

... über Forschung, Entwicklung und Anwendung der Antriebstechnologien
... über Analyse und Beurteilung von Motoren- und Antriebskonzepten
... über die Aspekte der Energie
... über Auswirkungen auf Mensch und Umwelt

Elektrifizierung von mobilen Maschinen – wo steht die Landtechnik?

Ueli Wolfensberger

nach Angaben und Vorlagen von Roger Stirnimann, HAFL Zollikofen

Die Elektrifizierung von mobilen Maschinen (Nonroad Mobile Machinery, NRMM) und damit auch von Landmaschinen ist seit Jahren ein viel diskutiertes Thema. Trotz vieler Vorteile sind NRMM-Serienfahrzeuge mit Leistungselektrik im Antriebsstrang in der (landwirtschaftlichen) Praxis noch selten anzutreffen, obwohl nahezu alle Hersteller aktuell daran arbeiten.

Beim *Generatorkonzept* wird der klassische mechanische Antriebsstrang um einen Generator erweitert, der einen Teil der Verbrennungsmotorleistung in elektrische Energie umwandelt. Hiermit werden externe Verbraucher (z.B. Elektromotoren auf Anbaugeräten) und/oder Nebenaggregate auf dem Fahrzeug selber (z.B. Ventilator, Kompressor) angetrieben. Der Fahrtrieb erfolgt weiterhin rein mechanisch.

Elektrisch-mechanisch leistungsverzweigte Getriebekonzepte sind ähnlich aufgebaut wie ihre hydrostatisch-mechanischen Pendanten. Anstelle der Hydroeinheit (Pumpe / Motor) als Stellglied beim hydrostatisch-mechanischen wird beim elektrisch-mechanischen Getriebe eine elektrische Einheit (Generator / Motor) eingebaut. Diese kann, wie z.B. beim John Deere ePower, so dimensioniert sein, dass sie

nicht nur den Fahrtrieb versorgt, sondern zusätzlich bis zu 100 kW elektrische Leistung für externe Verbraucher bereitstellt.

Bei *diesel-elektrischen Konzepten* wird die gesamte Leistung des Verbrennungsmotors mittels Generator in elektrische umgewandelt. Damit können Elektromotoren für den Fahrtrieb und andere Antriebe versorgt werden. Eine mechanische Verbindung zwischen Verbrennungsmotor und Arbeitsantrieb gibt es nicht. In der Landtechnik sind – ausser einem Prototyp von Rigitrac – keine solchen Beispiele bekannt, wohl aber bei anderen NRMM.

Vollelektrische Konzepte kommen ganz ohne Verbrennungsmotoren aus, dieser wird durch einen oder mehrere Elektromotoren ersetzt. Die dafür notwendige Batterie schränkt allerdings aufgrund ihrer geringfügigen Energiedichte die Einsatzdauer ein. Batterieelektrische Konzepte sind deshalb nur bei kleineren Fahrzeugen mit geringen Leistungsanforderungen zu finden. Beispiele hierfür sind der eHoftrac von Weidemann oder die Traktor-Prototypen von Fendt und Rigitrac.

In Kombination mit einer Traktionsbatterie lassen sich die drei erstgenannten Konzepte

mit Leistungselektrik grundsätzlich zu Hybriden erweitern. In der Landtechnik gibt es erst wenige Hybridfahrzeuge, so etwa den Kleingeräteträger Reform Metron, einen aktuellen Prototyp von Carraro oder eine aktuelle Konzeptstudie von Steyr.

