der Systementwicklung ändern sich Dateninhalte, kommen neue Botschaften hinzu, oder es sind andere Botschaften aus einer bekannten Menge interessant. Daraus folgt, daß die Beschreibung der CAN-Botschaften und deren Filterung an den TMS-Controller heruntergeladen werden muß, um die Flexibilität zu gewährleisten.

Um einen Mehrgrößen-Regler, der die Informationen über die Regelabweichungen über den CAN-Bus bezieht und Stellgrößen auf den CAN-Bus legt, in Software zu implementieren, ist ein tabellenorientierter Regler zu entwickeln. Auf dem CAN-Bus werden Informationen in Form von Botschaften ausgetauscht. Jede Botschaft besteht in der Regel aus einem oder mehreren Signalen. Die Signalwerte stellen entweder Zahlenwerte oder Ordnungsnummern für Statusmeldungen dar.

In **Bild 5** ist die Realisierung des Signalflusses von CAN-Botschaften für einen Mehrgrößen-Regler dargestellt. In diesem Beispiel ist er mit zwei CAN-Bussen verknüpft. In den Botschaftstabellen und Signaltabellen sind alle für die Anwendungsschicht relevanten Daten abgelegt. Der Funktionsblock „Control Rules“ wählt für eine bestimmte Reglerkonfiguration ein definiertes Signalfilter für die Reglereingangsgrößen und -ausgangsgrößen und verweist außerdem auf die Berechnungsvorschrift des Regelalgorithmus'. Das Signalfilter referenziert auf die Signaltabelle, die einen Verweis auf die Berechnungsvorschrift des Wertes, die Bit-Startposition und Bit-Länge im Datenfeld und einen Referenzwert zu dem Botschaftsfilter hat. Die Refreshrate für ankommende Signale zur Ausgangswertberechnung im Funktionsblock „Signal Controlling“ erfolgt ereignisgesteuert, wobei durchaus Signale unterschiedlicher Zykluszeit in die

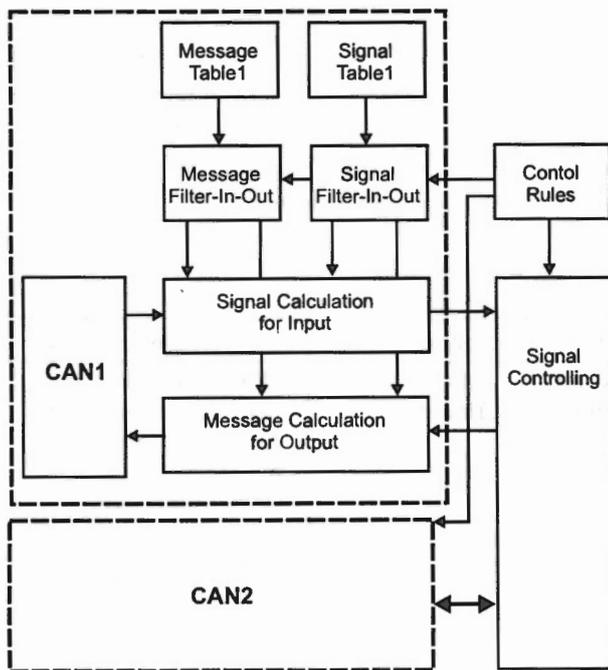


Bild 5: Signalverarbeitung im TMS-Controller  
 Fig. 5: Signal processing in the TMS-Controller

Regelung einbezogen werden können. Die Ausgabe der Ausgangswerte auf den CAN-Bus erfolgt analog zu den Eingangssignalen. Die Ausnahme bilden zyklische CAN-Sendebotschaften. Der Block „CAN1“ sorgt für das zyklische Senden der Sendeeobjekte mit den zuletzt berechneten Stellwerten. Ist ein Wert neu berechnet worden, wird ein Statusbit gesetzt, das die Berechnung des jeweiligen CAN-Objekts veranlaßt.

## 5 Traktormanagementsystem

### 5.1 Bedeutung stufenloser Getriebe

Für den Aufbau eines Traktormanagementsystems sind die heute verfügbaren elektronisch ansteuerbaren stufenlosen Getriebe in idealer Weise geeignet [24]. Wissenschaftliche Untersuchungen bezüglich stufenloser Traktorgetriebe sind seit 1959 bekannt [25]. Schon damals wurden die Einflüsse eines vom Fahrer gesteuerten stufenlosen Getriebes auf die Ausnutzung der Motorleistung theoretisch und experimentell untersucht und die Effizienzsteigerung nachgewiesen. Neben Entwürfen für eine automatische Getrieberegulierung [26] wurde auch über den Einsatz hydraulisch leistungsverzweigter Getriebe in Traktoren nachgedacht [27].

Der Durchbruch beim Einsatz stufenloser Getriebe in Traktoren, die auch schwere Zugarbeiten verrichten, gelang erst auf der Agritechnica'95, als Fendt das leistungsverzweigte Vario-Getriebe [28] in einem Serien-

traktor vorstellte. Weitere Entwicklungen wurden von Claas [29], Steyr [30] und ZF [31] vorgestellt.

