



Vom Diesel- zum elektrischen Antrieb

Einst stand der Krone BiG X 1000 im Dienste der Forschung – Heute ist er ein Exponat im DLM

Selbstfahrende Feldhäcksler werden nahezu ausschließlich im überbetrieblichen Einsatz genutzt. Neben der Möglichkeit eines schnellen und problemlosen Versatzes von Einsatzort zu Einsatzort ist die optimale Arbeitserledigung auf unterschiedlichen Feldgrößen, Feldformen und Geländetopologien eine zweite zentrale Voraussetzung. Sie wird ergänzt durch eine problemlose Anpassung an das zu erntende Gut von Grünfutter über Ganzpflanzensilage bis hin zum Haupteinsatzgebiet in Silomais mit geringstmöglichen Verlusten bei zugleich hoher Schlagkraft.

All das muss unter Berücksichtigung gesetzlicher Vorgaben im öffentlichen Straßenverkehr ökonomisch mit geringstmöglichen Kosten und ökologisch mit weitgehend vermeidbaren Boden- und Umweltbelastungen

erreicht werden. Allerdings unterscheiden sich mit stärker differenzierter Nutzung die erforderlichen Antriebsleistungen erheblich. Sie sind für den Transport der Maschine an den jeweiligen Einsatzort am geringsten, nehmen für das Häckseln von Gras oder Ganzpflanzen zu und sind für das Häckseln von Silomais am höchsten. Dabei können die erforderlichen Zeitanteile für die jeweilige Nutzung sehr stark variieren.

Vor dem Hintergrund dieser unterschiedlichen Anforderungen und Einsatzbedingungen entwickelte die Firma Krone in Spelle 2005 den Feldhäcksler BiG X 1000 mit zwei Sechszylindermotoren bei einer Nennleistung von 1.020 PS. Es war seinerzeit die stärkste Erntemaschine der Welt. Mit dieser Maschine wurde es möglich, eine weitgehend optimal angepasste Antriebsleistung umzusetzen, wobei je nach Kraftbedarf der Häcksler entweder mit einem oder mit beiden

Einsatzzeiten zweier Feldhäcksler als Beispiel

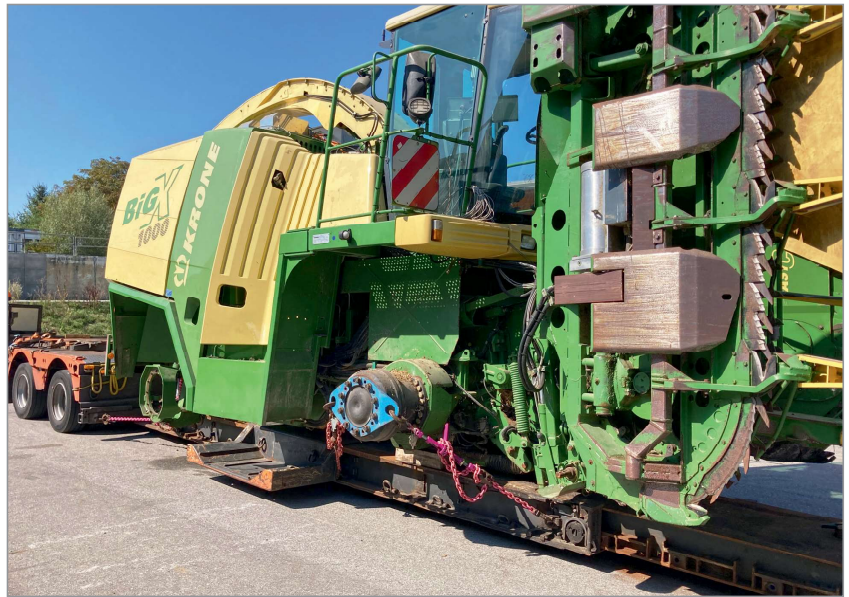
	Motorstunden	Trommelstunden	Fahrstrecke (Straße)	Fläche Gras (ha)	Fläche Mais (ha)
Feldhäcksler A	350	210	3.800 km	500	300
Feldhäcksler B	900	720	10.000 km	2.500	1.200

Motoren arbeiten kann. So wird zum Beispiel für den Straßentransport mit nur einem aktiven Motor über den vollhydrostatischen, stufenlosen Fahrtrieb und das automotiv-fahrtriebkonzept die Motordrehzahl automatisch an die vorgewählte Fahrgeschwindigkeit und die entsprechenden Fahrtriebsbelastungen angepasst. Dadurch sinkt der Kraftstoffverbrauch spürbar, Motor und Antrieb werden geschont.

