

SESAM



Folgenabschätzung zum Einsatz batteriebetriebener vollelektrifizierter Landmaschinen

Version 13 vom 7. Dezember 2015

**erstellt im Rahmen des Verbundprojektes
SESAM - Entwicklung eines vollelektrifizierten Traktors
Teilvorhaben Folgenabschätzung, Ergebnisverbreitung und
Managementunterstützung**

gefördert mit Mitteln des Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi)
unter dem Förderkennzeichen 01ME12124

Autoren:

Dr. Michael Stöhr, Sandra Giglmaier, Roland Berlet

B.A.U.M. Consult GmbH

Gotzinger Str. 48/50

81371 München

GERMANY

Tel: +49-89-18935-0

Fax: +49-89-18935-199

Email: m.stoehr@baumgroup.de

s.giglmaier@baumgroup.de

r.berlet@baumgroup.de

Partner-Website: www.baumgroup.de

Projekt-Website: www.sesam-project.de



B.A.U.M.

Hinweis

Diese Studie wird von B.A.U.M. Consult GmbH München/ Berlin im Rahmen des Teilvorhabens „Folgenabschätzung, Ergebnisverbreitung und Managementunterstützung zur Entwicklung eines vollelektrischen Traktors“ innerhalb des Verbundprojektes „SESAM – Entwicklung eines vollelektrifizierten Traktors“ erstellt.

Das Verbundprojekt SESAM wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) unter dem Förderkennzeichen 01ME12124 gefördert. Koordinator ist die John Deere GmbH & Co. KG, Mannheim, weitere Partner die Technische Universität Kaiserslautern und die B.A.U.M. Consult GmbH, München/ Berlin. Die Laufzeit des Projektes ist 36 Monate von 2013 bis 2015.

Die Studie „Folgenabschätzung zum Einsatz batterie-betriebener vollelektrischer Landmaschinen“ präsentiert die Ergebnisse des Arbeitspakets 10 (AP10), Erstellung einer Folgenabschätzung. Sie vorliegende Studien und sonstige Veröffentlichungen zusammen, setzt sie zueinander in Beziehung und stellt die darin publizierten Ergebnisse in einen Zusammenhang. Umfangreichere eigene Berechnungen, Modellierungen oder sonstige originäre Forschungsarbeiten sind nicht Gegenstand dieser Folgenabschätzung. Die Verantwortung für ihren Inhalt liegt bei den Autoren.

Bei der Erstellung der Studie wird darauf geachtet die jeweils aktuellsten Daten und Informationen zugrunde zu legen. Bei Informationen aus dem Internet wird in den Quellenangaben durch den Zusatz [abgerufen am ...] vermerkt, zu welchem Datum das letzte Mal überprüft wurde, ob die verwendete Information dort noch vorzufinden ist.

Inhaltsverzeichnis

Tabellenverzeichnis.....	5
Abbildungsverzeichnis.....	6
Abkürzungsverzeichnis.....	7
Kurzfassung.....	8
Abstract.....	9
1 ZUSAMMENFASSUNG.....	10
2 EINFÜHRUNG.....	14
2.1 Hintergrund.....	14
2.2 Das Verbundprojekt SESAM.....	17
2.3 Das Teilvorhaben Folgenabschätzung, Ergebnisverbreitung und Managementunterstützung.....	18
2.4 Ansatz und Aufbau der Folgenabschätzung.....	18
3 META-STUDIE ZU UMWELTAUSWIRKUNGEN (LCA).....	20
3.1 Methodisches Vorgehen.....	20
3.1.1 Festlegung von Ziel und Untersuchungsrahmen.....	21
3.1.2 Sachbilanz.....	23
3.1.3 Folgenabschätzung.....	24
3.1.4 Deutung.....	25
3.2 Life Cycle Assessment of Complex Heavy Duty Equipment.....	26
3.2.1 Ziel und Untersuchungsrahmen.....	26
3.2.2 Sachbilanz.....	27
3.2.3 Folgenabschätzung.....	27
3.2.4 Deutung.....	27
3.3 US-Environmental Protection Agency LCA on Li-ion batteries for electric vehicles (US-EPA Studie).....	28
3.3.1 Ziel und Untersuchungsrahmen.....	28
3.3.2 Sachbilanz.....	29
3.3.3 Folgenabschätzung.....	31
3.3.4 Deutung.....	33
3.4 Weitere Studien und Arbeitsergebnisse.....	34
3.4.1 Masterarbeit Olofsson/ Romare (2013).....	34
3.4.2 Instituts für Energie- und Umweltforschung (IFEU) Heidelberg GmbH.....	35
3.4.3 Förderschwerpunkt Modellregionen Elektromobilität.....	35
3.4.4 Comparative Life Cycle Environmental Assessment of different batteries.....	36
3.5 Einfluss von Wiederverwendung, -verwertung und Recycling.....	38
3.5.1 Forschungsprojekte zur Zweitverwendung von Li-Ionen-Traktionsbatterien.....	38
3.5.2 Untersuchungen des Öko-Institut zu Elektroschrott-Recycling allgemein.....	39
3.5.3 Ökobilanz LithoRec 2011.....	39
3.5.4 Batteriegesetz und existierende Rücknahmesysteme für Li-Ionen-Batterien.....	42

3.6	Sonstige Umweltauswirkungen der Vollelektrifizierung von Landmaschinen	43
3.7	Synthese der Ergebnisse von LCA-Studien	43
4	LÄRMMINDERUNG	46
4.1	Definition und rechtliche Einordnung	46
4.2	Ermittlung der Lärmimmission	47
4.3	Fazit arbeitsrechtliche Relevanz	49
4.4	Fazit umweltrechtliche Relevanz	50
4.5	Schlussfolgerungen mit Blick auf touristische ländliche Regionen	51
5	NETZINTEGRATION	52
5.1	Fragestellung und methodisches Vorgehen	52
5.2	Modellierung eines Viehhaltungsbetriebs mit PV-Anlage und SESAM-Traktor	52
5.2.1	Lastprofil eines Viehhaltungsbetrieb	52
5.2.2	PV-Anlage	55
5.2.3	SESAM-Traktor	55
5.3	Optimierte Ladestrategie zur Integration in elektrische Netze	57
5.4	Synthese der Ergebnisse zur Netzintegration	63
6	SONSTIGE ASPEKTE DER TECHNIKBEWERTUNG	64
6.1	Eigenschaften und Verfügbarkeit von Lithium	64
6.2	Eigenschaften von Lithium-Ionen-Batterien	70
6.2.1	Anforderungen an Energiespeicher für vollelektrische Landmaschinen	70
6.2.2	Volumetrische Energiedichte	71
6.2.3	Gravimetrische Energiedichte	74
6.2.4	Leistungsdichte	75
6.2.5	Leistungs- und energiespezifische Investitionskosten	75
6.2.6	Lebensdauer	75
6.2.7	Wirkungsgrad	76
6.2.8	Selbstentladung	77
6.3	Sicherheit von Li-Ionen-Batteriesystemen	77
6.4	Synthese der Ergebnisse zu sonstigen Aspekten der Technikbewertung	80
7	SCHLUSSFOLGERUNGEN	82
8	WEITERER UNTERSUCHUNGSBEDARF	85
	Literaturverzeichnis	86
	Glossar	88

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Immissionsrichtwerte für Immissionsorte außerhalb von Gebäuden	46
Tabelle 2: A-bewerteten Schalleistungspegel des SESAM-Traktors und gleichwertiger dieselbetriebener Traktoren	48
Tabelle 3: Produktionszahlen für PKW und Nutzfahrzeuge 1997-2013 (weltweit)	69
Tabelle 4: Kenndaten von Li-Ionen-Batterien und Dieselreferenzfall	72
Tabelle 5: Kurz-Checkliste des KIT für Li-Ionen-Heimspeicher	78
Tabelle 6: Energiedichte und Ladewirkungsgrad verschiedener Akkumulatortypen	89

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1	SESAM-Vision von JD einer nachhaltigen Energieversorgung im ländlichen Raum	14
Abb. 2	Generisches Prozessfluss-Diagramm für Li-Ionen-Batterien für Elektrofahrzeuge	30
Abb. 3	Relativer Einfluss der verschiedenen Lebenszyklusphasen auf einzelne Umweltindikatoren für die drei untersuchten Li-Ionen-Batterietypen für vollelektrische Fahrzeuge	32
Abb. 4	Prozessfluss-Diagramm für untersuchte Batterie-Typen	37
Abb. 5	Systemgrenze des LithoRec-Prozesses	40
Abb. 6	A-bewerteten Schalleistungspegel zur Einordnung	49
Abb. 7	Lastprofil L1 in kW eines Landwirtschaftsbetriebs mit Milchwirtschaft/ Nebenerwerbs-Tierzucht an Werktagen, normiert auf einen Jahresstromverbrauch von 1 MWh.	53
Abb. 8	Lastprofil L1 in kW eines Landwirtschaftsbetriebs mit Milchwirtschaft/ Nebenerwerbs-Tierzucht in den Sommermonaten (Zeitangaben dennoch in Winterzeit!), normiert auf einen Jahresstromverbrauch von 1 MWh.	54
Abb. 9	Leistungsflüsse in kW für Viehbetrieb mit 19,63 kW PV-Anlage und SESAM-Traktor	57
Abb. 10	Leistungsflüsse in kW für Viehbetrieb nur mit 19,63 kW PV-Anlage	58
Abb. 11	Leistungsflüsse in kW für Viehbetrieb mit 50 kW PV-Anlage und SESAM-Traktor	59
Abb. 12	Leistungsflüsse in kW für Viehbetrieb nur mit 50 kW PV-Anlage	60
Abb. 13	Leistungsflüsse in kW für Viehbetrieb mit 100 kW PV-Anlage und SESAM-Traktor	61
Abb. 14	Leistungsflüsse in kW für Viehbetrieb nur mit 100 kW PV-Anlage	62
Abb. 15	Das Li ⁺ -Ion ist klein, weil nur das 1s-Orbital besetzt ist.	65
Abb. 16	Häufigkeit der Elemente in der Erdkruste	66
Abb. 17	Energie- und Leistungsdichte von Energiespeichern für Strom, Wärme und Gas	90
Abb. 18	Energiespeicher und -netze für Strom, Wärme und Gas	99
Abb. 19	PV-Stromgestehungskosten (ct/kWh) in Abhängigkeit von der Kapitalverzinsung	110

Abkürzungsverzeichnis

ADP	abiotic resource depletion (Verbrauch fossiler und mineralischer Ressourcen)
AP	acidification potential (Versauerungspotenzial)
BattG	Batteriegelgesetz
BDEW	Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V.
BCMB	B.A.U.M. Consult GmbH, München/Berlin
BHKW	Blockheizkraftwerk
LCE	Lithiumcarbonat-Äquivalent
EcoTP	ecological toxicity potential (Ökotoxizitätspotenzial)
EE	<u>Erneuerbare Energien</u>
EEG	<u>Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.</u>
EEG 2012	Die rückwirkend zum 1. April 2012 derzeit geltende Fassung des EEG ¹
EP	eutrophication potential (Eutrophizierungspotenzial)
EV	electric vehicle (elektrisches Fahrzeug/ Elektrofahrzeug)
EWE	Energieversorgung Weser-Ems
GWP	global warming potential (Treibhauspotenzial)
HTP	human toxicity potential (Humantoxizitätspotenzial)
ISO	International Organisation for Standardisation (Internationale Organisation für Normung)
ISE	Fraunhofer-Institut für Solare Energie-Systeme, Freiburg
IWES	Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik, Kassel
KIT	Karlsruher Institut für Technologie
LCA	life-cycle assessment (Ökobilanz)
LFP	Lithium-Eisen-Phosphat, LiFePO ₄
Li-Ion	Lithium-Ionen
NiMH	nickel metal hydrid (Nickel-Metallhydrid)
NMC	Nickel-Mangan-Kobalt, Li ₃ NiMnCoO ₆
OCH	occupational cancer hazard (berufliches Krebsrisiko)
ODP	ozone depletion potential (Ozonabbaupotenzial)
OnCH	occupational non-cancer hazard (sonstige berufliche Risiken)
POP	photochemical oxidation potential (photo-chemisches Ozonbildungspotenzial)
SESAM	Sustainable Energy Supply for Agricultural Machinery
US-EPA	United States Environmental Protection Agency
VDI	Verein Deutscher Ingenieure

¹ „Gesetz zur Änderung des Rechtsrahmens für Strom aus solarer Strahlungsenergie und zu weiteren Änderungen im Recht der erneuerbaren Energien“ vom 17. August 2012 in der am 23. August 2012 im Bundesgesetzblatt (BGBl. I S. 1754) veröffentlichten Fassung.

Kurzfassung

Im Rahmen des Verbundprojektes „SESAM – Entwicklung eines vollelektrifizierten Traktors“ wurde eine Folgenabschätzung erstellt, die Antworten auf folgende Fragen gibt:

1. **Wird netto eine Verringerung der Treibhausgasemissionen und der in die Atmosphäre abgegebene Schadstoffe erreicht, wenn außer dem Betrieb der Maschine auch die durch die Produktion zentraler Komponenten (Li-Ionen Batterie etc.) bedingten Emissionen berücksichtigt werden?**

Antwort: Verglichen mit diesel-getriebenen Maschinen ja, vorausgesetzt, die elektrische Energie stammt aus erneuerbaren Quellen.

2. **Wie hoch ist die Verringerung der Lärmemissionen und wie ist diese Verringerung mit Blick auf touristische ländliche Regionen zu bewerten?**

Antwort: Die Verringerung ist bedeutend, wenngleich ohne direkte arbeitsschutzrechtliche und umweltrechtliche Konsequenzen, erlaubt aber, dass vollelektrische Landmaschinen nachts und zu Ruhezeiten an Stellen zum Einsatz kommen können, an denen es ihnen bislang verwehrt ist, zum Beispiel bei Ortsdurchfahren.

3. **Kann die Vermutung untermauert werden, dass vollelektrische Landmaschinen die Integration Erneuerbarer Energien in elektrische Netze erleichtern?**

Antwort: Ja, im Fall batterie-getriebener Landmaschinen sofern die Batterie dann geladen wird, wenn die Stromerzeugung aus erneuerbaren Quellen hoch ist. Umgekehrt muss gesagt werden: eine vollelektrische batterie-betriebene Landmaschine belastet tendenziell das Netz zur allgemeinen Versorgung. Diese Belastung kann durch die Kombination mit einer Anlage zur Erzeugung von elektrischer Energie aus erneuerbaren Quellen kompensiert werden. Optimal ist die Kombination mit einer PV-Anlage, deren Nennleistung ähnlich hoch ist, wie die Ladeleistung der Batterie.

4. **Welche sonstigen Folgen können qualitativ beschrieben werden?**

Antwort: Vollelektrische batterie-betriebene Landmaschinen können als sicher und gut bedienbar betrachtet werden, und die für die Batterien benötigten Lithium-Reserven sind ausreichend hoch. Ihre Praxistauglichkeit wird jedoch dadurch eingeschränkt, dass ihre maximale Betriebszeit zwischen zwei Ladevorgängen deutlich kürzer ist als die äquivalenter diesel-betriebener Landmaschinen zwischen zwei Tankvorgängen. Dies schränkt das Einsatzgebiet im Wesentlichen auf viehhaltende Betriebe ein. Gerade dort ist jedoch der Beitrag zur besseren Netzintegration Erneuerbarer Energien besonders hoch.

Abstract

Within the cooperation project “SESAM – Development of a Fully Electrified Tractor“ an impact assessment has been made which provides answers to the following questions:

1. **Does full electrification of agricultural machinery reduce climate gas emissions taking into account not only the operation of the machinery, but also the production of key components, in particular of lithium-ion batteries?**

Answer: Yes, provided the electric energy for the machine drive is generated from renewable sources.

2. **How important is the reduction of noise emissions and how can this be judged with regard to rural touristic areas?**

Answer: The reduction is significant, but without direct consequences with regard to occupational safety and environmental regulations. However, the lower noise emissions allow agricultural machinery to be used at night and during rest periods at places where this is not possible at present, e.g. when driving through villages.

3. **Can the assumption be substantiated that fully electrified agricultural machinery facilitates the integration of renewable energy into electric grids?**

Answer: Yes, in the case of battery-powered machinery if the battery is charged when the electricity generation from renewable sources is high. Vice-versa it can be said that fully electrified agricultural machinery has the tendency to be an additional burden to the grid. This can be relieved by combining it with installations generating electric energy from renewable sources. The optimum combination is with a PV plant whose nominal power is approximately equal to the battery's charging power.

4. **Which other impacts can be described qualitatively?**

Answer: Fully electrified battery-powered agricultural machinery can be considered to be safe and easy to handle. The lithium reserves needed for the battery production are sufficient. The practical suitability is reduced compared to diesel-powered machinery because the maximum operation time between two battery charges is much less than the maximum operation time of diesel-powered machinery between two tank fillings. This limits the potential field of application to cattle-breeding farms. However, the contribution to better integration of renewable energies into the grid is particularly high on such farms.

1 Zusammenfassung

Diese Meta-Studie ist ein Arbeitsergebnis des Teilvorhabens „Folgenabschätzung, Ergebnisverbreitung und Managementunterstützung zur Entwicklung eines vollelektrischen Traktors“, das die B.A.U.M. Consult GmbH München/ Berlin (BCMB) im Rahmen des Verbundprojektes SESAM – Entwicklung eines vollelektrifizierten Traktors“ bearbeitet. Die Folgenabschätzung soll Erkenntnisse zu folgenden Fragen erbringen:

1. Wird netto eine Verringerung der Treibhausgasemissionen und der in die Atmosphäre abgegebene Schadstoffe erreicht, wenn außer dem Betrieb der Maschine auch die durch die Produktion zentraler Komponenten (Li-Ionen Batterie etc.) bedingten Emissionen berücksichtigt werden?
2. Wie hoch ist die Verringerung der Lärmemissionen und wie ist diese Verringerung mit Blick auf touristische ländliche Regionen zu bewerten?
3. Kann die Vermutung untermauert werden, dass vollelektrische Landmaschinen die Integration Erneuerbarer Energien in elektrische Netze erleichtern?
4. Welche sonstigen Folgen können qualitativ beschrieben werden?

Im Wesentlichen lauten die Antworten auf diese Fragen:

1. Ja, vorausgesetzt, die elektrische Energie stammt aus erneuerbaren Quellen.
2. Die Verringerung ist bedeutend, wenngleich ohne direkte arbeitsschutzrechtliche und umweltrechtliche Konsequenzen, erlaubt aber, dass vollelektrische Landmaschinen nachts und zu Ruhezeiten an Stellen zum Einsatz kommen können, an denen es ihnen bislang verwehrt ist, zum Beispiel bei Ortsdurchfahren.
3. Ja, sofern die Batterie dann geladen wird, wenn die Stromerzeugung aus erneuerbaren Quellen hoch ist. Optimal ist die Kombination mit einer PV-Anlage, deren Nennleistung ähnlich hoch ist, wie die Ladeleistung der Batterie.
4. Vollelektrische batterie-betriebene Landmaschinen können als sicher und gut bedienbar betrachtet werden, und die für die Batterien benötigten Lithium-Reserven sind ausreichend hoch. Ihre Praxistauglichkeit wird jedoch dadurch eingeschränkt, dass ihre maximale Betriebszeit zwischen zwei Ladevorgängen deutlich kürzer ist als die äquivalenter diesel-betriebener Landmaschinen zwischen zwei Tankvorgängen. Dies schränkt das Einsatzgebiet im Wesentlichen auf viehhaltende Betriebe ein. Gerade dort ist jedoch der Beitrag zur besseren Netzintegration Erneuerbarer Energien besonders hoch.

Die zur ersten Frage behandelten Aspekte fallen in den Bereich der Umweltfolgenabschätzung beziehungsweise Ökobilanzierung, die zu den Fragen 2 bis 4 behandelten in den Bereich der Technikfolgenabschätzung oder Technikbewertung. Im Detail können folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:

Potenzial

- Elektrische Landmaschinen bieten im Vergleich zu dieselbetriebenen Landmaschinen mit Verbrennungsmotor, die fossile Energieträger nutzen, großes Potenzial, die Umweltauswirkungen zu senken. Damit dieses Potenzial ausgeschöpft wird, muss die

Energie für elektrische Landmaschinen jedoch so weit wie möglich aus erneuerbaren Quellen bereitgestellt werden.

- Li-Ionen-Batterien für vollelektrische Landmaschinen haben im Vergleich zu Nickel-Metallhydrid und NMC-Batterien die geringsten Umweltauswirkungen. Im Vergleich zu anderen Energiespeichern, ausgenommen chemischen Energiespeichern, haben sie die größte Energiedichte, was sie für mobile Anwendungen prädestiniert.
- Lithium ist weltweit in ausreichender Menge verfügbar, selbst wenn der gesamte Transportsektor auf elektrische Antriebe umgestellt wird. Entscheidend dafür ist jedoch eine hohe Wiedergewinnungsquote von Lithium durch Recycling von mindestens 60% ab Mitte der 2020er Jahre.

Praxistauglichkeit

- Landmaschinen mit elektrischen Antrieben, die Energie in mitgeführten Li-Ionen-Batterien speichern, können als sicher betrachtet werden, wenn die aktuellen Sicherheitsvorschriften auf allen Ebenen eingehalten werden. Dazu gehört mindestens, dass ein UN38.3-Sicherheitszertifikat vorliegt.
- Landmaschinen mit elektrischen Antrieben, die Energie in mitgeführten Li-Ionen-Batterien speichern, haben eine mindestens 4-8mal geringere maximale Betriebszeit zwischen zwei Ladevorgängen als vergleichbare dieselbetriebene Landmaschinen bei gleichen Arbeitsvorgängen zwischen zwei Tankvorgängen. Dies liegt an der spezifischen Energiedichte von Li-Ionen-Batterien, die auch durch weitere technische Entwicklung nur begrenzt erhöht werden kann. Diese im Vergleich zu Dieseldieselkraftstoff niedrige spezifische Energiedichte schränkt die Praxistauglichkeit batteriebetriebener vollelektrischer Landmaschinen deutlich ein und reduziert ihren Anwendungsbereich auf Arbeiten mit kleinem Leistungs- und Energiebedarf in der Nähe von Batterieladestationen, also zum Beispiel auf dem Hof. Dies beschränkt den Anwendungsbe- reich de facto auf viehhaltende Betriebe.
- Vollelektrische Landmaschinen benötigen keinen Motorölwechsel. Das erspart diese Tätigkeit, die damit verbundenen Kosten, und senkt das Risiko von Öleinträgen in Boden, Gewässer und Grundwasser.

Empfehlungen für den Einsatz auf landwirtschaftlichen Betrieben

- Es ist aus ökologischen, betriebsökonomischen und Ressourcengründen wichtig, dass die in vollelektrischen Landmaschinen verwendeten Li-Ionen-Batterien eine möglichst lange Lebensdauer erreichen und während ihrer Lebensdauer möglichst umfassend genutzt werden.
- Die Batterie sollte möglichst parallel zu ihrem Einsatz als Energiespeicher in einer elektrischen Landmaschine und nach Unterschreiten der dafür erforderlichen Mindestkapazität (vergleichbar mit den im Automobilbereich angesetzten mindestens 80 %) noch für weitere Zwecke dienen. Dies senkt die Umweltauswirkungen für die Nutzung in der Landmaschine dank der Allokation auf verschiedene Dienstleistungen. Da eine Landmaschine üblicherweise nur den kleineren Teil der Stunden eines Jahres in Betrieb ist, kann sie zum Beispiel in der restlichen Zeit als stationärer Puffer für elektrische Energie an das Netz zur allgemeinen Versorgung angeschlossen werden. Ist ihre Restkapazität so weit abgesunken, dass sie als Traktionsbatterie nicht mehr

verwendet werden kann, kann sie ganzjährig noch einige Zeit stationär verwendet werden.

Empfehlungen an Hersteller von batterieelektrischen Landmaschinen

- Es ist für eine hohe Recyclingquote und dadurch verringerte Umweltauswirkungen wünschenswert, dass durchgängige Geschäftsbeziehungen, möglichst industrieller Akteure, über den gesamten Lebenszyklus eines Produkts bestehen. Daraus kann die Empfehlung abgeleitet werden, dass ein Hersteller von batteriebetriebenen Landmaschinen entweder alleine oder mittels Kooperationen, Strukturen zur Wiederverwendung und –verwertung sowie dem Recycling für Batterien und elektronische Komponenten aufbaut oder vorhandene Strukturen erweitert und optimiert, um eine hohe Rücklaufquote für wertvolle Grund- und Rohstoffe zu ermöglichen.
- Als Maßnahmen zur Erhöhung der Lebensdauer der Batterien sollten unter anderem folgende erwogen werden:
 - Vermeidung von Über- und Tiefentladungen durch entsprechende Steuerstrategien;
 - Ergänzung der Batterie um einen parallel geschalteten Kurzzeitspeicher, der Mikrozyklen und starke Lastwechsel sowie hohe Be- und Entladeströme vermeiden hilft, idealerweise durch einen Kondensator mit ultra-hoher Kapazität; unter Umständen reichen dazu bereits die am Eingang von Wandlern üblicherweise vorhandenen Kondensatoren
 - Installation der erforderlichen Schnittstellen für die Zweitnutzung der Batterien als stationäre Energiespeicher in Zeiten, in denen die Landmaschine nicht für landwirtschaftliche Tätigkeiten zum Einsatz kommt.

Netzintegration batteriebetriebener Landmaschinen und Erneuerbarer Energien

- Vollelektrische batteriebetriebene Landmaschinen sind in erster Linie für viehhaltende Betriebe geeignet. Diese, insbesondere solche mit Milchviehhaltung, haben ein Lastprofil, das im Gegensatz zu allen anderen Verbrauchern das elektrische Netz sehr schlecht ausnutzt, da es durch zwei sehr ausgeprägte Leistungsspitzen am Morgen und am Abend geprägt ist. Es stellt sich darum nicht nur die Frage nach der Netzintegration batteriebetriebener Landmaschinen und Erneuerbarer Energien, sondern auch schon die nach der Verbesserung der Netzintegration von Milchviehbetrieben im Sinne einer besseren Ausnutzung der Netzkapazität.
- Eine batteriebetriebene Landmaschine stellt eine zusätzliche Last da, die nicht per se die Netzbelastung senkt.
- Die Last durch das Laden der Batterie beträgt bis zum Dreifachen des durchschnittlichen Leistungsbezugs eines Viehhaltungsbetriebs. Sie ist umso höher und belastet das Netz umso stärker, je höher die Ladeleistung ist, das heißt praktisch, je schneller die Ladung erfolgt.
- Eine nächtliche Ladung der Batterie über einen Zeitraum von etwa acht Stunden führt zu einer besseren Ausnutzung des Netzes und führt nicht dazu, dass dieses verstärkt werden muss.
- Eine schnelle Ladung am Tag, selbst zur Zeit des Lastminimums am Nachmittag führt jedoch zu einer deutlich stärkeren Belastung des Netzes und kann eine Netzverstärkung erforderlich machen.

- Die Auswirkungen einer PV-Anlage auf das Netz sind im Wesentlichen gegenläufig zu denen eines am Nachmittag geladenen SESAM-Traktors und die negativen Effekte auf das Netz kompensieren sich.
- Optimal ist die Kombination einer 50 kW PV-Anlage mit einem SESAM-Traktor, dessen maximale Batterieladeleistung ebenfalls 50 kW beträgt, für die Nutzung des Netzes zur allgemeinen Versorgung in einer Vielzahl von Fällen.
- Bei einer etwas größeren PV-Anlage weichen die Effekte nur gering vom Optimum ab, bei einer kleineren sehr stark.
- In Gebieten, in denen der Leistungsbezug durch Milchviehhaltungsbetriebe dominiert, wird das Netz gleichmäßiger und damit effizienter genutzt. In Gebieten mit hoher Einspeisung elektrischer Leistung aus PV-Anlagen wird diese signifikant verringert, wodurch insgesamt mehr PV-Anlagen betrieben werden können, ohne dass die Erzeugungsleistung aufgrund von Netzengpässen gedrosselt werden muss.

Weiterer Untersuchungsbedarf

Folgender weiterer Untersuchungsbedarf konnte identifiziert werden:

- Es bedarf noch einer LCA-Analyse einer konkreten elektrischen Landmaschine von der Gewinnung der Rohstoffe bis zum Recycling der Materialien.
- Die maximale Nutzungsdauer einer Landmaschine zwischen zwei Ladevorgängen muss für verschiedene Arbeitsgänge noch mittels Feldmessungen genauer untersucht werden.
- Die Erhöhung des Fahrzeuggewichts durch die Batterien führt bei Bussen zu einem ähnlich hohen zusätzlichen Primärenergieverbrauch - und bei einem überwiegend fossilen Strom-Mix auch zu einem ähnlich hohen zusätzlichen Treibhauspotenzial - in der Nutzungsphase wie die Herstellung der Batterien. Es sollte bei einer LCA-Analyse einer konkreten Landmaschine untersucht werden, ob dieser Effekt bei diesen auch zum Tragen kommt.
- Die Reduzierung der Lärmemissionen durch die Elektrifizierung von Landmaschinen ist signifikant, bedarf aber noch genauerer Messungen.
- Erneuerbare Energien könnten in ländlichen Gebieten deutlich stärker genutzt werden, wenn in größerem Umfang elektrifizierte Landmaschinen zum Einsatz kommen, deren Batterien die erzeugte elektrische Energie vor Ort verbrauchen oder zwischenspeichern. Zu untersuchen wäre genauer, welche Pufferfunktion elektrifizierte Landmaschinen oder ergänzende stationäre Speicher, die am Netz zur allgemeinen Versorgung angeschlossen sind, einnehmen können.
- Die Einschränkung der Praxistauglichkeit vollelektrischer Landmaschinen mit Batteriespeicher aufgrund der geringeren maximalen Betriebszeit bedarf einer genaueren Betrachtung.