Untersuchungen, Feldversuche [32; 33] und Simulationen [34] der letzten Jahre haben die Vorteile von geregelten stufenlosen Getrieben bezüglich Motorauslastung und Kraftstoff einsparung nachgewiesen. Anforderungen, Beurteilungskriterien und Strategien zur Steuerung und Regelung heutiger stufenloser Getriebe werden in [35] diskutiert.

Die auf dem Markt befindlichen stufenlosen Getriebe in Großtraktoren funktionieren nach dem Prinzip der Leistungsverzweigung [36]. Je nach Größe der hydrostatischen Einheit besitzen diese Getriebe eine unterschiedliche Anzahl mechanisch geschalteter Fahrbereiche, innerhalb derer sich der hydraulische Leistungsanteil kontinuierlich ändert. Da bekanntlich der hydraulische Wirkungsgrad schlechter ist als der mechanische, ist auch denkbar, daß der TMS-Controller den aktuellen Betriebspunkt nicht nur nach dem Verbrauchskennfeld des Motors, sondern auch nach dem Wirkungsgradkennfeld des Getriebes berechnet.

### 5.2 EMR und der Einfluß der Motorcharakteristik

Neben der Vorgabe der Motorsolldrehzahl ist die Wahl des Motorkennfelds (vgl. Bild 2) durch die Aktivierung einer entsprechenden Dachkurve im EMR entscheidend für das Verhalten des Gesamtsystems. Je nach gewählter Triebstrangstrategie ist es sinnvoll, ein geeignetes Motorkennfeld auszuwählen. Dabei stellt sich die Frage, ob beim Einsatz eines stufenlosen geregelten Getriebes andere Kennfeldformen eingesetzt werden können. Bei Schaltgetrieben wird durch hohe Drehmomentanstiege die Schalthäufigkeit verringert und ein gutes Durchzugsvermögen des Motors gewährleistet. Der Nachteil dieser Motorcharakteristik besteht in der Tatsache, daß sowohl die Bauteile des Motors, als auch die eingangsseitigen Teile des Getriebes auf diese hohen Drehmomente ausgelegt sein müssen. Die spezifischen Motorkosten (DM/kW) könnten durch Zurücknahme der hohen Drehmomentanstiege gesenkt werden [35]. Geregelte stufenlose Getriebe würden bei Lastschwankungen das fehlende Durchzugsvermögen des Motors durch die Verringerung der Getriebeübersetzung ausgleichen. Dabei muß allerdings die (kleinere) Steigung des Motordrehmoments auf die Dynamik des Getriebes abgestimmt werden, um ein Abwürgen des Motors bei größeren Lastschwankungen zu vermeiden und die Stabilität des Getrieberegulierungskreises zu gewährleisten.

Bei Zapfwellenarbeiten bietet der EMR noch eine interessante Funktionserweiterung. Das Motorsteuergerät erfaßt die Kühlmitteltemperatur, die prozentuale Auslastung des Motors und den Ladeluftdruck. Kommt es z. B. bei einem Häcksler zu einem überhöhten Lastmoment aufgrund schwankender Bestandsdichte, so steigt die prozentuale Motordrehmomentauslastung auf 100% an. Sofern es die Kühlmitteltemperatur noch erlaubt, wird unter anderem aus dem Ladeluftdruck berechnet, wieviel Dieselkraftstoff zusätzlich als sogenannte Mehrmenge über einen gewissen Zeitraum eingespritzt werden kann. Auf diese Weise wird der Drehzahlabfall verringert und das Durchzugsvermögen im entscheidenden Moment erhöht.

Im folgenden werden einige Strategien erläutert, die im Institut für Landmaschinen und Fluidtechnik entwickelt bzw. untersucht werden.

### 5.3 Antriebsstrangstrategien

Durch ein intelligentes TMS soll erreicht werden, daß sich der Motor und das Getriebe immer in einem optimalen Betriebspunkt befinden. Der Mikrocontroller des TMS ist über den CAN-Bus mit dem EMR, dem EGR und dem Bedienungsterminal des Traktorfahrers verbunden (siehe auch Bild 3). Zur Realisierung von Antriebsstrangstrategien muß der TMS-Controller mit den Informationen (Meßwerten) und den Fahrerwünschen, die ihm über den CAN-Bus mitgeteilt werden, entsprechende Stellensignale an den Motor und das Getriebe geben. Bei der Regelung des Getriebes erhält der EGR lediglich die Fahrhebelposition, womit direkt die interne Getriebeübersetzung beeinflusst werden kann. Die **Tabelle 4** zeigt die wichtigsten Größen, die von TMS-Controller empfangen, bzw. gesendet werden. Von den aufgelisteten CAN-Botschaften sind nicht zu jedem Zeitpunkt alle aktiv. Die vom Fahrer gewählte Getriebeübersetzung ist z. B. nur dann relevant, wenn eine entsprechende Arbeitsstrategie gewählt wurde.

