



Die gute alte Lichtmaschine arbeitet an ihrer Leistungsgrenze. Doch moderne Schlepper benötigen immer mehr elektrischen Strom – für sich selbst, für angehängte Geräte und für immer aufwendigere Regeltechniken. Werden die Traktoren der Zukunft zum Kraftwerk?

## Schlepper unter Strom

**T**aghelle Beleuchtung, automatische Klimaanlage, elektrische Antriebe von Schlepperorganen und ordentlicher Stromdurst der angebauten Geräte: Die klassische Bordelektrik der Schlepper kommt immer mehr an ihre Grenzen. Als John Deere zur Agritechnica 2007 den E-Premium vorstellte – einen Schlepper mit integriertem Kurbelwellen-Generator – kam Dynamik in die Diskussion „Schlepper unter Strom“. Zur letzten Messe stellte ZF ein Konzept mit einem im Antriebsstrang integrierten Generator vor, Claas präsentierte den Xerion mit 24 Volt-Leistungssteckdose und von Belarus stand gar ein Schlepper mit komplett diesel-elektrischem Antriebssystem in Han-

nover. Zieht die viel gepriesene Hybridtechnik auch in den Traktorenbau ein?

### Lichtmaschine an der Leistungsgrenze

Wir haben in der Szene recherchiert und mit Konstrukteuren bei Fendt und John Deere gesprochen, uns bei den Fachleuten von Grimme und Rauch umgehört und wissenschaftliche Veröffentlichungen zum Thema ausgewertet. Wird in Zukunft die Bordspannung steigen, arbeiten die Traktoren künftig mit zwei unterschiedlichen Stromnetzen oder lösen Generator und E-Motoren sogar komplett die mechanischen Antriebe ab?

Alle gängigen Traktoren arbeiten heute mit einem 14 Volt-Bordnetz. Die Stromversorgung übernimmt die Lichtmaschine. Bei 150 PS-Schleppern haben diese Generatoren meist eine Nennleistung von 200 Ampere. Bei einem Wirkungsgrad von 40 bis 60 % liegt der mechanische Antriebsleistungsbedarf des Generators immerhin bei 4,5 bis 7 kW. Die Differenz zur elektrischen Leistung muss als Wärme abgeführt werden. Und weil bei steigender Temperatur im Motorraum die Leistung der Lichtmaschine um ca. 10 bis 15 % abnimmt, bleiben dann nur 170 bis 180 A über. Rechnet man das über die Formel **Spannung (Volt) x Stromstärke (Ampere) = elektrische Leistung (Watt)** um,

*E-Premium von John Deere mit Kurbelwellen-Generator (1), Frequenzumrichter (2), intelligenter Steuereinheit (3), elektrischem Lüfter- und Wasserpumpen-Antrieb (4), Kompressor mit elektrisch geschaltetem Riemenantrieb (5) und elektrischem Klimaanlage-Kompressor (6).*

*Fotos: Höner, Werkbilder*



beträgt der maximale Output der Lichtmaschine rund 2,5 kW (physikalisch korrekt ist übrigens die Angabe in kVA, denn beim Berechnen der effektiven Leistung muss auch die Blindleistung berücksichtigt werden).

Ein einzelner Arbeitsscheinwerfer mit einer H3-Glühlampe verbraucht schon 55 Watt bzw. knapp 4 A. Und die ISO-Bus Steckdose soll sogar 60 A bereitstellen (bei 14 Volt über 800 Watt!). Praxisuntersuchungen haben nachts bei einem 170 PS-Schlepper mit voller Beleuchtung einen Strombedarf von knapp 134 A ergeben, wohlgemerkt ohne zusätzliche Stromabnahme über Steckdosen. Hängen hier noch stromhungrige Geräte dran, fällt schnell die 180 A-Praxisgrenze und die Verbraucher „saugen“ die Batterie leer. Unter anderem rüstet Fendt die großen Schlepper der 900er-Baureihe deshalb mit zwei Lichtmaschinen mit je 150 Ampere Nennleistung aus. Doch auch beim Einsatz von zwei Generatoren stößt das 14 Volt-Bordnetz an seine Grenzen.