Die Gründe für die zögerliche Verbreitung der Elektrifizierung des Antriebs von Landwirtschaftsmaschinen sind vielfältig und von Fahrzeugart zu Fahrzeugart unterschiedlich. Bei Traktoren beispielsweise kann die Motorleistung über die Räder, über die Zapfwelle und die Hydraulikanschlüsse auf den Boden bzw. auf Arbeitsgeräte übertragen werden. Die Leistungselektrik stände hier also für eine vierte Möglichkeit, was das System

Traktor noch komplexer und teurer machen würde. Eine wichtige Rolle spielen auch die Einsatzprofile. Bei schweren Zugarbeiten auf dem Feld könnte ein hybridisierter Traktor kaum von der Hybridfunktion „Rekuperation“ profitieren. Selbst bei Transportarbeiten dürften wegen der geringen Fahrgeschwindigkeiten und relativ hohen Rollwiderständen nur geringe Effizienzvorteile resultieren. Auch vollelektrische Konzepte „vertragen“ sich mit Traktoreinsätzen eher schlecht, weil die Leistungsanforderungen meistens hoch und die Einsatzzeiten lang sind. Weitere Herausforderungen stellen hier zudem die relativ langen Batterieladezeiten dar.

Weitere Informationen:

- <https://www.wochenblatt-dlv.de/feld-stall/landtechnik/e-traktor-technik-maechtig-strom-561724>

Auf dem Weg zum klimafreundlichen Fliegen

Theo Rindlisbacher, BAZL

Global wird der Konsum in der Luftfahrt zunehmen und es braucht grosse Anstrengungen, um Flugtransporte in Zukunft umweltfreundlicher durchführen zu können. Dabei spielen die Antriebstechnologie und damit zusammenhängend die Energieträger eine bedeutende Rolle.

Energiespeicher als Problem

Der Energieinhalt in einem Kilogramm Kerosin ist rund 60 Mal höher als bei den besten heutigen aufladbaren Batterien. Gleichzeitig ist das benötigte Volumen für die gleiche Menge Energie bei heutigen Batterien mindestens 20 Mal grösser als bei Kerosin.

Ein Elektro-Airbus A320 mit 180 Sitzen benötigte auch mit Batterien der doppelten heutigen Energiedichte eine Batteriemasse von etwa 85 Tonnen für z.B. einen Flug von Zürich nach Oslo. Der heutige A320 hat beim Start total eine Masse von etwa 65 Tonnen! Der Realisierung von rein elektrischen, kommerziell betriebenen grösseren Flugzeugen steht also zurzeit die unter anderem geringe Energiedichte der Batterien im Weg.

Hybridantriebe im Test

Im Bereich der elektrischen Antriebe für grössere Flugzeuge sind Hybridantriebe in den kommenden Jahrzehnten am ehesten umsetzbar, und Entwicklungen werden von allen grösseren heutigen Triebwerkherstellern

verfolgt (General Electrics(GE) und Safran, Rolls-Royce, Pratt&Whitney, Honeywell).

Hybridkonzepte für Flugzeuge verwenden als Hauptenergiespeicher nach wie vor Kerosin und zusätzlich Batterien sowie bei seriellen Hybriden elektrisch angetriebene Turbinen. Mögliche Vorteile solcher Konzepte sind voraussichtlich ein etwas geringerer Treibstoffverbrauch, weniger Schadstoffemissionen, ein emissionsfreier Betrieb am Boden und weniger Lärm am Flughafen. Um Möglichkeiten und Grenzen genauer auszuloten, arbeiteten Airbus und Rolls-Royce bis Anfang 2020 an einem Hybrid-Antriebsstrang mit 2 MW Leistung (Projekt E-Fan X). Der Erstflug war für das Jahr 2021 geplant, das Projekt wurde aber gestoppt

Honeywell sieht in Hybridkonzepten bei kleinen Fluggeräten durchaus eine Zukunft. Allerdings zeigen ihre Analysen, dass Im Vergleich zu einem einmotorigen heutigen Helikopter bei einem Hybrid ähnlicher Grösse die Zuladung etwa auf die Hälfte sinkt, und bei einem rein elektrischen Gerät auf etwa einen Achtel. Honeywell und GE erwarten erste brauchbare Hybridflugzeuge deutlich nach 2030.

Wasserstoff als Antrieb der Zukunft?

Im Jahre 1988 baute der russische Flugzeughersteller Tupolev ein Flugzeug des

Typs TU-154 um, so dass es mit flüssigem Wasserstoff betrieben werden konnte (Bezeichnung TU-155). Der Flugzeughersteller Tupolev demonstrierte damit die prinzipielle Machbarkeit eines Wasserstoffflugzeuges in der Grösse eines Passagierjets.