#### Leistungsstrategie

Bei schweren Zugarbeiten (z. B. beim Pflügen) bietet sich eine Strategie an, die den Motor immer im Bereich der maximalen Leistung hält, um in zeitsparender Arbeitsweise eine möglichst große Flächenleistung zu erlangen. Der TMS-Controller muß dementsprechend die geeignete Motorcharakteristik auswählen und die Übersetzung des Getriebes bei Lastschwankungen infolge von veränderten Bodenverhältnissen oder Steigungen so verändern, daß der Motor immer bis zu dem Drehzahlbereich gedrückt wird, in dem er die Maximalleistung ab-

gibt. Bei geringen Bodenwiderständen würde mit höherer Geschwindigkeit und bei hohen Bodenwiderständen mit etwas niedrigerer Geschwindigkeit gepflügt. Eine andere Möglichkeit wäre der Einsatz eines stufenlos breitenverstellbaren Pflugs mit einer Regelung der Arbeitsbreite, wie sie in [37] untersucht worden ist.

Tabelle 4: Botschaften auf dem CAN-Bus

Table 4: CAN-Bus messages

TMS Controller	CAN-Botschaften
empfängt vom Bedienterminal bzw. Fahrer	- Motordrehzahl - Arbeitsgeschwindigkeit - Arbeitsstrategie - Art der Arbeit - Getriebeübersetzung
empfängt vom Motor	- Motordrehzahl - Theor. Verbrauch - Kühlwassertemperatur - Momentauslastung in % - Öldruck - Gaspedalstellung - Ladeluftdruck
sendet an den Motor	- P-Grad - Motorschutz - Dachkurve - Motordrehzahl - Reglermodus
empfängt vom Getriebe	- Getriebestrategie - Anfahrang - Motordrehzahl - Fahrhebelstellung - Abtriebsdrehzahl
sendet an das Getriebe	- Anfahrang - Getriebeübersetzung - Getriebestrategie

#### Energiesparstrategie

Die Energiesparstrategie ist das Pendant zur Leistungsstrategie mit der Forderung, den Motor nicht im Bereich der maximalen Leistung, sondern im Bereich des günstigsten Kraftstoffverbrauchs zu betreiben. In der Regel liegt dieser Punkt im mittleren Drehzahlbereich des Motors, nahe dem maximalen Moment. Auf Grund der relativ niedrigen Drehzahl ist hier jedoch nicht mehr die maximale Motorleistung verfügbar. Im Vergleich zur Leistungsstrategie wird bei der Energiesparstrategie eine geringere Flächenleistung, diese aber bei reduziertem Flächenverbrauch, erreicht.

#### Geschwindigkeitsstrategie

Bei zahlreichen landwirtschaftlichen Arbeiten ist eine konstante Fahrgeschwindigkeit verfahrenstechnisch sinnvoll. Mit einem stufenlosen Getriebe ist dieser Forderung

leicht nachzukommen. Der Fahrer wählt die Arbeitsdrehzahl des Motors vor und gibt über den Fahrhebel die gewünschte Fahrgeschwindigkeit ein. Der TMS-Controller errechnet unter Berücksichtigung des vorhandenen Schlupfs, der über einen Radarsensor ermittelt wird, die entsprechende Übersetzung und regelt das stufenlose Getriebe.

Der Nachteil dieser Strategie liegt in der Tatsache, daß der Fahrer über die Vorwahl der Motordrehzahl die maximale Leistung des Motors beschränkt und diese im Falle erhöhten Leistungsbedarfs selber korrigieren (erhöhen) muß. Dieses Abschätzen der benötigten Leistung und die daraus erfolgende Einstellung der Motordrehzahl bzw. max. Motorleistung wird heutzutage ganz intuitiv von jedem Traktorfahrer vorgenommen. Die „Gefahr“ ist jedoch, daß wie schon bei der Leistungsstrategie erläutert, der Traktorfahrer dazu tendiert, eher eine erhöhte Motordrehzahl zu wählen, um Leistungsreserven zu haben. Dadurch wird jedoch der Motor zu einem Großteil der Zeit nicht optimal ausgelastet und arbeitet im Abregelzweig mit erhöhtem Kraftstoffverbrauch.

Eine Verbesserung der Geschwindigkeitsstrategie bezüglich des Kraftstoffverbrauchs ergibt sich, wenn der TMS-Controller aus dem Geschwindigkeitswunsch des Fahrers nicht nur die Getriebeübersetzung, sondern auch die Motordrehzahl regelt, wie in [38] vorgestellt. Die Wahl der Übersetzung sollte die geforderte Leistung in einem Betriebspunkt mit möglichst geringem Kraftstoffverbrauch zur Verfügung stellen. Verbal ausgedrückt wurde die Fahrstrategie folgendermaßen programmiert:

- stelle zu einer vorgegebenen Sollgeschwindigkeit die niedrigste mögliche Motordrehzahl und die dazu gehörende Übersetzung ein
- wenn die Leistung nicht ausreicht, um die Geschwindigkeit zu halten, erhöhe die Motordrehzahl

In [38] werden die prinzipielle Reglerauslegung für diese kombinierte Fahrgeschwindigkeits- und Motordrehzahl-Regelung sowie die dabei aufgetretenen Probleme (wie z. B. Abwürgen des Motors) bei verschiedenen Fahrsituationen dargestellt. Als wichtigste Erkenntnis bleibt jedoch festzuhalten, daß sich trotz der trägen Reaktionen von Fahrzeug, Motor und Getriebe alle wesentlichen Fahrsituationen stabil bewältigen lassen.