Je höher die Stromstärke, desto mehr wird auch das Übertragen der elektrischen Leistung zum Problem – je mehr Ampere durch die Leitungen fließen, desto dicker müssen die Kabel sein. Normalerweise rechnet man mit einem Querschnitt von 1 mm<sup>2</sup> pro 10 Ampere, das heißt bei einer Nennleistung von 200 Ampere muss das Kabel einen Querschnitt von mindestens 20 mm<sup>2</sup> haben. Zum Vergleich: Eine Ader eines normalen 230 V-Kabels hat einen Querschnitt von 1,5 mm<sup>2</sup>.

Die Stromstärke treibt die Kosten. Dickere Leitungen bedeuten einen höheren Materialverbrauch. Außerdem steigen die Anforderungen an die Steckverbindungen, die auf schnelle Montageakte beim Bau des Schleppers abgestimmt sind. Produktionsspezialisten sagen, dass jedes Ampere mehr die Steckverbindungen aufwendiger macht und auch die Gefahr von Kontaktkorrosion steigt.

### Steigt die Bordspannung?

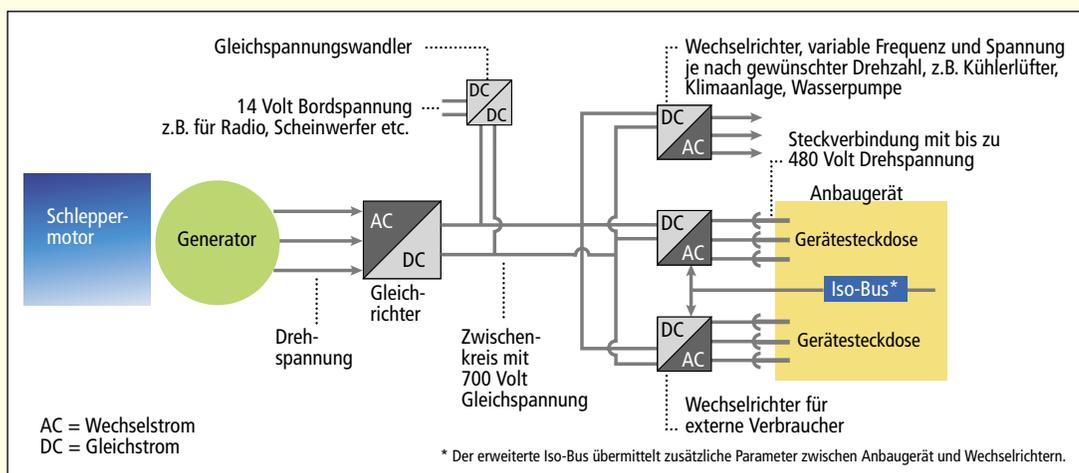
Die Autoindustrie diskutierte vor einigen Jahren die Erhöhung der Bordspannung. Die Gleichung Volt x Ampere = Watt macht deutlich, dass bei höherer Spannung die gleiche elektrische Leistung bei niedrigerer Ampere-Zahl (Stromstärke) erreicht werden kann. Die Pkw-Konstrukteure setzten ihre Hoffnungen auf eine „neue“ Spannung von 42 Volt. Mittlerweile ist diese Diskussion tot: Denn die Zuliefer-Industrie hat sich seit Jahrzehnten auf 12 Volt (bzw. 14 Volt) im Pkw-Bereich und auf 24 Volt bei den Lkw eingestellt. Außerdem: Mit 42 Volt wäre man zwar im Bereich der „berührungssicheren Spannung“ geblieben, die praktisch verfügbare Leistung hät-

te sich aber nur auf 7,5 bis maximal 10 kW erhöht – ein Wert weit unterhalb der Anforderungen der Pkw-Hybride.

Eine Erhöhung der Bordspannung zöge enorme Folgekosten nach sich, weil quasi alle heute verfügbaren elektrischen und elektronischen Komponenten neu entwickelt werden müssten. Durch die im Vergleich zur Pkw- und Lkw-Produktion winzigen Stückzahlen ist ein Alleingang der Landmaschinen-Hersteller hier komplett ausgeschlossen.