Ein Kilogramm Wasserstoff enthält fast drei Mal so viel Energie wie ein Kilogramm Kerosin, jedoch ist das dafür benötigte Speichervolumen sehr gross. Die Speicherung bei sehr hohen Drücken (um 700 bar) kommt für Flugzeuge nicht in Frage, die Tanks wären für die benötigte Energiemenge viel zu gross und viel zu schwer. Die Speicherung in flüssiger Form – wie beim Einsatz in Welt- raumraketen – erfordert eine extrem niedrige Temperatur in isolierten Tanks (minus 253° C), das Speichervolumen ist dabei noch etwa vier Mal so gross wie bei der Verwendung von Kerosin. (Die TU-155 wurde so betrieben.) Sowohl die Bereitstellung, die Zwischen- speicherung und der Transport von flüssigem Wasserstoff wären mit hohem Energieaufwand verbunden. Zudem können bei der Speicherung über längere Zeit recht grosse Wasserstoffverluste auftreten.

Ein Elektroantrieb mittels Wasserstoff und Brennstoffzellen benötigt ebenfalls Batterien. Aufgrund des hohen Leistungsbedarfs grosser Flugzeuge und des Gewichts von benötigten Pufferbatterien fällt diese Variante bis auf weiteres weg.

Unklar ist bei der Wasserstoffvariante der Gesamteffekt auf das Klima, da bei der Wasserstoffverbrennung (ob in einer Brennstoffzelle oder in einer Gasturbine) zirka drei Mal so viel Wasserdampf entsteht, wie bei der Kerosinvariante, und verstärkte Wolkenbildung auf grosser Höhe nach heutigem Wissen insgesamt zu mehr Klimaerwärmung führt.

Weitere Informationen:

- Ausführlicher Beitrag zum Thema siehe https://www.ssm-studies.ch/fileadmin/pdf/SSM/Blogsammlung/Antriebstechnologien/200804_Auf_dem_Weg_zum_klimafreundlichen_Fliegen.pdf
- www.airbus.com → Innovation → Future technology → Electric flight → E-Fan X

Effizientere und sauberere Triebwerke

Die grossen Triebwerkshersteller legen den Schwerpunkt auf weitere Verbesserung der Triebwerke, vorab der Treibstoffeffizienz. Die Entwicklung der neuen Umweltnorm «Feinstaubstandard» hat auch Möglichkeiten eröffnet, russfreie Triebwerke zu konstruieren.

Um den Treibstoffverbrauch weiter zu senken, steigern die Triebwerkshersteller einerseits den thermodynamischen Wirkungsgrad, indem sie die Verdichtung der Verbrennungsluft noch mehr erhöhen, andererseits erhöhen sie den Propulsionswirkungsgrad, indem sie den Durchmesser des Fans bzw. Propellers möglichst vergrössern. Es ist zur Erzeugung des Schubs effizienter, mehr Luftmasse etwas langsamer zu bewegen, als eine kleine Luftmasse schneller.

Synthetische Treibstoffe fördern

Kerosin kann aus einer beliebigen Kohlenstoffquelle zusammen mit Wasserstoff und entsprechender erneuerbarer Prozessenergie synthetisch hergestellt werden. Als CO₂-neutrale Kohlenstoffquelle kommen Biomasse, Abfälle, CO₂-Abgase bzw. CO₂, welches der Luft entzogen wird, in Frage («Power to Liquid»). Eine weitere Möglichkeit besteht darin, Sonnenenergie direkt als gebündelte Wärme für die Gewinnung der Kerosinbausteine aus der Luft zu nutzen («Sun to Liquid»). «Power to Liquid» ist für die Produktion von Kerosin im industriellen Massstab schon weit entwickelt, wogegen «Sun to Liquid» noch in den Anfängen steckt. Diese Treibstoffe können ohne technische Änderungen an den bestehenden Flugzeugflotten direkt, mit bis zu 50% Anteil im getankten Kerosin verwendet werden. Hauptproblem sind bislang die hohen Kosten solcher Kerosinproduktionsarten.