Um das Abwürgen des Motors zu verhindern, wird unter anderem auch das vom Motorsteuergerät zur Verfügung gestellte Signal der Einspritzpumpenregelstange ausgewertet. Anhand dieses Signals kann zu jedem Zeitpunkt die aktuelle Motorauslastung berechnet werden. Wird z. B. auf Grund einer starken Steigung der Motor plötzlich

zu 100% ausgelastet und in der Drehzahl gedrückt, darf das Getriebe auf keinen Fall aufgrund der verringerten Fahrgeschwindigkeit die Übersetzung vergrößern. Es muß im Gegenteil die Übersetzung verkleinert werden, um den Motor zu entlasten und ihm damit das Anheben der Motordrehzahl zur Leistungssteigerung zu ermöglichen.

## 6 Versuche

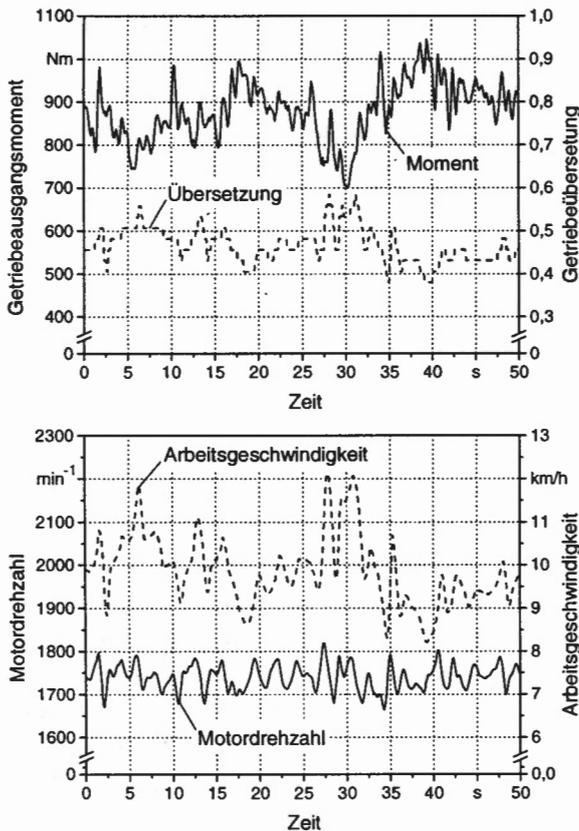
Nachdem verschiedene Strategien des TMS vorgestellt wurden, soll jetzt das Potential eines TMS anhand von durchgeführten Versuchen diskutiert werden.

Untersucht wurde die Leistungsstrategie eines stufenlosen Getriebes im Vergleich zum Stufengetriebe mit verschiedenen Übersetzungen. Im EMR wurde das Motorkennfeld für "Schwere Zugarbeit" (vgl. Bild 2) einprogrammiert. Das Getriebe des Versuchsstands wurde über die Hydraulikpumpe mit einem realen Lastkollektiv, das bei einem Einsatz mit einem 5-Schar-Volldrehpflug aufgenommen wurde, belastet. Das Lastkollektiv hat eine Dauer von 50 Sekunden. Zur qualitativen Bewertung wurden die Flächenleistung und der Flächenverbrauch aus der absolut verbrauchten Kraftstoffmenge und den Umdrehungen am Getriebeausgang bestimmt. In allen Versuchen wurde Vollgas gegeben, d.h., daß die eigentliche Motorsolldrehzahl auf 2200 U/min eingestellt war.

In Bild 6 sind exemplarisch zwei Versuchsergebnisse gegenübergestellt. In den oberen Meßschrieben sind die Getriebeausgangsmomente und die Getriebeübersetzungen über der Zeit aufgetragen. In den unteren Meßschrieben sind die Motordrehzahlen und die aus den Getriebeabtriebsdrehzahlen berechneten theoretischen Arbeitsgeschwindigkeiten aufgetragen.

Die Übersetzung im Versuch 2 ist beim Stufengetriebe konstant, wodurch sich die Schwankung der Motordrehzahl im gleichen Verhältnis auf die Arbeitsgeschwindigkeit auswirkt. Der Zusammenhang zwischen Getriebeausgangsmoment und Motordrehzahl ist eindeutig. Bei hohen Momenten wird der Motor gedrückt und stellt so bei geringerer Drehzahl die benötigten größeren Momente zur Verfügung. Bei kleinen Momenten versucht der Motor, die eingestellte Solldrehzahl zu erreichen und beschleunigt. Bei der gewählten Übersetzung schwankt die Motordrehzahl zwischen 1780 und 2180 U/min. Da der Motor nicht seine Solldrehzahl erreicht, wird immer die (drehzahlabhängige) maximale Kraftstoffmenge eingespritzt. Dies bedeutet, daß sich der Motorbetriebspunkt zu keinem Zeitpunkt im Abregelzweig befunden, sondern sich drehzahlabhängig auf der Vollastkennlinie bewegt hat.