2 Einführung

2.1 Hintergrund

Diese Meta-Studie zur Folgenabschätzung batterie-betriebener vollelektrischer Landmaschinen wird im Rahmen des Verbundprojekts „SESAM – Entwicklung eines vollelektrischen Traktors“ erstellt. Dieses fügt sich in eine Reihe von Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten der John Deere GmbH & Co. KG (JD) ein, die das Ziel haben, die Vision „Sustainable Energy Supply for Agricultural Machinery (SESAM) zu konkretisieren und zu verwirklichen. Die SESAM-Vision sieht landwirtschaftliche Betriebe als zentrale Akteure und landwirtschaftliche Maschinen als Komponenten einer nachhaltigen Energieversorgung im ländlichen Raum. Diese Vision ist in Abb. 1 illustriert.



Die Motivation für die SESAM-Vision gründet in folgenden Erkenntnissen und Entwicklungen:

Landtechnik

- **Landwirtschaftliche Maschinen mit elektrischen Antrieben können eine deutlich höhere Präzision erzielen als solche mit einem Verbrennungsmotor.** Dies ermöglicht, das Potenzial von Precision-Farming besser auszuschöpfen, Betriebsmittel (Dünger, Pflanzenschutzmittel, Maschinen u.a.) effizienter einzusetzen und somit Umweltauflagen leichter zu genügen als auch die Betriebskosten landwirtschaftlicher Betriebe zu senken.
- **Speziell die Auflagen zur Abgasreinigung von Verbrennungsantrieben lassen sich nur noch mit einem sehr hohen Aufwand erfüllen.**

Technisches Potenzial Erneuerbarer Energien in der Landwirtschaft

- Landwirtschaftliche Betriebe haben ein besonders hohes Potenzial zur eigenen Erzeugung von elektrischer Energie aus erneuerbaren Quellen. Neben den Flächen für PV- und Windkraftanlagen verfügen sie insbesondere auch über die Möglichkeit der Biogaserzeugung aus eigenen Anbau- und Abfallprodukten und der Produktion von Pflanzenölkraftstoffen, was ihnen ermöglicht, eine Eigendeckung (zeitsynchron) ihres Strombedarfs aus Erneuerbare Energien zu realisieren, sprich Leistungsautarkie zu erreichen.

Kostendegression von Strom aus Erneuerbaren Energien

- Die Stromgestehungskosten von neuen PV-Anlagen in Deutschland liegen im Jahr 2015 für einen gewichteten durchschnittlichen Kapitalzins von 5% zwischen 6,9 und 10,4 ct/kWh (USA: 4,3-6,9 ct/kWh), im Jahr 2025 werden Kosten zwischen 5,1 und 8,3 ct/kWh prognostiziert (USA: 3,2-5,5 kWh).² Sie sind damit u.a. laut (ISE, 2015) innerhalb weniger Jahre um 80 % gefallen. Ein Ende der Preisdegression ist nicht in Sicht, zumal es regelmäßig zu Entwicklungssprüngen durch neue Materialien, Konzepte oder Produktionsverfahren kommt. Genannt seien hier beispielhaft der neue Wirkungsgradrekord des Fraunhofer-Instituts für Solare Energie-Systeme (ISE) für Silizium-Solarzellen von 25,1 %³, die Fortschritte bei der Entwicklung von Perowskit-Solarzellen⁴ und das neuartige Wechselrichterkonzept des israelischen Herstellers Solaredge, das kleinere elektrische Bauteile und dadurch Materialeinsparungen ermöglicht⁵.

² Berechnet mit Calculator of Levelized Cost of Electricity for Photovoltaics von Agora Energiewende; <http://www.agora-energiewende.de/de/themen/-agothem-/Produkt/produkt/89/Calculator+of+Levelized+Cost+of+Electricity+for+Photovoltaics/> [abgerufen am 15. September 2015]

³ TOPCon-Technologie ermöglicht 25,1 Prozent Wirkungsgrad, Presseinformation des ISE vom 15.9.2015; <https://www.ise.fraunhofer.de/de/presse-und-medien/presseinformationen/presseinformationen-2015/fraunhofer-ise-erzielt-neuen-weltrekord-fuer-beidseitig-kontaktierte-siliciumsolarzellen> [abgerufen am 15. September 2015]

⁴ http://www.pv-magazine.de/nachrichten/details/beitrag/forscher-hoffen-auf-durchbruch-mit-perowskit-modulen_100015326/ [abgerufen am 15. September 2015]

⁵ Solaredge: Evolutionssprung vergleichbar der Einführung der Flachbildschirme; http://www.pv-magazine.de/nachrichten/details/beitrag/solaredge--evolutionssprung-vergleichbar-der-einfuhrung-der-flachbildschirme_100020472/ [abgerufen am 15. September 2015]

- Die Stromgestehungskosten von neuen Windkraftanlagen an Land lagen in Deutschland im Jahr 2013 bei 4,5-10,9 ct/kWh. Eine weitere Preisdegression wird vorhergesagt, doch ist diese nur moderat im Vergleich zu PV-Anlagen.⁶
- Damit liegen die **Kosten für selbst erzeugten und selbst verbrauchten Strom aus PV- und Windkraftanlagen deutlich unter den üblichen Strombezugskosten für landwirtschaftliche Betriebe** von ca. 22 ct/kWh netto⁷. Der finanzielle Vorteil für den Landwirt wird durch die verminderte EEG-Umlage auf Eigenverbrauch leicht verringert. Diese beträgt aktuell 30 % der vollen EEG-Umlage⁸, also 1,852 ct/kWh im Jahr 2015⁹. Ab 1. Januar 2017 beträgt sie 40 % der dann geltenden vollen EEG-Umlage. Nichtsdestotrotz verbleibt ein hinreichender Abstand zwischen den Kosten der Eigenherzeugung von Strom und dem Preis für Strombezug aus dem Netz.
- Bei Biogasanlagen hängen die Stromgestehungskosten stark von den Substratpreisen ab, liegen nach (ISE, Stromgestehungskosten Erneuerbarer Energien, 2014) mit Werten zwischen 13,5 und 21,5 ct/kWh aber unter 22 ct/kWh. Mithin ist auch die Eigendeckung (zeitsynchron) des Strombedarfs landwirtschaftlicher Betriebe aus Biogas gegenwärtig i.d.R. betriebswirtschaftlich attraktiv.

Verfügbarkeit von Energiespeichern

- Die Stromgestehungskosten von PV-Anlagen mit integriertem Lithium-Ionen-Batteriespeicher (Li-Ionen-Batteriespeicher) liegen ab Juni 2014 für das günstigste System bei 20 ct/kWh¹⁰, ab Juni 2015 bei 17ct/kWh¹¹. Mithin ist auch der Einsatz einer Li-Ionen-Batterie zur Optimierung der Eigendeckung des Strombedarfs landwirtschaftlicher Betriebe bei günstiger Systemauslegung bereits betriebswirtschaftlich attraktiv. Es konnten aber nicht nur in den vergangenen Jahren rasante Preisreduzierungen dank der anlaufenden Massenproduktion und verbesserter Produktionstechniken erzielt werden.¹² Verschiedene Prognosen, z.B. in (Thielmann, Sauer,

⁶ Windkraft und Photovoltaik günstiger als Kohle, neue energie;

<http://www.neueenergie.net/wissen/technologien/windkraft-und-photovoltaik-guenstiger-als-kohle> [abgerufen am 15. September 2015]

⁷ Der Preisrechner von AGRAVIS Raiffeisen AG berechnet z.B. für Gewerbestrom für den Standort des Hofguts Neumühle in der Westpfalz einen Arbeitspreis von 22,15 ct/kWh und eine Grundgebühr von 50,42 €/Jahr, <http://www.agravis.de/de/energie/strom/index.html> [abgerufen am 17. September 2015]; der Stromrechner des Strom-Magazins weist für den gleichen Standort als günstigsten Arbeitspreis 20,07 ct/kWh aus, <http://www.strom-magazin.de/gewerbestrom/> [abgerufen am 17. September 2015]; unbelegt, aber nicht unwahrscheinlich sind Hinweise von Experten, dass Landwirte teilweise individuelle Verträge mit deutlich niedrigeren Preisen aushandeln, doch auch bei z.B. 15-19 ct/kWh netto liegt der Bezugspreis für Strom noch immer deutlich über den Stromgestehungskosten von PV- und Windkraftanlagen, <http://www.top50-solar.de/experten-forum-energiewende/7389/wie-hoch-ist-aktuell-der-durchschnittliche-strompreis-den-landwirte-bezahlen> [abgerufen am 17. September 2015]

⁸ Gesetz zur grundlegenden Reform des Erneuerbare-Energien-Gesetzes und zur Änderung weiterer Bestimmungen des Energiewirtschaftsrechts vom 21. Juli 2014 (EEG 2014), §61 (1)

⁹ <http://www.top50-solar.de/experten-forum-energiewende/5638/zur-eeg-umlagepflicht-auf-eigenverbrauchten-solarstrom?show=5638#q5638> [abgerufen am 16. September 2015]

¹⁰ Mitteilung des PV-Batterie-Systemanbieters Sonnenbatterie, Wildpoltsried;

<http://www.sonnenbatterie.de/strom-energie-speicher/home/>, zum Basis-System (4,5 kWh nominale, 3,5 kWh nutzbare Batteriekapazität) der vierten Produktgeneration auf der Intersolar 2014. Die Kosten des Speichersystems wurden gegenüber der dritten Produktgeneration vor allem durch vermehrte Verwendung von Standard-Komponenten halbiert.

¹¹ Information von Sonnenbatterie auf dem Stand der Intersolar/EES 2015.

¹² Von Juni 2014 bis Juni 2015 sanken die Kosten für Batteriespeichersysteme für PV-Anlagen um 25 %,

Ißenmann, Wietschel, & Plötz, 2012), sagen weitere starke Preissenkungen bis 2020 beziehungsweise 2030 voraus. Dadurch **vergrößert sich sehr schnell die betriebswirtschaftliche Attraktivität für Landwirte auch große Anteile aus Erneuerbare Energien erzeugten Stroms mit Hilfe von Energiespeichern selbst zu nutzen.**

- Die Stromgestehungskosten von Pflanzenöl-BHKW wurden in (DLR, IWES, & IFNE, 2010) für 2015 auf 25,1 ct/kWh, 22,0 ct/kWh und 18,1 ct/kWh für BHKW < 10 kW, < 150 kW beziehungsweise < 500 kW prognostiziert. Sie hängen sehr stark vom aktuellen Marktpreis für Pflanzenöl ab. Ihr Einsatz zur Eigenstromerzeugung ist folglich für Landwirte nur dann attraktiv, wenn damit primär ein Wärmebedarf gedeckt und/oder das Pflanzenöl-BHKW als regelbarer Generator im Verbund mit anderen Erzeugungsanlagen zur bedarfsgerechten Erzeugung genutzt wird.

Zur Verwirklichung der SESAM-Vision beabsichtigt JD, im Laufe der nächsten Jahre Traktoren und gegebenenfalls weitere Geräte mit großen Batterien zu entwickeln. Dabei werden zunächst kleinere Verbrauchsgeräte im Traktor, dann Anbaugeräte und schließlich der gesamte Traktor mit Anbaugerät elektrisch versorgt. Das mittel- bis langfristige Ziel ist, eine Smart Farm komplett mit JD-Technologie ausrüsten zu können. Das Verbundvorhaben SESAM setzt auf diesen Vorüberlegungen auf und ist ein Baustein zur Umsetzung der SESAM-Vision von JD.

2.2 Das Verbundprojekt SESAM

Im Verbundprojekt SESAM wird eine vollständig mit elektrischer Energie versorgte Landmaschine entwickelt. Hierbei werden zwei Möglichkeiten verfolgt: Bei einer Variante wird ein Traktor durch eine mitgeführte Batterie mit elektrischer Energie versorgt, bei der anderen durch eine elektrische Leitung, welche eine Verbindung des Traktors mit dem Stromnetz herstellt. Der batteriebetriebene Traktor wird als Prototyp gebaut. Alle seine wichtigen Funktionen werden getestet und grundlegende Aussagen über die Einsatzmöglichkeiten, Einschränkungen und Chancen dieses Traktorkonzepts abgeleitet. Er baut auf der 6000er Serie von JD auf und wird für Aufgaben im Teillastbereich optimiert.

Für den kabelgeführten Traktor wird ein detailliertes Konzept erarbeitet und Simulationen durchgeführt, um die grundsätzliche Machbarkeit und die in Frage kommenden Optionen zu klären. Schlussfolgerungen werden auf der Basis des entwickelten Konzepts und grundlegender Simulationen abgeleitet. Für den kabelgeführten Traktor wird ein Konzept für eine große Dauerleistung entwickelt. Dabei wird ein Traktor der 6R-Serie zugrunde gelegt.

Zum Abschluss des Projekts sollen ein funktionsfähiger batteriebetriebener vollelektrischer Traktor und ein Konzept für eine kabelgeführte Landmaschine vorliegen.

http://www.pv-magazine.de/nachrichten/details/beitrag/preise-fr-photovoltaik-speicher-deutlich-gesunken_100019520/ [abgerufen am 30. Juni 2015]; vergleichbare Kosten- und Preissenkungen gab es bereits in den Vorjahren. So hat Sonnenbatterie auf der Intersolar 2014 bereits ein im Vergleich zur vorangegangenen Produktgeneration um 50 % günstigeres PV-Speicher-System mit einer Li-Ionen-Batterie vorgestellt.

2.3 Das Teilvorhaben Folgenabschätzung, Ergebnisverbreitung und Managementunterstützung

Das Teilvorhaben „Folgenabschätzung, Ergebnisverbreitung und Managementunterstützung zur Entwicklung eines vollelektrischen Traktors“ deckt den von der B.A.U.M. Consult GmbH München/ Berlin (BCMB) bearbeiteten Teil des Verbundprojektes ab. Der Schwerpunkt liegt auf der Erstellung einer Folgenabschätzung zur Entwicklung eines vollelektrischen Traktors. Diese soll Erkenntnisse zu folgenden Fragen erbringen:

1. *Wird netto eine Verringerung der Treibhausgasemissionen und der in die Atmosphäre abgegebenen Schadstoffe erreicht, wenn außer dem Betrieb der Maschine auch die durch die Produktion zentraler Komponenten (Li-Ionen Batterie etc.) bedingten Emissionen berücksichtigt werden?*
2. *Wie hoch ist die Verringerung der Lärmemissionen und wie ist diese Verringerung mit Blick auf touristische ländliche Regionen zu bewerten?*
3. *Kann die Vermutung untermauert werden, dass vollelektrische Landmaschinen die Integration Erneuerbarer Energien in elektrische Netze erleichtern?*
4. *Welche sonstigen Folgen können beschrieben werden?*

Die Referenz zu dem betrachteten vollelektrischen batterie-betriebenen Traktor (Pilot im SESAM-Projekt im Folgenden mit „SESAM-Traktor“ bezeichnet) ist der rein diesel-betriebene Serientraktor 6830 (mittlerweile ersetzt durch Nachfolgemodell 6140R), auf dem der entwickelte vollelektrische Traktor aufbaut.

2.4 Ansatz und Aufbau der Folgenabschätzung

Der Begriff „Folgenabschätzung“ (engl. impact assessment) wird in dieser Studie umfassend verstanden und schließt eine Untersuchung der Folgen des Einsatzes batterie-betriebener vollelektrischer Landmaschinen hinsichtlich verschiedener Aspekte und Bereiche, wie Umwelt, menschliche Gesundheit, Praxistauglichkeit, Möglichkeit des breiten Einsatzes, Auswirkungen auf andere technische Systeme (Versorgung mit elektrischer Energie) etc. ein. Diese Verwendung des Begriffs „Folgenabschätzung“ ist zu unterscheiden von der engeren Verwendung im Sinne eines Schritts bei der Erstellung einer Ökobilanzierung (s. 3.2.3 Folgenabschätzung).

Hauptteil dieser Folgenabschätzung – im umfassenden Sinn - ist eine Meta-Studie auf der Basis vorliegender Erkenntnisse zu den Umweltfolgen der Nutzung von Li-Ionen-Batterien in Fahrzeugen. Diese Erkenntnisse werden aus Life-Cycle-Assessment-Studien (LCA-Studien) und anderen Untersuchungen zusammengetragen. Die Meta-Studie fasst vorliegende Studien und sonstige Veröffentlichungen zusammen, setzt sie zueinander in Beziehung und die darin publizierten Ergebnisse in einen Zusammenhang. Umfangreichere eigene Berechnungen, Modellierungen oder originäre Forschungsarbeiten fallen nicht in ihren Rahmen.

Die Untersuchung der Folgen hinsichtlich der Lärmemissionen setzt mangels genauer Messungen auf der Wahrnehmung auf, dass der SESAM-Traktor einen ähnlich hohen Lärmpegel hat, wie ein Server-Raum, mithin nicht geräuschlos, aber deutlich leiser ist als ein diesel-betriebener Traktor. Sie nimmt vor allem arbeitsschutzrechtliche und umweltschutzrechtliche

Aspekte in den Blick. Die Konsequenzen der deutlichen Verringerung der Lärmemissionen für touristische Regionen können nur qualitativ abgeschätzt werden.

Die Untersuchung der Option batterie-betriebene Landmaschinen zur Verbesserung der Integration Erneuerbare Energien in ländliche Netze zu nutzen baut auf vorhandenen Untersuchungen zur Netzintegration Erneuerbarer Energien, insbesondere von PV-Anlagen auf.

Der letzte Teil umfasst verschiedene Aspekte der Technikbewertung (Technikfolgenabschätzung), die für den praktischen Einsatz vollelektrischer batterie-betriebener Traktoren und deren weite Verbreitung relevant sind. Darin fließen neben Literaturdaten zu Li-Ionen-Batterien insbesondere die Ergebnisse der Entwicklung und der Tests des SESAM-Traktors ein.

Dieses Dokument ist wie folgt aufgebaut:

1. Die **Zusammenfassung** präsentiert die wesentlichen Ergebnisse der gesamten Arbeit auf wenigen Seiten.
2. Kapitel 2 erläutert, in welchem **Kontext** (Motivation, Forschungsprojektreihe, Förderung) diese Folgenabschätzung erstellt wird, welche Fragen sie beantworten soll und wo bei deren Beantwortung angesetzt wird.
3. Kapitel 3 präsentiert **Zusammenfassungen der untersuchten LCA-Studien** und anderen Dokumente und setzt die wesentlichen Ergebnisse der LCA-Studien **in einen Zusammenhang**.
4. Kapitel 4 fasst die Ergebnisse zur Untersuchung zur Lärminderung zusammen,
5. Kapitel 5 die Ergebnisse zur Netzintegration.
6. Kapitel 6 fasst die Ergebnisse zu sonstigen Aspekten zusammen, die wie die Untersuchung zur Lärminderung und der Netzintegration dem Bereich der **Technikbewertung** zuzuordnen sind.
7. Kapitel 7 formuliert die **Schlussfolgerungen**,
8. Kapitel 8 den **weiteren Untersuchungsbedarf**.
9. Ein umfangreiches **Glossar** zu Schlüsselbegriffen im Anhang bietet nicht nur eine Erläuterung einzelner Begriffe, sondern ergänzende Informationen und detailliertere Darstellungen einiger Zusammenhänge.

Schlüsselbegriffe, die im Glossar erläutert sind, sind sowohl im Haupttext der Studie als auch im Glossar selbst unterstrichen und als Link ausgeführt. Darüber gelangt der Leser direkt zum entsprechenden Eintrag im Glossar.

3 Meta-Studie zu Umweltauswirkungen (LCA)

3.1 Methodisches Vorgehen

Die folgenden Ausführungen zur Methode des Life-Cycle-Assessment (LCA), deutsch Ökobilanzierung, orientieren sich im Wesentlichen an dem Lehrbuch von H. Baumann und A.-M. Tillmann, *The Hitch Hiker's Guide to LCA – An orientation in life cycle assessment and application* (Baumann & Tillmann, 2004). Sie werden im Folgenden direkt auf die in dieser Meta-Studie analysierten Untersuchungen bezogen.

Das Ziel einer LCA-Studie ist, **unter zwei oder mehreren Produkten oder Dienstleistungen**, die jeweils einen vergleichbaren Nutzen haben, **das oder diejenige mit den geringsten Umweltauswirkungen zu identifizieren**. Dazu wird der gesamte Lebenszyklus der betrachteten Produkt- oder Dienstleistungsalternativen von der Gewinnung der Rohmaterialien bis zur Entsorgung beschrieben und die Umweltauswirkungen jeder einzelnen Lebenszyklusphase werden berechnet und interpretiert.

Im Fall dieser Meta-Studie ist das Produkt ein vollelektrischer Traktor mit einer Li-Ionen-Batterie, die Alternative mit vergleichbarem Nutzen ein Diesel-Traktor mit gleicher mechanischer Leistung. Die beiden Traktoren unterscheiden sich zwar auch in anderer Hinsicht als in ihren Umweltauswirkungen, etwa durch die Präzision der Steuerung und dem Aufwand für Bedienung, Wartung und Instandhaltung. Die Betrachtung dieser Unterschiede ist zwar für die Entscheidungsfindung über Entwicklung und Einsatz der einen, der anderen oder beider technischen Alternativen relevant, fällt jedoch nicht in den Betrachtungsrahmen einer LCA-Studie, sondern in den umfassenderen der Technikbewertung. Weitere, hier aber nicht näher betrachtete Alternativen sind vollelektrische Traktoren mit anderen Batterietypen und Traktoren, die mittels einer Leitung im Betrieb an ein Stromnetz angeschlossen ist (leitungsgeführte Traktoren).

Die einzelnen Schritte einer LCA-Studie sind:

- Bestimmung von Ziel und Untersuchungsrahmen
- Sachbilanz
- Folgenabschätzung
- Deutung

LCA ist nicht standortspezifisch und arbeitet stattdessen mit Durchschnittswerten. So werden etwa in der Sachbilanz nicht die spezifischen Emissionen einer konkreten Produktionsstätte, sondern Durchschnittswerte der spezifischen Emissionen repräsentativer Produktionsstätten verwendet. Die der Folgenabschätzung zugrunde liegenden wissenschaftlichen Modelle sind per se nicht standortspezifisch.

Im Rahmen dieser Meta-Studie ist es jedoch sinnvoll und auch notwendig, eine bestimmte Herkunft der elektrischen Energie anzunehmen, mit welcher die betrachtete Batterie geladen wird. Dies widerspricht nicht dem grundsätzlich von einem konkreten Standort losgelösten Vorgehen bei LCA-Studien, da dabei immer noch durchschnittliche Emissionen bestimmter Strom-Mixe und nicht konkrete Emissionen einzelner Erzeugungsanlagen in die Rechnungen einfließen. Für die untersuchte Fragestellung ist es insbesondere interessant zu betrachten,

wie die Umweltauswirkungen variieren, wenn wahlweise ein europäischer oder deutscher Strom-Mix, der Strom-Mix bestimmter Anbieter (grünen) Stroms oder Strom aus Anlagen zur Nutzung erneuerbarer Energien auf einem landwirtschaftlichen Betrieb zum Laden der Batterie verwendet wird.

Wirtschaftliche und soziale Kriterien fließen außer bei der Deutung nicht ein. Ebenso sind Risiken nicht Gegenstand einer LCA-Studie. Bei einer LCA-Studie kann sehr flexibel und fallspezifisch vorgegangen werden, doch ist durch die internationalen Standards ISO 14040-14043 eine Grundstruktur der Vorgehensweise festgelegt. Die ISO-Standards wurden auf der Grundlage von und parallel zu Leitfäden für LCA-Studien entwickelt, welche wesentlich detailliertere Empfehlungen für das methodische Vorgehen geben als die ISO-Standards und oft auch konkrete Daten enthalten.

Da im Rahmen einer Meta-Studie keine eigenen Untersuchungen zu den verglichenen Alternativen durchgeführt werden können, werden stattdessen Erkenntnisse aus vorhandenen Studien auf die verglichenen Alternativen extrapoliert und so versucht, eine Grobabschätzung hinsichtlich der Umweltauswirkungen zu erhalten. Die im Folgenden näher beschriebenen Schritte einer LCA-Studie werden, ausgenommen die abschließende Deutung, also nicht selbst durchgeführt, sondern deren Durchführung in vorhandenen Studien analysiert und für die eigene (Meta-)Deutung aufbereitet.

3.1.1 Festlegung von Ziel und Untersuchungsrahmen

Zunächst werden bei einer LCA-Studie Ziel und Untersuchungsrahmen, die Grenzen des untersuchten Systems und die funktionale Einheit festgelegt (goal and scope definition), auf welche die zu bestimmenden Umweltauswirkungen normiert werden sollen, etwa eine Kilowattstunde elektrische Energie, ein Kilogramm eines Produktes, Personenkilometer bei Transportdienstleistungen u.a.

Nach ISO 14040 beinhaltet die Festlegung von Ziel und Untersuchungsrahmen einer LCA-Studie eine Aussage über ihre beabsichtigte Anwendung und den Grund ihrer Erstellung sowie eine Benennung der Adressatengruppe. Angewandt auf diese Meta-Studie sind die entsprechenden Aussagen:

- Es ist beabsichtigt, mittels dieser Meta-Studie **zu überprüfen, ob die Option der Elektrifizierung von Landmaschinen mittels Li-Ionen-Batterien unter Umweltgesichtspunkten** im Vergleich zu Landmaschinen mit Dieselmotorantrieb und im Vergleich zu vollelektrischen Landmaschinen mit anderen Batterien **eher vorteilhaft oder nachteilig ist**.
- Grund ihrer Erstellung ist, dass John Deere – genauso wie andere Landmaschinen- und ähnlich wie sonstige Off-Road-Fahrzeughersteller – es sich nicht leisten kann, umfangreiche Entwicklungsarbeiten zu vollelektrischen Landmaschinen mit Li-Ionen-Batterien zu erbringen, wenn der Einsatz solcher Landmaschinen mittel- oder langfristig aus Umweltgesichtspunkten durch den Gesetzgeber beschränkt, mit Auflagen oder Abgaben belegt oder bestraft wird, oder das Risiko besteht, dass die Preise von Li-Ionen-Batterien und erforderlichen Peripherie-Geräten auf Grund unzureichender weltweiter Reserven exorbitant in die Höhe schnellen. Es soll darum zu einem mög-

lichst frühen Zeitpunkt untersucht werden, ob das eine oder das andere eintreten könnte.

- Die ersten Adressaten dieser Meta-Studie sind Entscheidungsträger innerhalb von John Deere, welche über die Festlegung und Priorisierung von Entwicklungstätigkeiten zu entscheiden haben.

Da es von Vorteil ist, wenn allgemeine Teile der Entwicklung, etwa der von Li-Ionen-Batterien für Fahrzeuge, nicht nur von John Deere, sondern auch von Mitbewerbern, anderen Off-Road-Fahrzeugherstellern, vor allem aber von Batterieherstellern parallel oder gemeinsam durchgeführt werden, und wenn mit Blick auf Standardisierung und die Entwicklung des gesetzlichen Rahmens sowie Förderprogramme ein Konsens hinsichtlich der Umweltauswirkungen von Off-Road-Fahrzeugen mit Li-Ionen-Batterien besteht, sind die weiteren Adressaten andere Landmaschinen- und allgemein Off-Road-Fahrzeughersteller, Fachverbände und politische Entscheidungsträger.

Zur Festlegung des Untersuchungsrahmens gehören die **Systemgrenzen**, die betrachteten Umweltauswirkungen und weitere Modellspezifizierungen. Das System, für das hier Aussagen erarbeitet werden, umfasst:

- Die Batterie eines vollelektrischen Traktors, welche die Energie für dessen Antrieb bereitstellt, jedoch nicht die sonstigen Komponenten eines vollelektrischen oder Diesel-Traktors, noch die Anbaugeräte. Das untersuchte Alternativsystem ist damit „keine Batterie“, und hat zwangsläufig geringere Umweltauswirkungen als eine Batterie. Um dennoch eine sinnvolle Bewertung der Umweltauswirkungen der Batterie vornehmen zu können, werden die für diese berechneten um die Umweltauswirkungen der durch sie für den Antrieb bereitgestellten elektrischen Energie ergänzt und mit denen des Dieserverbrauchs eines Diesel-Traktors verglichen. Ferner erfolgt ein Vergleich der Umweltauswirkungen verschiedener Batterietypen.
- Die gesamte Produktionskette der Li-Ionen-Batterie und alternativer Batterietypen von der Gewinnung der Rohstoffe bis zur Wiederverwertung/ Entsorgung.
- Die Nutzung der Batterie beim Betrieb des Traktors für eine typische Mischung an Anwendungen. Die Betrachtung endet dabei an der Abgabe mechanischer Leistung.

Die für die Betrachtung ausgewählten **Umweltauswirkungen** sind durch die untersuchten vorhandenen Studien bestimmt und umfassen u.a.:

- Primärenergieverbrauch
- Verbrauch fossiler und mineralischer Ressourcen
- Treibhauspotenzial
- Versauerungspotenzial
- Eutrophierungspotenzial
- Ozonabbaupotenzial
- photo-chemisches Ozonbildungspotential
- Ökotoxizitätspotenzial
- Humantoxizitätspotenzial
- berufliches Krebsrisiko
- sonstige berufliche Risiken

Die Umweltauswirkungen, welchen im Kontext der SESAM-Vision die **größte Bedeutung** beikommt, sind der **Primärenergieverbrauch und das Treibhauspotenzial**, da beide Indikatoren für aktuell besonders brisant angesehene Umweltprobleme sind, ihnen die größte Aufmerksamkeit des Gesetzgebers zukommt und beide durch die Nutzung erneuerbarer Energiequellen deutlich reduziert werden können.