Futuricum – elektrisch angetriebene schwere Nutzfahrzeuge

Duga Hoti, Produktmanager E-LKW, Designwerk Products AG

Die Designwerk Group entwickelt und vertreibt unter der Marke „Futuricum“ elektrisch angetriebene schwere Nutzfahrzeuge der Kategorie N3. Der Ursprung des heutigen Erfolges liegt

vier Jahre zurück. In Zusammenarbeit mit dem Bundesamt für Energie (BFE), der Volvo Trucks (Schweiz) AG und der Contena Ochsner AG wurde dabei das erste rein

elektrisch betriebene Wertstoffsammelfahrzeug entwickelt. Dies war Teil des Leuchtturmprojektes, welches das Ziel verfolgte, vier Prototypen zu realisieren und diese im Einsatz bei den Kunden zu testen und auszuwerten.

Die Auswertung der Prototypen zeigte, dass innerhalb von zwei Jahren über 100'000 km Laufleistung zurückgelegt wurde. Dabei wiesen die Fahrzeuge einen Durchschnittsverbrauch von 190 kWh/100 km auf. Das errechnete Dieseläquivalent ergibt schliesslich einen Verbrauchswert von 19.6 l/100km. Die vorherigen Dieselvarianten verbrauchten bei gleichen Strecken und Einsatzart über 90 l/100km im Schnitt. Durch den Wegfall des Dieselmotors sind bei den Kehrtraktoren die Fahrer, Belader und die umliegenden Anwohner zusätzlich deutlich geringeren Lärmmissionen ausgesetzt. Weiter konnte seit der Realisierung der ersten vier Prototypen das Anwendungsspektrum der elektrischen Nutzfahrzeuge von Futuricum stark diversifiziert werden. Noch vor Ende 2020 sollen beispielsweise vier elektrisch betriebene 40 t Betonmischer bei zwei grossen Baufirmen zum Einsatz kommen.

Das Herzstück der Entwicklung der Designwerk Group bilden dabei die Traktionsbatterien und das „Drivemodul“. Steht bei der Dieselvariante ein grosser und schwerer Dieselmotor für den Antrieb im Einsatz, werden bei Futuricum vier leichte und leistungsstarke Elektromotoren verwendet. Durch den Einsatz von vier Elektromotoren ergeben sich nebst der kompakten und leichten Bauweise noch weitere Vorteile. Der Kunde hat so die Möglichkeit, je nach Einsatzart seines Fahrzeuges, auf maximal zwei Elektromotoren zu verzichten und somit Gewicht und Kosten einzusparen. Gleichzeitig ergeben sich durch die Modularität Redundanzeffekte, welche einen Ausfall des Fahrzeuges verhindern. Dem Fahrer stehen so maximal 500 kW und 41'000 Nm an den Antriebsachsen zur Verfügung.

Die Systemspannung von Traktionsbatterie, Nebenantrieb und Drivemodul beträgt 400 V DC. Die Bordspannung für die Beleuchtung und Speisung der Steuergeräte erfolgt weiterhin über die herkömmlichen 24 V Batterien, welche über einen DC/DC Wandler von den Traktionsbatterien nachgeladen werden. Die Batteriepakete stammen ebenfalls von Designwerk und werden unter der Marke „Batteriewerk“ entwickelt und vertrieben. Diese werden auch Drittkunden für Elektrifizierungsprojekte verschiedenster Art angeboten.

Die ebenfalls modular aufgebauten Batteriepacks von Batteriewerk können, je nach Reichweitenbedarf, bis zu 900 kWh pro E-LKW verbaut werden. Eine Medium-Batterie mit 225 kWh wiegt 1770 kg. Das ist die herkömmliche Ausstattung der Kommunalfahrzeuge, die im Einsatz 200 km zurücklegen. Mit der bisherigen Weiterentwicklung der Zelltechnologie und dem Packaging im Batteriegehäuse konnte die Batteriekapazität bei gleichbleibendem Volumen um 65% gegenüber den ersten vier Leuchtturmfahrzeugen erhöht werden.