Und warum stellt dann Claas einen Xerion mit 24 Volt-Steckdose vor? Das ist eher ein Mitnahmeeffekt, denn sehr große Schlepper mit Lkw-Triebwerken brauchen die 24 Volt für die Steuerungselektronik und den Anlasser. Auch die 900er-Schlepper von Fendt hatten bis 2006 einen 24 Volt-Bereich im Bordnetz. Und zwar wegen ihres MAN-Motors – und nicht wegen eines Trends zu höherer Spannung.

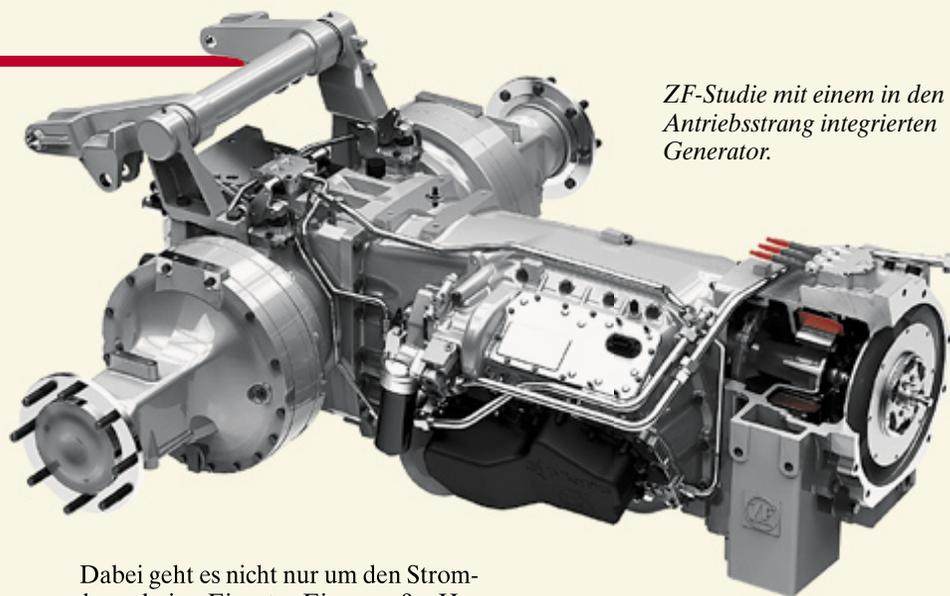
Die Schlepperentwickler versuchen, mit intelligenter Steuerungstechnik weiter mit den bisherigen Rahmenbedingungen auszukommen. Aufhänger ist das intelligente Energiemanagement, das eindeutige Prioritäten setzt: „Das Wichtigste zuerst, wenn der Saft knapp wird.“



### Schaltplan eines Schleppers mit zwei Bordnetzen:

*Der Motor treibt den Generator an. Der Gleichrichter wandelt die Drehspannung in einen fixen Gleichstrom um. Die nachgeschalteten Wechselrichter „erzeugen“ daraus passenden Drehstrom für die unterschiedlichen Anwendungen.*

*Zeichnung: M. Höner*



ZF-Studie mit einem in den Antriebsstrang integrierten Generator.

Dabei geht es nicht nur um den Stromverbrauch im Einsatz. Eine große Herausforderung ist auch der Standverbrauch. Denn die Elektronik der Maschine muss am Leben bleiben, auch wenn der Motor keinen Strom nachliefert. Heute erwartet jeder Fahrer eines modernen Schleppers, dass der Monitor direkt beim Drehen des Zündschlüssels betriebsbereit ist. Wie beim Fernseher kostet dieser Standby-Betrieb Energie.