Zu den Modellspezifizierungen gehört die Festlegung der **funktionalen Einheit**, auf welche die Umweltauswirkungen bezogen werden sollen. Eine sinnvolle Wahl ist zum Beispiel eine Stunde Traktorbetriebszeit für ein typisches Operationsprofil. Da bei den analysierten Studien jedoch nur eine die Umweltauswirkungen eines Traktors mit Dieselmotor und keine die eines elektrifizierten Traktors untersucht, können hier keine vergleichenden Aussagen mit Bezug auf die funktionale Einheit „Traktorbetriebsstunde“ entnommen werden. Allerdings lassen sich vergleichende Aussagen über die Umweltauswirkungen von elektrischen und verbrennungsmotorischen Antrieben vorliegenden Studien zu Elektroautos entnehmen und auf Landmaschinen übertragen.

3.1.2 Sachbilanz

Im nächsten Schritt einer LCA-Studie, der Sachbilanz (inventory analysis), wird ein Lebensbilanzmodell erstellt und es werden verschiedene Ressourcenverbräuche, etwa von Metallen oder fossilen Rohstoffen, und Emissionen, wie CO₂ oder SO₂, berechnet. **Jeder einzelne Ressourcenverbrauch und jede einzelne Emission ist von einer Vielzahl von Parametern abhängig**, die den jeweiligen Lebensabschnitt des Produkts oder der Dienstleistung beschreiben.

In diese Rechnungen fließen **Umrechnungskoeffizienten** ein, die **durchschnittliche Rohstoffgewinnungs-, Produktions- und Entsorgungsverfahren sowie Nutzungsprofile abbilden**. Durch **technischen Fortschritt und industrielle Modernisierung ändern sich diese** Umrechnungskoeffizienten fortwährend, weshalb auf aktuelle spezialisierte Datenbanken beziehungsweise LCA-Software zurückgegriffen werden muss, um die Ressourcenverbräuche und Emissionen von Produkt- und Dienstleistungslebensabschnitten zu berechnen. Es sind dann Summen über die Verbräuche und Emissionen der verschiedenen Lebensabschnitte eines Produktes oder einer Dienstleistung zu bilden, um diese für den gesamten Lebenszyklus zu ermitteln.

Die Sachbilanz umfasst folgende Teilschritte:

- Aufstellung eines Flussdiagramms für alle hinsichtlich der ausgewählten Umweltauswirkungen relevanten Energie- und Masseflüsse
- Datensammlung zu Energie- und Masseflüssen
- Berechnung der für die Ermittlung der ausgewählten Umweltauswirkungen relevanten Ressourcenverbräuche und Emissionen bezogen auf die ausgewählte funktionale Einheit

Innerhalb der Sachbilanz kommen **subjektive** Momente dort ins Spiel, wo mit einem technische (Teil)prozess mehr als ein einziges (Zwischen)produkt hergestellt wird. Dies erfordert eine anteilige Zuordnung (**Allokation**) der mit dem (Teil)prozess verbundenen Ressourcen-

verbräuche und Emissionen zu den einzelnen (Zwischen)produkten. Klassische Verfahren der Allokation sind die Zuordnung nach Masse, Volumen, Energieinhalt oder Marktwert.

Da in dieser Meta-Studie kein eigenes LCA durchgeführt, sondern Ergebnisse vorhandener Studien ausgewertet werden, entfallen die genannten Schritte hier. Bei der Auswertung der untersuchten Studien wird jedoch die jeweilige Sachbilanz in den Blick genommen.

3.1.3 Folgenabschätzung

In der Folgenabschätzung (impact assessment) werden die in der Sachbilanz ermittelten Ressourcenverbräuche und Emissionen dann auf konkrete **Umweltprobleme** bezogen (mathematisch: abgebildet), etwa Klimawandel, Versauerung, Ozonbildung u.a., und Indikatoren berechnet, welche die Auswirkungen der untersuchten Produkt- oder Dienstleistungsalternativen hinsichtlich dieser Umweltprobleme beschreiben. Ein solcher Indikator ist üblicherweise **eine lineare Funktion mehrerer Ressourcenverbräuche und/oder Emissionen**, also eine lineare Funktion $R^v \rightarrow R$ wobei v die Zahl der voneinander unabhängigen Ressourcenverbräuche und/ oder Emissionen ist, deren Funktion der einzelne Indikator ist. Werden m verschiedene Indikatoren betrachtet, kann deren Abhängigkeit von den Ressourcenverbräuchen und Emissionen als lineare Funktion $R^n \rightarrow R^m$ dargestellt werden. Dabei ist $n \geq v$ die Anzahl aller Ressourcenverbräuche und Emissionen, von denen mindestens ein Indikator abhängt.

Die **Koeffizienten** dieser linearen Funktion werden **geophysikalischen, medizinischen und anderen Modellen entnommen**. Auch diese sind Gegenstand der Veränderung, allerdings nicht auf Grund des technischen Fortschritts, sondern veränderter wissenschaftlicher Erkenntnis. Ihre jeweils aktuellen Werte sind ebenfalls spezialisierten Datenbanken zu entnehmen, welche in LCA-Software integriert sind oder ergänzend dazu beschafft werden können.

Kurz: In der Folgenabschätzung werden die in der Bestimmung von Ziel und Untersuchungsrahmen ausgewählten Umweltauswirkungen aus den in der Sachbilanz ermittelten Ressourcenverbräuchen und Emissionen berechnet. So wird zum Beispiel die Menge emittierter Fluorkohlenwasserstoffe in der Sachbilanz ermittelt. In der Folgenabschätzung fließt sie in die Berechnung des Treibhauspotenzials und des Ozonabbaupotentials ein.

Auch dieser Rechenschritt wird hier nicht selbst vollzogen, sondern die Ergebnisse der untersuchten vorhandenen Studien der weiteren Analyse zugrunde gelegt.

3.1.4 Deutung

Der Begriff „life cycle interpretation“ wird im ISO 14040 Standard definiert als:

„... phase of life cycle assessment in which the findings of either the inventory analysis or the impact assessment, or both, are combined consistent with the defined goal and scope in order to reach conclusions and recommendations.“ (ISO 14040 1997)¹³

(... Abschnitt der Ökobilanz, in welchem die Befunde der Sachbilanz, der Folgenabschätzung oder beider in einen stimmigen Zusammenhang mit dem zuvor festgelegten Ziel und Untersuchungsrahmen gestellt werden, um Schlussfolgerungen und Empfehlungen abzuleiten.)

Eine LCA-Studie kann zu unerwarteten Ergebnissen führen, die eine Revision von Ziel und Untersuchungsrahmen und eine, gegebenenfalls auch mehrere Wiederholungen der Sachbilanz und Folgenabschätzung nahe legen. Dann, aber nicht nur dann erreicht sie Bedeutung erst durch Deutung der Ergebnisse, durch ein Aufzeigen und Gewichten von Zusammenhängen, das am Schluss Folgerungen für das Handeln zu formulieren erlaubt.

Der Schritt der Deutung nimmt in einer Meta-Studie wie der hier vorliegenden einen größeren Raum ein als alle vorangehenden Schritte, da allein in ihm auch ohne eigene Berechnungen Neues gefunden werden kann, allein durch Betrachtung des in vorhandenen LCA-Studien Vorgefundenen, das in der Deutung jedoch originär in einen Zusammenhang und in einen größeren Kontext gestellt werden kann.

Die in der Folgenabschätzung berechneten Umweltauswirkungen sind in der Regel inkommensurabel¹⁴, d.h. ohne gemeinsames Maß, sprich nicht zusammen mess- und somit nicht vergleichbar. Um dennoch die Umweltauswirkungen eines untersuchten Produkts oder einer Dienstleistung mit denen der betrachteten Alternativen, zum Beispiel eines elektrischen Traktors mit denen eines Dieseltraktors, vergleichen zu können, können **die berechneten Umweltindikatoren gewichtet und zwecks Deutung (Interpretation) auf einen einzigen Gesamtindikator umgerechnet (Aggregation)** werden. Mathematisch wird hier wieder eine lineare Funktion $R^m \rightarrow R$ berechnet, wobei m die Anzahl der betrachteten, im Gesamtindikator aggregierten Umweltauswirkungen ist. **Die Koeffizienten dieser linearen Funktion hängen weder vom Stand der Technik noch der wissenschaftlichen Erkenntnis ab. Sie werden frei gewählt** und bestimmen die Gewichtung der verschiedenen Umweltauswirkungen innerhalb des Gesamtindikators.

Bei diesem Schritt der Gewichtung werden bildlich gesprochen zwar nach bestem Wissen und Gewissen, aber **mit zwangsläufiger methodischer Unzulänglichkeit Äpfel mit Birnen verglichen**. Entsprechend ist dieser Schritt stark subjektiv geprägt, aber nicht schon deshalb irrational. So lassen sich Äpfel und Birnen durchaus nach sinnvollen Kriterien unterscheiden, etwa nach „Kugelähnlichkeit“ oder „mittlerer Bissfestigkeit“, sprich nach Kriterien, die sich an beide anlegen lassen. Bei einer LCA-Studie ist ein entsprechendes Gewichtungskriterium zum Beispiel, ob das Problem des Klimawandels als gravierender betrachtet wird als das Problem der Versauerung von Böden und Gewässern oder als das Problem des

¹³ (Baumann & Tillmann, 2004), S. 175

¹⁴ Lat.: mensura = Maß, metiri = messen

Verlusts biologischer Vielfalt. Dabei angelegte Kriterien sind „Schadensgröße“, „Irreparabilität“ u.a.

Der (Teil-)Schritt der Aggregation kann der Folgenabschätzung zugeordnet werden, hat aber auf Grund seiner stark subjektiven Momente eher seinen Platz im Schritt der Deutung. Im einfachsten Fall mündet er in zwei Zahlen, die die Umweltauswirkungen zweier untersuchter Alternativen beschreiben. Die Alternative mit der kleineren Zahl ist dann die umweltfreundlichere und zu wählende.

Deutung erschöpft sich jedoch nicht in der Aggregation von Daten, sondern umfasst üblicherweise auch Sensitivitätsanalysen, Unsicherheitsanalysen und Bewertungen der Datenqualität. Auch qualitative Daten können in der Deutung Berücksichtigung finden. Wie im Einzelnen die Deutung erfolgt, hängt von der Fragestellung ab, die in der Festlegung von Ziel und Untersuchungsrahmen formuliert wurde.

Die in dieser Meta-Studie formulierte Frage lautet:

Ist die Option der Elektrifizierung von Landmaschinen mittels Li-Ionen-Batterien unter Umweltgesichtspunkten im Vergleich zu Landmaschinen mit Dieselmotorantrieb und im Vergleich zu vollelektrischen Landmaschinen mit anderen Batterien eher vorteilhaft oder nachteilig?

3.2 Life Cycle Assessment of Complex Heavy Duty Equipment

3.2.1 Ziel und Untersuchungsrahmen

In Zusammenarbeit mit der Universität Illinois hat John Deere ein Life-Cycle Assessment (LCA) eines Traktors der Abgasstufe 3B durchgeführt. Die Ergebnisse wurden von (Kwak, et al., 2012) veröffentlicht. Die Umweltauswirkungen wurden nach der Methode Eco-Indicator 99 bestimmt, das Treibhauspotenzial zusätzlich nach der Methode IPCC 2007. Die Berechnungen wurden mit der Software SimaPro 7.3 durchgeführt.

Als funktionale Einheit wurde die angenommene technische Lebenszeit des Traktors von 20.000 Betriebsstunden gewählt. Betrachtet wurden alle Lebensphasen von der Herstellung inklusive Gewinnung der Rohmaterialien, über Nutzung, Instandhaltung und Reparatur bis zur Zerlegung und Wiederverwertung beziehungsweise Entsorgung der Komponenten. Für die Nutzungsphase wurden Annahmen zu Teillast- und transientem Betrieb getroffen, um eine möglichst realitätsnahe und repräsentative Nutzung abzubilden.

3.2.2 Sachbilanz

Bei CO₂, SO₂ und NO_x ist die Nutzungsphase für 78,4 %, 71,1 % beziehungsweise 77,3 % der Emissionen verantwortlich. Diese rühren sowohl von der Dieselproduktion als auch von dessen Verbrennung im Motor her. Bei Partikeln dominiert die Herstellungsphase mit 63,0 % der Emissionen.

3.2.3 Folgenabschätzung

Eco-Indicator 99 berechnet 11 Umweltauswirkungen, gruppiert diese in 3 Schadenskategorien (menschliche Gesundheit, Ökosystem, Ressourcen) und aggregiert diese in einer einzigen Zahl, der Eco-Indicator-Punktzahl. Für den untersuchten Traktor beträgt diese 69.590,48. Davon gehen nur 5.043,98 auf das Konto des Indikators „Klimawandel“, aber 41.707,80 auf das Konto des Indikators „Verbrauch fossiler Ressourcen“. Dies zeigt auf, dass Eco-Indicator 99 den Verbrauch fossiler Ressourcen im Vergleich zum Klimawandel sehr hoch gewichtet.

Interessant ist hier, welche Nutzungsphasen welchen Beitrag zu den Umweltfolgen beitragen. Von den 69.590,48 Eco-Indicator-Punkten des Traktors entfallen 49.902,16, also 72 % auf die Nutzungsphase. Beim Indikator „Klimawandel“ entfallen 3.897,23 von 5.043,98 Punkten, also 77 % auf die Nutzungsphase, beim Indikator „Verbrauch fossiler Ressourcen“ 36.932,15 von 41.707,80 Punkten, also 89 %.

Die Berechnung nach IPCC 2007 beziffert die Lebenszyklus-Treibhausgasemissionen des untersuchten Traktors auf 528.256 kg CO₂-Äq. (Masse an CO₂, deren Treibhauspotenzial der Gesamtheit der verschiedenen Treibhausgasemissionen entspricht, die während des Lebenszyklus des Traktors emittiert werden). Davon entfallen 77 % auf die Nutzungsphase.

Beide Rechenwege führen also zum exakt gleichen Ergebnis hinsichtlich des Anteils der Nutzungsphase am Treibhauspotenzial. Dass auch der Verbrauch fossiler Ressourcen fast vollständig auf das Konto der Nutzungsphase geht, in der im wesentlichen Dieselkraftstoff und nur sehr wenig andere Ressourcen verbraucht werden, zeigt, dass das Treibhauspotenzial vom Verbrauch von Dieselkraftstoff während der Nutzungsphase dominiert wird.

3.2.4 Deutung

Die Berechnungen von (Kwak, et al., 2012) führen zu einer zentralen Erkenntnis, die als Ausgangspunkt für die weiteren Betrachtungen dienen kann:

Der Verbrauch von Dieselkraftstoff hat mit Abstand den größten Anteil an den Umweltauswirkungen eines vergleichsweise modernen diesel-betriebenen Traktors der Abgasstufe 3B, beim Treibhauspotenzial sind es im konkreten Fall eines untersuchten JD-Traktors 77 %, beim Verbrauch fossiler Ressourcen 89 %.

Wenn aus den weiteren untersuchten Studien analog dazu hervorgeht, dass auch Li-Ionen-Batterien die größten Umweltauswirkungen in ihrer Nutzungsphase haben, also die Erzeugung des Stroms (aus fossilen und nuklearen) Quellen größere Umweltauswirkungen hat als die Produktion der Batterien einschließlich der Gewinnung der Rohmaterialien und ihre Entsorgung, lässt sich der erste Teil der oben gestellten Frage beantworten: Die Elektrifizierung von Landmaschinen mittels Batterien ist dann im Vergleich zu diesel-betriebenen Landmaschinen vorteilhaft, wenn die elektrische Energie zum Laden aus erneuerbaren Quellen stammt. Denn der Umweltvorteil von erneuerbarem Strom gegenüber fossilem und nuklearem Strom ist durch hinreichend viele Untersuchungen eindeutig belegt und schlägt sich in der deutlichen Verringerung der CO₂-Intensität des deutschen Strom-Mix seit 1990 infolge des Ausbaus der Nutzung Erneuerbare Energien nieder.¹⁵ Dazu ist zunächst die folgende Frage zu beantworten:

Hat die Nutzungsphase einer Li-Ionen-Batterie den weit überwiegenden Anteil an deren Umweltauswirkungen im Laufe ihres Lebenszyklus, wenn bei der Nutzung die Ladung überwiegend mit Strom aus fossilen Quellen erfolgt?

Wenn Batterien, die überwiegend mit Strom aus fossilen Quellen geladen werden, die größten Umweltauswirkungen in der Nutzungsphase haben, ist auch die genaue Größe der Umweltauswirkungen in der Rohstoffgewinnungs- und Produktionsphase nur für den Vergleich verschiedener Optionen elektrifizierter Landmaschinen relevant.

3.3 US-Environmental Protection Agency LCA on Li-ion batteries for electric vehicles (US-EPA Studie)

3.3.1 Ziel und Untersuchungsrahmen

Die US-Environmental Protection Agency (US-EPA) hat von Abt Associates Inc. ein umfassendes LCA zu Li-Ionen-Batterien für Elektrofahrzeuge (electric vehicles; EV) erstellen lassen, welches im April 2013 publiziert wurde (Amarakoon, Smith, & Segal, 2013)¹⁶. Diese US-EPA Studie umfasst ein LCA nach ISO 14040 zu Li-Ionen-Batterien. Untersucht wurden Lithium-Manganoxid (LiMnO₂)-, Lithium-Nickel-Kobalt-Manganoxid (LiNi_{0.4}Co_{0.2}Mn_{0.4}O₂)- und Lithium-Eisenphosphat (LiFePO₄)-Batterien, die in vollelektrischen oder in ans Stromnetz anschließbaren Hybridfahrzeugen (plug-in hybrid vehicles) genutzt werden. Als Verhältnis der Kapazitäten der für diese beiden Fahrzeuge verwendeten Batterien wurde 3,4 : 1 gewählt. Sensitivitätsanalysen wurden für Batterielebensdauer, Recycling und Wiederverwendung des Materials, sowie verschiedene Ladestrategien (verschiedene Herkunft der zum Laden verwendeten elektrischen Energie) durchgeführt.

Die US-EPA-Studie untersuchte die Umweltauswirkungen der Herstellung und Nutzung der untersuchten Li-Ionen-Batterietypen von der Rohmaterialgewinnung bis zum Recycling/ Entsorgung (Abb. 2). Die funktionale Einheit ist ein Kilometer der von einem Elektrofahrzeug gefahrenen Strecke, welches die entsprechende Batterie als Energiespeicher hat. Zu den

¹⁵ S. z.B. <http://www.umweltbundesamt.de/daten/klimawandel/treibhausgas-emissionen-in-deutschland/kohlendioxid-emissionen> [abgerufen am 18. September 2015]

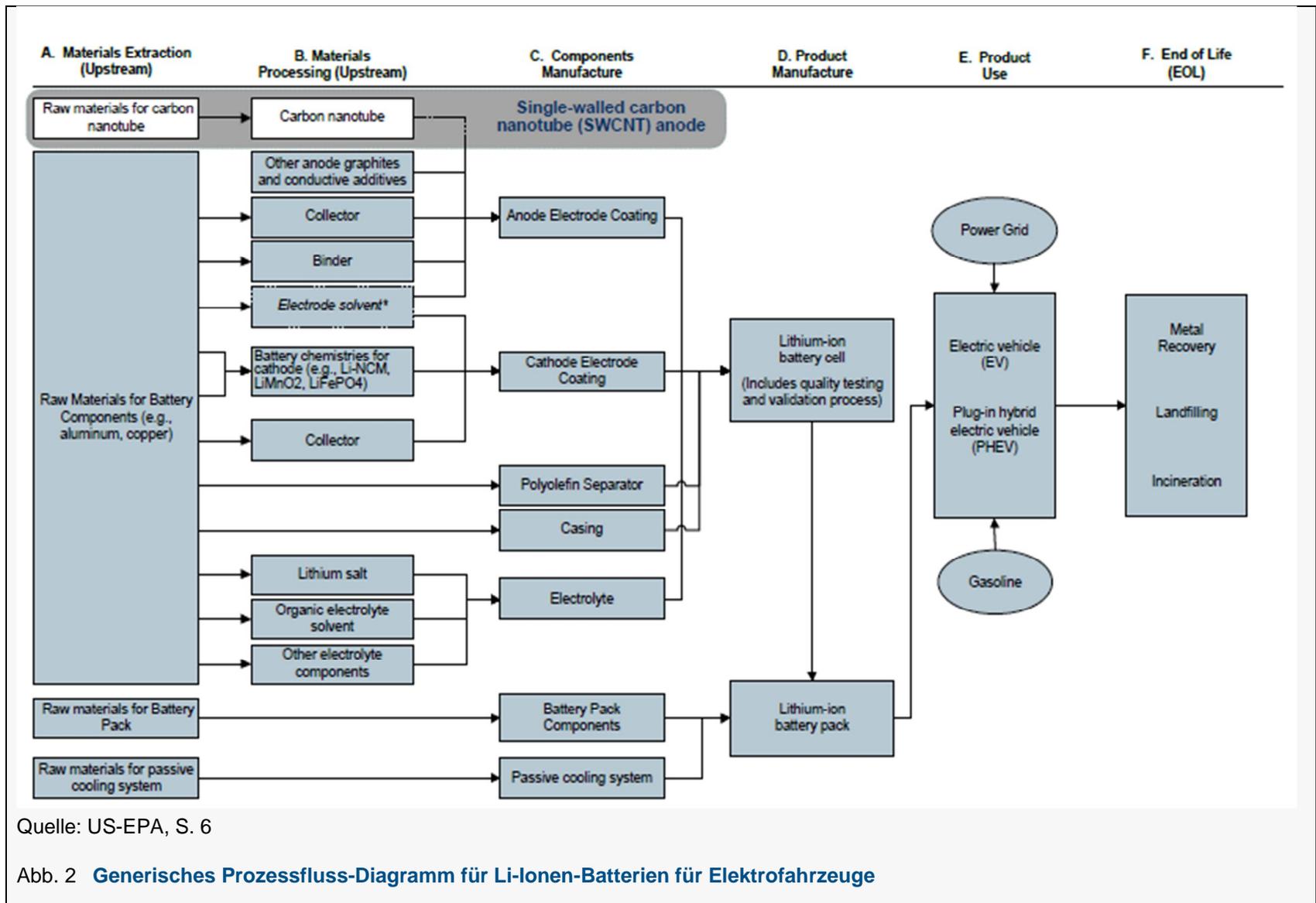
¹⁶ <http://www.epa.gov/dfe/pubs/projects/lbnp/final-li-ion-battery-lca-report.pdf> [abgerufen am 12. Mai 2014]

wesentlichen Annahmen gehört, dass die Lebensdauer der Batterie die gleiche ist wie die des Fahrzeugs, nämlich zehn Jahre.

Die Studie erfasste nur die direkt mit der Batterie verbundenen Umweltauswirkungen und ließ die der sonstigen Fahrzeug- und Infrastrukturkomponenten außer Acht. Jedoch wurden die Umweltauswirkungen von Erzeugung, Transport und Verteilung der für die Ladung der Batterie genutzten elektrischen Energie mitberücksichtigt.

3.3.2 Sachbilanz

Für die Erstellung der Sachbilanz wurden für alle Stufen des Batterielebenszyklus Daten zu Energie- und Masseflüssen, spezifischen Ressourcenverbräuchen und Emissionen zusammengetragen und mittels einer GaBi4 LCA-Software die Ressourcenverbräuche und Emissionen je gefahrenen Kilometer berechnet. Dabei flossen Primärdaten von Herstellern und Lieferanten sowie Sekundärdaten aus existierenden Studien mit ein, u.a. auch aus (Majeau-Bettez, Hawkins, & Stromman, 2011). In die Bestimmung der Verbräuche und Emissionen der Nutzungsphase floss die Zusammensetzung von US-amerikanischen Strom-Mix Varianten ein. Lithiumsalzlösung, die für die Elektroden-Herstellung benötigt wird, ist dabei mit 28 % nach Wasser und Luft der größte Masseneingangsstrom.



3.3.3 Folgenabschätzung

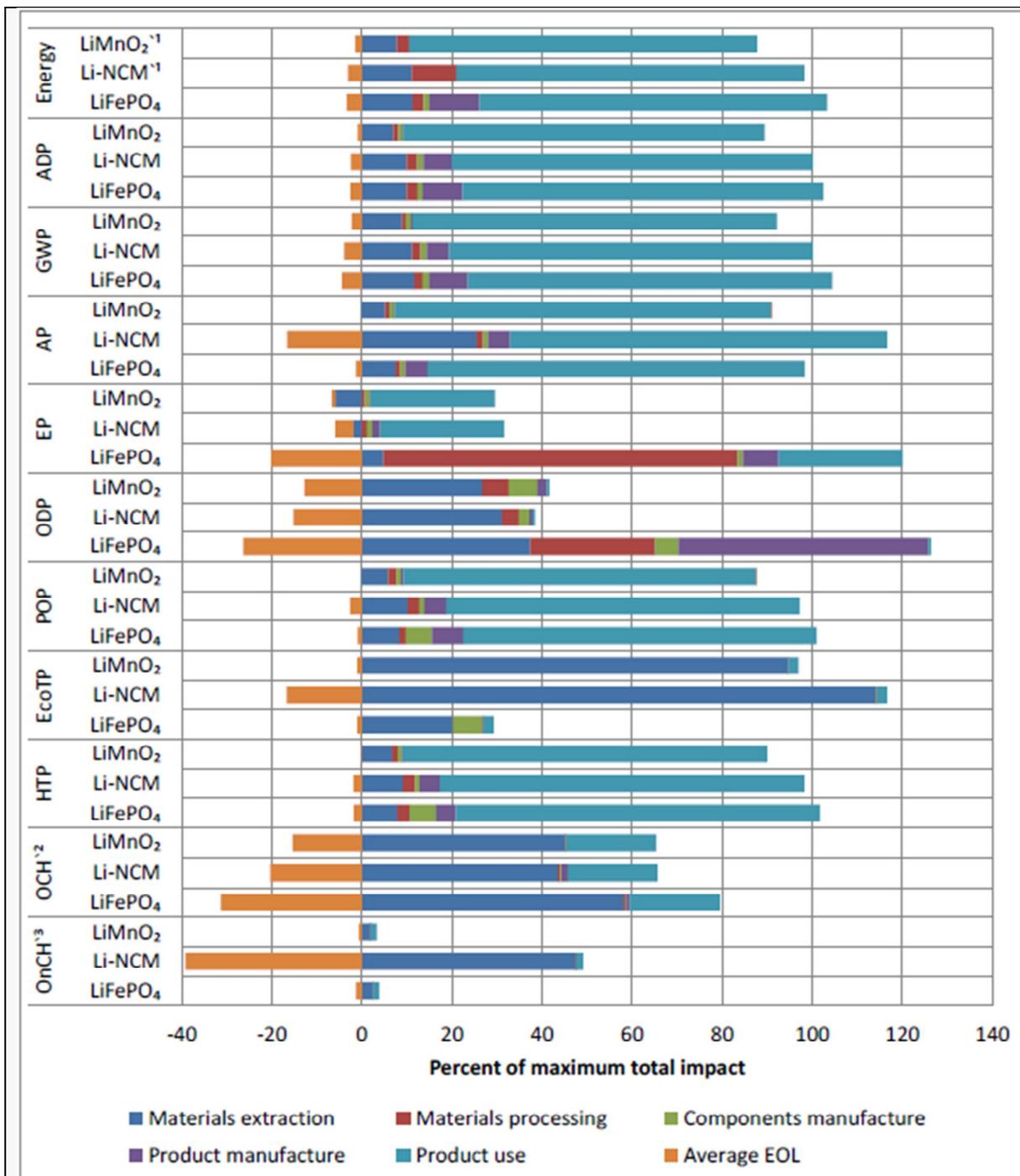
Aus den in der Sachbilanz ermittelten Ressourcenverbräuchen und Emissionen wurden in der Folgenabschätzung ausgewählte Umweltauswirkungen berechnet. Abb. 3 zeigt den relativen Einfluss der verschiedenen Lebenszyklen auf einzelne Umweltindikatoren für die drei untersuchten Li-Ionen-Batterietypen für vollelektrische Fahrzeuge. Die berechneten und in Abb. 3 dargestellten Umweltindikatoren sind im Einzelnen:

Energy:	Primärenergieverbrauch
ADP:	abiotic resource depletion (Verbrauch fossiler und mineralischer Ressourcen)
GWP:	global warming potential (Treibhauspotenzial)
AP:	acidification potential (Versauerungspotenzial)
EP:	eutrophication potential (Eutrophizierungspotenzial)
ODP:	ozone depletion potential (Ozonabbaupotenzial)
POP:	photochemical oxidation potential (photo-chemisches Ozonbildungspotenzial)
EcoTP:	ecological toxicity potential (Ökotoxizitätspotenzial)
HTP:	human toxicity potential (Humantoxizitätspotenzial)
OCH:	occupational cancer hazard (berufliches Krebsrisiko)
OnCH:	occupational non-cancer hazard (sonstige berufliche Risiken)

Abb. 3 illustriert, dass die Nutzungsphase des Elektrofahrzeugs bei fast allen Umweltindikatoren und fast immer für alle drei untersuchten Batterietypen den größten Beitrag liefert. Folglich ist die **Herkunft der elektrischen Energie, mit der die Batterien geladen werden, entscheidend für die Umweltauswirkungen**. Unterschiede zwischen den Umweltauswirkungen von Batterien vollelektrischer Fahrzeuge und von ans Stromnetz anschließbaren Hybridfahrzeugen sind gänzlich von der Herkunft der zur Batterieladung verwendeten elektrischen Energie abhängig. Die US EPA-Studie zeigt zudem auf, dass elektrische Fahrzeuge unabhängig von der Kohlenstoffintensität der verwendeten elektrischen Energie zu einer Verringerung des Treibhauspotenzials beitragen. **Einen großen Einfluss auf die Umweltauswirkungen hat zudem die Wiederverwendung der Materialien** am Ende des Lebenszyklus.