Auch bei leichter Grasernte wird nur ein Motor eingesetzt. Erst bei höherer Leistungsanforderung, wie dem Maishäckseln, wird der zweite Motor über eine Lamellenkupplung zugeschaltet. Die beiden synchronisierten Reihenmotoren werden dabei über ein Gleichlaufgetriebe an den Kurbelwellen miteinander verbunden, eine dazu entwickelte elektronische Ansteuerung der einzelnen Motoren sorgt für den exakten Gleichlauf beider Aggregate. Über Riementrieb werden die Häckseltrommel mit Wurfbeschleuniger und Korncracker angetrieben. Auch Lüftung und Klimatisierung erfolgen mechanisch über Riementrieb. Alle anderen Antriebe werden von der Hydraulik übernommen, deren Pumpen(türme) direkt am Motorverteilergetriebe sitzen. Die nun verfügbare Gesamtmotorleistung ermöglicht mit einem dazu entwickelten Maisgebiss von bis zu 14 Reihen bzw. 10,50 m Arbeitsbreite eine maximale Schlagkraft von bis zu 8 ha/h.

Die umfangreichen Tests und Praxiseinsätze bestätigten das angedachte Konzept in der Umsetzung und führten nach Detailverbesserungen zur Serienfertigung. 2010 verabschiedet sich Krone vom Doppelmotor und spendiert seinen Feldhäckslern stattdessen Einzelmotoren mit noch mehr PS. Von dem einmotorigen BiGX 1000 wurden weltweit 150 Maschinen auf den Markt gebracht. Derzeit sind noch immer rund 130 davon im Einsatz.

Aus energetischer und steuerungstechnischer Sicht besitzt die zweimotorige Maschine noch erhebliches Verbesserungspotential, welches bei der installierten Motorleistung aus ökonomischer, ökologischer und konstruktiver Sicht einen lohnenswerten Ansatz für Verbesserungen darstellt. In Form elektrischer Antriebe betrifft dies vor allem die drehzahl-variablen Antriebe auf hydraulischer Basis. Zuvorderst ist dabei eine



wesentliche Erhöhung des Wirkungsgrads zu nennen. Vorteile bestehen zudem in der elektrischen Energieübertragung, der Energiespeicherung und für die künftige Weiterentwicklung agrartechnischer Systeme in der sehr viel günstigeren Steuer- und Regelbarkeit.

Der Forschungs-Häcksler auf dem Tieflader abfahrbereit ins DLM Hohenheim

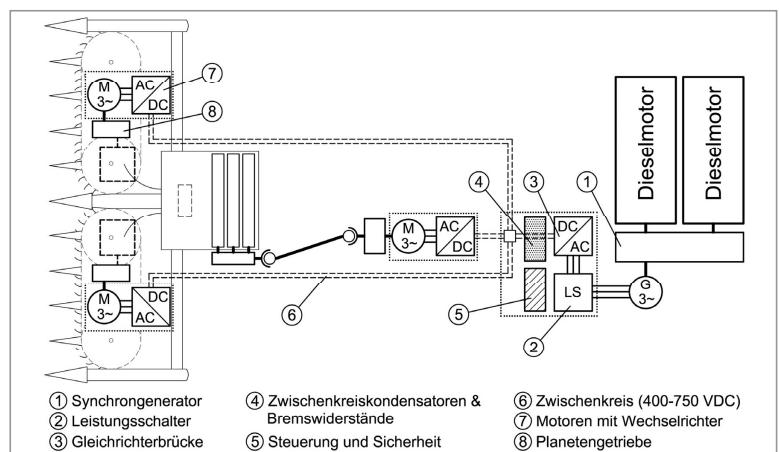
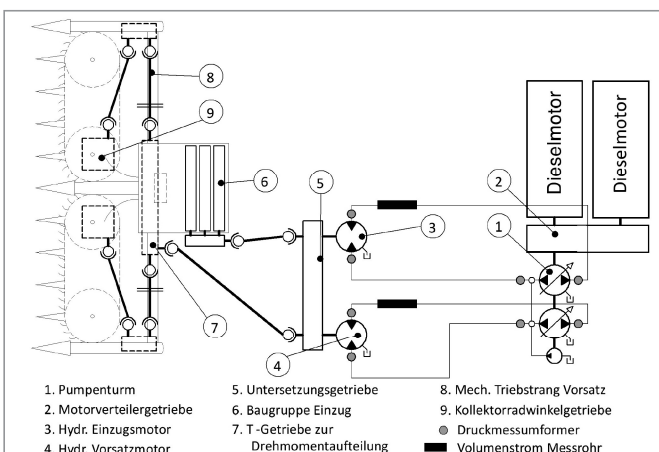
Diesel-elektrische Hybridisierung