Was aber, wenn z.B. der schwere Ackerschlepper im Winter nur selten startet, oder der Mähdrescher komplett im Winterschlaf ist? Hier sorgt das Energiemanagement dafür, dass der Bordrechner 3 bis 4 Tage nach dem Motorstopp vom Standby-Modus in den energiesparenden Tiefschlaf wechselt. Nach längerer Pause dauert das Hochfahren der Systeme dann eben auch etwas länger – was immer noch besser ist als eine komplett leer gesaugte Batterie.

Neben dem Powermanagement versuchen die Firmen natürlich auch, möglichst energiesparende Komponenten einzubauen. Ein neuer Ansatz sind hier z.B. LED-Scheinwerfer, deren Stromverbrauch teils um 50 % niedriger liegt als bei herkömmlichen Arbeitsscheinwerfern. So groß die Fortschritte beim Energiemanagement und bei Leistungsaufnahme neuer Komponenten auch sein mögen: Bisher steigt der elektrische Energiekonsum schneller.

### In Zukunft mit zwei Netzen?

Wenn die allgemeine Bordspannung bei 14 Volt bleibt, welche anderen Auswege gibt es aus der „Energiekrise“ der Traktoren? Wie beim E-Premium von John Deere könnte man zwei Netze mit unterschiedlichen Spannungen im Schlepper installieren. Eines mit 14 Volt für die üblichen Komponenten wie Scheinwerfer oder Bordrechner. Ein zweites Bordnetz mit deutlich höherer Spannung stünde dann für spezielle Verbraucher mit hoher Leistungsaufnahme oder natürlich auch für angehängte Geräte zur Verfügung.

Vorbild für diese Lösung sind unter anderem Pkw mit Hybrid-Antrieb (siehe Kasten S. 124). Hier setzt sich zunehmend



MELA-Projekt mit elektrischen Komponenten im Antrieb eines Fendts.

eine „Arbeitsspannung“ von 700 Volt durch. Ein Ziel ist das Reduzieren der Stromstärke durch höhere Spannung. Denn die Stärke des Stroms ist der Kostentreiber, nicht die Spannung.

Bei Schleppern mit zwei getrennten Bordnetzen übernimmt ein Generator die Stromversorgung, der entweder von der Motorkurbelwelle angetrieben wird (John Deere) oder im Antriebsstrang integriert ist (ZF). Eine klassische 14 Volt-Lichtmaschine haben diese Schlepper nicht mehr. Ähnliche Versuche gab es auch im Rahmen des so genannten MELA-Forschungsprojekts (Mobile Elektrische Leistungs- und Antriebstechnik) das von 2001 bis 2004 u.a. von Fendt, der FH Regensburg und der Firma STW durchgeführt wurde.

Bei diesen Lösungen erzeugt der Generator je nach Drehzahl eine Wechselspannung von z.B. 480 Volt (siehe Schaltplan S. 121). Ein nachgeschalteter elektronischer Gleichrichter wandelt den Wechselstrom in eine konstante Gleichspannung von 700 Volt um. Die Spannung dieses Zwischenkreises entspricht dem zurzeit gängigen Niveau im Hybrid-Fahrbereich. Direkt auf diesen Zwischen-

kreis greift ein Gleichspannungswandler zu, der die 700 Volt elektronisch zu 14 Volt umwandelt. Er zapft also Strom mit einer Stärke von bis zu 300 A für den „klassischen Teil“ des Bordnetzes ab.

Neu ist der elektrische Antrieb interner Verbraucher, wie z.B. des Lüfters. Das funktioniert über elektronische Wechselrichter, die ebenfalls am 700 Volt-Zwischenkreis hängen. Die Wechselrichter wandeln den Gleichstrom wieder in einen Wechselstrom und regeln über seine Frequenz die Drehzahl der Verbraucher – z.B. des Lüfters. Die Lüfterdrehzahl lässt sich also völlig unabhängig vom Dieselmotor steuern.

### Höherer Wirkungsgrad

Das kann den Dieserverbrauch senken. Denn die Geräteantriebe oder Schlepperaggregate laufen nur bedarfsgerecht und nicht mehr im Leerlauf, oder – was noch mehr Energie kostet – mit Sicherheitsreserven. Diese können sehr hoch sein, denn z.B. ein Lüfter muss auch bei hohen Umgebungstemperaturen und geringer Fahrgeschwindigkeit für Kühlung sorgen.