Der durchschnittliche Primärenergieverbrauch verschiedener Li-Ionen-Batterietypen beträgt 1.780 MJ/kWh beziehungsweise 2 MJ/km (Megajoule je gefahrener Kilometer). Dies wird im Wesentlichen durch den Verbrauch von elektrischer Energie in der Nutzungsphase bestimmt. Für diesen wurde 174,5 Wh/km, d.h. 0,63 MJ/km ab Netz angenommen. Wird der US-amerikanische Strom-Mix zugrunde gelegt, entspricht dies einem Primärenergieverbrauch von 1,68 MJ/km, im Mittel der verschiedenen betrachteten Batterietypen also etwa 80% des durchschnittlichen Primärenergieverbrauchs während des gesamten Lebenszyklus. Der angenommene Verbrauch elektrischer Energie in der Nutzungsphase entspricht einem Verbrauch von 1,8 l Diesel pro hundert Kilometer¹⁷.

¹⁷ Unter Verwendung eines unteren Heizwerts von 35 MJ/l für Dieselkraftstoff; vgl. <http://de.wikipedia.org/wiki/Dieselmotor> [abgerufen am 11. Mai 2015]



Quelle: US-EPA, S. 8

Abb. 3 Relativer Einfluss der verschiedenen Lebenszyklusphasen auf einzelne Umweltindikatoren für die drei untersuchten Li-Ionen-Batterietypen für vollelektrische Fahrzeuge

Das durchschnittliche Treibhauspotenzial verschiedener Li-Ionen-Batterietypen beträgt 142 g CO₂-Äq./km (spezifische Masse an CO₂, deren Treibhauspotenzial der Gesamtheit der verschiedenen Treibhausgase entspricht, die während des Lebenszyklus einer Batterie emittiert werden). **Davon stammen 120 g CO₂-Äq./km aus der Nutzungsphase, das sind 82%.**

Die Sensitivitätsanalyse der US EPA-Studie zeigt, dass die Lebensdauer der Batterie einen signifikanten Einfluss auf die Umweltauswirkungen einer funktionalen Einheit, also eines von einem Elektrofahrzeug gefahrenen Kilometers hat. Den größten Einfluss auf die Umweltauswirkungen haben gleich danach Änderungen in der Zusammensetzung des Strom-Mix, das heißt der Herkunft der für die Ladung der Batterie verwendeten elektrischen Energie, insbesondere auf das Treibhauspotenzial. Erfolgt die Ladung mit elektrischer Energie aus erneuerbaren Quellen, können die Umweltauswirkungen drastisch gesenkt werden. Insbesondere kann das Treibhauspotenzial um etwa 80% auf etwas über 22 g CO₂-Äq./km gesenkt werden.

Verbesserungen der Umweltauswirkungen lassen sich zudem durch Änderungen im Herstellungsprozess erzielen. So haben Batterien mit positiven Elektroden aus Nickel und Kobalt sowie solche, die unter Einsatz von Lösungsmitteln hergestellt werden, die stärksten Umweltauswirkungen. Eine Änderung der Materialien oder der Verzicht auf Lösungsmittel bei der Herstellung, kann hier die Umweltauswirkungen deutlich verringern. Die Materialien für die Ummantelung der Batterie, meist Stahl oder Aluminium, haben einen großen Einfluss auf die Umweltauswirkungen der Rohstoffgewinnung und Herstellung. Änderungen am Design oder andere Materialien bieten hier Optimierungspotenzial. Der Einsatz von Nanotechnologie hat das Potential, die Umweltauswirkungen insgesamt deutlich zu verringern, da sie erlaubt, bedeutende Einsparungspotentiale in der Herstellung zu erschließen.

3.3.4 Deutung

Die US EPA-Studie zitiert Ergebnisse, wonach die Produktion eines Personewagens 25 g CO₂-Äq./km verursacht, also etwa so viel wie die Produktion der Batterie, aber wenig verglichen mit dem Treibhauspotenzial der Nutzungsphase. Dies entspricht den Ergebnissen von (Kwak, et al., 2012), wonach das Treibhauspotenzial eines diesel-betriebenen Traktors im Wesentlichen aus der Nutzungsphase herrührt, und bestätigt, dass die Berücksichtigung des in der US EPA-Studie nicht explizit berechneten Treibhauspotenzials der Fahrzeugherstellung nichts an der Schlussfolgerung ändert, dass die Verwendung elektrischer Energie aus erneuerbaren Quellen das Treibhauspotenzial eines Elektrofahrzeugs entscheidend verbessert.

Diese ist damit die zentrale Schlussfolgerung, die aus der US-EPA Studie gezogen werden kann:

Die Umweltauswirkungen von Elektrofahrzeugen rühren im Wesentlichen aus der Nutzungsphase her und werden durch die Erzeugungsform der elektrischen Energie bestimmt.

Mit Blick auf die Untersuchungsfragen im Projekt SESAM bedeutet dies, dass vollelektrische Landmaschinen, die überwiegend mit elektrischer Energie aus vor Ort vorhandenen und genutzten erneuerbaren Quellen betrieben werden, geringe Umweltauswirkungen haben. Der Einsatz von Energie aus erneuerbaren Quellen wird nicht durch Umweltauswirkungen der Gewinnung von Lithium und der Herstellung und Entsorgung von Batterien konterkariert.

Damit ist der erste Teil der oben gestellten Frage beantwortet:

Die Option der Elektrifizierung von Landmaschinen mittels Li-Ionen-Batterien ist unter Umweltgesichtspunkten im Vergleich zu Landmaschinen mit Dieselmotorantrieb eher vorteilhaft.

Dieses Ergebnis ist nun noch im Lichte weiterer Untersuchungen zu betrachten. Ferner ist noch zu klären, ob Li-Ionen-Batterien auch im Vergleich zu anderen Batterien, die für Landmaschinen in Frage kommen, unter Umweltgesichtspunkten vorteilhaft sind.

3.4 Weitere Studien und Arbeitsergebnisse

3.4.1 Masterarbeit Olofsson/ Romare (2013)

In ihrer Masterarbeit untersuchten Olofsson und Romare (Olofsson & Romare, 2013) die Umweltauswirkungen der Verwendung von Lithium-Eisenphosphat- und Lithium-Nickel-Kobalt-Manganoxid-Batterien in Plug-in Hybridbussen von der Gewinnung der Rohstoffe bis zur Bereitstellung der elektrischen Energie für den Antrieb. Erfasst wurden die Umweltauswirkungen der Batteriekomponenten und –untersysteme. Periphere Komponenten wie Batterieladegeräte wurden nicht in die Untersuchung einbezogen. Für die Berechnungen wurde die GaBi LCA-Software von PE Internationals eingesetzt.

Als typische Fahrstrecke eines Hybrid-Busses wurden 5-10 km angenommen, als typische Batteriekapazität 20-60 kWh und als typische Motorleistung 120-150 kW bei einer Spannung von 500-730 V. Diese Werte sind anders als die von Personenkraftwagen sehr nahe an den typischen Werten eines vollelektrischen Traktors wie er in dieser Meta-Studie betrachtet wird.

Erkenntnisse der Arbeit von Olofsson und Romare sind unter anderem:

- **Die Erhöhung des Fahrzeuggewichts um 300-500 kg durch die Batterien führt zu einem ähnlich hohen zusätzlichen Primärenergieverbrauch - und bei einem überwiegend fossilen Strom-Mix auch zu einem ähnlich hohen zusätzlichen Treibhauspotenzial - in der Nutzungsphase wie die Herstellung der Batterien.**
- Unter allen Komponenten eines Batteriesystems verursachen die Batteriezellen und der elektronischen Kontrollsysteme die größten Umweltauswirkungen bei der Herstellung. Darunter haben die Aktivmaterialien der Batteriezellen den größten Anteil, vor allem die positive Elektrode. Dies gilt für die beiden untersuchten Li-Ionen-Batterietypen.

- Der Anteil des in den Kühlrippen, den Stromableitern und der Batteriegehäuse enthaltenen Aluminiums an den Umweltauswirkungen der Herstellungsphase ist ebenfalls nennenswert.
- Die Substitution von seltenen Materialien durch solche von größerer Verfügbarkeit kann die Umweltauswirkungen verringern.
- Die Umweltauswirkungen der Elektronikkomponenten im Batteriekontrollsystem schlagen unter anderem durch den Anteil seltener Erden zu Buche. Eine Wiederverwendung der Elektronikkomponenten, die aufgrund der geringen Beanspruchung im Betrieb durchaus denkbar ist, kann die Umweltauswirkungen deutlich verringern.
- Diesem Ziel dient es auch, wenn die Anzahl der Wandler und damit der elektronischen Komponenten durch geeignete Wahl der Spannungsebenen reduziert wird.
- Nach Substitution und Wiederverwendung kann Recycling die Umweltauswirkungen verringern helfen.

3.4.2 Instituts für Energie- und Umweltforschung (IFEU) Heidelberg GmbH

LCA-Ergebnisse des unter anderem auf die Durchführung von LCA spezialisierten IFEU zu Li-Ionen-Batterien sind im Konferenzbeitrag (Helms, Pehnt, Lambrecht, & Liebich, 2010) veröffentlicht worden. In der zugrunde liegenden Studie wurden ein vollelektrischer Personenkraftwagen, ein Personenkraftwagen mit Hybridantrieb und einer mit Verbrennungsmotor miteinander verglichen. Als funktionale Einheit wurde die Lebensdauer eines Personenkraftwagens gewählt. Wesentliche Aussagen sind:

- **Die meisten Umweltauswirkungen entstehen in der Nutzungsphase. Beim Treibhauspotenzial sind dies etwa zwei Drittel.**
- Wird das Elektrofahrzeug beliebig am Netz geladen, kann das Treibhauspotenzial sogar höher sein als bei Fahrzeugen mit Verbrennungsantrieben. **Erfolgt die Ladung jedoch ausschließlich mit Strom aus erneuerbaren Energiequellen, ist das Treibhauspotenzial der Nutzungsphase nahezu Null.** Sprich, es ist insbesondere für das Treibhauspotenzial entscheidend, aus welcher Quelle die für die Ladung der Batterie verwendete Energie stammt.
- Die Effizienz des Fahrzeugantriebs ist ein weiterer entscheidender Parameter. Elektroantriebe zeichnen sich durch eine generell hohe Effizienz im Vergleich zu Verbrennungsantrieben aus. Insbesondere ist ihre Effizienz nahezu konstant über den gesamten Lastbereich und damit im Teillastbetrieb deutlich höher als bei Verbrennungsantrieben. Elektroantriebe zeigen auch deutliche Vorteile bei Lastwechseln.
- Der Energieverbrauch der Nebenaggregate, 14 % bei Personenkraftwagen im Stadtverkehr, 4 % auf der Autobahn, ist nicht zu vernachlässigen.

3.4.3 Förderschwerpunkt Modellregionen Elektromobilität

Das Wuppertal Institut für Klima, Umwelt und Energie GmbH hat im Rahmen der Umweltbegleitforschung Elektromobilität im Förderschwerpunkt „Modellregionen Elektromobilität“ (Ritthoff & Schallaböck, 2012) einen Überblick zur Ökobilanzierung der Elektromobilität erstellt. Der Überblick ist selbst eine Meta-Studie. Darin wurden unter anderem folgende Erkenntnisse zusammengefasst:

- „Bei Kompaktfahrzeugen (PKW) gibt es hinsichtlich der lebenszyklusweiten Treibhausgasemissionen nur geringe Unterschiede zwischen den konventionell angetriebenen Fahrzeugen und den Hybrid- und Elektrofahrzeugen, wenn für die Strombereitstellung der deutsche Strom-Mix angesetzt wird. ... Dieses Ergebnis ändert sich jedoch deutlich, wenn die Elektrizität ausschließlich aus Windkraft erzeugt wird.“
- Generell ist für die Bewertung der Umweltauswirkungen der Stromerzeugung zur Ladung der Batterie entscheidend, welche (marginalen) Änderungen dadurch bei der Struktur des Kraftwerkparcs und seiner Nutzung verursacht werden.
- **Bei Elektrofahrzeugen hat die Phase der Herstellung einen größeren Anteil an den Umweltauswirkungen als bei Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor. Dies liegt insbesondere an der Batterie.** Es entfallen etwa 17 g CO₂-Äq/km allein auf die Batterieherstellung. Nichtsdestotrotz sind die Umweltauswirkungen der Nutzungsphase dominant.
- Die Ergebnisse der Vergleiche ändern sich, wenn nicht nur das Treibhauspotenzial betrachtet wird. So wurden in einer Studie (Held 2011) ein höheres Versauerungspotenzial für Hybrid- und Batteriefahrzeuge im Vergleich zu diesel- und insbesondere benzinbetriebenen Fahrzeugen festgestellt.

3.4.4 Comparative Life Cycle Environmental Assessment of different batteries

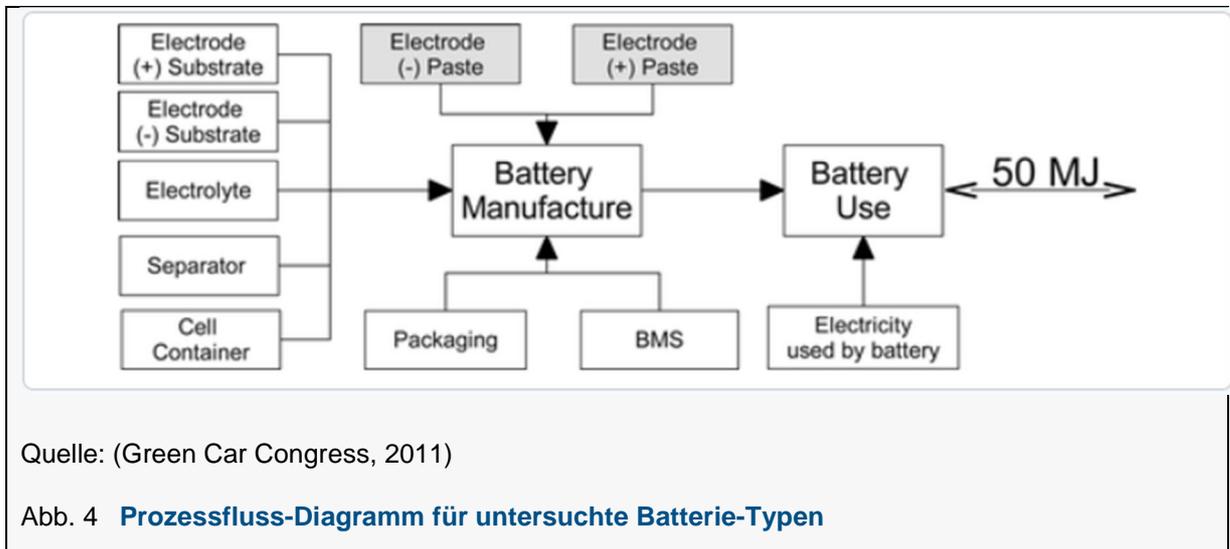
Der in der Zeitschrift “Environmental Science & Technology” erschienene Artikel „Life Cycle Environmental Assessment of Lithium-Ion and Nickel Metal Hydrid Batteries for Plug-In Hybrid and Battery Electric Vehicles” (Majeau-Bettez, Hawkins, & Stromman, 2011)¹⁸ präsentiert eine LCA-Studie, in der die Umweltauswirkungen dreier verschiedener Batterietypen verglichen werden:

1. Eisenphosphat Lithium-Ionen (Li-Ion)
2. Nickel-Metallhydrid (NiMH)
3. Nickel-Mangan-Cobalt-Lithium-Ionen (NMC)

Für die Auswertung wurde eine Kurzfassung dieser Studie auf der Website Green Car Congress herangezogen (Green Car Congress, 2011).¹⁹ Abb. 4 zeigt das Prozessfluss-Diagramm für die untersuchten Batterietypen. Die funktionale Einheit ist 50 MJ an das Antriebsaggregat abgegebene Energie.

¹⁸ <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/es103607c> [abgerufen am 18. September 2015]

¹⁹ <http://www.greencarcongress.com/2011/04/ntnu-20110421.html> [abgerufen am 23. Mai 2014]



Zentrale Ergebnisse von (Majeau-Bettez, Hawkins, & Stromman, 2011) sind:

- Im Vergleich sind die Li-Ion Typen über alle Impact-Kategorien vorteilhafter. Die Wahl von Li-Ionen-Batterien für vollelektrische Landmaschinen hat also im Vergleich zu Nickel-Metallhydrid und NMC-Batterien die geringsten Umweltauswirkungen.
- Effizienz in der Nutzungsphase und der Energiemix bei der Erzeugung der zum Laden verwendeten elektrischen Energie sind sehr bedeutsam.

Der erste dieser beiden Punkte beantwortet den zweiten Teil der dieser Meta-Studie vorangestellten Frage:

Die Option der Elektrifizierung von Landmaschinen mittels Li-Ionen-Batterien ist unter Umweltgesichtspunkten im Vergleich zu vollelektrischen Landmaschinen mit anderen Batterien eher vorteilhaft.

Der zweite Punkt bestätigt – wie die anderen betrachteten Untersuchungen auch, das bereits gefundene Ergebnis, dass die Elektrifizierung von Landmaschinen mittels Li-Ionen-Batterien unter Umweltgesichtspunkten im Vergleich zu Landmaschinen mit Dieselmotorantrieb vorteilhaft ist.

Im Detail enthalten die betrachteten Untersuchungen jedoch noch eine Reihe weiterer interessanter Erkenntnisse, die Hinweise darauf geben, wie die Umweltauswirkungen vollelektrischer Landmaschinen gesenkt werden können, und was den Umweltvorteil der Elektrifizierung von Landmaschinen konterkarieren könnte. Ein zentraler Punkt ist dabei die Wiederverwendung und -verwertung sowie das Recycling der Li-Ionen-Batterien.

3.5 Einfluss von Wiederverwendung, -verwertung und Recycling

Einen großen Einfluss auf die Umweltauswirkungen hat nach dem Befund vieler Arbeiten die Wiederverwendung, -verwertung und das Recycling von Li-Ionen-Batterien und ihren Komponenten beziehungsweise der in ihnen enthaltenen Materialien. Insbesondere die bislang noch nicht nennenswert entwickelte Wiedergewinnung des Lithiums hat einen großen Einfluss auf das Gesamtergebnis der Ökobilanzierung. Da auch bei der Wiederverwendung, -verwertung und dem Recycling Energie und Input-Materialien benötigt und Emissionen erzeugt werden, ist nicht von vornherein gesichert, dass diese Prozesse die Ökobilanz hinsichtlich der meisten oder gar aller Umweltauswirkungen verbessern. Es bedarf darum einer genauen Ökobilanzierung der dabei angewandten Verfahren. Die im Folgenden aufgeführten Arbeiten haben spezifisch die Ökobilanzierung der End-of-Life-Phase von Li-Ionen-Batterien zum Gegenstand.

3.5.1 Forschungsprojekte zur Zweitverwendung von Li-Ionen-Traktionsbatterien

Für Traktionsbatterien in Elektrofahrzeugen existieren Spezifikationen, die das End-of-Life definieren. Wesentlicher Parameter ist dabei die Restkapazität (State-of-Health). Beträgt dieser Wert nur noch 80 Prozent der anfänglichen Nennkapazität, dann wird im Automobilbereich das Lebensende der Batterie definiert. Derartige Batterien eignen sich jedoch durchaus für Zweitanwendungen, d.h. für eine Second-Life Verwendung. Die Restkapazität allein gibt jedoch noch keinen ausreichend genauen Aufschluss über den Zustand der gealterten Batterie. Weitere Werte aus dem Lebenszyklus der Batterie (z. B. Nutzungsdauer, Entlade- und Ladetiefen oder Ladeprofile) sind in die Charakterisierung des Batteriezustandes einzubeziehen. Diese zu untersuchen ist Gegenstand des Projektes StarTrak, das von Dezember 2013 bis November 2015 vom Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme in Freiburg durchgeführt wird.²⁰

In einer Reihe von Projekten wird gegenwärtig die Zweitverwendung von E-Fahrzeugbatterien als stationäre Energiespeicher untersucht. Zu den erfolgreich abgeschlossenen Vorhaben zählt das Pilotprojekt PV-Store^{plus} E-Bike im Oberallgäu, das im Rahmen des Alpenraum-Projektes Alpstore durchgeführt worden ist.²¹ Dabei werden ReeVOLT Energiespeicher²², die auf gebrauchten E-Bike-Batterien basieren und von WEMAG AG²³ in Kooperation mit dem Tourismusunternehmen MOVELO²⁴ entwickelt wurden, eingesetzt.

Zu den Vorhaben mit direkter Beteiligung von Automobilherstellern gehört das EU-Horizon 2020 Projekt „Energy Local Advanced Storage Systems“ (ELSA) unter der Führung des französischen Immobilienkonzerns Bouygues und mit Beteiligung der Automobilhersteller Renault

²⁰ <http://www.erneuerbar-mobil.de/de/projekte/vorhaben-im-bereich-der-elektromobilitaet-von-2013/forschung-und-entwicklung-zum-thema-batterierecycling/StaTrak> [abgerufen am 15. Mai 2015]

²¹ <http://www.alpstore.info/Pilots.html> [abgerufen am 18. September 2015]; der deutsche Abschlussbericht mit dem auf der Website englisch angegebenen Titel „Case Study – PV-Store^{plus} E-Bike kann heruntergeladen werden von: <http://www.alpstore.info/Downloads.html> [abgerufen am 18. September 2015]

²² <http://www.reevolt.de/produkte/stromspeicher/> [abgerufen am 18. September 2015]

²³ <http://www.wemag.com/> [abgerufen am 18. September 2015]

²⁴ <http://www.moveo.com/de/allgaeu/> [abgerufen am 18. September 2015]

und Nissan.²⁵ Ein ähnliches Projekt läuft mit Beteiligung des französischen Energiekonzerns EdF und der Automobilfirmen Mitsubishi und Peugeot-Citroën.²⁶ Auch deutsche Automobilbauer suchen nach Möglichkeiten den Nutzen von E-Fahrzeugg Batterien durch eine Zweitverwendung zu erweitern.²⁷

3.5.2 Untersuchungen des Öko-Institut zu Elektroschrott-Recycling allgemein

Das Öko-Institut e.V. untersucht in einer Reihe verschiedener Projekte Aspekte der Wiederverwendung und –verwertung und des Recycling, vor allem von Elektroschrott²⁸. Einige darin gewonnene Erkenntnisse wurden im Vortrag (Buchert, E-Schrottreycling - Eine ökologische Bewertung, 2013) auf der T.R.E.N.D. 2013 in Hamburg präsentiert:

- **Urban Mining, d.h. die Nutzung von Rohstoffen in Abfall, erlaubt deutlich höhere Ausbeuten und hohe Einsparungen an Energie und Hilfsstoffen sowie Vermeidung von Emissionen.** Z.B. enthält Golderz nur ca. 5 g/t Gold, Computer-Leiterplatten dagegen etwa 250 g/t.
- Weltweit wächst das Elektroschrottaufkommen um etwa 7 % pro Jahr.
- Im Bereich Elektroschrott-Recycling bestehen häufig Schwachpunkte in der Sammlung und/ oder in der Vorbehandlung. Zum Beispiel können unsachgemäße Shredderprozeduren von edelmetallhaltigen Platinen zu starken diffusen Verlusten von Palladium, Gold und Silber führen.
- Das Beispiel Platingruppenmetalle (PGM) zeigt: **Bestehen direkte Geschäftsbeziehungen über den gesamten Produktlebenszyklus (Hersteller – industrieller Nutzer – PGM-Refiner), werden Recycling-Quoten von über 90% erreicht.**
- Bestehen keine Geschäftsbeziehungen über den gesamten Lebenszyklus, wird der Kreislauf durch private Nutzer und nicht-industrielle Akteure unterbrochen, sinken die Recyclingquoten deutlich, Stoffströme werden intransparent und illegal, „graue“ und „schwarze“ Akteure treten in der Recyclingkette auf.

3.5.3 Ökobilanz LithoRec 2011

Das Projekt LithoRec wurde zwischen Sommer 2009 und Herbst 2011 unter der Koordination der Technischen Universität Braunschweig mit den Verbundpartnern Audi AG, Chemetall GmbH, Electrocyling GmbH, Evonik Litarion GmbH, Walch Recycling & Edelmetallhandel GmbH & Co. KG, H. C. Starck GmbH, I+ME ACTIA GmbH, Recylex GmbH, Süd-Chemie AG, Universität Münster und Volkswagen AG durchgeführt.²⁹ Gegenstand des Projektes war die Entwicklung eines Recyclingverfahrens für Li-Ionen-Batterien und eine Realisierung im Labormaßstab.

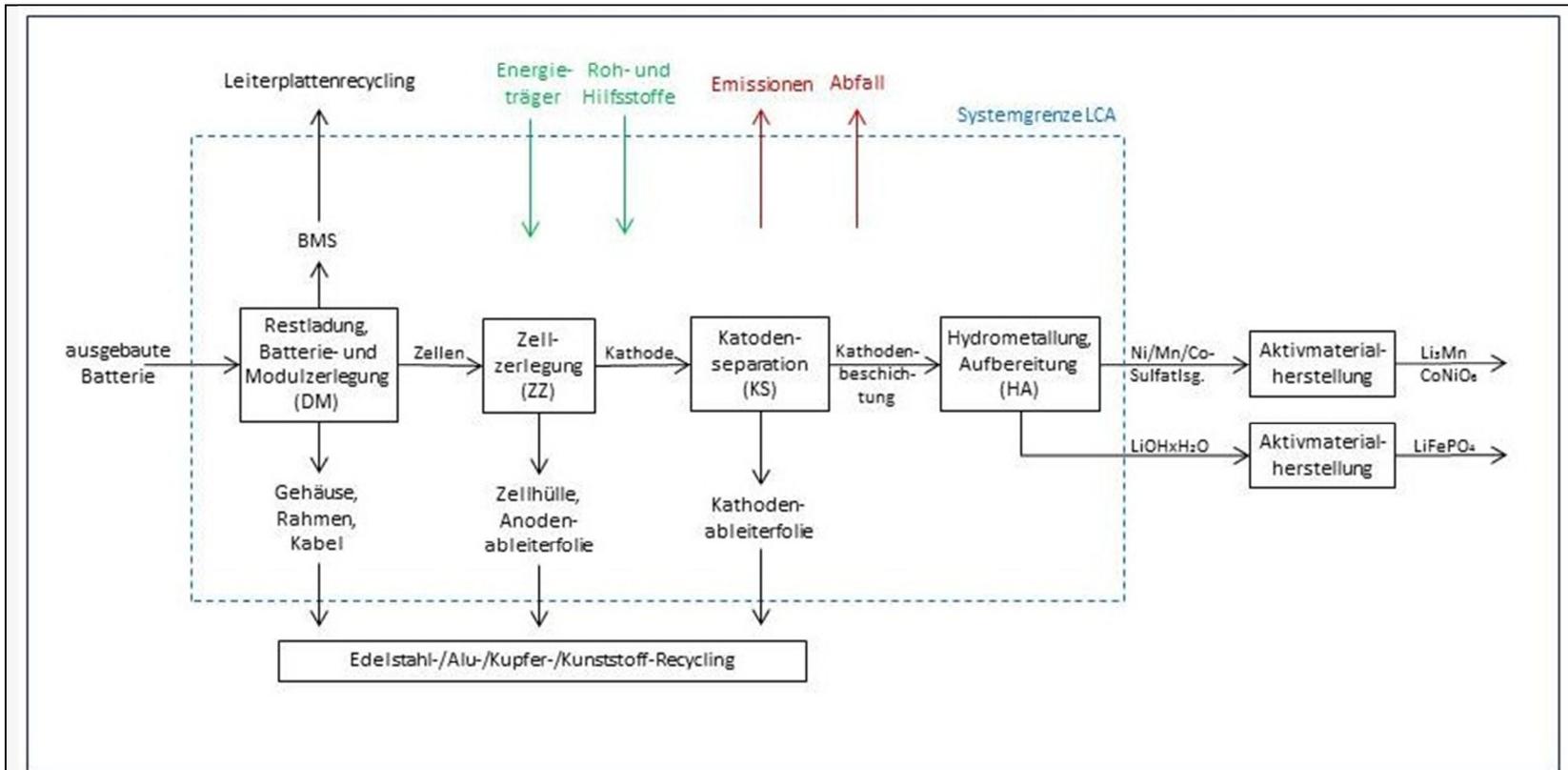
²⁵ www.elsa-h2020.eu; Website im Aufbau

²⁶ http://www.pv-magazine.de/nachrichten/details/beitrag/edf--forsee-power--mitsubishi-und-peugeot-citron-starten-second-life-projekt_100019851/ [abgerufen am 18. September 2015]

²⁷ B.A.U.M., interne mündliche Mitteilung

²⁸ <http://www.resourcefever.org/home.html> [abgerufen am 18. Mai 2015]

²⁹ Die Eigendarstellung von LithoRec findet sich unter: <http://www.pt-elektromobilitaet.de/projekte/batterierecycling/lithorec> [abgerufen am 15. Mai 2015]



Quelle: B.A.U.M. in Anlehnung an (Buchert, Jenseit, Merz, & Schüler, 2011), S. 9

Abb. 5 Systemgrenze des LithoRec-Prozesses

Das Öko-Institut war als assoziierter Partner für die Konzeption und Realisierung der Ökobilanzierung verantwortlich und koordinierte die Arbeiten der Umbrella-Gruppe LCA, die neben LithoRec das parallel laufende Projekt LiBRi begleitete.

Es wurde eine Ökobilanzierung des LithoRec-Recyclingverfahrens gemäß ISO 14040/14044 durchgeführt, um dieses in der Entwicklung befindliche Verfahren zu bewerten und Optimierungspotenziale aufzuzeigen. Das Projekt wurde vor dem Hintergrund durchgeführt, dass bekannte Recyclingverfahren für Li-Ionen-Batterien auf portable Elektronik ausgerichtet sind, mit unzureichenden Rückgewinnungsquoten arbeiten und Lithium als wertvolle Ressource vernachlässigen.