Die Gesetzesanpassung¹ erlaubt bei alternativen Antrieben die Kompensation des Mehrgewichts von bis zu maximal einer Tonne. Diese Anpassung soll Nutzlasteinbussen minimieren und somit den alternativen Antrieben den Markteinstieg erleichtern.

Während die grossen Hersteller erste Standardvarianten mit elektrischen Antrieben auf den Markt bringen, kann Futuricum durch die eigene Entwicklung jegliche Varianten im Spezialfahrzeugbau anbieten. Die Bestellungen im aktuellen Jahr belaufen sich auf 50 Fahrzeuge. Diese sollen bereits Ende 2020 im Einsatz stehen. Bis Ende 2021 sollen weitere 100 Fahrzeuge hinzukommen und den europäischen Raum ebenfalls erschliessen.

¹ Verordnung über die technischen Anforderungen an Strassenfahrzeuge VTS 741.41, Art. 95, Abs. 1bis <https://www.admin.ch/opc/de/classified-compilation/19950165/201902010000/741.41.pdf>

H2-LKW's – Die Zukunft hat begonnen

Thomas Walter, H2 Energy AG

Für die Dekarbonisierung des Strassenverkehrs werden elektrisch angetriebene Fahrzeuge der wesentliche Technologiebaustein sein. Dabei ist zu unterscheiden zwischen Fahrzeugen mit batterie-elektrischem sowie mit wasserstoff-elektrischem Antrieb. Beiden Antriebsarten dient ein elektrischer Motor als Antriebsaggregat. Damit sind beide Arten 'Elektrofahrzeuge'. Der wesentliche Unterschied ist, dass die Energiespeicherung einmal mittels Batterien und einmal mittels Wasserstoff stattfindet. Zur Erreichung der Dekarbonisierungsziele ist es aber entscheidend, dass der Strom zur Aufladung der Batterien als auch der Strom zur Produktion von Wasserstoff ausschliesslich aus erneuerbaren Quellen stammt.

Beide Antriebsarten werden sich zukünftig ergänzen. Für PKW-Anwendungen mit einer Reichweite im realen Verkehr von z. B. 200 km im Sommer und 150 km im Winter sind batterie-elektrische Antriebe kostenmässig im Vorteil. Wohingegen für Anwendungen mit hohem Energiebedarf wie z. B. LKW's oder auch Oberklasse-PKW, die lange Fahrstrecken mit relativ hoher Geschwindigkeit und gleichem Komfortniveau im Sommer wie im Winter bieten müssen, wasserstoff-elektrische Antriebe mit der resultierenden grösseren Nutzlast und der schnellen Betankung klar im Vorteil sind.

Die ersten serienmässigen H2-PKW's in der Schweiz wurden bereits vor fünf Jahren angeboten und konnten an der halb-öffentlichen Tankstelle der EMPA Dübendorf betankt werden. Im November 2016 wurde die erste öffentliche H2-Tankstelle in Hunzenschwil eröffnet und gleichzeitig der weltweit erste H2-LKW mit einem Gesamtgewicht von 34 t und einer Reichweite von 400 km sowie eine Flotte von H2-PKW's von Coop in Betrieb genommen. Für die Versorgung der Tankstelle in Hunzenschwil hat die Firma H2 Energy AG in Zusammenarbeit mit der Eniwa eine Wasserstoff-Produktionsanlage in Aarau auf dem Gelände des Wasserkraftwerks erstellt und produziert dort seit November 2016 erneuerbaren Wasserstoff.

Im anschliessenden Flottenbetrieb haben sich sowohl die H2-PKW's als auch der H2-LKW gut bewährt. Es hat sich sehr schnell gezeigt,

dass der H2-LKW für den Verteilerverkehr einen Diesel-LKW vollständig ersetzen kann. Die H2-Initiative von Coop hat bei anderen Verteiler- und Transportfirmen grosses Interesse an der Technologie geweckt. Mit dem Ziel ein H2-Tankstellennetz in der Schweiz aufzubauen und eine Flotte von H2-LKW's auf die Strasse zu bringen, wurde von Verteiler-, Transport- und Tankstellenbetreiber-Firmen im Jahr 2018 der 'Förderverein H2-Mobilität Schweiz' gegründet. Damit war die Basis gelegt, und es fehlte nur noch ein Lieferant für die H2-LKW's.