Um diese Möglichkeiten auszuloten wurde vom Lehrstuhl für Agrarsystemtechnik der TU-München 2006 mit der Firma Krone ein Forschungsantrag an die Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU) gestellt, um eine diesel-elektrische Hybridisierung am zweimotorigen Krone BiGX 1000 einzuleiten. Damit sollten die relativ schweren mechanischen Antriebelemente des Vorsatzes durch elektrische Antriebe ersetzt werden, wobei zusätzlich durch die dann installierten elektrischen Steckverbindungen ein Wechsel des Vorsatzes sehr stark vereinfacht werden würde. Zudem sollte der Einzug einen elektrischen Antrieb erhalten, wodurch auf das vorhandene Getriebe verzichtet und zugleich eine absolut stufenlose Drehzahlregelung für die Häckselnängen Anpassung möglich würde.

Dank der Förderung des Pilotvorhabens durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt und der Fa. Krone konnte 2006 mit der wissenschaftlichen Bearbeitung begonnen

LINKS Schema des im BiGX 1000 realisierten hydraulisch-mechanischen Antriebskonzeptes

RECHTS Schema des im BiGX 1000 realisierten diesel-elektrischen Antriebskonzeptes



- 1. Pumpenturm
- 2. Motorverteilergetriebe
- 3. Hydr. Einzugsmotor
- 4. Hydr. Vorsatzmotor
- 5. Untersetzungsgetriebe
- 6. Baugruppe Einzug
- 7. T-Getriebe zur Drehmomentaufteilung
- 8. Mech. Triebstrang Vorsatz
- 9. Kollektorradwinkelgetriebe

- ① Synchrongenerator
- ② Leistungsschalter
- ③ Gleichrichterbrücke
- ④ Zwischenkreis Kondensatoren & Bremswiderstände
- ⑤ Steuerung und Sicherheit
- ⑥ Zwischenkreis (400-750 VDC)
- ⑦ Motoren mit Wechselschalter
- ⑧ Planetengetriebe



werden. Dazu wurde im Juni 2007 der Feldhäcksler Krone BiGX 1000 dem Lehrstuhl für Agrarsystemtechnik in Weihenstephan für die Umsetzung und Realisierung des vorgesehenen Forschungsansatzes übergeben.

Für das Forschungsvorhaben erbrachte das Zwei-Motorenkonzept mit dem verfügbaren Bauraum nahezu optimale Voraussetzungen. So konnte relativ einfach der Pumpenturm für die bisherigen hydraulischen Antriebe für Vorsatz und Einzug durch einen Generator ersetzt werden. Dafür wurde ein permanenterregter Synchrongenerator mit einer Eckleistung

von 100 kW gewählt, dessen ausgangsseitige dreiphasige Drehstromleistung über eine ungesteuerte Diodengleichrichterbrücke den Zwischenkreis mit einer Spannung zwischen 400 und 700 V Gleichstrom versorgt. Drei wassergekühlte Reluktanzmotoren mit integrierten Wechselrichtern übernehmen mit je 20 kW Nennleistung den Vorsatzantrieb und mit 40 kW Nennleistung den Einzugsantrieb.