Es wurden in der Umbrella-Gruppe LCA generische, aber repräsentative Durchschnittsgewichte und –zusammensetzungen der Batterien definiert, für deren Recycling die Ökobilanz erstellt werden sollten. Im Vordergrund der Untersuchungen stand die Rückgewinnung von Metallverbindungen (Kobalt-, Nickel-, Mangan- und Lithiumverbindungen) in batteriefähiger Qualität für die Elektrodenherstellung. Als funktionelle Einheit wurde 1.000 kg zu recycelnde Batterien des Typs NMC beziehungsweise LFP gewählt. Der LithoRec-Ansatz setzt auf einen separaten „Rückbau“ der Batterien bis hin zu den einzelnen Zellmaterialien. Entsprechend umschließt die Systemgrenze für die Bilanzierung des LithoRec-Recyclingverfahrens die folgenden Module (s. Abb. 5):

- Entladung und Zerlegung der Batteriesysteme bis auf Zellebene
- Zellzerlegung
- Kathodenseparation
- Hydrometallurgische Aufbereitung

Für die in das System eingebrachten, zu recycelnden Batterien wurden keine Umweltauswirkungen verbucht. Dies entspricht der Ausblendung der vorgelagerten Produktlebensphasen, welche hier nicht Gegenstand der Betrachtung sind. Für die das System verlassenden Stoffströme wurden entweder Gutschriften (für Metalle und andere Wertstoffe und –komponenten) oder Emissionen verbucht. In das System eingebrachte Energie- und Stoffströme werden in der Sachbilanz bewertet. Dabei wurde auf die Datenbanken der GaBi LCA-Software von PE Internationals in der Version 4.4 zurückgegriffen, ergänzt um Daten aus der ecoinvent Datenbank v2.01. Wichtige Daten zu den LithoRec-Prozessen stammen zudem aus Laborversuchen und Pilotanlagen. Da letzte noch keine industriellen Prozesse abbilden, sind die Ergebnisse der Ökobilanzierung zum LithoRec-Recyclingverfahren mit Vorbehalt zu betrachten.

Die in der der Ökobilanzierung zum LithoRec-Recyclingverfahren betrachteten Umweltauswirkungen waren das Treibhauspotenzial, der kumulierte Aufwand nicht erneuerbarer Primärenergie, das Versauerungspotenzial, der Verbrauch abiotischer Ressourcen, die Eutrophierung und die Bildung von Photooxidantien). Die Ergebnisse sind:

- Das Recycling der beiden betrachteten Batterietypen ergeben sich für alle betrachteten Umweltauswirkungen zum Teil deutliche Nettogutschriften.
- Beim Treibhauspotenzial treten sowohl Belastungen als auch Gutschriften auf. Die höchsten Belastungen resultieren aus der hydrometallurgischen Aufbereitung und werden durch die entsprechenden Gutschriften nicht vollständig kompensiert. Bei Be-

rücksichtigung aller vier Prozessschritte resultiert eine **Nettogutschrift von ca. 1.000 kg CO₂-äq./1.000 kg Batterien (NMC)** beziehungsweise **1.700 kg CO₂-äq./1.000 kg Batterien (LFP)**.

- Der nicht erneuerbare kumulierte Primärenergieaufwand zeigt ein ähnliches Bild wie das Treibhauspotenzial.
- In der Kategorie „elementarer Ressourcenverbrauch“ weist das LithoRec-Verfahren deutliche Gutschriften auf. Der höchste Beitrag entsteht dabei im Schritt der Zellzerlegung aus dem Recycling der Kupferableiterfolie.
- Für die ermittelten Nettogutschriften sind die Gutschriften für die das System verlassenden batteriefähigen Metallverbindungen relevant. Es folgen Gutschriften für andere Wertkomponenten. Beiden gegenüber stehen Ressourcenverbräuche und Emissionen des Recyclingprozesses.
- Eine sorgfältige Entladung und Zerlegung ist essentiell für ein positives Gesamtergebnis des Recyclingprozesses.
- Die Zellmaterialien Nickel-, Kobalt- und Lithiumverbindungen sind wichtig und interessant für die Recyclingwirtschaft.
- Die sonstigen Komponenten, die der Recyclingwirtschaft überführt werden können, machen jedoch ungefähr die Hälfte des gesamten Batteriegewichts aus. Die entsprechenden Recyclingverfahren (Edelstahlrecycling, Kupferrecycling, Aluminiumrecycling, Leiterplattenrecycling etc.) fußen auf bereits bewährten und etablierten Infrastrukturen und es ist für sie keine Entwicklungsaufwand notwendig.
- Es sind nicht nur für Lithium, sondern auch für die wichtigen Batteriemetalle Nickel und Kobalt jeweils aktuelle Datensätze für die Förderung und Produktion der Primärmetalle von sehr hoher Bedeutung für die Ergebnisse der Ökobilanz.
- Die Verwendung von Energie aus erneuerbaren Quellen im Recyclingprozess verbessert das Gesamtergebnis der Ökobilanz.

Das Projekt LithoRec wird im Folgeprojekt LithoRec II von Oktober 2012 bis September 2015 vom Öko-Institut e.V. Darmstadt fortgesetzt.³⁰ Ziel des Folgeprojektes ist die Weiterentwicklung des LithoRec-Recyclingverfahrens und der komplette Aufbau einer Recycling-Kette für Li-Ionen-Traktionsbatterien im Pilotmaßstab. Ein weiteres Projekt, in dem ein Verfahren zum Li-Ionen-Batterierecycling entwickelt wird, ist das von Mai 2012 bis Oktober 2016 laufende Projekt ECO BAT REC.³¹

3.5.4 Batteriegesetz und existierende Rücknahmesysteme für Li-Ionen-Batterien

Das Batteriegesetz (BattG)³² verpflichtet die Vertrieber von Batterien, seien diese wiederaufladbar oder nicht, zur Rücknahme von Altbatterien von Endnutzern an oder in unmittelbarer Nähe der Verkaufsstelle (§9 Abs. 1) und dem von den Herstellern von Gerätebatterien einzurichtenden Gemeinsamen Rücknahmesystem zur Abholung bereitzustellen (§9 Abs. 2). Die Hersteller sind zur Rücknahme und Verwertung verpflichtet (§5 Abs. 1).

³⁰ <http://www.lithorec2.de/index.php> [abgerufen am 15. Mai 2015]

³¹ <http://www.ecobatrec.de/index.html> [abgerufen am 15. Mai 2015]

³² Batteriegesetz vom 25. Juni 2009 (BGBl. I S. 1582), das zuletzt durch Artikel 4 des Gesetzes vom 24. Februar 2012 (BGBl. I S. 212) geändert worden ist.

Für die Rücknahme von stationären Batteriespeichern wurde von der Gemeinsame Rücknahmesystem Servicegesellschaft (GRS) mbH, einer 100-prozentigen Tochter der Stiftung GRS Batterien, zusammen mit dem Bundesverband Solarwirtschaft e.V. (BSW-Solar), dem Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V. (ZVEI) sowie dem Zentralverband der Deutschen Elektro- und Informationstechnischen Handwerke (ZVEH) eine Branchenlösung entwickelt, die dem BattG genügt. Die Branchenlösung hat den Vorteil, dass die Altbatterien nicht individuell den jeweiligen Herstellern zur Rücknahme zugeführt werden müssen. Zuständig für die Umsetzung ist die GRS.³³

3.6 Sonstige Umweltauswirkungen der Vollelektrifizierung von Landmaschinen

Neben der Herstellung, Nutzung und dem Recycling von Li-Ionen-Batterien führt die Vollelektrifizierung von Landmaschinen noch zu Änderungen von Umweltauswirkungen im Vergleich zum Dieseltraktor, die nicht mit der Li-Ionen-Batterie beziehungsweise motorischen Dieselverbrennung zusammenhängen. Diese liegen außerhalb des in Kap. 3.1.1 beschriebenen Untersuchungsrahmen, sollen hier aber kurz erwähnt sein:

- Veränderte Umweltauswirkungen im Zusammenhang mit der Produktion und Entsorgung anderer Komponenten, vor allem eines Elektromotors statt eines Dieselmotors mit Abgasnachbehandlungssystemen. Vor allem in letztem kommen Katalysatoren zum Einsatz, deren Produktion mit hohen Umweltauswirkungen verbunden ist. Diese entfallen bei einem vollelektrischen Traktor.
- Weniger Schmieröleinträge in den Boden.
- Geringere Umweltauswirkungen dank Einsparungen von Dünge- und Pflanzenschutzmitteln in Folge höherer Präzision bei der Ausbringung bei entsprechend elektrifizierten Anbaugeräten.

3.7 Synthese der Ergebnisse von LCA-Studien

Die Ergebnisse der Meta-Studie zu den Umweltauswirkungen von Li-Ionen-Batterien lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Vergleich batterie-elektrischer Antrieb mit Dieselmotorantrieb

- Die Umweltauswirkungen des Referenzfahrzeugs, einer Landmaschine mit Dieselmotorantrieb, rühren im Wesentlichen aus der Nutzungsphase her und sind durch die Produktion und Verbrennung von Dieselmotorantrieb bestimmt.
- Die Umweltauswirkungen von Elektrofahrzeugen rühren ebenfalls im Wesentlichen aus der Nutzungsphase her und werden durch die Erzeugungsform der elektrischen Energie bestimmt, mit der die Batterie des Elektrofahrzeugs geladen wird. Beim

³³ http://www.umweltruf.de/2015_Programm/news/111/news3.php3?nummer=4068 [abgerufen am 4. September 2015]

Treibhauspotenzial elektrischer Personenkraftwagen sind etwa 65-80 % der Nutzungsphase zuzuordnen, wenn die elektrische Energie aus fossilen Quellen stammt.

- Bei Elektrofahrzeugen hat die Phase der Herstellung einen größeren Anteil an den Umweltauswirkungen als bei Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor. Dies liegt insbesondere an der Batterie. Nichtsdestotrotz sind die Umweltauswirkungen der Nutzungsphase dominant.
- Die Erhöhung des Fahrzeuggewichts durch die Batterien führt bei Bussen zu einem ähnlich hohen zusätzlichen Primärenergieverbrauch - und bei einem überwiegend fossilen Strom-Mix auch zu einem ähnlich hohen zusätzlichen Treibhauspotenzial - in der Nutzungsphase wie die Herstellung der Batterien. Bei Landmaschinen müsste dieser Effekt noch näher untersucht werden. Sollte er nicht größer sein als bei Bussen, ändert er nichts daran, dass die Umweltauswirkungen der Nutzungsphase dominieren.
- **Folglich sind überschlägig gerechnet die Umweltauswirkungen einer voll-elektrischen batterie-betriebenen Landmaschine signifikant geringer als die einer vergleichbaren Landmaschine mit Dieselmotorantrieb, sofern die elektrische Energie zum Laden der Batterie aus erneuerbaren Quellen stammt, insbesondere, wenn sie aus PV oder Windkraftanlagen stammt.**

Einzelne Umweltauswirkungen

- Der Vorteil des Elektroantriebs gegenüber dem Dieselmotorantrieb schlägt vor allem beim Treibhauspotenzial und dem Verbrauch nicht erneuerbarer Ressourcen zu Buche.
- Andere Umweltauswirkungen als das Treibhauspotenzial können bei Hybrid- und Batteriefahrzeuge höher sein als bei diesel- und insbesondere benzinbetriebenen Fahrzeugen.

Vergleich verschiedener Batterietypen

- Li-Ionen-Batterien für vollelektrische Landmaschinen haben im Vergleich zu Nickel-Metallhydrid und NMC-Batterien die geringsten Umweltauswirkungen.

Optimierungsmöglichkeiten

- Die Optimierung des Designs von Batterien kann und die Substitution von Materialien mit hohen Umweltauswirkungen, etwa seltene Erden, durch solche mit geringeren kann die Umweltauswirkungen der Batterieherstellung senken.
- Die Lebensdauer der Batterie hat einen großen Einfluss auf die Umweltauswirkungen. Sie hängt sowohl von der Anzahl der durchfahrenen Be- und Entladezyklen als auch vom kalendarischen Alter ab.³⁴
- Im Automobilbereich wird das Lebensende der Batterie eines Elektrofahrzeugs im Wesentlichen durch das Absinken der Restkapazität auf 80 Prozent des Anfangswerts definiert. Batterien, die nach dieser Definition das Lebensende erreicht haben, eignen sich jedoch durchaus für Zweitanwendungen, d.h. für eine Second-Life Verwendung.

³⁴ Notizen des Autors beim EES Forum im Rahmen der Intersolar/EES 2014 und 2015

- Eine Reduzierung der Anzahl von Elektronikkomponenten im Rahmen der Designoptimierung der Landmaschine und die Wiederverwendung von Elektronikkomponenten, die aufgrund der geringen Beanspruchung im Betrieb durchaus denkbar ist, kann die Umweltauswirkungen unabhängig davon verringern.
- Nach Designoptimierung, Substitution und Wiederverwendung kann Recycling die Umweltauswirkungen noch deutlich verringern.
- Da auch bei der Wiederverwendung, -verwertung und dem Recycling Energie und Input-Materialien benötigt und Emissionen erzeugt werden, ist nicht von vornherein gesichert, dass diese Prozesse die Ökobilanz hinsichtlich der meisten oder gar aller Umweltauswirkungen verbessern. Es bedarf darum einer genauen Ökobilanzierung der dabei angewandten Verfahren. Beim LithoRec-Verfahren, das bislang im Pilotmaßstab umgesetzt wurde, ergeben sich für alle betrachteten Umweltauswirkungen zum Teil deutliche Nettogutschriften, spricht, dass Recycling verbessert die Umweltauswirkungen des gesamten Lebenszyklus. Weitere Verfahren zur Wiedergewinnung von Lithium sind in der Entwicklung.
- Bestehen keine Geschäftsbeziehungen über den gesamten Lebenszyklus und wird der Kreislauf durch private Nutzer und nicht-industrielle Akteure unterbrochen, sinken Recyclingquoten üblicherweise deutlich, Stoffströme werden intransparent und illegal, „graue“ und „schwarze“ Akteure treten in der Recyclingkette auf.

4 Lärminderung

4.1 Definition und rechtliche Einordnung

Lärm wird im Duden „als störend und unangenehm empfundene laute, durchdringende Geräusche“ definiert³⁵. Geräusche werden von sogenannten Emittenten, beispielsweise durch den Betrieb von Anlagen, verursacht und an die Außenwelt abgegeben (Geräusch- bzw. Schallemissionen). Das so verursachte Geräusch wirkt als Schall auf die Umwelt ein (Geräusch- bzw. Schallimmission) und ist in bestimmten Fällen gesundheitsschädlich oder wird als belästigend wahrgenommen. Bei der Beurteilung von Lärm ist einerseits der Schalldruckpegel als physikalisch messbare Größe und andererseits die subjektive Bewertung der Geräusche eines jeden Menschen zu berücksichtigen.

Der Schutz vor körperlichen, seelischen und materiellen Schäden durch Lärm sind wichtige Bestandteile des Umwelt- und Arbeitsschutzes. Das **Bundes-Immissionsschutzgesetz** regelt den Interessensausgleich zwischen Lärmverursachern und der betroffene Personenkreisen. Ab wann Geräusche als Lärmbelästigung gelten, beurteilt die Behörde anhand der normkonkretisierenden Verwaltungsvorschrift TA Lärm - Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm³⁶, die auf Grund § 48 des BImSchG erlassen wurde. In der Technischen Anleitung Lärm (TA Lärm) wird unter anderem die Ermittlung von Geräuschimmission standardisiert und Immissionsrichtwerte für den sogenannten Beurteilungspegel L_T festgelegt. Der Beurteilungspegel L_T setzt sich aus dem zeitlichen Mittelwert des Schalldrucks (Mittelungspegel L_{Aeq}) und Zuschlägen von 3 bis 6 dB bei informations- oder impulshaltigen Geräuschen zusammen. Der Beurteilungspegel L_T setzt sich somit aus physikalisch messbaren Größen und subjektiv bewerteten Geräuschen über einen bestimmten Zeitraum zusammen. Die Immissionsrichtwerte für den Beurteilungspegel sind in Abhängigkeit der Anzahl der betroffenen Personen und der Zweckbestimmung unterschiedlicher Siedlungstypen gestaffelt (Tabelle 1).

Tabelle 1: Immissionsrichtwerte für Immissionsorte außerhalb von Gebäuden³⁷

Siedlungstypen	Immissionsrichtwert tagsüber (6:00 bis 22:00 Uhr)	Immissionsrichtwert nachts (22:00 bis 6:00 Uhr)
<i>Industriegebiete</i>	70 dB(A)	70 dB(A)
<i>Gewerbegebiete</i>	65 dB(A)	50 dB(A)
<i>Kern-, Dorf- und Mischgebiete</i>	60 dB(A)	45 dB(A)
<i>Allgemeine Wohngebiete</i>	55 dB(A)	40 dB(A)
<i>Reine Wohngebiete</i>	50 dB(A)	35 dB(A)
<i>Kurgebiete, Krankenhäuser und Pflegeanstalten</i>	45 dB(A)	35 dB(A)

³⁵ (Bibliographisches Institut GmbH, 2015)

³⁶ Sechste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz; TA Lärm - Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm; Vom 26. August 1998; (GMBI. 1998 S. 503)

³⁷ TA Lärm Nr. 6.1 zu VV Nr. 6 zu § 48 BImSchG

Das **Arbeitsschutzgesetz** und die darunter konkretisierenden Landesgesetze und Verordnungen legen u.a. physikalische Normen zum Schutz der Beschäftigten fest (Lärm am Arbeitsplatz). Die Grenzwerte beziehen sich auf die Tages- und Wochen-Lärmexpositionspegel und die Spitzenschalldruckpegel und beziehen somit alle Lärmemittenten am Arbeitsplatz mit ein.

- Der Tages-Lärmexpositionspegel (LEX, 8h) ist der über die Zeit gemittelte Lärmexpositionspegel bezogen auf eine Achtstundenschicht. Er umfasst alle am Arbeitsplatz auftretenden Schallereignisse³⁸.
- Der Spitzenschalldruckpegel (L_{pc, peak}) ist der Höchstwert des momentanen Schalldruckpegels³⁹.
- Der Wochen-Lärmexpositionspegel (LEX, 40h) ist der über die Zeit gemittelte Tages-Lärmexpositionspegel bezogen auf eine 40-Stundenwoche⁴⁰. Dieser kann nur in besonderen Ausnahmefällen als Bemessungsgrundlage bei der zuständigen Behörde beantragt werden, wenn die Lärmexposition von einem Arbeitstag zum anderen erheblich schwankt⁴¹.

Werden die unteren Auslösewerte L(tief)EX,8h i.H.v. 80 dB(A) bzw. L(tief)pC,peak i.H.v. 135 db(C)⁴² erreicht, hat der Arbeitgeber den Beschäftigten einen geeigneten persönlichen Gehörschutz zur Verfügung zu stellen⁴³. Werden die oberen Auslösewerte L(tief)EX, 8h i.H.v. 85 dB(A) bzw. L(tief)pC,peak i.H.v. 137 db(C)⁴⁴, erreicht, hat der Arbeitgeber dafür Sorge zu tragen, dass die Beschäftigten den persönlichen Gehörschutz bestimmungsgemäß verwenden⁴⁵.

4.2 Ermittlung der Lärmimmission

In der Anlage der TA Lärm werden zwei Methoden zur Ermittlung der Geräuschemission standardisiert und dargelegt. Geräuschemission können ermittelt werden durch Prognose (detailliert und überschlägig) sowie durch Messung⁴⁶, durch Ersatzmessung⁴⁷. Eine Messung der Lärmimmission des SESAM-Traktors, ist beim derzeitigen Entwicklungsstand nicht vorgesehen. Im Rahmen dieser Studie kann also nur eine oberflächliche Annäherung an die von ihm verursachte Lärmimmission vorgenommen werden.

Bei der Immissionsprognose sind grundsätzlich alle Schallquellen der Anlage zu berücksichtigen. Die Eingabedaten (u.a. A-bewerteter Schalleistungspegel der Schallquelle, Richtwirkungsmaß, Raumwinkelmaß, Abstand des Immissionsortes vom Zentrum der Quelle, Zu-

³⁸ § 2 (2) LärmVibrationsArbSchV

³⁹ § 2 (4) LärmVibrationsArbSchV

⁴⁰ § 2 (3) LärmVibrationsArbSchV

⁴¹ § 15 (2) LärmVibrationsArbSchV

⁴² § 6 LärmVibrationsArbSchV

⁴³ § 8 LärmVibrationsArbSchV

⁴⁴ § 6 LärmVibrationsArbSchV

⁴⁵ § 8 LärmVibrationsArbSchV

⁴⁶ Die Lärmmessung ist immer abhängig von gerade vorherrschenden Randbedingungen wie Witterungseinflüsse, Hintergrundgeräuschen etc.

⁴⁷ TA Lärm Nr. A1 ff zu VV Nr. 6 zu § 48 BImSchG

schläge für Impuls-, Ton-, Informationshaltigkeit des Geräusches) sind stets kritisch zu prüfen, da die Genauigkeit der Prognose wesentlich davon abhängt. Der Aufwand des Prognoseverfahrens ist somit enorm. Eine Prognose der Geräuschmission des batteriebetriebenen Traktors nach vorgeschriebenen Verfahren, erscheint daher unverhältnismäßig. Eine Annäherung kann aber über den subjektiven Vergleich mit anderen Schallquellen getroffen werden.

Als Ausgangsbasis und Vergleichswert wird zunächst die Geräuschmission eines vergleichbaren dieselbetriebenen Traktors dargestellt, für den umfangreiche Messwerte vorliegen. Bei der Beurteilung der Lärmmission ist grundsätzlich der Ort der Schallmission zu berücksichtigen. Bei der Ermittlung des Lärmpegels eines Traktors ist deshalb zu unterscheiden in Lärm am Fahrerohr und Lärm bei Vorbeifahrt. Nachfolgende Tabelle 2 zeigt eine Übersicht vergleichbarer Traktoren mit jungen Baujahren auf. Der SESAM-Traktor zeigt in der provisorischen Messung nur etwas geringere Schalleistungspegel als vergleichbare Traktoren. Dies entspricht nicht der subjektiven Wahrnehmung und ist vermutlich dem Umgebungslärm und Schallreflexionen auf dem Hof geschuldet. Genauere Messungen sind hier noch erforderlich.

Tabelle 2: A-bewerteten Schalleistungspegel des SESAM-Traktors und gleichwertiger dieselbetriebener Traktoren

Quelle: JD und © Agroscope, 2014⁴⁸

	Motor	Lärm am Fahrerohr	Lärm bei Vorbeifahrt
<i>John Deere 6830 (Referenzfahrzeug zu SESAM-Traktor)</i>	85 kW (116 PS)	-	-
<i>John Deere 6110RC</i>	81 kW (110 PS)	74,0 dB(A)	80,5 dB(A)
John Deere SESAM-Traktor	130 kW (176 PS)	69 dB(A)*	82 dB(A)*
<i>John Deere 6210RE</i>	155 kW (210 PS)	70 dB(A)*	85 dB(A)*
<i>Hürlimann XM 120 T4i V-Drive</i>	83 kW (113 PS)	74,5 dB(A)	82,5 dB(A)
<i>Steyr 4115 Multi</i>	84 kW (114 PS)	77 dB(A)	83,5 dB(A)

*Provisorische Messung mit einem AMPROBE SM.10 Sound Level Meter Gemessen auf einem gepflasterten Hof. Es wurde kein Umgebungslärm/ Lärm bei Stillstand zum Vergleich gemessen.

Traktoren älteren Modells oder mit zusätzlichen integrierten Geräten weisen höhere Emissionswerte bis zu 120 dB(A) auf⁴⁹. Traktoren jüngeren Baualters müssen höhere Anforderungen zur Einschränkung schädlicher Umwelteinwirkungen einhalten und profitieren zudem vom technischen Fortschritt. So sind beispielsweise die Fahrerinnen mittlerweile sehr gut isoliert, was zu erheblicher Lärminderung am Fahrerohr führt.

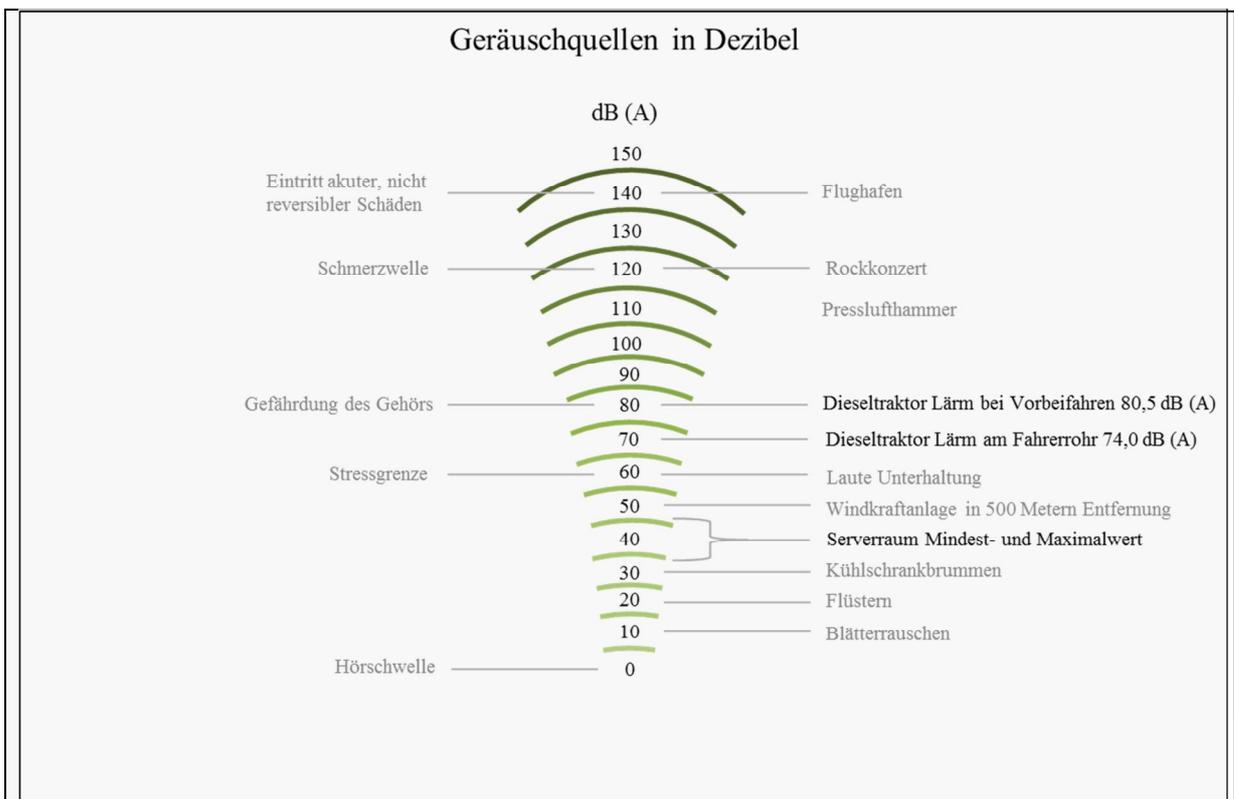
⁴⁸ <http://www.services.art.admin.ch/traktor/d/tt2014d.html>

⁴⁹ <https://osha.europa.eu/de/sector/agriculture/noise>

Das Geräusch des batteriebetriebenen SESAM-Traktors kann verglichen werden mit den Geräuschen eines Serverraums⁵⁰ deren Schalleistungspegel zwischen 30 dB(A)⁵¹ und maximal 50 dB(A)⁵² liegen können. Geräuschemissionen werden im Wesentlichen vom Lenkbremssystem oder durch leises Pfeifen der Hydraulikpumpe verursacht⁵³.

4.3 Fazit arbeitsrechtliche Relevanz

Da das dieselbetriebene Grundfahrzeug, JD 6830, die Grenzwerte lt. Arbeitsschutzgesetz von 80 dB(A) bzw. 85 dB(A) am Fahrerrohr, bereits unterschreitet, ist davon sicher auszugehen, dass der elektrifizierte Traktor diese ebenfalls unterschreitet. **Die Lärmemissionen des batteriebetriebenen Traktors hat aus arbeitsschutzrechtlichen Aspekten deshalb eine untergeordnete Relevanz.**



Quelle: B.A.U.M. Consult

Abb. 6 A-bewerteten Schalleistungspegel zur Einordnung

⁵⁰ Subjektive Einschätzung von M. Stöhr bei Vor-Ort-Besuch

⁵¹ <http://www.pressebox.de/pressemitteilung/lehmann-gmbh-salach/Wenn-laute-Server-ins-Buero-muessen/boxid/278171> [abgerufen am 18. September 2015]

⁵² Uppenkampundpartner (2012): Immissionsschutz-Gutachten – Schallimmissionsprognose für das BV Teleoint Hemer, Bahnhofstraße

⁵³ Auskunft von Prof. Peter Pickel, John Deere

4.4 Fazit umweltrechtliche Relevanz

Das Einsatzgebiet des hier betrachteten batteriebetriebenen SESAM-Traktors kann wegen der eingeschränkten Reichweite auf den Einsatz auf dem Hof eines Viehbetriebs eingegrenzt werden. Die Geräuschmission, die durch den Traktor verursacht wird, wirken sich demnach überwiegend auf dem Gelände des Hofes und in der angrenzenden näheren Nachbarschaft aus.

Grundsätzlich kann bei einem landwirtschaftlichen Viehbetrieb von einer permanenten Geräuschkulisse ausgegangen werden. Je nach Betriebsgröße und Nutztierart, muss in den frühen Morgenstunden, zwischen 5 Uhr bis 7 Uhr die erste Fütterungsrunde durchgeführt werden.