## Versuch 1: Stufenloses Getriebe



## Versuch 2: Stufengetriebe

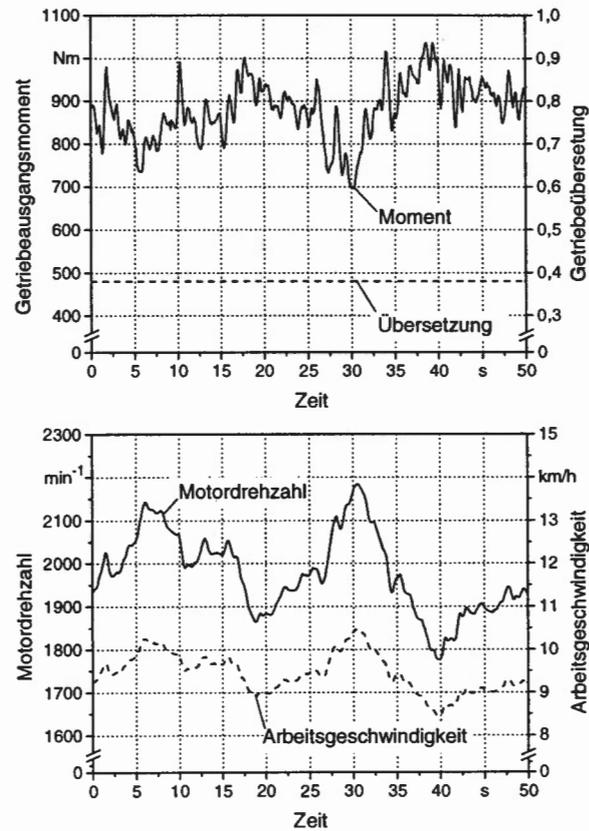


Bild 6: Stufengetriebe und stufenloses Getriebe im Vergleich

Fig. 6: Comparison between a shifted transmission and a continuously variable transmission

Bei dem gewählten Motorkennfeld für "Schwere Zugarbeit" gibt der Motor eine nahezu konstante, maximale Leistung von ca. 90 kW (vgl. Bild 2) im Konstantleistungsbereich zwischen 1700 und 2100 U/min ab. Berechnet man aus dem Motordrehzahlverlauf den prozentualen Zeitanteil, in dem sich der Motor im Konstantleistungsbereich befunden hat, so stellt man fest, daß zu ca. 88% der Versuchsdauer die Maximalleistung von ca. 90 kW abgegeben wurde.

Die im Versuch 1 dargestellte Getriebeübersetzung ist der Wert, der vom Getriebesteuergerät als Istübersetzung auf den CAN-Bus gelegt wird. Die Leistungsstrategie im TMS-Controller ist so programmiert, daß versucht wird, diejenige Motordrehzahl konstant zu halten, bei der im Konstantleistungsbereich der spezifische Kraftstoffverbrauch am geringsten ist. Im dargestellten Versuch schwankt die Motordrehzahl in relativ geringem Maße um die Solldrehzahl von 1750 U/min. Wird der Motor durch hohe Momente zu stark gedrückt, wird er durch die Verringerung der Übersetzung entlastet und umgekehrt. Durch die wesentlich niedrigere Motordrehzahl ist die mittlere Übersetzung deutlich höher als beim Stufengetriebe.

In der Tabelle 5 sind die wichtigsten Meßergebnisse zur Beurteilung der Versuche zusammengefaßt. Entscheidend für die Beurteilung sind die Flächenleistung und der Flächenverbrauch. Die in der Agrartechnik üblichen Einheiten der Flächenleistung in [ha/h] und des Flächenverbrauchs in [ $\ell$ /ha] sind von der Qualität der hier verwendeten Einheiten identisch. Zusätzlich sind bei den Versuchen mit konstanten Übersetzungen das Übersetzungsverhältnis und die auf den Versuch 1 bezogenen prozentualen Flächenleistungen und -verbräuche angegeben. Die Werte der höchsten Motordrehzahlrückung, die jeweils bei der höchsten Last zum Zeitpunkt  $t = 40$  s auftraten, sollen als Diskussionsgrundlage dienen, ob diese Übersetzungen überhaupt von einem Landwirt gewählt werden.

Das Verhältnis der Übersetzungen von Versuch 2 zu Versuch 8 beträgt  $\frac{0,385}{0,335} = 1,15$ . Wenn man von Stufen

fensprüngen eines Lastschaltgetriebes im Hauptarbeitsbereich von  $\varphi = 1,15$  ausgeht, dann kann man annehmen, daß bei jedem Stufengetriebe tatsächlich nur eine (im Grenzfall zwei), der hier untersuchten Übersetzungen vorhanden ist.