Hier sei betont, dass auf eine mögliche direkte Integration der Motoren in die Antriebsorgane (z.B. als Wellenersatz in einer Einzugswalze) wegen fehlender Verfügbarkeit verzichtet werden musste. Aus heutiger Sicht und mit heute verfügbaren elektrischen Antrieben könnte deshalb der aufgezeigte Gesamtantrieb nochmals vereinfacht und vor allem mit wesentlich weniger Gewicht realisiert werden.

Schon zur Silomaisernernte 2007 konnten mit der so umgebauten Maschine erste Feldversuche durchgeführt werden. Abgesehen von ersten kleinen Schwächen erwies sich das erstellte Konzept mit seinen integrierten Antrieben als absolut praxistauglich. Dies konnte mit mehr als 30 ha Erntefläche Silomais im konkurrierenden Einsatz mit überbetrieblich eingesetzten Serienmaschinen ohne größere Ausfälle beeindruckend unter Beweis gestellt werden.

Zufriedene Gesichter bei der Pressekonferenz anlässlich des Projektabschlusses u. a. mit dem BiGX-Entwicklungsleiter Dr. Josef Horstmann (l.), Dr. Bernard Krone (3. v. l.) sowie Prof. Hermann Auernhammer (3. v. r.)



Mit dem nun verfügbaren funktionsfähigen elektrischen Antriebsstrang konnten direkte Vergleiche zum ursprünglichen hydraulisch-mechanischen Antrieb abgeleitet werden. Als äußerst vorteilhaft erwies sich dabei die einfache Integration der dieselektrischen Antriebstechnik in das Triebstrangmanagementsystem und die Regelung der Antriebe mit der Rückführung von Prozessparametern. Allerdings erhöhte sich dabei das Leistungsgewicht des Gesamttriebstrangs um 22 Prozent von 14,1 kg/kW bei der hydraulischen auf 17,2 kg/kW bei der dieselektrischen Lösung. Wie schon erwähnt ist jedoch zu berücksichtigen, dass gegenüber den weitgehend optimierten Bauteilen im Serienantrieb die umgesetzte dieselektrische Lösung ausschließlich auf Prototypen beruht.

Neben dem Beweis der Funktionsfähigkeit im praktischen Einsatz kann allerdings nur ein exakter, wissenschaftlich gestützter Prüfstandsversuch die Leistungsfähigkeiten der zu vergleichenden Antriebssysteme exakt beschreiben. Deshalb erfolgten neben der Leistungsermittlung im Feld zusätzlich Vergleichsmessungen an einem Prüfstand der DLG in Groß-Umstadt, um die Wirkungsgrade der Einzelsysteme und des Gesamtsystems zu ermitteln. Danach erbrachte der dieselektrische Antrieb über weite Teile des Betriebskennfelds einen Vorteil von 13,5 bis 30 Prozentpunkten. Bezogen auf die daraus abgeleitete Energieeffizienz ergaben sich Vorteile im typischen Einsatzzyklus zwischen 14 und 20 Prozentpunkten.

Den erfolgreichen Abschluss dieses Forschungsvorhabens zur Antriebselektrifizierung von Vorsatz und Einzug im BiGX 1000 bildete eine vielbeachtete Pressekonferenz im März 2008 in Weihenstephan bei der die Ergebnisse vorgestellt und diskutiert wurden. Begleitend dazu konnten sich die Teilnehmer am Objekt informieren und so einen Eindruck von einer bis dahin in der Agrartechnik nur in Einzelfällen entwickelten und getesteten neuen Antriebsform erhalten.

Elektrischer Antrieb für die Hinterachse

Unmittelbar an diese erste Projektphase wurde wiederum mit Unterstützung der Fa. Krone und der DBU die Elektrifizierung des Fahrtriebs in Angriff genommen. Ziel war dabei einen fahrstrategisch geregelten Einzelradantrieb der Räder zu verwirklichen, um im Straßen- und Feldeinsatz das Fahrverhalten zu optimieren und für neue Ansätze zu öffnen. Beispielsweise sei die Verwirklichung einer Schlupfregelung und einer Differentialsperre genannt. Auch auf ein verbessertes und effizienteres Fahrverhalten in Hanglagen und bei Wendevorgängen sei hier verwiesen.