Umgekehrt kann die Elektronik durch das Hochregeln der Kühlung auch bei niedrigerer Motordrehzahl mehr Boostleistung für Zapfwellen- oder Hydraulikanwendungen zur Verfügung stellen. Weiterer Vorteil des elektrischen Organantriebs: Die Einbauposition ist komplett unabhängig. Das bringt mehr Freiheiten als ein unflexibler Keilriemenantrieb über die Motorkurbelwelle. So könnte in Zukunft das Kühlerpaket plus Lüfter auch auf dem Dach sitzen und so Platz für die Abgas-Behandlungsanlage machen.

Elektrische Antriebe für Wasserpumpe oder Klimaanlagekompressor eröffnen ähnliche Möglichkeiten. Eventuell lässt sich auch der Turbo elektrisch antreiben – aufwendige VGT-Lader oder zweistufige Turbos wären damit überflüssig. Oder die Load-Sensing-Hydraulik arbeitet nicht mehr per Druckwaage und Axialkolben-Verstellpumpe sondern – bedarfsgerecht – mit einem elektrischen Antrieb.

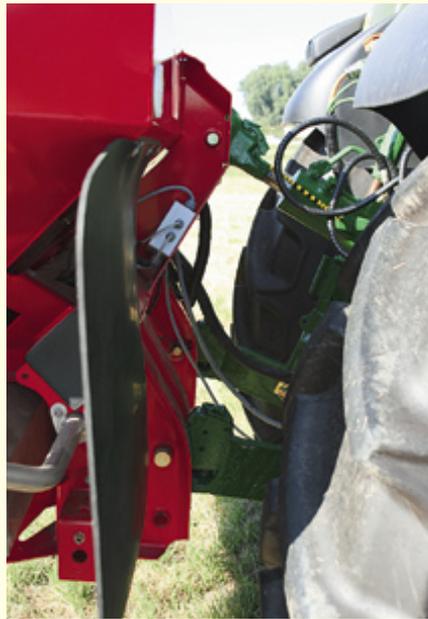
Elektrische Energie ist effizienter und lässt sich einfacher übertragen. Elektrische Antriebe haben über einen weiten Verstellbereich einen besseren Wirkungsgrad als hydraulische und lassen sich besser regeln. Ein hydraulischer Antrieb ist auf einen bestimmten Arbeitspunkt, eine bestimmte Drehzahl, ausgelegt. Verlässt man diesen Punkt durch Erhöhen oder Drosseln der Drehzahl, steigen die Verluste. Elektromotoren bleiben durch das Steuern von Spannung und Drehfrequenz im effizienten Bereich. Durch die elektronische Steuerung sind keine zusätzlichen Sensoren für Drehzahl und Drehmoment notwendig.

Die gute Regelbarkeit elektrischer Antriebe interessiert natürlich auch die Gerätehersteller. Vorteile zeigen sich vor allem wenn es auf die exakte Regelung der Drehzahl ankommt. Rauch hat bereits auf der Agritechnica 2007 einen Düngestreuer mit elektrischem Scheibenantrieb vorgestellt. Amazone zeigte im letzten Jahr in Hannover eine elektrifizierte Anhängespritze, Kverneland eine elektrisch angetriebene, GPS-gesteuerte Einzelkorndrille.

Auch bei Anbaugeräten mit komplizierter mechanischer Kraftübertragung sind elektrische Lösungen denkbar. Ein Heuwender braucht verschiedene Getriebe: Ein zentrales Getriebe mit Abtrieben nach links und rechts, mehrere mit geradem Durchtrieb und an den Enden einfache mit Antrieb von links bzw. rechts. Einfacher wäre es doch, über jedem Kreis einen E-Motor zu montieren.