Tabelle 5: Meßergebnisse  
Table 5: Results

	Einheit	Versuch 1	Versuch 2	Versuch 3	Versuch 4	Versuch 5	Versuch 6	Versuch 7	Versuch 8
Getriebeübersetzung	[-]	stufenlos	0,385	0,38	0,37	0,36	0,35	0,34	0,335
Versuchsdauer	[s]	50	50	50	50	50	50	50	50
Triebstrangumdrehungen	[U]	666,5	641	639,8	634,4	629,4	623,1	611,7	603,6
Dieserverbrauch	[ml]	317	334	338	339	340	339	336	334
Flächenleistung = $\frac{\text{Triebstrangumdrehungen}}{\text{Versuchsdauer}}$	[U/s]	13,33	12,82	12,79	12,69	12,59	12,46	12,23	12,07
Flächenverbrauch = $\frac{\text{Dieserverbrauch}}{\text{Triebstrangumdrehungen}}$	[ml/U]	0,476	0,522	0,528	0,534	0,539	0,544	0,550	0,553
Flächenleistung bezogen auf Versuch 1	[%]	100	96,2	95,9	95,2	94,4	93,5	91,7	90,5
Flächenverbrauch bezogen auf Versuch 1	[%]	100	109,7	110,9	112,2	113,2	114,3	115,5	116,2
Höchste Motordrehzahl drückung	[U/min]	1670	1780	1820	1870	1950	2000	2050	2070

Die Ergebnisse zeigen, daß mit einem Stufengetriebe nur 90,5 bis 96,2 % der Flächenleistung im Gegensatz zu einem geregelten stufenlosen Getriebe erreichbar sind. Gleichzeitig steigen die flächenbezogenen Kraftstoffverbräuche auf 109,7 bis 116,2 %.

Die Steigerung der Flächenleistung im Versuch 1 ist hauptsächlich darauf zurückzuführen, daß durch die Leistungsstrategie die Motordrehzahl wesentlich exakter im Bereich des Konstantleistungsbereichs gehalten werden konnte als bei den Versuchen mit Stufengetriebe. Einen weiteren Einfluß hat sicherlich der Getriebewirkungsgrad, der sich gerade bei einem leistungsverzweigten stufenlosen Getriebe mit der Getriebeübersetzung relativ stark ändert. Der Getriebewirkungsgrad wurde allerdings meßtechnisch nicht erfaßt, so daß an dieser Stelle keine Angaben darüber gemacht werden können. Weiterhin ist anzumerken, daß bei den Versuchen keine Beschleunigungskräfte und kein Triebbradschlupf berücksichtigt worden sind. Die höherfrequenten Schwingungen von Motor- und Getriebedrehzahl beim geregelten stufenlosen Getriebe würden sich wahrscheinlich eher negativ auf die Flächenleistung beim Versuch 1 auswirken. Durch die Trägheit eines realen Traktors könnten sehr schnelle Änderungen der Getriebeausgangsdrehzahl durch erhöhten Triebbradschlupf nicht voll in eine Erhöhung der Arbeitsgeschwindigkeit umgesetzt werden.

Die Überlegenheit des stufenlosen Getriebes im Flächenverbrauch ist eindeutig durch den Arbeitspunkt des Dieselmotors begründet. Der spezifische Kraftstoffverbrauch bei 1750 U/min liegt wesentlich niedriger als bei höheren Drehzahlen.

Zu den Versuchen ist anzumerken, daß hier nur Übersetzungen eines „Gangbereichs“ untersucht worden sind. Aufgrund der sehr großen Motordrücke bei den Versuchen 2 bis 4, ist es wahrscheinlich, daß ein Landwirt einen Gang mit geringerer Übersetzung wählt. Für den Landwirt ist in der Praxis die Wahl des „idealen“ Gangs eines Stufengetriebes sehr schwierig. Er weiß weder im voraus welche Lastspitzen auftreten, noch weiß er genau in welchen Drehzahl- und Momentbereich der Motor die maximale Leistung abgibt oder wo der spezifische Verbrauch des Motors am geringsten ist. In den meisten Fällen werden die Gänge eher zu klein gewählt, um eine ausreichende Drehmomentreserve bei plötzlich auftretenden Lastspitzen zu haben. Als Konsequenz arbeitet der Motor nicht voll ausgelastet im Abregelzweig mit hohem spezifischen Verbrauch.

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

Die hier vorgestellten Versuche haben die Effizienzsteigerung eines über den CAN-Bus durch den TMS-Controller geregelten stufenlosen Getriebes im Vergleich zum Stufengetriebe deutlich aufgezeigt. Interessant sind dabei die quantitativen Unterschiede in dem hier untersuchten relativ kleinen Übersetzungsbereich von der Größe eines Stufenstrangs. Je nach tatsächlich vorhandener Übersetzung eines Stufengetriebes im untersuchten Übersetzungsbereich ergeben sich beim Einsatz eines geregelten stufenlosen Getriebes Steigerungen der Flächenleistung von bis zu 10,4 % und Einsparungen im Flächenverbrauch von bis zu 13,9 %.