Die von der Lärmmission betroffenen Personenkreise und Lebewesen können wie folgt eingegrenzt werden:

- Beschäftigte auf dem landwirtschaftlichen Betrieb und dort lebende Familienangehörige
- Auf dem landwirtschaftlichen Betrieb untergebrachte Touristen
- Auf dem landwirtschaftlichen Betrieb untergebrachte Nutz- und Haustiere
- Nachbarhöfe und Dorfgemeinschaft

Neben der Lärmmission eines Traktors sind weitere Lärmquellen wie die Geräusche

- der technischen Anlagen: Maschinen und Technik wie Mühl-, Mal-, Mischanlagen, Quetschen, Fütterungsanlagen, Güllemixer, Milchkühlanlagen u.a.,
- der weiteren landwirtschaftlichen Verkehre: Kraftfahrzeuge, Hoflader, Motormäher u.a.
- der Nutztiere: Rinder, Schweine, Schafe, Pferde, Geflügel u.a.

zu berücksichtigen⁵⁴. Bei der Beurteilung der Lärmmission eines landwirtschaftlichen Betriebes sind grundsätzlich alle Lärmquellen auf dem Hof zu berücksichtigen.

Durch die Vielzahl der auf einem landwirtschaftlichen Betrieb befindlichen Geräuschemittenten, fällt die Substitution eines dieselbetriebenen Traktors (jüngeren Baujahres) durch einen batteriebetriebenen Traktor kaum ins Gewicht. Die Auswirkung auf die gesamte Lärmmission eines landwirtschaftlichen Betriebs im Regelbetrieb ist zu vernachlässigen. Gleichwohl kann davon ausgegangen werden, dass der batteriebetriebene Traktor die Grenzwerte für nächtliche Einsätze nicht überschreitet. **Folglich haben die Lärmmissionen eines batteriebetriebenen Traktors unter umweltschutzrechtlichen Aspekten eine untergeordnete Relevanz.**

⁵⁴ Umweltbundesamt GmbH, Wien, 2013: Praxisleitfaden Schalltechnik in der Landwirtschaft 2013

4.5 Schlussfolgerungen mit Blick auf touristische ländliche Regionen

Da die Lärmemission des batterie-betriebenen SESAM-Traktors deutlich geringer ist als die des Referenzmodells 6830 und sonstiger vergleichbarer Traktoren, ist sein Einsatz grundsätzlich positiv für touristische Regionen. Es kann ohne umfassende Untersuchungen mit Messungen auf Demonstrationsbetrieben und Erfassung der Wirkung auf Touristen jedoch nicht genauer beurteilt werden, wie das andersartige Geräusch von diesen tatsächlich wahrgenommen wird. Erschwerend wirkt, dass landwirtschaftliche Betriebe noch andere Geräuschquellen mit einem vergleichbaren Schallemissionspegel haben.

5 Netzintegration

5.1 Fragestellung und methodisches Vorgehen

Ziel dieses Kapitels ist, eine Antwort auf folgende Frage zu geben:

Kann die Vermutung untermauert werden, dass vollelektrische Landmaschinen die Integration Erneuerbarer Energien in elektrische Netze erleichtern?

Es wird hier vorausgesetzt, dass die betrachteten Erzeugungsanlagen, die Erneuerbare Energien nutzen, grundsätzlich die technischen Kriterien für den Anschluss an ein Netz zu allgemeinen Versorgung erfüllen, das heißt unter anderem die für den Anschlusspunkt relevanten Grenzen der Erzeugungsleistung, -spannung, -grundfrequenz und -oberfrequenzen einhalten.

In einem etwas engeren Sinne wird nun unter besserer Integration in elektrische Netze verstanden, dass die Erzeugungsanlage, die Erneuerbare Energien nutzt, Netzkonform betrieben wird, also zu einer möglichst gleichmäßigen Beanspruchung der Übertragungs- und Verteilkapazität des Netzes zur allgemeinen Versorgung beiträgt, diese also effizienter nutzt, und möglichst wenig zu Netzengpässen beiträgt (siehe auch Netzdienliches Verhalten). Als Beitrag dazu wird insbesondere die Option betrachtet, die erzeugte elektrische Energie aus erneuerbaren Quellen direkt am Ort der Erzeugung zu nutzen.

Können vollelektrische Landmaschinen helfen, die Erzeugung und Nutzung von elektrischer Energie aus erneuerbaren Quellen insgesamt und insbesondere direkt am Ort der Erzeugung zu erhöhen?

Das Einsatzgebiet des hier betrachteten batteriebetriebenen SESAM-Traktors wird wegen der eingeschränkten Reichweite auf den Einsatz auf und unmittelbar um den Hof eines Viehbetriebs eingegrenzt. Als Erzeugungsanlage wird exemplarisch eine PV-Anlage in der Größenordnung 10 - 100 kW betrachtet. Für die vollelektrische Landmaschine werden die technischen Kenndaten des SESAM-Traktors zugrunde gelegt.

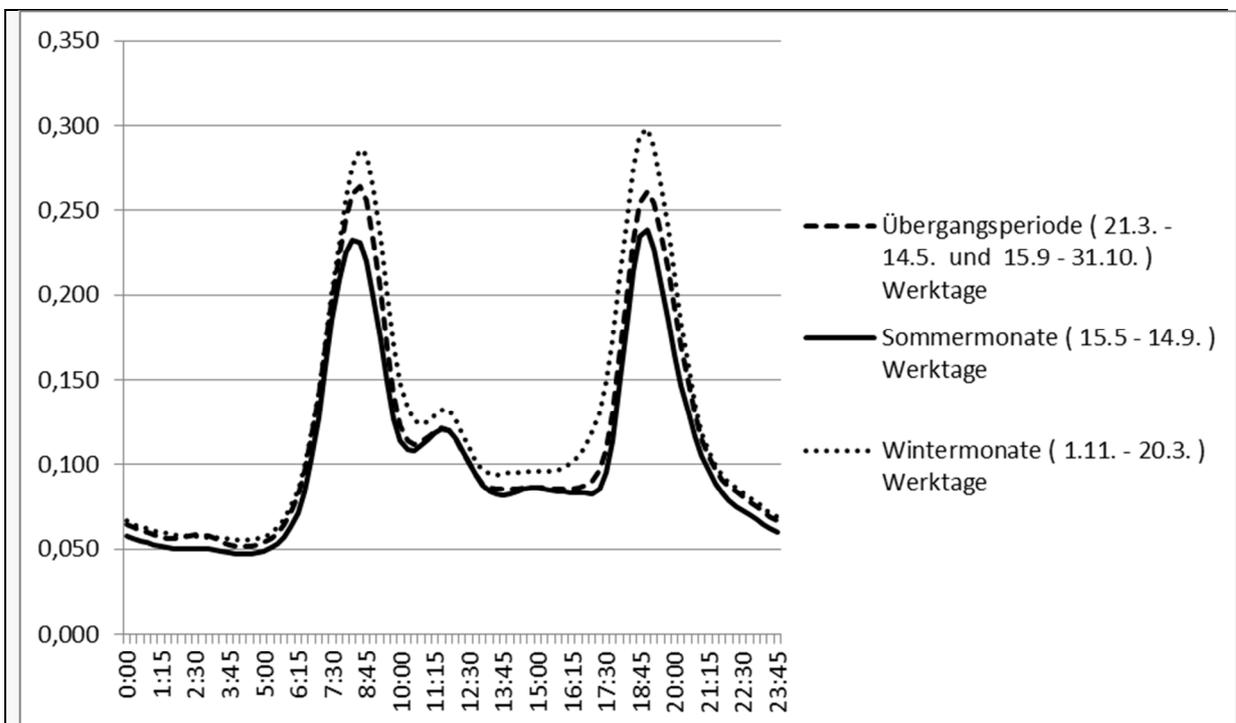
5.2 Modellierung eines Viehhaltungsbetriebs mit PV-Anlage und SESAM-Traktor

5.2.1 Lastprofil eines Viehhaltungsbetrieb

Zur Beantwortung der Ausgangsfrage wurden die Leistungsflüsse eines fiktiven, aber repräsentativen Viehhaltungsbetriebs mit PV-Anlage und einem SESAM-Traktor betrachtet. Für den Viehhaltungsbetrieb wurden Annahmen zum Verbrauch elektrischer Energie getroffen, die der Definition des Musterhofs „Bauernhof A“ des Fraunhofer-Instituts für Windenergie und Energiesystemtechnik (IWES) entlehnt sind. Das IWES hat diesen für John Deere im

Zusammenhang mit der Entwicklung des Lasten- und Pflichtenheftes für das Projekt „econnect“ definiert.⁵⁵ Dieser Musterhof entspricht einem durchschnittlichen deutschen Viehhaltungsbetrieb und ist wie folgt charakterisiert:

- Viehbestand: 87 Rinder und 459 Schweine
- Jahresstromverbrauch: 138 MWh
- Durchschnittliche Leistungsabnahme: 15,75 kW
- Theoretische maximale Leistungsabnahme: 143 kW⁵⁶



Quelle: EWE⁵⁷

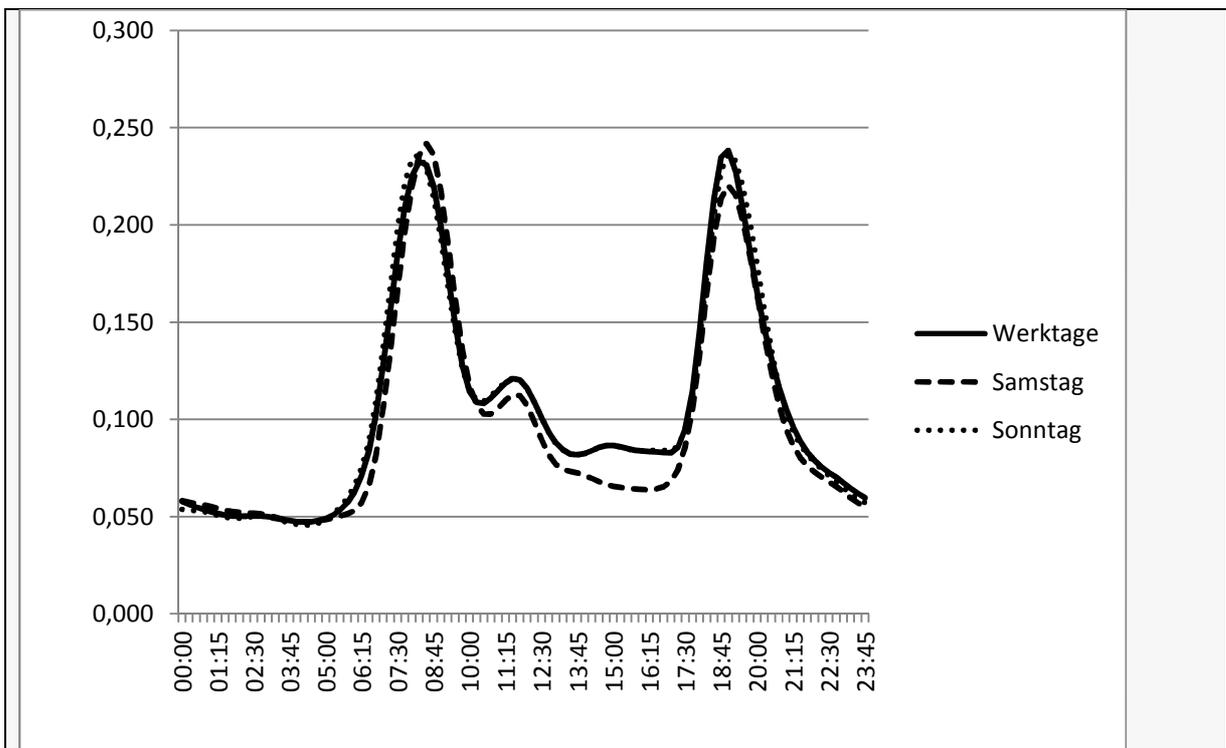
Abb. 7 Lastprofil L1 in kW eines Landwirtschaftsbetriebs mit Milchwirtschaft/ Nebenerwerbs-Tierzucht an Werktagen, normiert auf einen Jahresstromverbrauch von 1 MWh.

⁵⁵ J. Prior, M. Landau, H. Schneider, G. Weiß, Grundlagen und Grobkonzept zu einer Batterieladestation mit Energiemanagementsystem für landwirtschaftliche Betriebe, Schwerpunkt: Bestimmung von Use Cases, IWES, 2. Juli 2012

⁵⁶ Ermittelt durch simple Addition der Nennleistungen der Verbrauchsgeräte, welche in der IWES-Studie (siehe Fußnote 55) aufgeführt sind. Da die Verbrauchgeräte unter realen Bedingungen nie gleichzeitig alle unter Nennlast betrieben werden, wird die maximale Leistungsabnahme in der Praxis nicht erreicht. Präziser ausgedrückt: Die statistische Zeitdauer der maximalen Leistungsabnahme ist verschwindend gering. Nach dem Standard-Lastprofil L1 ist sie null. Entsprechend kann die maximale Leistung des Netzanschlusses deutlich geringer ausgelegt werden.

⁵⁷ Erstellt auf der Basis des BDEW-Lastprofils L1 gemäß der Datei für 2014, heruntergeladen von <https://www.ewe-netz.de/strom/1988.php> [abgerufen am 23. September 2015]

Der Stromverbrauch folge dem BDEW-Lastprofil L1 für Landwirtschaftsbetriebe mit Milchwirtschaft/ Nebenerwerbs-Tierzucht. Wie Abb. 7 und Abb. 8 zeigen, ist das Profil durch zwei ausgeprägte Lastspitzen am frühen Morgen und am Abend charakterisiert, welche im Wesentlichen vom zweimaligen Melken mit anschließendem Herabkühlen der Milch herrühren. Da täglich zur gleichen Zeit gemolken werden muss variiert das Profil nur gering von Saison zu Saison und unterscheidet sich kaum für verschiedene Wochentage.



Quelle: EWE⁵⁸

Abb. 8 Lastprofil L1 in kW eines Landwirtschaftsbetriebs mit Milchwirtschaft/ Nebenerwerbs-Tierzucht in den Sommermonaten (Zeitangaben dennoch in Winterzeit!), normiert auf einen Jahresstromverbrauch von 1 MWh.

Das BDEW-Lastprofil L1 ist auf einen Jahresverbrauch von 1.000 MWh (in der für die Modellierung verwendeten Datei) beziehungsweise 1 MWh (in der Abb. 7 und Abb. 8 zugrunde liegenden Aufbereitung) normiert. Für die Modellierung wurde es auf einen Jahresverbrauch von 138 MWh skaliert⁵⁹. Die Zeitangaben des Lastprofils L1 sind wie bei Standardlastprofilen üblich durchgängig in Winterzeit, die Leistungsangaben in kW.

⁵⁸ Erstellt auf der Basis des BDEW-Lastprofils L1 gemäß der Datei für 2014, heruntergeladen von <https://www.ewe-netz.de/strom/1988.php> [abgerufen am 23. September 2015]

⁵⁹ Sprich, die viertelstündlichen Energiewerte aus der Datei des BDEW-Lastprofils L1 wurden mit $138 \text{ MWh}/1.000 \text{ MWh} = 0,138$ multipliziert. Durch weitere Multiplikation mit 4 wurde die durchschnittliche Leistungsabnahme je Viertelstundenintervall des betrachteten Modellbetriebs errechnet.

Das auf 138 MWh Jahresverbrauch skalierte Lastprofil zeigt an Sommersamstagen, für welche ein Viehhaltungsbetrieb modelliert wurde, ein Maximum des Leistungsbezugs zwischen 9:45 und 10:00 Uhr (Sommerzeit) in Höhe von 33,4 kW. Das ist etwas mehr als das Doppelte der durchschnittlichen Leistungsabnahme von 15,75 kW, aber deutlich weniger als die Summe der nominalen Leistungsaufnahme aller elektrischen Geräte des zugrunde gelegten Musterhofs von 143 kW. Im Vergleich zu anderen BDEW-Lastprofilen ist es dennoch das ausgeprägt ungleichmäßigste, sprich das, bei welchem das elektrische Netz zur allgemeinen Versorgung am ineffizientesten genutzt wird.

5.2.2 PV-Anlage

Für die folgende Modellierung wurde das EWE NETZ-eigene Standardprofil ES0 zugrunde gelegt⁶⁰ und auf verschiedene PV-Anlagenleistungen zwischen 10 und 100 kW mit einem spezifischen Jahresertrag von 1.000 kWh/kW skaliert. Dass es keine Zeitumstellung berücksichtigt, also entweder durchgängig in Sommer- oder durchgängig in Winterzeit angegeben sein muss, ist am Fehlen einer Profilverschiebung am Tag der Zeitumstellung zu erkennen. Durch Vergleich mit den Einstrahlungsdaten realer PV-Anlagen und unter Berücksichtigung der geographischen Länge des Netzgebiets von EWE wurde ermittelt, dass das Profil ES0 genau wie die Standardlastprofile des BDEW durchgängig in Winterzeit angegeben ist.

Zur Untersuchung der Integration der PV-Anlage in Netze zur allgemeinen Versorgung wurde der Grenzfall betrachtet, dass die Anlage am längsten Sommertag, dem 21. Juni, bei durchgängig strahlendem Sonnenschein produziert. Ist zudem die Last am geringsten, was bei Viehhaltungsbetrieben an Samstagen der Fall ist, wird der Extremfall erreicht, bei dem PV-Anlagen in ländlichen Regionen das Netz zur allgemeinen Versorgung an eine der Grenzen des zulässigen Betriebszustandes führen können. In der Regel wird dann der obere zulässige Wert der Spannung in Teilen des Netzes erreicht. Die für die Modellierung genutzten Profile L1 und ES0 sind für das Jahr 2014 ausgeführt. Im Jahr 2014 fiel der 21. Juni auf einen Samstag. Für die Modellierung wurde darum der Profilausschnitt für diesen Tag gewählt.

Das Profil L1 ist repräsentativ für ganz Deutschland. Das Profil ES0 ist dagegen für das Netzgebiet von EWE, also den Nordwesten Deutschlands ausgelegt. Dies führt dazu, dass das Profil ES0 im Sommer eine etwas längere Sonnenscheindauer zeigt als ein für die Mitte Deutschlands repräsentatives Profil und im Vergleich zu diesem geringfügig zu späteren Stunden hin verschoben ist. Dieser Effekt wurde hier vernachlässigt, da er für die Beantwortung der Ausgangsfrage nebensächlich ist und die Unterschiede zwischen verschiedenen realen Landwirtschaftsbetrieben erheblich stärker zu Buche schlagen.

5.2.3 SESAM-Traktor

Nach (Kegel, 2015) kann der SESAM-Traktor nur für eine Zeit von etwa zwei, maximal drei Stunden genutzt werden und muss danach wieder geladen werden. Die maximale Ladeleistung beträgt 50 kW. (Kegel, 2015) beschreibt einen Ladevorgang, bei dem die Batterie mit zunächst mit konstantem Strom, dann mit konstanter Spannung geladen wird. Die Ladeleis-

⁶⁰ Genutzt wurde das EWE NETZ-eigene Profil ES0 der Datei für 2014, heruntergeladen von <https://www.ewe-netz.de/strom/1988.php> [abgerufen am 23. September 2015]

tung steigt dabei zunächst etwa 2 h 15' lang von einem Wert leicht unter 50 kW langsam auf 50 kW und fällt danach ungefähr exponentiell ab. Nach etwa drei Stunden ist die Batterie vollgeladen und die Ladeleistung fällt abrupt auf null ab. Der Ladevorgang benötigt etwa 130 kWh an elektrischer Energie.

Es wurde für die Modellierung angenommen, dass der SESAM-Traktor in der Mittagszeit, wenn die Erzeugungsleistung der PV-Anlage am höchsten ist, ungefähr so geladen wird, wie von (Kegel, 2015) beschrieben. Die Leistungsaufnahme $P_1(t)$ der Batterie (inklusive Ladegerät) wurde dafür mit folgender Funktion modelliert:

$$P_1(t) = 50 \text{ kW} \quad \forall t \in [0; 2,25h]$$

$$P_1(t) = 50 \text{ kW} \cdot e^{-\frac{t-2,25h}{\tau}} \quad \forall t \in]2,25h; 3h[$$

$$P_1(t) = 0 \quad \forall t \in]-\infty; 0] \cup [3h; \infty[$$

Der Nullpunkt der Zeitachse, also der Beginn des Ladevorgangs, wurde zunächst als variabel betrachtet. Für die Zeitkonstante τ wurde der Wert 0,4208 ermittelt. Für diesen erfüllt die Funktion $P_1(t)$ die Bedingung, dass ihr Integral über $P_1(t)$ die Ladeenergie von 130 kWh ergibt:

$$\int_{-\infty}^{\infty} P_1(t) dt = \int_0^{3h} P_1(t) dt = 130 \text{ kWh}$$

Mit der in der Mittagszeit geladenen Energie kann der SESAM-Traktor am Nachmittag oder Abend für maximal drei Stunden betrieben werden. Damit er zusätzlich auch am Vormittag genutzt werden kann, muss er mindestens ein zweites Mal geladen werden. Es wurde angenommen, dass ein weiterer Ladevorgang in der Nacht stattfindet, wenn zwar die Erzeugung der PV-Anlage null, dafür aber der sonstige Leistungsbezug aus dem Netz am geringsten ist. Die gesamte Ladedauer betrage acht Stunden. Dazu wurde folgende Funktion konstruiert:

$$P_2(t) = P_0 \quad \forall t \in [0; 7,25h]$$

$$P_2(t) = P_0 \cdot e^{-\frac{t-7,25h}{\tau}} \quad \forall t \in]7,25h; 8h[$$

$$P_2(t) = 0 \quad \forall t \in]-\infty; 0] \cup [8h; \infty[$$

Der Nullpunkt der Zeitachse wurde auch hier zunächst als variabel betrachtet. Für die Zeitkonstante τ wurde der oben ermittelte Wert 0,4208 verwendet. Aus der Bedingung, dass das Integral über $P_2(t)$ den Wert von 130 kWh erreichen muss, wurde für die anfängliche Ladeleistung P_0 der Wert von 17,105 kW abgeleitet.

5.3 Optimierte Ladestrategie zur Integration in elektrische Netze

Es wurde festgelegt, dass die nächtliche Ladung der Batterie des SESAM-Traktors zwischen 22:00 und 6:00 Uhr Winterzeit beziehungsweise 23:00 und 7:00 Uhr Sommerzeit erfolgt. Damit wird die Batterie zu der Zeit geladen, in der der Leistungsbedarf der sonstigen Geräte am geringsten ist, und das Maximum des Leistungsbezugs aus dem Netz wird nicht erhöht. Sprich, der Netzanschluss muss auf keinen Fall aufgrund der nächtlichen Ladung der Batterie des SESAM-Traktors verstärkt werden. In einem geringen Umfang trägt die beginnende Erzeugung der PV-Anlage in der Endphase der nächtlichen Batterieladung bereits zur Deckung des Leistungsbedarfs bei.

Im nächsten Schritt wurde angenommen, dass die PV-Anlage eine Leistung von 50 kW hat und der Beginn der mittäglichen Batterieladung so variiert, dass die Summe der in das Netz eingespeisten elektrischen Energie minimiert, also der Eigenverbrauch der elektrischen Energie aus der PV-Anlage maximiert wurde. Das Ergebnis dieses Optimierungsschritts ist, dass die mittägliche Ladung der Batterie am besten zwischen 12:15 und 15:15 Uhr Winterzeit, also zwischen 13:15 und 16:15 Uhr Sommerzeit erfolgt. Diese Zeitwahl wurde für die folgenden Untersuchungen beibehalten.

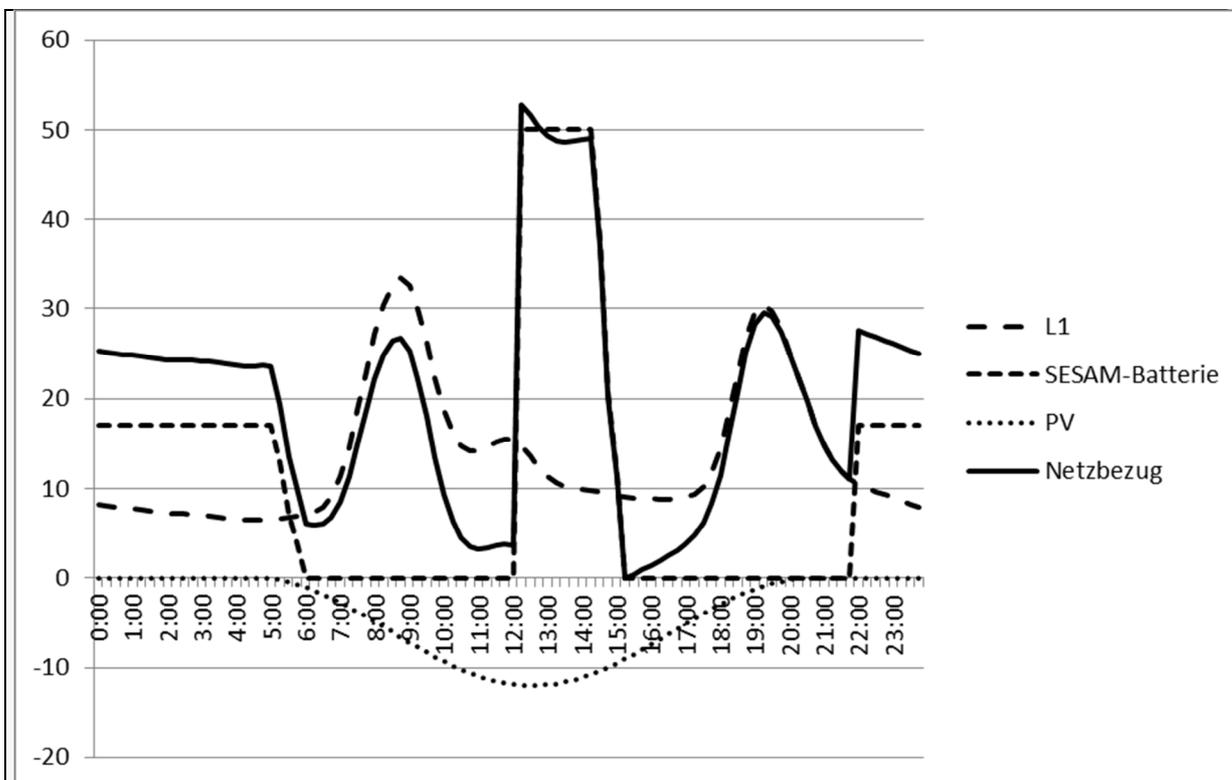
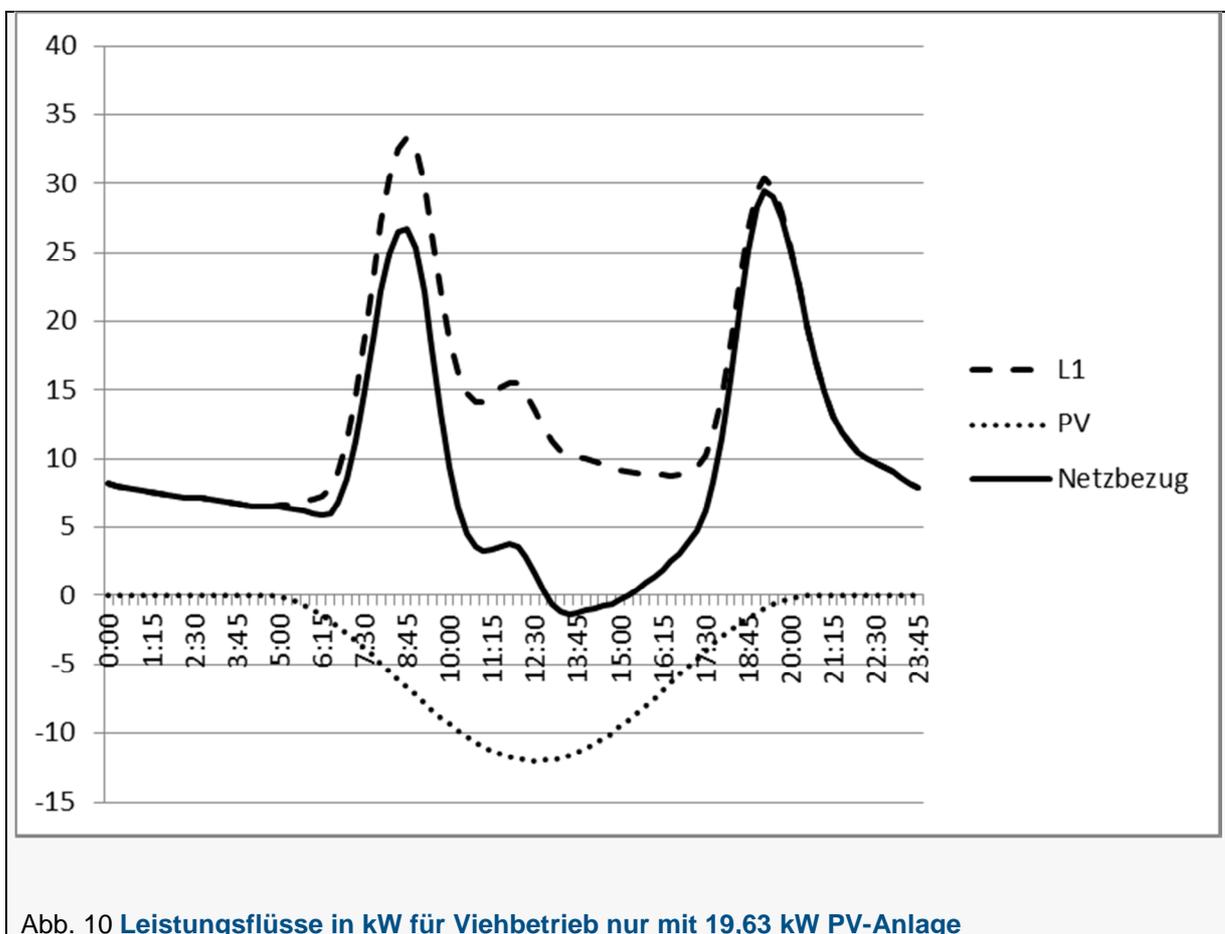


Abb. 9 Leistungsflüsse in kW für Viehbetrieb mit 19,63 kW PV-Anlage und SESAM-Traktor

Dann wurde ermittelt, wie groß die Nennleistung der PV-Anlage höchstens sein darf, wenn bei dem beschriebenen Zeitplan für die beiden Batterieladungen selbst an einem sonnigen Mitt-Juni-Samstag niemals elektrische Leistung in das Netz zurückgespeist werden soll, sprich, die von der PV-Anlage erzeugte elektrische Energie komplett zum Eigenbedarf verwendet werden soll. Diese maximale PV-Anlagennennleistung beträgt 19,63 kW. Die Leistungsflüsse für diesen Fall zeigt Abb. 9, die für die gleiche Situation, aber ohne SESAM-Traktor Abb. 10. Die Wahrscheinlichkeit, dass es an einem anderen Tag im Jahr, an dem die SESAM-Batterie am frühen Nachmittag geladen wird, zu einer Netzeinspeisung kommt, ist sehr gering, da an anderen Tagen die PV-Leistung geringer und der Grundverbrauch höher ist.