### Abhängig von der Pkw-Entwicklung

Doch ganz so reibungslos wird die Elektrifizierung der Landmaschinen wohl nicht ablaufen. Es fehlen maßgeschneiderte Teile. Denn entgegen verbreiteter Meinung ist eine simple Übernahme von elektrischen Industriekomponenten kaum möglich. Standardbauteile sind dem Temperaturbereich, der Feuchtigkeit, dem Staub und vor allem den Vibrationen beim landwirtschaftlichen Einsatz nicht dauerhaft gewachsen. Die übliche Luft-



*Rauch-Streuer mit elektrischem Antrieb: Komfort ohne Zapfwelle!*

kühlung von 08/15-Motoren scheidet unter staubigen Bedingungen aus.

Dazu kommt die Leistungsdichte: Elektromotoren sind – im Vergleich zum Hydromotor mit gleicher Leistung – deutlich größer und schwerer. Bei stationären Einsätzen spielt der Platzbedarf kaum eine Rolle. Notfalls macht man das Gehäuse einfach etwas größer. Bei einer Landmaschine ist das kaum möglich.

Natürlich gibt es auch für mobile An-

wendungen Lösungen – allerdings mit erheblich höherem Aufwand und Kosten. Beim MELA-Projekt wurde sogar ein elektrisch-mechanisches leistungsverzweigtes Getriebe entwickelt. Die eigens entwickelten Generatoren und Motoren führten die Wärme per Flüssigkeitskühlung über ein Isolieröl ab.

Fachleute von Grimme schätzen, dass die Anforderungen beim Einsatz in der Landmaschine zwei- bis dreimal höher als bei Stationäranwendungen sind. Das treibt natürlich auch die Kosten. Im Vergleich zu bewährten hydraulischen Lösungen dürften elektrische Antriebe zurzeit um den Faktor zwei bis drei teurer sein. Der Abstand zu mechanischen Antrieben ist wegen der dort üblichen hohen Stückzahlen sogar noch deutlich größer.

Es geht nicht ohne die Konstruktion völlig neuer elektrischer Antriebe. Eine Aufgabe, die von der Landtechnik nicht gestemmt werden kann. Und selbst können hier die Auto-Hersteller kaum Alleingänge wagen. Große Hersteller wie BMW, Daimler oder General Motors haben sich unter dem gemeinsamen Dach der Global-Hybrid-Cooperation zusammengeschlossen, um in diesem Bereich gemeinsam zu entwickeln.

Erst wenn erprobte Motoren und Elektronik-Komponenten zu vertretbaren Kosten verfügbar sind und elektrische Antriebe einen Mehrnutzen für den Kunden bringen (weniger Verbrauch und/oder bessere Arbeitsqualität) wird Dynamik in das Thema kommen.

Auch dann gibt es noch viele Fragen zu lösen: Wie lassen sich die Bordnetze mit ihrer hohen Spannung absichern? Was ist mit der erforderlichen elektromagnetischen Verträglichkeit? Und vor allem: Wie überträgt man auch sehr hohe elektrische Leistungen von bspw. 150 kW über einen praxistauglichen Stecker vom Schlepper auf das Gerät? Hier gibt es am Markt noch keine standardisierten Lösungen für mobile Anwendungen. Um sich in der Praxis durchsetzen zu können, wird sich ein Stecker mit dem einfachen Kuppeln von Zapfwelle und Hydraulikleitungen messen lassen müssen.

Welche „Art“ von Strom stellt das Kraftwerk Schlepper an der Steckdose zur Verfügung? Gleichstrom oder „fertigen“ Drehstrom? Wie ein Hydrauliksteuergerät säßen die teuren Wechselrichter dann auf dem Schlepper und das angehängte Gerät ruft beim Schlepper per (erweitertem) ISO-Bus Wechselstrom mit der gewünschten Frequenz ab, es kommandiert also die Drehzahl (Zeichnung Seite 121). Maschinen mit vielen individuellen Drehzahlen, wie z. B. Kartoffelroder, beliefert der Schlepper mit elektrischer Leistung und fester Frequenz oder

## Was ist ein Hybridantrieb?

Ein Hybridantrieb ist super umweltfreundlich, braucht fast keinen Treibstoff und speichert die gesamte Bremsenergie. Fazit: Der Hybrid löst alle Probleme! Zu diesem Schluss könnte man kommen, wenn man die Jubelberichte in den Zeitungen liest. Aber kaum einer weiß genau, was Hybrid eigentlich bedeutet.