Dabei sollte auf das in der Maschine verfügbare System zurückgegriffen werden, um dessen Funktionsfähigkeit zu erhalten. Dies hatte zur Folge, dass aufgrund der verfügbaren installierten Generatorleistung und der schon verbauten Motoren für den Antrieb im Vorsatz und im Einzug nur noch eine relativ geringe elektrische Leistung von 20 kW zur Verfügung stand. Infolgedessen

wurden die Arbeiten auf den Antrieb der Hinterachse beschränkt, weil mit dessen Realisierung schon wesentliche Teile der Fragstellungen und der damit verbundenen neuen Möglichkeiten beantwortet werden konnten. Hierfür wurden zwei Synchron-Radnabenmotoren mit einer Einzelleistung von je 13,6 kW verbaut, weil diese neben einem hohen Wirkungsgrad eine hohe Überlastfähigkeit besitzen. Dies führte zum nächsten Forschungsziel: dem diesel-elektrischen Antriebskonzept für die Hinterachse.

Auf dem Prüfstand

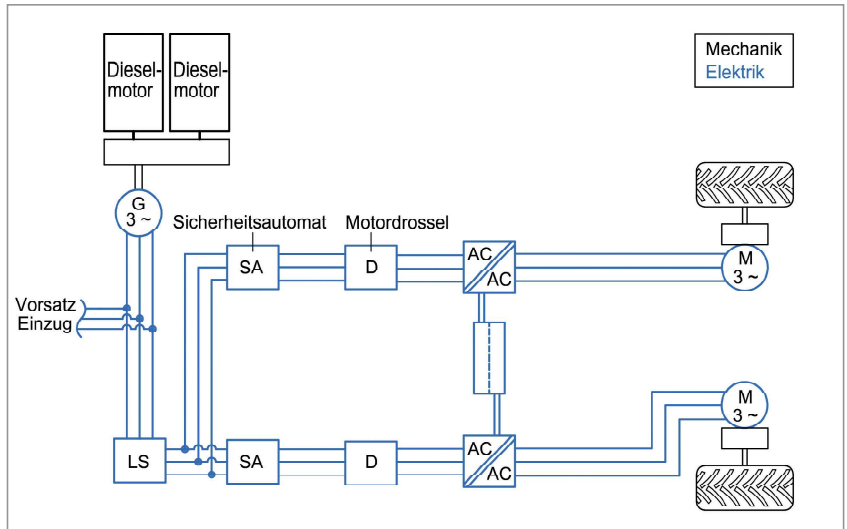
Im Gegensatz zum vorhergehenden Forschungsprojekt wurde für diesen Ansatz zur exakten Vermessung und Bewertung der beiden Antriebsarten für die Hinterachse auf einen eigens dazu installierten Prüfstand zurückgegriffen. Dazu wurde der Versuchsträger an der Hinterachse aufgebockt und beiderseits über Gelenkwellen und Getriebe Bremsmotoren mit Bremswiderständen und Frequenzumrichtern angeschlossen. So konnten beide Antriebsstränge aufeinander folgend unter gleichen Bedingungen untersucht werden.

All dies erfolgte in Testzyklen nach einem vordefinierten Schema mit Motordrehzahlen von 1.550 bis 1.850 min⁻¹ in 100 min⁻¹ Schrittweite und mit Raddrehzahlen von 5 bis 30 min⁻¹ in Schritten von 5 min⁻¹ (entsprechend 1,5 bis 9 km/h). Werden hierbei für den Feldbetrieb typische Lasten und Drehzahlen angenommen, dann zeigt sich für den hydraulischen Antrieb ein Gesamtwirkungsgrad von 64 Prozent. Hingegen erreicht der installierte elektrische Antrieb einen um 23 Prozentpunkte höheren Wirkungsgrad von 79 Prozent. Dieser führt, vergleichbar zur Elektrifizierung des Antriebs im Vorsatz und im Einzug, auch hier zu einer deutlichen Verbesserung der Energieeffizienz zwischen 16 und 22 Prozent.

Auch mit der so erweiterten Elektrifizierung konnte der Feldhäcksler bei der abschließenden Feldprüfung auf mehr als 30 ha seine grundsätzliche Eignung unter Feldbedingungen unter Beweis stellen. Zugleich zeigte sich durch das schnelle Ansprechverhalten und die hohe Regelgüte der elektrisch angetriebenen Hinterachse im Fahrverhalten im Vergleich zum Serienantrieb eine deutliche Verbesserung.