Es wurde jedoch nur ein Lastkollektiv in Verbindung mit einem Motorkennfeld ausgewertet. In weiteren Untersuchungen gilt es herauszufinden und nachzuweisen, welche Steigerungen der Arbeitseffektivität und Einsparungen im Kraftstoffverbrauch sich bei verschiedenen Fahrstrategien mit unterschiedlichen Motorkennfeldern und Lastkollektiven ergeben. Bei Berücksichtigung von Zapfwellenarbeiten ist weiteres Einsparpotential zu erwarten.

Eine weitere Effizienzsteigerung ergibt sich, wenn die gesamte Arbeits- und Hubwerkshydraulik über den CAN-Bus als Hydraulikmanagement in das System mit eingebunden wird. Auf diese Weise können einfache Ablaufsteuerungen am Feldende variabel programmiert werden, so daß z. B. nach dem Ausheben des Pflugs über die EHR der Dreh- und Schwenkvorgang über zwei weitere Hydraulikventile automatisiert werden.

Die Kommunikation von Traktor und Gerät ist schon heute über das Landwirtschaftliche Bus-System LBS möglich [39]. Das deutsche LBS erlaubt jedoch keine direkte Vorgabe einer Soll-Fahrgeschwindigkeit an den Traktor durch gerätegebundene Sensoren oder Jobrechner [40]. Die ISO 11783 hingegen, die in absehbarer Zeit das LBS ersetzen wird, beabsichtigt, auch Sollwertvorgaben für die Fahrgeschwindigkeit geräteseitig zuzulassen. Hierdurch könnten Gerätesensoren die Arbeitsqualität durch direkte Einflußnahme auf die Fahrgeschwindigkeit weiter erhöhen.

## Literatur

- [1] • Mertins, K.-H.: Theoretische und apparative Voraussetzungen zur Traktoreinsatzoptimierung mit Hilfe von Fahrerinformationssystemen. Dissertation Technische Universität Berlin 1983; Fortschritt-Berichte VDI-Z, Reihe 14 H. 25, Düsseldorf: VDI-Verlag 1984.
- [2] • Kipp, J.-C.: Optimierung des Leistungsumsatzes von Traktoren durch den Einsatz elektronischer Hilfsmittel. Dissertation Technische Universität Berlin 1987; Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 14 H. 35, Düsseldorf: VDI-Verlag 1987.
- [3] Stoppel, A.: Energie- und Arbeitszeitbedarf für gezogene Geräte der Bodenbearbeitung bei unterschiedlicher Schleppermotorauslastung. Grundl. Landtechnik 30 (1980) H. 4, S. 135-139.
- [4] Schimmel, J., Hulla, H.: Einsatzoptimierung von Ackerschleppern durch elektronische Fahrerinformation. Grundl. Landtechnik 33 (1983) H. 1, S. 5-10.
- [5] Mertins, K.-H.: Ein Beitrag zur Energieeinsparung beim Schleppereinsatz. Landtechnik 30 (1980) H. 4, S. 162-164.
- [6] Kirste, T., Grünbeck, W., Feller, M.: Kennfeldmonitor für Dieselmotoren. Landtechnik 40 (1985) H. 10, S. 426-430.
- [7] Jahns, G., Speckmann, H., Möller, R.: Fahrerinformation als Hilfsmittel der Optimierung beim Einsatz von Ackerschleppern. Grundl. Landtechnik 35 (1985) H. 6, S. 195-202.
- [8] Mertins, K.-H., Bergmann, E., Kipp, C.: Zum Stand der Entwicklung von Fahrerinformationssystemen bei Ackerschleppern. Grundl. Landtechnik 34 (1984) H. 4, S. 163-169.
- [9] Schäfer, W.: Wie teuer ist eine mangelhafte Schleppermotorauslastung? Landtechnik 35 (1980) H. 8/9, S. 393-395.
- [10] Welschhof, G.: Der Ackerschlepper - Mittelpunkt der Landtechnik. VDI-Berichte 407, S. 11-17. Düsseldorf: VDI-Verlag 1981.
- [11] Schulz, H.: Geizig muß er sein. Agrartechnik 76 (1996) H. 4, Seite 35-38.
- [12] Lober, M., Lenge, R.: Schleppermotor: Auf den Charakter kommt es an. top agrar 27 (1998) H. 4, S. 126-131.
- [13] Holtmann, W.: Das elektronische Gaspedal. profi 10 (1998) H. 3, S. 68-71.
- [14] Holtmann, W.: Die elektronische Ackerautomatik. profi 10 (1998) H. 8, S. 52-55.
- [15] Kempf, Tilo.: Automatikschaltung für ein Teillastschaltgetriebe. Landtechnik 54 (1999) H. 2, S. 70-71.
- [16] Rinck, S.: Moderne hydrostatische Antriebssysteme mit Mikroprozessorsteuerungen für mobile Arbeitsmaschinen. Ölhydraulik und Pneumatik 43 (1999) H. 3, S. 154-163.
- [17] • Etschberger, K.: CAN Controller Area Network Grundlagen, Protokolle, Bausteine, Anwendungen. München Wien: Carl Hanser Verlag 1994.
- [18] Gnahn, K.: Frei programmierbare Steuerung für mobile Arbeitsmaschinen mit CAN-Bus. Ölhydraulik und Pneumatik 42 (1998) H. 9, S. 580-583.
- [19] -,: Main Station für Busbenutzer. fluid 32 (1998) H. 11/12, S. 24-25.
- [20] Jaufmann, A., Tewes, G.: Traktormanagementsystem - Entwicklung, Aufbau und Simulation. Agrartechnische Forschung 2 (1996) H. 1, S. 53-62.
- [21] Jaufmann, A.: Entwicklung und Aufbau eines Traktormanagementsystems. Ölhydraulik und Pneumatik 41 (1997) H. 4, S. 234-241.
- [22] Jaufmann, A.: Potential eines Traktormanagementsystems. Landtechnik 52 (1997) H. 6, S. 290-291.
- [23] -,: Betriebsanleitung Xerion 2500, Claas Harsewinkel 1997.
- [24] Tewes, G.: Traktormanagement. Landtechnik 48 (1993) H. 10, S. 510-512.
- [25] Meyer, H.: Die Bedeutung eines stufenlosen Getriebes für den Ackerschlepper und seine Geräte. Grundl. Landtechnik 9 (1959) H. 11, S. 5-12.
- [26] Coenenberg, H.-H.: Einige Grundbedingungen und Möglichkeiten für die automatische Regelung stufenloser Getriebe in Schleppern. Landtechnische Forschung 11 (1961) H. 4, S. 101-107.
- [27] Martyrer, E.: Hydraulische Getriebe. Grundl. Landtechnik 9 (1959) H. 11, S. 13-21.
- [28] Dziuba, P. F., Honzek, R.: Neues stufenloses leistungsverzweigtes Traktorgetriebe. Agrartechnische Forschung 3 (1997) H. 1, S. 19-27.
- [29] -,: Der Traum vom perfekten Antrieb. fluid 30 (1996) H. 11/12, S. 12-14.