Zunächst bezeichnet Hybrid grundsätzlich die Kombination verschiedener Techniken für den Antrieb. Ein CVT-Getriebe mit mechanischem und hydraulischem Teil ist nach dieser Definition auch ein hybrider Antrieb.

Eine strengere Definition verlangt von einem Hybridantrieb mindestens zwei unterschiedliche Motoren und zwei Energiespeicher. Also z.B. Dieselmotor plus elektrischem Antrieb mit Tank und Akku. Diese Antriebe arbeiten parallel (gleichzeitig bzw. leistungsverzweigt) oder seriell – dann wirkt nur

ein Teil auf den Antrieb, der andere stellt die Leistung bereit (z.B. Dieselmotor treibt den Generator, der Fahr-antrieb arbeitet elektrisch).

Mikrohybride haben ein elektrisches Leistungsnetz und elektrisch angetriebene Nebenaggregate. Mild- und Vollhybride können beim Bremsen oder im Schubtrieb die frei werdende Energie wieder in den Akku einspeisen (Nutzbremse). Das ist immer dann sinnvoll, wenn das Fahrzeug oft beschleunigt und wieder abbremst. Atlas-Weyhausen hat z.B. einen Radlader mit diesem Konzept vorgestellt. Beim Ackerschlepper wird dagegen nur selten nutzbare (Brems-) Energie frei. Und je länger ein Auto mit gleichbleibender Geschwindigkeit fährt, desto weniger trägt diese Speichermöglichkeit zur Effizienz bei. Der hohe technische Aufwand der Vollhybriden steht der weiter steigenden Effizienz klassischer Verbrennungsmotoren entgegen.

sogar mit Gleichspannung. Roder-interne Wechselrichter wandeln diese dann nach eigenen Bedürfnissen und steuern die Drehzahlen der Antriebe völlig unabhängig. Auch hier gibt es noch Fragen zu beantworten: Wie steht es mit der Effizienz eines Wechselrichters der für hohe Leistungen ausgelegt ist, wenn das aktuell angebaute Gerät nur wenig abruft?

## ***Warten auf den Entwicklungsschub***

Eine Kreiselegge mit elektrischem Antrieb wird es so schnell wohl nicht geben. Und auch der gute alte Hydraulikzylinder wird längerfristig kaum durch

Spindelmotoren ersetzt. Trotzdem geht die Entwicklung künftig zu mehr Strom im Schlepper.

Norbert Rauch brachte es auf der VDI-Tagung Landtechnik für Profis Ende Februar auf den Punkt: „Es stellt sich nicht mehr die Frage, ob elektrische Antriebe in der Landtechnik kommen, sondern nur noch wie schnell!“

Steigende Anforderungen an Regelbarkeit und Verteilung von Leistung mit hoher Effizienz sprechen für diese Technik. Sie eröffnet völlig neue Perspektiven beim Dosieren und Verteilen und erhöht das Automatisierungspotenzial. Das schnelle Abbremsen elektrischer Antriebe verbessert die Sicherheit. Elektrische

Antriebe lassen sich – z.B. über ein Planetengetriebe – auch mit anderen Antriebsarten kombinieren. Großes Potenzial haben diese Antriebe in selbstfahrenden Arbeitsmaschinen. So hat die TU Dresden eine Dreschtrommel mit innen liegendem elektrischen Antrieb vorgestellt.

Vorreiter ist die Pkw-Industrie mit ihrer Hybrid-Technologie. Doch erst wenn Großserien-Komponenten aus diesem Bereich zu wirtschaftlich vertretbaren Preisen verfügbar sind, springt auch die Landtechnik auf. Leistungspotenzial bieten elektrische Antriebe reichlich: Caterpillar hat gerade die 25 t-Planierdrape D7E mit Hybridantrieb vorgestellt.

G. Höner