Ein besonderes Exponat

Der im September 2020 dem Deutschen Landwirtschaftsmuseum überlassene selbstfahrende Feldhäcksler Krone BiGX 1000 ist in mehrerer Hinsicht ein besonderes Exponat, denn es handelt es sich um die seinerzeit leistungsfähigste Erntemaschine der Welt, basierend auf einem Zwei-Motoren-Konzept mit einer bis dahin in der Praxis unerreichten Erntekapazität in Silomais von bis zu 8 ha/h. Mit der verfügbaren Motorleistung und dem Einzug von bis zu 14 Reihen reduziert sich die Anzahl der Überfahrten und verursacht weniger Bodenbelastungen. Gleichzeitig konnten damit beim Transport von Einsatzort zu Einsatzort und beim Häckseln von Gras mit nur einem Motor deutliche Reduzierungen im Dieselver-



brauch und in der Umweltbelastung durch verminderten CO₂-Ausstoß im Praxiseinsatz erreicht werden.

Schema des im BiGX 1000 realisierten diesel-elektrischen Antriebskonzeptes für die Hinterachse

Diese Fähigkeiten besitzt das dem Museum übergebene Fahrzeug auch weiterhin im vollen Funktionsumfang, weil die in den beiden Forschungsvorhaben vorgenommenen Ergänzungen und Erweiterungen das bestehende Grundkonzept mit den beiden Dieselmotoren und dem direkten Antrieb der Häckseltrommel und des Wurfbeschleunigers sowie weiterer Nebenaggregate nicht beeinflusst haben.

Gleichzeitig stellen die vorgenommenen elektrischen Baugruppenantriebe im Vorsatz, im Einzug und im Antrieb der Hinterachse Unikate auf Prototypenbasis dar. Deren Funktionssicherheit wurde nicht nur auf Prüfständen unter Beweis gestellt. Vielmehr konnte damit auch in Praxiseinsätzen auf mehr als 60 ha Silomaisfläche ein Maßstab in der praktischen Umsetzung realisiert werden.

Bei alledem zeigten die durchgeführten Forschungsarbeiten zur Elektrifizierung von Baugruppenantrieben

Prüfstand für die Untersuchung der Hinterachsantriebe



neue Möglichkeiten auf. Hier sind zuvorderst die um 20 bis 30 Prozent höheren Wirkungsgrade der elektrischen Antriebe gegenüber den hydraulischen zu nennen. Dies bedeutet im Umkehrschluss, dass mit dieser Antriebsart die erforderliche Motorleistung für die untersuchten Antriebe bei gleichbleibender Durchsatzleistung um 15 bis 20 Prozent reduziert werden könnte. Gleiches würde mit hoher Wahrscheinlichkeit auch für einen elektrischen Vorderachsantrieb gelten. Auch können die nun wesentlich höheren Leistungsgewichte schon heute durch verfügbare Serienteile deutlich verringert werden. Zudem wird es möglich, die mechanischen und die hydraulisch-mechanischen Antriebe konstruktiv sehr stark zu vereinfachen und zugleich sehr viel exakter an die Einsatzbedingungen anzupassen.

Allerdings, und auch dies ist ein sehr wesentliches Ergebnis aus den vorliegenden Untersuchungsergebnissen, müsste dazu das Gesamtsystem weiterentwickelt, modifiziert und angepasst werden. Im Fahrtrieb sollte daher dem schon realisierten elektrischen Antrieb der Hinterachse die Vorderachse folgen. Zusätzlich wäre dann eine Anti-Schlupfregelung und ein Elektronisches Stabilitäts-Programm (ESP) umzusetzen. Auch eine mögliche und evtl. erforderliche Rekuperation ist dabei zu beachten und zu berücksichtigen, weil Maschinen z.T. sehr lange Fahrstrecken zu ihrem Einsatzort zurücklegen.