- [30] Ulbrich, P.: Neues stufenloses hydrostatisch-mechanisches Verzweigungsgetriebe. Vortrag VDI/MEG-Tagung "Landtechnik" 13./14.10.1994 Stuttgart-Hohenheim.
- [31] Pohlentz, J.: Neue stufenlose Traktorgetriebebaureihe "Eccom" im Leistungsbereich von 75 bis 220 kW. Vortrag VDI-Tagung "Getriebe in Fahrzeugen 98" 16./17.06.1998 Friedrichshafen.
- [32] Vahlensieck, B.: Steigende Motorauslastung durch geregelte stufenlose Antriebe. Landtechnik 52 (1997) H. 5, S. 234-235.
- [33] Bea, S.: Nutzwertanalyse eines neuen stufenlosen leistungsverzweigten Traktorgetriebes. Agrartechnische Forschung 3 (1997) H. 1, S. 28-33.
- [34] Schrock, M. D., Liu, Y.: Simulation of Control Schemes for Agricultural Tractor Engines and Transmissions. Transactions ASAE 33 (1990) H. 6, S. 1785-1789.
- [35] Renius, K. Th.: Stufenlose Fahrtriebe für Traktoren. Landtechnik 50 (1995) H. 5, S. 254-255.
- [36] Lang, T., Römer, A., Seeger, J.: Entwicklungen der Hydraulik in Traktoren und Landmaschinen - Beobachtungen anlässlich der Agritechnica '97. Ölhydraulik und Pneumatik 42 (1998) H. 2, S. 87-94.
- [37] • Frerichs, L.: Grundlagen für das elektronische Traktor-Pflug-Management. Dissertation Universität Hohenheim 1991; Forschungsbericht Agrartechnik des Arbeitskreises Forschung und Lehre der Max-Eyth-Gesellschaft (MEG), Selbstverlag, Bezugsquelle Stuttgart: Institut für Agrartechnik der Universität Hohenheim 1991.
- [38] Heitz, U., Dobler, S.: Entwicklung der Fahrstrategie für ein Fahrzeug mit stufenlosem Getriebe und drehzahlgeregeltem Motor, am Beispiel eines Ackerschleppers. VDI-Berichte Nr. 1418, S. 485 - 497. Düsseldorf: VDI-Verlag 1998.
- [39] Auernhammer, H., Frisch, J.: Landwirtschaftliches BUS-System LBS. Münster Hiltrup: KTBL-Schriftenvertrieb im Landwirtschaftsverlag GmbH 1993.
- [40] Freimann, R.: Digitale Datenkommunikation in Landmaschinen und Traktoren. Landtechnik 53 (1998) Sonderheft, S. 202 - 204.