Der in Abb. 9 und Abb. 10 illustrierte Fall eines Viehhaltungsbetriebs mit einer PV-Anlage mit weniger als 20 kW Nennleistung zeigt:

- Das schnelle Laden der Batterie des SESAM-Traktors zwischen zwei Arbeitsgängen am Mittag führt zu einer starken Anhebung der maximal dem Netz entnommenen

Last. Diese ist umso stärker, je weniger die PV-Anlage an dem betreffenden Tag erzeugt. Das steigert die Belastung des Netzes zunächst punktuell an Netzanschluss des Betriebs, aber auch in einem größeren Einzugsgebiet, wenn darin viele Betriebe gleichzeitig einen SESAM-Traktor laden.

- Die mittägliche Ladung der Batterie steigert den Eigenverbrauch des erzeugten PV-Stroms, jedoch lediglich vom sowieso schon sehr hohen Wert von 98 % auf 100 %.
- Insgesamt führt der SESAM-Traktor also zu einer besseren Ausnutzung des Netzes bei nächtlicher Ladung der Batterie, zu einer höheren Netzbelastung bei Ladung am frühen Nachmittag und der Beitrag zur Netzintegration einer PV-Anlage mit weniger als 20 kW ist unbedeutend.

Diese Effekte sind für Viehhaltungsbetriebe umso ausgeprägter, je kleiner die Leistung der PV-Anlage ist.

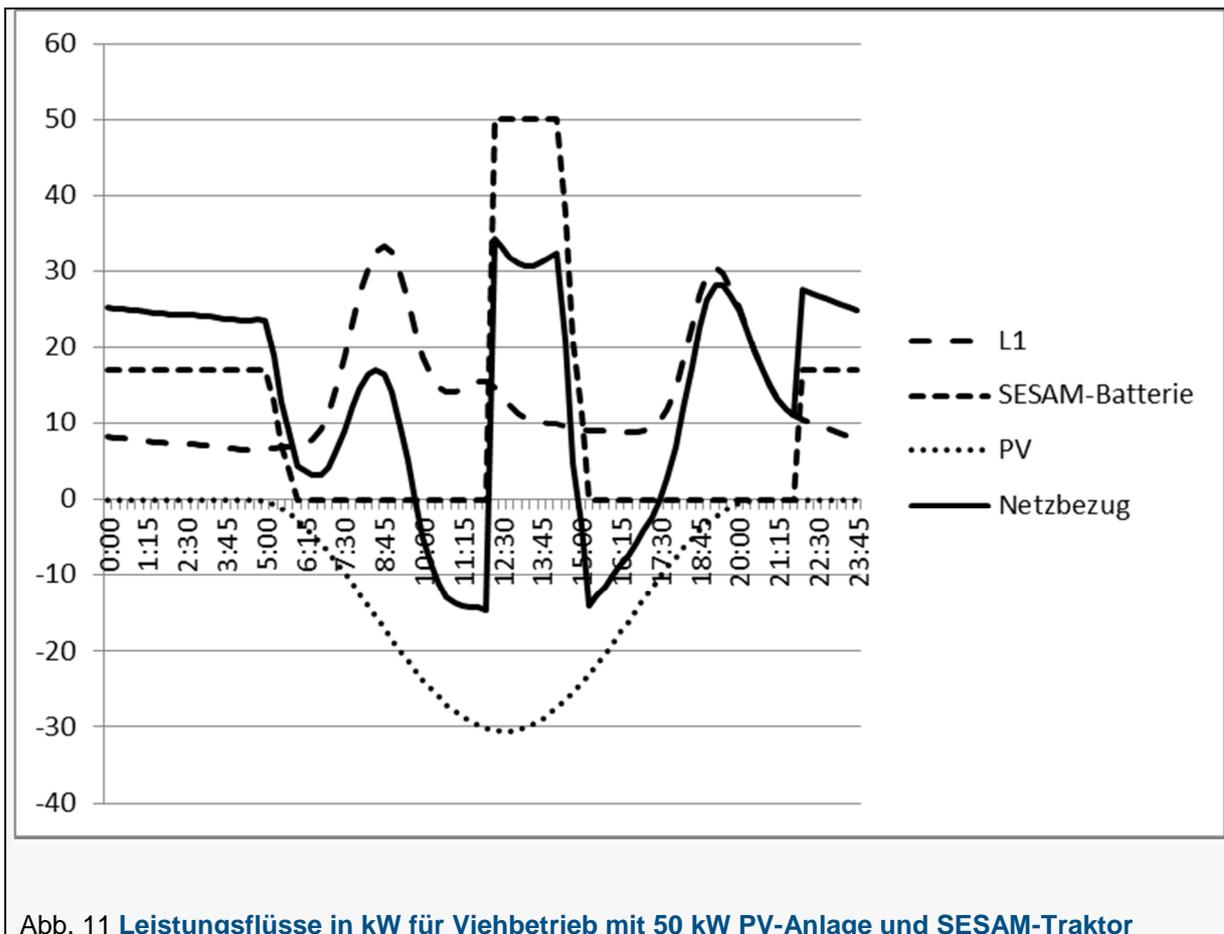


Abb. 11 Leistungsflüsse in kW für Viehbetrieb mit 50 kW PV-Anlage und SESAM-Traktor

Abb. 11 und Abb. 12 zeigen in analoger Weise die Leistungsflüsse eines Viehhaltungsbetriebs mit 50 kW PV-Anlage mit beziehungsweise ohne SESAM-Traktor. Der Vergleich zeigt:

- Die maximal bezogene Leistung ist an sonnigen Sommertagen nicht höher als sie es ohne SESAM-Traktor wäre. Der Netzanschluss und das vorgelagerte Netz müssen also mit geringer Wahrscheinlichkeit aufgrund des SESAM-Traktors verstärkt werden. Diese Wahrscheinlichkeit ist geringer als bei einem Betrieb mit einer PV-Anlage mit weniger als 50 kW Nennleistung.
- Das Verhältnis von maximal bezogener Leistung zur durchschnittlich bezogenen Leistung ist insgesamt höher als ohne SESAM-Traktor, vor allem an sonnigen Tagen. Damit wird das Netz gleichmäßiger und damit effizienter genutzt.
- Die mittägliche Ladung des SESAM-Traktors erhöht die Eigenverbrauchsquote des PV-Stroms von 60 % auf 81 %.
- Der Grundverbrauch des Betriebs kappt die maximale Einspeisung elektrischer Leistung in das Netz um 36 % der PV-Nennleistung, mit SESAM-Traktor um 52 %.
- In Kombination mit der 50 kW PV-Anlage führt der SESAM-Traktor zu einer insgesamt besseren Ausnutzung des Netzes und der Beitrag zur besseren Netzintegration der PV-Anlage ist signifikant.

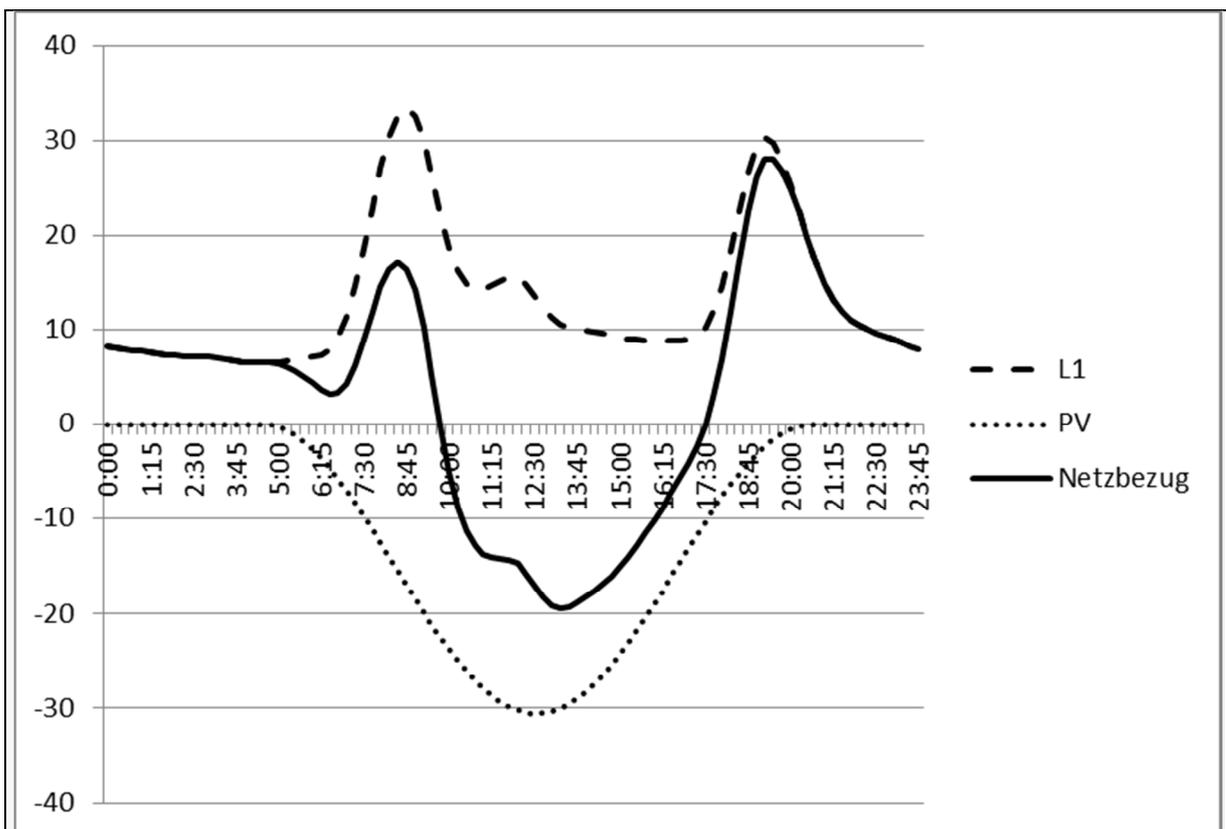


Abb. 12 Leistungsflüsse in kW für Viehbetrieb nur mit 50 kW PV-Anlage

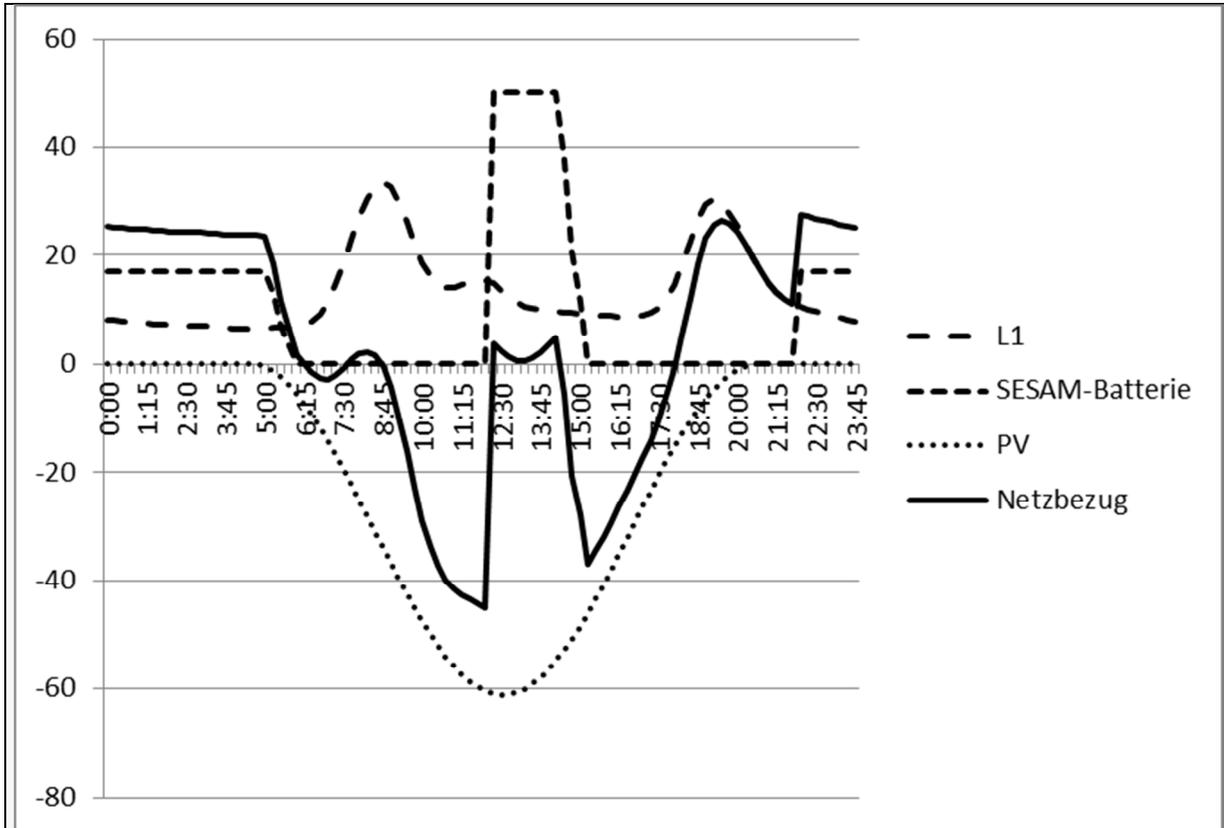


Abb. 13 Leistungsflüsse in kW für Viehbetrieb mit 100 kW PV-Anlage und SESAM-Traktor

Abb. 13 und Abb. 14 zeigen in analoger Weise die Leistungsflüsse eines Viehhaltungsbetriebs mit 100 kW PV-Anlage mit beziehungsweise ohne SESAM-Traktor. Der Vergleich zeigt:

- Die maximal bezogene Leistung ist an sonnigen Sommertagen nicht höher als sie es ohne SESAM-Traktor wäre. Der Netzanschluss und das vorgelagerte Netz müssen also mit geringer Wahrscheinlichkeit aufgrund des SESAM-Traktors verstärkt werden. Diese Wahrscheinlichkeit ist noch geringer als bei einem Betrieb mit einer PV-Anlage mit weniger als 100 kW Nennleistung.
- Das Verhältnis von maximal bezogener Leistung zur durchschnittlich bezogenen Leistung ist insgesamt höher als ohne SESAM-Traktor, vor allem an sonnigen Tagen. Damit wird das Netz gleichmäßiger und damit effizienter genutzt. Dieser Effekt ist jedoch geringer als bei einer 50 kW PV-Anlage.
- Die mittägliche Ladung des SESAM-Traktors erhöht die Eigenverbrauchsquote des PV-Stroms von 39 % auf 64 %. Dieser Effekt ist geringfügig höher als bei einer 50 kW PV-Anlage.

- Der Grundverbrauch des Betriebs kappt die maximale Einspeisung elektrischer Leistung in das Netz um 19 % der PV-Nennleistung, mit SESAM-Traktor um 26 %. Der Kappungseffekt ist geringer als bei einer 50 kW PV-Anlage.
- In Kombination mit einer 100 kW PV-Anlage führt der SESAM-Traktor zu einer insgesamt besseren Ausnutzung des Netzes und der Beitrag zur besseren Netzintegration der PV-Anlage ist signifikant, aber geringer als bei einer 50 kW PV-Anlage.

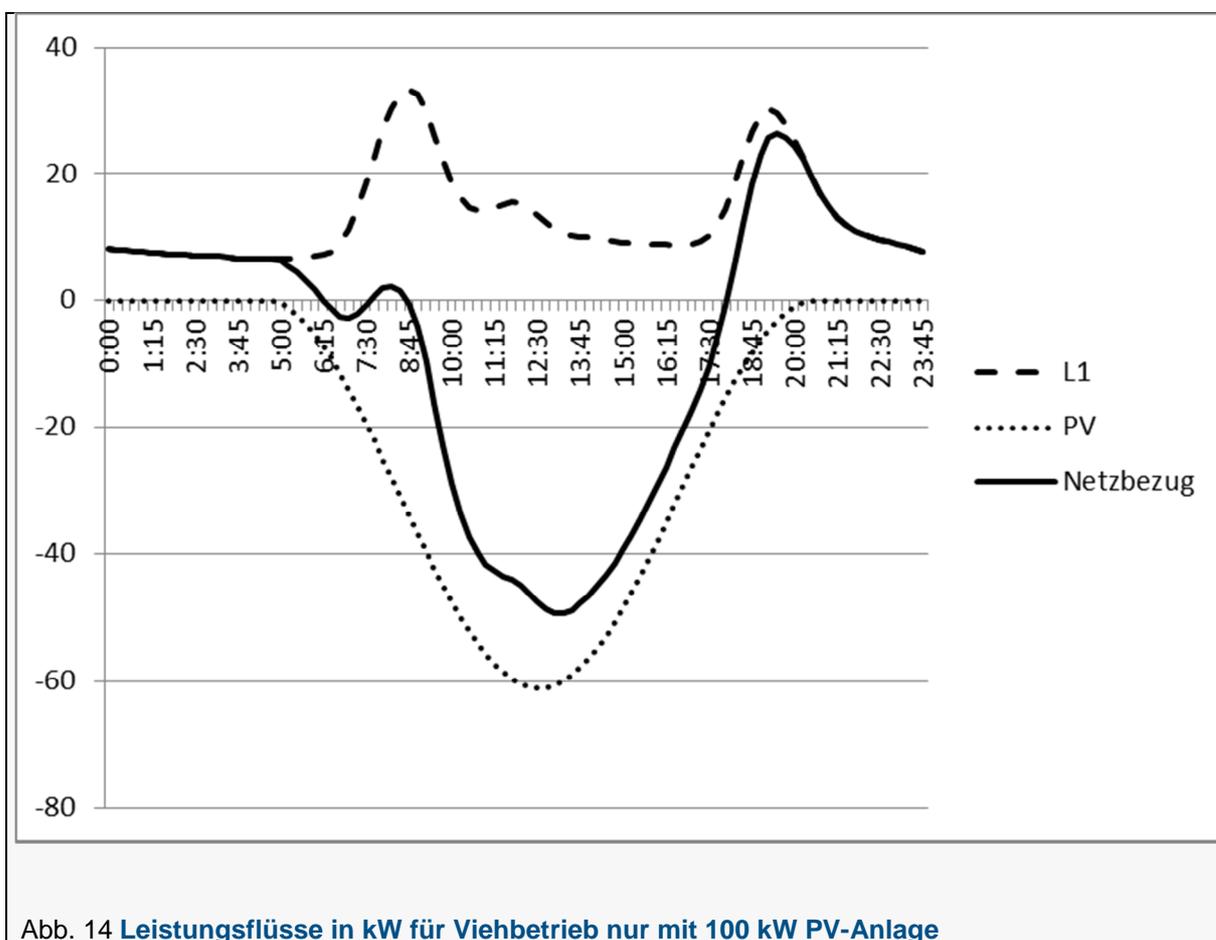


Abb. 14 Leistungsflüsse in kW für Viehbetrieb nur mit 100 kW PV-Anlage

5.4 Synthese der Ergebnisse zur Netzintegration

Die Ergebnisse der Untersuchung zu den Auswirkungen eines SESAM-Traktors auf das Netz zur allgemeinen Versorgung und die Netzintegration von Erneuerbaren Energien, insbesondere PV-Anlagen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Viehhaltungsbetriebe nutzen das Netz am ineffizientesten von allen Verbrauchern. Bevor erneuerbare Energien in den Blick genommen werden, stellt sich eigentlich zunächst die Frage, wie deren Netzintegration verbessert werden kann.
- Eine batteriebetriebene Landmaschine stellt eine zusätzliche Last da, die nicht per se die Netzbelastung senkt.
- Die Last durch das Laden der Batterie beträgt bis zum Dreifachen des durchschnittlichen Leistungsbezugs eines Viehhaltungsbetriebs. Sie ist umso höher und belastet das Netz umso stärker, je höher die Ladeleistung ist, das heißt praktisch, je schneller die Ladung erfolgt.
- Eine nächtliche Ladung der Batterie über einen Zeitraum von etwa acht Stunden führt zu einer besseren Ausnutzung des Netzes und führt nicht dazu, dass dieses verstärkt werden muss.
- Eine schnelle Ladung am Tag, selbst zur Zeit des Lastminimums am Nachmittag führt jedoch zu einer deutlich stärkeren Belastung des Netzes und kann eine Netzverstärkung erforderlich machen.
- Die Auswirkungen einer PV-Anlage auf das Netz sind im Wesentlichen gegenläufig zu denen eines am Nachmittag geladenen SESAM-Traktors und die negativen Effekte auf das Netz kompensieren sich.
- Optimal ist die Kombination einer 50 kW PV-Anlage mit einem SESAM-Traktor, dessen maximale Batterieladeleistung ebenfalls 50 kW beträgt für die Nutzung des Netzes zur allgemeinen Versorgung in einer Vielzahl von Fällen.
- In Gebieten, in denen der Leistungsbezug durch Viehhaltungsbetriebe dominiert, wird das Netz gleichmäßiger und damit effizienter genutzt. In Gebieten mit hoher Einspeisung elektrischer Leistung aus PV-Anlagen wird diese signifikant verringert, wodurch insgesamt mehr PV-Anlagen betrieben werden können, ohne dass die Erzeugungsleistung aufgrund von Netzengpässen gedrosselt werden muss.

6 Sonstige Aspekte der Technikbewertung

6.1 Eigenschaften und Verfügbarkeit von Lithium

Lithium ist das dritte Element des Periodensystems der chemischen Elemente. Es hat also je drei Protonen und Elektronen. Seine stabilen Isotope haben zudem drei oder vier Neutronen, Lithium also insgesamt eine Masse von etwa sechs oder sieben atomaren Masseeinheiten. Da von den beiden stabilen Isotopen Li - 6 und Li - 7 dieses mit 92,6 % des Vorkommens auf der Erde wesentlich häufiger ist als jenes mit 7,4 %, ergibt sich im Schnitt eine Masse von 6,94 atomaren Masseeinheiten für terrestrisches Lithium.⁶¹ Diese geringe Atommasse erlaubt, aus ihm Batterien mit hoher Ladungsdichte herzustellen. Im Vergleich dazu hat Blei eine mittlere Atommasse von 202,7 atomaren Masseeinheiten.⁶² Zwar werden bei Be- und Entladung einer Bleibatterie je Bleiatom zwei statt wie beim Lithium nur ein Elektron bewegt⁶³, doch ist die resultierende **Ladungsdichte** mit 1/101,4 Elementarladungseinheiten je atomare Masseinheit **bei Blei mehr als 14 mal kleiner als bei Lithium** (1/6,94). Diese vereinfachte Begründung der hohen Ladungsdichte von Li-Ionen-Batterien ist noch je nach genauer chemischer Zusammensetzung der Elektroden der jeweiligen Batterie zu modifizieren, da auch die Atomgewichte der anderen am Elektrodenaufbau beteiligten Elemente eine Rolle spielen, beschreibt aber bei fast allen Elektrodenmaterialien den wesentlichen unter den zahlreichen Zusammenhängen.

Das einfach positive Lithium-Ion Li^+ hat einen Ionenradius von nur 0,068 nm⁶⁴ und ist zusammen mit dem Wasserstoffatom H, dem Heliumatom He und dem Ion He^+ **eines der kleinsten Atome beziehungsweise Ionen überhaupt**, da nur das Elektronen-Orbital mit der geringsten räumlichen Ausdehnung, das 1s-Orbital, besetzt ist. Nur das H^+ -Ion (Proton) und das He^{2+} -Ion (α -Teilchen) sind noch kleiner, da sie nur aus einem Atomkern bestehen. Das Li^+ -Ion ist sogar etwas kleiner als das Helium-Atom, das die gleiche Elektronen-Anordnung hat, da seine Elektronen vom dreifach statt zweifach positiv geladenen Kern stärker angezogen werden.

Abb. 15 zeigt eine Darstellung unterschiedlicher Orbitale der ersten und zweiten Elektronenschale von Atomen. Die untere Reihe zeigt, in welchem Volumen sich das Elektron mit 90 % Wahrscheinlichkeit aufhält. Diese Volumina entsprechen denen, mit denen sich Atome in chemischen Molekülen, Festkörpern und Gasen bemerkbar machen.⁶⁵ Das 1s-Orbital ist wesentlich kleiner als die 2s- und 2p-Orbitale. Darum ist das Li^+ -Ion (nur 1s-Orbital gefüllt, Radius = 68 pm) wesentlich kleiner als das Na^+ -Ion (zusätzlich zu 1s- auch 2s- und 2p-Orbitale gefüllt, Radius = 102 pm). Dass das Radien-Verhältnis nur 102/68 beträgt, also sehr viel weniger als Abb. 15 nahe legt, zeigt, dass die Größe von Ionen noch von anderen Faktoren bestimmt wird, nicht zuletzt auch von der Umgebung des Ions, etwa im Kristallgitter.⁶⁶

⁶¹ <http://de.wikipedia.org/wiki/Lithium> [abgerufen am 24. Juni 2014]

⁶² <http://de.wikipedia.org/wiki/Blei> [abgerufen am 2. Juli 2014]

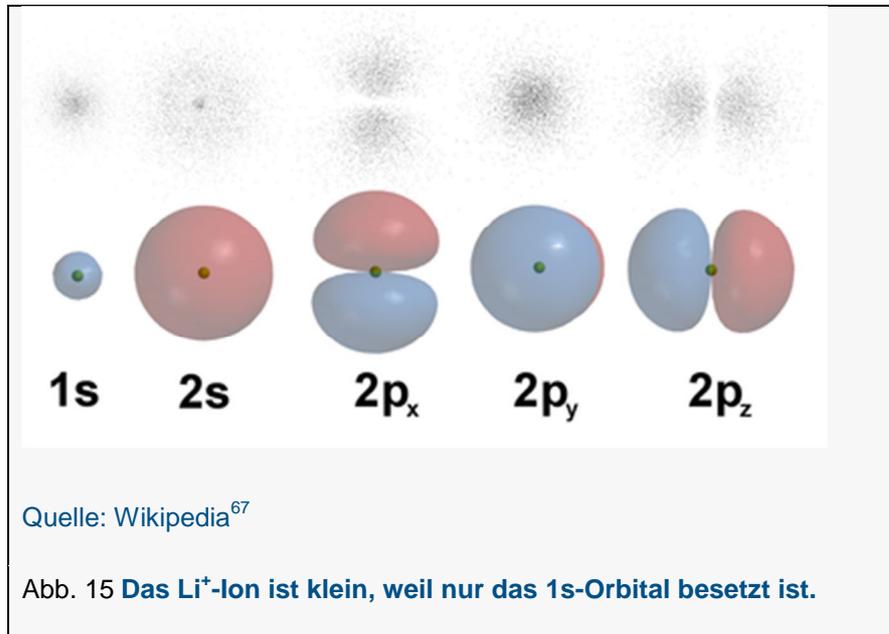
⁶³ Blei liegt am negativen Pol einer Bleibatterie in den Oxidationsstufen (Ladungszuständen) 0 (geladen) und +II (entladen), am positiven Pol in den Oxidationsstufen +II (entladen) und +IV (geladen) vor;

<http://de.wikipedia.org/wiki/Bleibatterie> [abgerufen am 2. Juli 2014]

⁶⁴ (Sternner & Stadler, 2014), S. 250; 0,068 nm = 68 pm; zum Vergleich: Wikipedia (s. 66) zitiert Erwin Riedel, *Anorganische Chemie*, de Gruyter, Berlin 2004, ISBN 3-11-018168-1, und nennt 76 pm

⁶⁵ <http://de.wikipedia.org/wiki/Orbitalmodell> [abgerufen am 2. Juli 2014]

⁶⁶ http://de.wikipedia.org/wiki/Ionenradius#Zusammenhang_von_Ionenradius_und_Atomradius [abgerufen am 2.



Auf Grund seiner Kleinheit ist das Li⁺-Ion sehr beweglich. Bei der genauen Berechnung der Beweglichkeit in verschiedenen Materialien sind allerdings noch andere Zusammenhänge zu berücksichtigen, ohne dass jedoch dadurch die Kausalität Kleinheit → Beweglichkeit an Bedeutung verliere.