Die Hyundai Motor Company aus Korea hat die Chance erkannt und sich bereit erklärt solche H2-LKW's zu liefern. Mit Ihrer LKW-Sparte sowie ihrer innerhalb der letzten 20 Jahre entwickelten Brennstoffzellentechnologie ist Hyundai für solch eine Aufgabe prädestiniert. Im Jahr 2019 wurde mit der H2 Energy AG das Joint Venture 'Hyundai Hydrogen Mobility' gegründet. Die Firma wird bis im Jahr 2023 1'000 H2-LKW's beschaffen und in einem 'Pay-per-use-Modell' an Mitgliedsfirmen des H2-Fördervereins zur Verfügung stellen.



Die nächsten zehn H2-LKW's werden in Korea verladen (Quelle: Hyundai Hydrogen Mobility)

Entsprechend dem Wachstum der H2-Fahrzeugflotte muss natürlich auch die H2-Produktion und -Logistik entsprechend ausgebaut werden. Dazu wurde ebenfalls im Jahr 2019 von der H2 Energy AG die Firma 'Hydros spider' gegründet, an der mittlerweile auch Alpiq und Linde beteiligt sind. Mit der Inbetriebnahme der zusätzlichen H2-Produktionsanlage mit 2 MW Leistung in Niedergösgen im Februar 2020 wurde ein nächster Ausbauschritt erreicht, deren

Produktion für den Betrieb von etwa 50 H2-LKW's ausreichen wird. Nachdem am 7. Juli 2020 eine weitere H2-Tankstelle in St. Gallen eröffnet wurde, kommen bis Ende des laufenden Jahres noch ca. drei Tankstellen hinzu. Bis Ende 2023 wird es in der Schweiz zirka dreissig H2-Tankstellen geben.

Der erste Hyundai XCIENT Fuel Cell kam im Februar 2020 in der Schweiz an und wurde für die Validierung und Homologation verwendet. Ein nächstes Batch von zehn H2-LKW's ist am 26. August 2020 in der Schweiz eingetroffen. Ende des laufenden Jahres werden etwa fünfzig H2-LKW's in der Schweiz auf der Strasse sein. Bis 2023 werden insgesamt

eintausend und bis 2025 1'600 H2-LKW's auf Schweizer Strassen rollen und pro Einheit rund 55 t/a CO₂-Emissionen einsparen.

In Zusammenhang mit der ersten Flotte von H2-LKW's hat neben dem neuen Treibstoff 'Wasserstoff' auch ein anderer Sachverhalt eine sehr hohe Relevanz. Bei den Brennstoffzellensystemen, wie sie im H2-LKW zum Einsatz kommen, handelt es sich um Aggregate, die weitgehend identisch sind mit solchen in H2-PKW und in absehbarer Zeit in Zügen, Schiffen und Stationäranlagen. Damit wird die Vielfalt der Antriebsvarianten für verschiedene Anwendungen zukünftig deutlich reduziert werden.

Veranstaltungen und Termine

22. Sept. 2020 Zoom-Meeting im Rahmen der SSM-Technik-Forumsveranstaltungen
"CO₂-Gesetz als neue Herausforderung für die mobile Antriebstechnik"
Einladung per E-Mail an die SSM-Mitglieder folgt.
26. Januar 2021 SSM/SAE Switzerland Vortragstagung, Campus Sursee
(Terminverschiebung) «Die Welt hat kein Energieproblem. Wir haben ein CO₂-Problem!»
https://www.ssm-studies.ch/fileadmin/pdf/SSM/Vortragstagung_2020/200825_SSM-_und_SAE-Switzerland-Tagung_2020_-_Programmwurf.pdf