Daran anschließend könnte der direkte Antrieb der Häckseltrommel durch einen integrierten elektrischen Antrieb ersetzt werden, so wie er für die Dreschtrommel des Mähdreschers vom Institut für Landmaschinen der TU Dresden entwickelt wurde. Damit wäre es dann möglich, die Schnittlänge des Häckselgutes ohne Drehzahländerung des Einzugs anzupassen, einen „Sofort-Stopp der Häckseltrommel“ zur

Unfallvermeidung zu realisieren und Überlegungen zu einem Schleifmanagement der Trommelmesser zu berücksichtigen.

Schließlich könnte in einem abschließenden Schritt der diesel-elektrische Antrieb durch die Energiebereitstellung über eine Brennstoffzelle ersetzt werden. Erst damit könnte dann der Bedarf an elektrischer Leistung bedarfsgerecht erzeugt und somit auf das absolute Minimum realisiert werden. Stacks mit der erforderlichen Leistung und möglicher Integration in den verfügbaren Bauraum zeichneten sich in der Entwicklung und Verfügbarkeit schon zu Beginn des Gesamtvorhabens ab.

Mit diesen heute schon weitgehend verfügbaren Bauteilen würde sich dann ein Grundkonzept für eine leistungsangepasste und zugleich äußerst umweltfreundliche Landmaschine von morgen realisieren lassen. Die fast ausschließlich rotatorischen Antriebe dieser Maschinen kommen dabei einer Elektrifizierung mit weiter entwickelten elektronischen Überwachungs-, Steuer- und Regelstrategien in hohem Maße entgegen.

Die Zeit arbeitet für diese Lösung! Die dem Museum in Hohenheim übereignete Maschine ist deshalb ein unübersehbares und damit erhaltenswertes Teil der agrartechnischen Entwicklungen.

Der Autor

Prof. Dr. Hermann Auernhammer war Inhaber des Lehrstuhls für Technik im Pflanzenbau an der TU München. Er gilt als einer der Pioniere des Precision Farmings. Für seine Arbeiten zur Standardisierung elektronischer Kommunikation in der Landtechnik erhielt er 2001 den Bundesumweltpreis.

Stärkste selbstfahrende Landmaschine der Welt

Nach dem Ausstieg aus der Bodenbearbeitung 1996 beginnt bei Krone die Ära der Selbstfahrertechnik als das Emsländer Unternehmen seine erste selbstfahrende Arbeitsmaschine vorstellt: den Grasmäher BiG M. Mit insgesamt drei ausklappbaren Mähwerken an Front und den beiden Seiten schafft der BiG M eine Arbeitsbreite von über neun Metern. Beim Mähen jedoch belässt er es nicht: Zur Beschleunigung der Trocknung wird das Schnittgut mit Stahlzinken mechanisch beansprucht, auch Aufbereiten genannt. Die Erfahrung mit dem BiG M mündeten zur Jahrtausendwende in die Fertigung des selbstfahrenden Feldhäckslers BiG X, „Wir werden nur einen Feldhäckslers bringen, wenn wir Argumente haben, die die anderen nicht haben“, begründet Seniorchef Dr. Bernard Krone seine Entscheidung damals. Tatsächlich besitzt der BiG X Features, die andere Hersteller damals nicht hatten. Schon bei der Arbeitsbreite von zunächst 8, 10 und heute sogar 12 bzw. 14 Reihen beim Mais zog der BiG X an allem vorbei, was es es auf dem globalen Landmaschinenmarkt gab. Bei der Häckseltechnik galt der Grundsatz: „keine Kompromisse“ und so nahm Krone damals die Fertigung sämtlicher Teile incl. der Häckseltrommel und des Vorsatzes selbst in die Hand. Dass man bei Krone in großen Dimensionen denkt, wird auch an der Motorleistung des Selbstfahrers deutlich. Mit über 600 PS in der ersten Ausführung drang der BiG X in ungekannte Dimensionen vor. Den Mut zu haben, sich als Mittelständler in den Wettbewerb mit global agierenden Fulllinern zu begeben und eine Nische zu besetzen, zahlte sich schließlich für Krone aus. 21 Jahre nach seinem Debut hat Krone rund 5.500 BiG X verkauft und besitzt heute einen Marktanteil von über 20 Prozent in diesem Segment. Mit Recht kann das Traditionsunternehmen mit Sitz in Spelle behaupten, dass der BiG X zum Synonym für den selbstfahrenden Feldhäckslers schlechthin geworden ist.