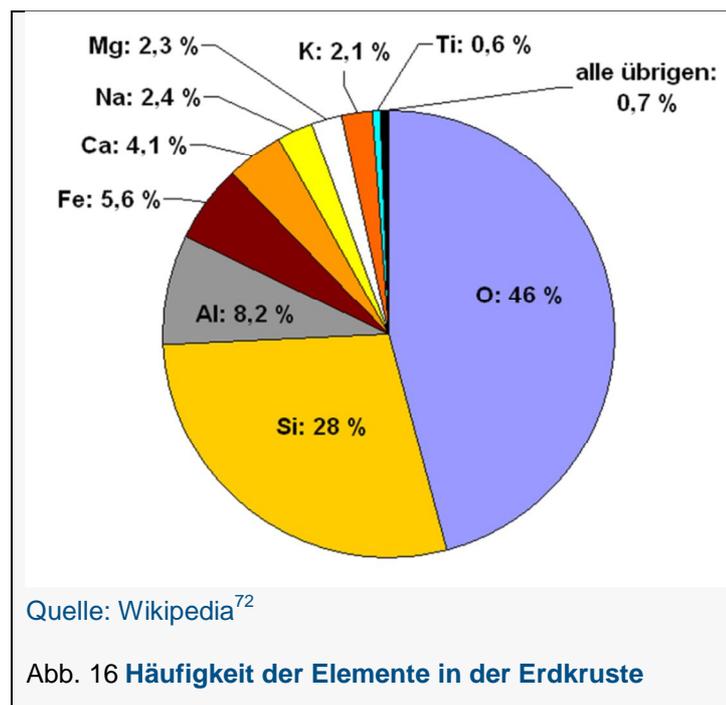
Lithium ist ein Alkalimetall, das in Kontakt mit Wasser heftig und unter starker Wärmeabgabe zu Lithium-Lauge reagiert, ähnlich wie Natrium zu Natronlauge. In Kontakt mit Luft korrodiert Lithium langsam zu Lithiumoxid und Lithiumnitrid.⁶¹ **Zumindest Li-Ionen-Batterien mit Anteilen an Lithiummetall, also noch nicht ionisiertem Lithium, müssen darum hermetisch gegen Wasser und Luft geschützt werden.** Sollte durch Zerstörung des Schutzes dennoch Wasser in die Batterie gelangen, muss sie entweder inhärent gegen Explosion geschützt oder die Explosion durch einen äußeren Schutz aufgefangen werden. Nach erfolgter Reaktion mit Wasser muss die Konstruktion das Auslaufen der Lithium-Lauge verhindern oder zumindest beschränken.

Juli 2014]

⁶⁷ Autor: Ben Mills; <http://commons.wikimedia.org/wiki/User:Benjah-bmm27>
http://de.wikipedia.org/wiki/Liste_der_H%C3%A4ufigkeiten_chemischer_Elemente#mediaviewer/Datei:H%C3%A4ufigkeit_Erdkruste.png [abgerufen am 24. Juni 2014]

Eine kurze Geschichte des Lithiums:⁶⁸ Nach dem Urknall ist bei der primordialen Elementsynthese neben Wasserstoff- und Heliumisotopen auch eine nennenswerte Menge an Li - 7 entstanden. Dieses wurde jedoch durch die stellaren thermonuklearen Prozesse weitgehend abgebaut. Größere Mengen an Li - 7 finden sich darum nur noch in Braunen Zwergen, Sternen mit weniger als 75 Jupitermassen, in denen es nicht zur Wasserstofffusion kommt.⁶⁹ Da bei den Kernfusionsreaktionen in Sternen (stellare Nukleosynthese), bei denen alle höheren Elemente entstehen, Lithium verbraucht wird, aber nur in Spuren neu entsteht, ist es im Universum mittlerweile deutlich seltener als die Hauptprodukte der stellaren Nukleosynthese, Kohlenstoff, Neon, Natrium, Magnesium, Sauerstoff, Silizium, Phosphor, Schwefel und Eisen.⁷⁰

Mit einem Masseanteil von 20 ppm ist folglich **Lithium auch eines der selteneren Elemente der Erdkruste**. Es ist ähnlich häufig wie Schwefel, Vanadium, Chrom, Nickel, aber immerhin doch doppelt so häufig wie Kupfer. Es tritt **gehäuft in Salzseen** auf.⁷¹



⁶⁸ „Eine kurze Geschichte der Zeit“ (A brief history of time), worauf hier angespielt wird, ist ein populärwissenschaftliches Buch des Physikers Stephen Hawking zur Geschichte des Universums; http://de.ask.com/wiki/Eine_kurze_Geschichte_der_Zeit?lang=de&o=2802&ad=doubleDownan=apnap=ask.com

⁶⁹ http://de.wikipedia.org/wiki/Lithium#Vorkommen_au.C3.9Ferhalb_der_Erde [abgerufen am 2. Juli 2014]

⁷⁰ <http://de.wikipedia.org/wiki/Nukleosynthese> [abgerufen am 2. Juli 2014]

⁷¹ http://de.wikipedia.org/wiki/Liste_der_H%C3%A4ufigkeiten_chemischer_Elemente [abgerufen am 24. Juni 2014]

⁷² Autor: Orcj;

http://de.wikipedia.org/wiki/Liste_der_H%C3%A4ufigkeiten_chemischer_Elemente#mediaviewer/Datei:H%C3%A4ufigkeit_Erdkruste.png [abgerufen am 24. Juni 2014]

Lithium wird in verschiedenen Industriesektoren für verschiedene Produkte und Prozesse genutzt. Nach (US Geological Survey, 2015) entfielen **im Jahr 2014** 35% auf Keramik und Glas, **31% auf Batterien**, 8% auf Schmierfette, und 26% auf andere Anwendungen. Batterien bilden jedoch den mit Abstand am stärksten wachsenden Anwendungsbereich von Lithium.

Bei Angaben zur Verfügbarkeit, Produktion und Verwendung von Lithium wird die Menge an Lithium auf zwei verschiedene Weisen angegeben, was bei oberflächlicher Lektüre der jeweiligen Quellen zur Verwirrung führen kann: (1) als Masse des Lithiums selbst in den verschiedenen Verbindungen, in denen Lithium jeweils vorliegt, und (2) als äquivalente Masse an Lithiumcarbonat (Li_2CO_3), die gegeben wäre, wenn alles Lithium in Form von Li_2CO_3 vorläge. Die zweite Angabe ist insofern sinnvoll, als Lithium oft in Form von Li_2CO_3 gehandelt wird. Da Lithium nur einen Anteil von 18,85 % der Masse von Li_2CO_3 hat, besteht zwischen beiden Angaben jedoch der Faktor 5,306⁷³. Im Folgenden wird mit Masse an Lithium ausschließlich die Masse des Lithiums selbst gemeint. Werden Lithiumcarbonat-Äquivalente (LCE) gemeint, wird dies explizit erwähnt.

Bei der Angabe von Rohstoffvorkommen müssen verschiedene Stufen der Bekanntheit, Qualität und wirtschaftlichen Erschließbarkeit unterschieden werden. In Anlehnung an (US Geological Survey, 2015) können Ressourcen definiert werden als Vorkommen von Rohstoffen, die bekannt sind oder aufgrund geologischer Gegebenheiten abgeschätzt werden können. Reserven sind der Teil der Ressourcen, der physikalische und chemische Mindestbedingungen erfüllt und zum Zeitpunkt der Erhebung wirtschaftlich rentabel erschlossen werden kann. Nach (US Geological Survey, 2015) betragen die weltweiten Ressourcen von Lithium aktuell 39,5 Millionen Tonnen, die weltweiten Reserven 13,5 Millionen Tonnen und der Jahresverbrauch 2014 33.000 Tonnen, 10% mehr als 2013. Damit beträgt die statistische Reichweite der weltweiten Reserven bei gleichbleibendem Verbrauch 409 Jahre, bei einem wie von 2013 auf 2014 beobachteten weiterhin jährlich um 10% steigenden Verbrauch 39,2 Jahre, reicht also bis Anfang 2053.⁷⁴ Die statistische Reichweite der weltweiten Ressourcen beträgt bei gleichbleibendem Verbrauch zwar knapp 1.200 Jahre, bei jährlich um 10% steigendem Verbrauch aber nur wenig mehr als die statistische Reichweite der Reserven, nämlich 50,3 Jahre, sprich reicht bis Anfang 2064.

⁷³ Die Standardatomgewichte der beteiligten Elemente betragen nach der Commission on Isotopic Abundances and Atomic Weights [www.ciaaw.org; abgerufen am 23. Juni 2015]: Li 6,9675 u; C 12,0106 u; O 15,9994 u, wobei $u = 1,66 \cdot 10^{-27}$ kg die atomare Masseneinheit ist [http://www.chemie.de/lexikon/Atomare_Masseneinheit.html; abgerufen am 23. Juni 2015] und bei allen drei Elementen das arithmetische Mittel der von der CIAAW angegebenen oberen und unteren Werte ist. Das Standardgewicht der Ionenverbindung Li_2CO_3 beträgt mithin 73,9438. Die beiden Li-Ionen haben darin einen Anteil von $13,935 / 73,9438 = 18,85\%$. Angaben von Lithiummengen in Masse Lithium und Masse Lithiumcarbonat stehen folglich im Verhältnis $18,85 : 100 = 1 : 5,306$.

⁷⁴ Steigt der Verbrauch ab 2014 mit konstanter Wachstumsrate jährlich um x% und bezeichnet man mit V den weltweiten Verbrauch an Lithium im Jahr 2014 in Höhe von 33.000 Tonnen und mit q den Term $1+x\%$, so beträgt die in den Jahren 2014 bis 2014+n verbrauchte Masse an Lithium

$$M_{2014 \text{ bis } 2014+n} = V \cdot (1 + q + q^2 + \dots + q^n) = V \cdot \frac{1 - q^{n+1}}{1 - q}$$

Setzt man $x=10$, was dem von 2013 auf 2014 beobachteten Anstieg entspricht, und $M_{2014 \text{ bis } 2014+n}$ gleich den für 2014 ermittelten Reserven von 13,5 Millionen Tonnen Lithium und löst die Gleichung nach n auf, erhält man die statistische Reichweite bei einem mit jährlich 10% wachsenden Verbrauch. Diese beträgt 39,2 Jahre.

Die Annahme eines jährlichen Wachstums von 10% über einen Zeitraum von 40-50 Jahren ist mit einer sehr großen Unsicherheit behaftet, weshalb die meisten Prognosen kaum über das Jahr 2020 hinausgehen. Eine komplementäre Abschätzung kann an Hand des erwarteten Bedarfs für eine vollständige Elektrifizierung des Automobilsektors vorgenommen werden. Dazu müssen ebenfalls eine Reihe von Annahmen gemacht werden:

- Anteil der im betrachteten Zeitraum voll-, beziehungsweise teilelektrifizierten Fahrzeuge. Hier wird für die Zwecke dieser Überschlagsrechnung und zum Vergleich mit den oben aufgeführten Rechnungen der Einfachheit halber angenommen, dass bereits ab 2014 alle neu produzierten Fahrzeuge vollelektrisch angetrieben werden.
- Anzahl der im betrachteten Zeitraum produzierten PKW und Nutzfahrzeuge. Im Jahr 2013 wurden 87,3 Millionen produziert, die durchschnittliche jährliche Steigerung betrug im Zeitraum 1997 - 2013 3,00% (s. Tabelle 3). Es sei angenommen, dass dieses Wachstum bis zum Ende des Jahres 2052/ Beginn des Jahres 2053 beziehungsweise Ende 2063/ Anfang 2064 konstant anhalte. Diese Annahme ist mit sehr großen Unsicherheiten behaftet, doch sind diese etwas kleiner als bei der Annahme eines konstanten Wachstums des Lithiumverbrauchs von 10% im gleichen Zeitraum.
- Durchschnittliche Batteriekapazität eines vollelektrifizierten Automobils. Aktuelle Modelle haben Batteriekapazitäten im Bereich von 20 – 60 kWh (Elektro-Transporter Kangoo Z.E. und Kangoo Maxi Z.E.: 22 kWh⁷⁵; Tesla Roadster: 56 kWh⁷⁶). Abweichend von (Schott, 2010) wird hier nicht eine durchschnittliche Batteriekapazität von 20 kWh sondern von 30 kWh angenommen.
- Bedarf an Lithium pro Kilowattstunde Batteriekapazität: 150 g/kWh nach (Schott, 2010).

Aus diesen Annahmen lässt sich die Menge des im Zeitraum Anfang 2014 – Ende 2052 beziehungsweise Anfang 2014 – Ende 2063 für elektrische PKW und Nutzfahrzeuge benötigten Lithiums abschätzen und mit den oben genannten Reserven beziehungsweise Ressourcen vergleichen:

Lithiumbedarf 2014 – 2052: 29,2 Mio t = 2,2fache der aktuell bekannten Reserven
Lithiumbedarf 2014 – 2063: 45,6 Mio t = 1,2fache der aktuell bekannten Ressourcen

Spricht, **unter der Annahme einer Vollelektrifizierung des PKW- und Nutzfahrzeugsektors** ab 2014, einer durchschnittlichen Batteriekapazität von 30 kWh, einem Lithiumbedarf von 150 g/kWh und einem weiteren Anstieg der Fahrzeugproduktionszahlen um 3,00 % pro Jahr wächst der Lithiumbedarf stärker als mit 10 % pro Jahr, denn anders kann die benötigte Menge an Lithium für Fahrzeugbatterien nicht bereitgestellt werden. Dann **reichen** dann **die aktuell bekannten Reserven nicht vollständig aus**, um den Lithiumbedarf bis 2052 zu decken, und selbst die Ressourcen sind vor 2063 erschöpft.

⁷⁵ <http://www.elektroauto-news.net/elektroautos/reault/reault-kangoo-ze-elektro-transporter-fuer-die-city>

[abgerufen am 23. Juni 2015]

⁷⁶ http://my.teslamotors.com/de_DE/roadster/technology [abgerufen am 23. Juni 2015]

Tabelle 3: Produktionszahlen für PKW und Nutzfahrzeuge 1997-2013 (weltweit)

Quelle: https://en.wikipedia.org/wiki/Automotive_industry#World_motor_vehicle_production [abgerufen am 23. Juni 2015]

Jahr	Automobil-Produktion	Änderung zum Vorjahr	Produktion interpoliert ⁷⁷
1997	54.434.000	-	54.434.000
1998	52.987.000	-2,66%	56.064.995
1999	56.258.892	6,17%	57.744.858
2000	58.374.162	3,76%	59.475.055
2001	56.304.925	-3,54%	61.257.094
2002	58.994.318	4,78%	63.092.528
2003	60.663.225	2,83%	64.982.956
2004	64.496.220	6,32%	66.930.026
2005	66.482.439	3,08%	68.935.437
2006	69.222.975	4,12%	71.000.935
2007	73.266.061	5,84%	73.128.321
2008	70.520.493	-3,75%	75.319.450
2009	61.791.868	-12,38%	77.576.231
2010	77.857.705	26,00%	79.900.631
2011	79.989.155	2,74%	82.294.677
2012	84.141.209	5,19%	84.760.455
2013	87.300.115	3,75%	87.300.115

Dieses Bild verändert sich, wenn die gemachten Annahmen modifiziert werden. Es verändert sich auch, wenn eine hinreichend hohe Recyclingquote angenommen wird. Folgende Annahmen führen zu einem Szenario, in dem die aktuellen Reserven und Ressourcen bis zum Ende des Jahrhunderts ausreichend sind:

- Die jährliche Lithiumproduktion sei in den betrachteten Zeiträumen immer gleich dem Bedarf. Überträge von einem Jahr in andere werden vereinfachend nicht betrachtet.

⁷⁷ Dividiert man die Produktionszahl von 2013 durch die von 1997, zieht aus dem Quotienten die 16te Wurzel (2013-1997 = 16) und subtrahiert 1, erhält man das durchschnittliche jährliche Wachstum des Automobilsektors im Zeitraum 1997 bis 2013. Mit diesem kann man die Produktionszahlen im genannten Zeitraum exponentiell interpolieren, was angemessen ist, da der Automobilsektor sich ungefähr exponentiell entwickelt. Die fiktiven Produktionszahlen, die man dabei erhält, geben diejenigen wieder, die einem konstanten Produktionswachstum (= exponentielles Wachstum der Produktionsmenge!) entsprechen. Sie werden im Rahmen der Abschätzung der künftigen Automobilproduktion mit gleichbleibendem Wachstum in die Zukunft fortgeschrieben. Die Annahme eines fortgesetzten konstanten Wachstums, sprich exponentiellen Wachstums der absoluten Produktionszahlen, ist bei einer Fortschreibung in die weitere Zukunft allerdings mit großen Unsicherheiten behaftet, da Wachstumsfunktionen von Gütern üblicherweise ab einem bestimmten Zeitpunkt abflachen und insgesamt eher eine S-Funktion beschreiben. Wird ein Gut durch ein anderes ersetzt, wird die Wachstumskurve eher durch eine Gauss-Funktion beschrieben, die bis zum Maximum etwa einer S-Funktion und am Anfang einer Exponential-Funktion entspricht. Entsprechende Darstellungen historischer Produktionskurven zeigte z.B. Ludwig Bölkow in seinen Vorträgen zu Erneuerbaren Energien regelmäßig auf (Mitteilung M. Stöhr).

- Der Anteil des produzierten (und verbrauchten) Lithiums aus Recyclingprozessen betrage im Jahr 2014 0% und steige jährlich in Schritten von 5% bis im Jahr 2026 60% erreicht werden.
- Der Anteil von Lithium aus Recyclingprozessen von 60% werde in der Folge beibehalten. Damit nähert sich dann auch die Recyclingquote (Anteil des Lithiums im Gebrauch, das durch Recycling wieder in den Produktionsprozess einfließt) asymptotisch dem Wert von 60%.

Lithiumbedarf 2014 – 2052: 13,4 Mio t = 1,0fache der aktuell bekannten Reserven

Lithiumbedarf 2014 – 2063: 20,0 Mio t = 0,5fache der aktuell bekannten Ressourcen

Sprich, ein ambitioniertes Recycling mit einer Rückgewinnungsquote von 60 % ab Mitte der 2020er Jahre erlaubt, dass ein Wachstum des Lithium-Verbrauchs von jährlich 10% und der Automobil- und Nutzfahrzeugproduktion von jährlich 3% auch bei sofortiger kompletter Umstellung auf vollelektrische Fahrzeuge bis zum Jahr 2052 fortgesetzt werden können. Dann sind erst die aktuell bekannten Reserven komplett verbraucht. Bei einer Fortsetzung dieser Wachstumsraten und unveränderter Annahmen zu Batteriegröße und Lithiumbedarf je Kilowattstunde Batteriekapazität wird **erst im Jahr 2063 die Hälfte der aktuell bekannten Ressourcen verbraucht** sein.

6.2 Eigenschaften von Lithium-Ionen-Batterien

6.2.1 Anforderungen an Energiespeicher für vollelektrische Landmaschinen

Beim SESAM-Traktor kommen Lithium-Ionen-Batterien (Li-Ionen-Batterien) als Energiespeicher zum Einsatz. Dafür spricht, dass sie folgende Anforderungen an vollelektrifizierte Landmaschinen erfüllen:

- Im Einsatz als Arbeitsmaschine: Transportfähigkeit und Fähigkeit zur Bereitstellung großer Leistungen und zwar begrenzter, aber hinreichend großer Energiemengen bei begrenztem Volumen und Gewicht.
- Im Einsatz als stationärer Energiespeicher in Zeiten, in denen die Maschine nicht für Arbeiten genutzt wird: hinreichend hohe Zyklen-Festigkeit.
- Generell: lange Lebensdauer, hoher Wirkungsgrad, Fähigkeit zu schnellen Lastwechseln und geringe Selbstentladung in Zeiträumen von bis zu zwei Wochen.
- Geringe und/ oder schnell sinkende spezifische Leistungs- und Energiekosten.

Die folgenden Angaben sind, wenn nicht anders angegeben, (Sternier & Stadler, 2014) entnommen.⁷⁸

⁷⁸ (Sternier & Stadler, 2014), Kap. 12, Vergleich der Speichersysteme, Tab. 12.1 Überblick über Mittelwerte der wichtigsten technischen und ökonomischen Parameter verschiedener Speichertechnologien

6.2.2 Volumetrische Energiedichte

Li-Ionen-Batterien übertreffen mit einer volumetrischen Energiedichte von 190-375 kWh/m³ nicht nur Blei-Säure-Batterien (25-65 kWh/m³) und Nickel-Batterien (60-105 kWh/m³), die grundsätzlich hinsichtlich der anderen Anforderungen auch für die Anwendung in Landmaschinen, und Redox-Flow-Batterien (20-60 kWh/m³), die grundsätzlich auch als stationäre Energiespeicher auf landwirtschaftlichen Betrieben in Frage kommen, sondern **generell alle anderen Speichersysteme, ausgenommen die meisten chemischen Energiespeicher**. Die volumetrische Energiedichte der chemischen Energiespeicherung von Wasserstoff in Kavernenspeichern (350 kWh/m³) wird von guten Li-Ionen-Batterien erreicht. Allerdings kann die volle Kapazität einer Li-Ionen-Batterie nur eingeschränkt genutzt werden, da Überbelastungen und Tiefentladungen die Lebensdauer verkürzen.

Im Vergleich dazu beträgt die volumetrische Energiedichte von Dieselkraftstoff 9.700 kWh/m³, ist also je nach konkreter Batterie 26-51mal so groß wie die von Li-Ionen-Batterien.⁷⁹ Wird zudem die Batterie im Gegensatz zum Dieseltank nur zwischen 10 % und 90 % der Maximalladung betrieben, um die Lebensdauer zu verlängern, ist die volumetrische Energiedichte nochmals um den Faktor 1,25 kleiner, folglich die von Dieselkraftstoff effektiv 32-64mal größer als die einer Li-Ionen-Batterie. Wird nun zum Beispiel das Volumen der Li-Ionen-Batterie einer Landmaschine doppelt so groß ausgelegt wie ein üblicher Dieseltank⁸⁰, und eine im Durchschnitt viermal höhere Effizienz des vollelektrischen Antriebs im Vergleich zum Dieselmotorantrieb angenommen⁸¹, **verkürzt sich die maximale Betriebszeit zwischen zwei Ladevorgängen je nach Batterie rechnerisch etwa um den Faktor 4-8 im Vergleich zur maximalen Betriebszeit zwischen zwei Tankvorgängen einer Landmaschine mit Dieselmotorantrieb gleicher Leistung bei gleichem Arbeitsvorgang**.⁸²

⁷⁹ 35 MJ/l laut <https://de.wikipedia.org/wiki/Dieselmotorantrieb#Eigenschaften> [abgerufen am 26. Juni 2015]; 35 MJ/l = 35/3,6 kWh/l = 35.000/3,6 kWh/m³ = 9.722 kWh/m³; Division durch 190 beziehungsweise 375 ergibt die genannten oberen und unteren Grenzwerte für das Verhältnis von volumetrischer Energiedichte von Dieselmotorantrieb zu der von Li-Ionen-Batterien.

⁸⁰ Dies ist ohne Änderung der Abmessungen der Landmaschine möglich, da der Elektroantrieb wesentlich weniger Volumen einnimmt als ein Dieselmotorantrieb gleicher Leistung mit Abgasnachbehandlungssystem.

⁸¹ Die Verbesserung der Effizienz des Antriebs infolge des Ersatzes eines Dieselmotorantriebs durch einen Elektroantrieb hängt stark vom jeweiligen Einsatz der Landmaschine und den dabei auftretenden Teil- und Vollastanteilen sowie den Lastwechseln zusammen. Nach Auskunft v. Volker Kegel, John Deere, per Email v. 9. Juli 2015 kann folgende Faustregel formuliert werden: Bei kleinen Leistungen ist die rein elektrische Lösung viel effizienter, bei großen Leistungen gibt es praktisch keinen Unterschied zum Dieselmotorantrieb.

⁸² Angenommen, die Batterie sei in Bezug auf die volumetrische Energiedichte besonders gut und diese betrage 1/26 der Energiedichte von Dieselmotorantrieb, dann kann sie bei Betrieb im Ladezustandsbereich 10-90 % (80/100 = 1/1,25 des Bereichs von 0-100 %) effektiv 1/26/1,25, also etwa 1/32 der Energie eines Dieseltankinhalts bereitstellen, wird sie doppelt so groß ausgelegt, etwa 1/16. Dank des viermal effizienteren Elektroantriebs im Vergleich zum Dieselmotorantrieb kann sie aber ungefähr 1/4 der mechanischen Endenergie bereitstellen, die durch den Dieseltank und -motorantrieb bereitgestellt wird (Dieselreferenzfall). Die maximale ununterbrochene Betriebszeit des Traktors wird dann bei exakt gleichem Arbeitsvorgang um den Faktor 4 gegenüber dem Dieselreferenzfall verkürzt.

Ist die Batterie dagegen in Bezug auf die volumetrische Energiedichte besonders schlecht und diese beträgt 1/51 der Energiedichte von Dieselmotorantrieb, dann kann sie bei Betrieb im Ladezustandsbereich 10-90 % mittels des Elektroantriebs 1/51/1,25, also etwa 1/64 der Energie eines Dieseltankinhalts bereitstellen, wird sie doppelt so groß ausgelegt, etwa 1/32. Dank des viermal effizienteren Elektroantriebs im Vergleich zum Dieselmotorantrieb kann sie aber ungefähr 1/8 der mechanischen Endenergie bereitstellen, die durch den Dieseltank und -motorantrieb bereitgestellt wird (Dieselreferenzfall). Die maximale ununterbrochene Betriebszeit des Traktors wird dann bei exakt gleichem Arbeitsvorgang um den Faktor 8 gegenüber dem Dieselreferenzfall verkürzt.

Wird der Dieseltank des Referenztraktor-Modells 6830 von John Deere mit einem Volumen von 325 l zu Grunde gelegt⁸³ beträgt das Volumen der Batterie bei doppelt so großer Auslegung 0,65 m³, das entspricht ziemlich exakt der SESAM-Batterie von 0,66 m³. Die SESAM-Batterie hat einen maximalen Energieinhalt von 130 kWh.⁸⁴ Mithin liegen ihre volumetrische Energiedichte mit 197 kWh/m³ knapp über dem unteren von (Sternier & Stadler, 2014) angegebenen Wert. Nach (Kegel, 2015) wurden die 182 in Reihe verschalteten Zellen der SESAM-Batterie im Jahr 2010 produziert. Ihre Kennwerte reflektieren folglich noch nicht die in den letzten Jahren erzielten Verbesserungen bei Design und Herstellung von Li-Ionen-Batterien. Folglich sollte die maximale Betriebszeit zwischen zwei Ladevorgängen etwa 8mal kürzer sein als die maximale Betriebszeit zwischen zwei Tankvorgängen des Referenztraktors.

Eine Li-Ionen-Batterie mit einem Volumen von 0,65 m³ speichert je nach volumetrischer Kapazität 124-244 kWh, also 13-26mal weniger elektrische Energie als der Referenzdieseltank chemische Energie (3.160 kWh). Wird sie zwischen 10 % und 90 % des vollgeladenen Zustands betrieben, kann sie effektiv 99-195 kWh, also 16-32mal weniger Energie als der Referenzdieseltank an den Motor abgeben. Da der elektrische Antriebsstrang aber im Mittel etwa 4mal effektiver ist als der diesel-motorische, kann sie 4-8mal weniger mechanische Endenergie bereitstellen. Entsprechend verkürzt sich die maximale Betriebszeit zwischen zwei Ladevorgängen im Vergleich zu der zwischen zwei Tankvorgängen. Tabelle 4 zeigt die Kenndaten dieser Auslegungsbeispiele im Überblick.

Tabelle 4: Kenndaten von Li-Ionen-Batterien und Dieselreferenzfall

Quelle: eigene Berechnungen auf der Grundlage der im Text angegebenen Kennwerte

	Li-Ionen-Batterie		Dieseltank
	schlecht	gut	
Volumen [m ³]	0,650	0,650	0,325
Masse der Batterie/ des Diesels [t]	1,123	1,283	0,276
Energieinhalt [kWh]	124	244	3.160
nutzbarer Energieinhalt [kWh]	99	195	3.160
Traktorbetriebszeitverhältnis [h/h]	0,125	0,247	1,0
Traktorbetriebszeitverkürzung [h/h]	7,995	4,051	1,0

In der Arbeit von (Kegel, 2015) wird ein Feldtest des SESAM-Traktors mit einem Schwergrubber der Fa. Rabe (Typ EG 15) durchgeführt und ein Straßentransport durch eine Fahrt auf Betonboden rund um eine Halle simuliert. Beim Schwergrubbern wird eine Arbeitszeit von 1 Stunde und 56 Minuten erreicht, beim simulierten Straßentransport eine Fahrt von 3 Stunden und 15 Minuten, bei der eine Strecke von 54 km zurückgelegt wird.

⁸³ Mitteilung von Volker Kegel, John Deere, per Email vom 15. September 2015

⁸⁴ Mitteilung von Volker Kegel, John Deere, per Email vom 9. Juli 2015

Im Rahmen des 2ndVegOil-Projektes⁸⁵ werden in (Kaiser, Dieringer, Wunderlich, & Innerhofer, 2012) Feldarbeiten einer Traktorflotte zum Zweck des Monitorings klassifiziert, um Aussagen über die Effizienz des Antriebs, im darin untersuchten Fall mit Pflanzenölen betriebene Dieselmotoren, im Feldtest machen zu können. Die Klassifizierung erfolgt nach dem Kraftstoffverbrauch und ist auf den Verbrauch beim Pflügen normiert. Die Bodenbearbeitung mit einem Grubber und Transportfahrten auf der Straße werden als Maschinenarbeiten am unteren Ende der Gruppe von Arbeiten mit mittlerer Last definiert. Die Feldbearbeitung mit einem Grubber hat danach einen Kraftstoffverbrauch von 43 % des Verbrauchs beim Pflügen, eine Transportfahrt auf der Straße einen von 52 %. Die absoluten Werte sind 10 beziehungsweise 12 l/h.⁸⁶ Die Arbeit mit einem Schwergrubber fehlt in der Aufstellung von (Kaiser, Dieringer, Wunderlich, & Innerhofer, 2012). Sie ist eher einem Kraftstoffverbrauch entsprechend 70-80 % der Maximallast und einem Kraftstoffverbrauch von 17 l/h zuzuordnen.⁸⁷

Unter den beim Feldtest im 2ndVegOil-Projekt untersuchten John Deere Traktoren befindet sich auch das hier als Referenz verwendete Traktor-Modell 6830. Dessen Kraftstofftank mit einem Volumen von 325 l reicht beim Schwergrubbern und bei Transporten auf der Straße für 19 beziehungsweise 27 Betriebsstunden. Dies ist mit den im Feldversuch von (Kegel, 2015) ermittelten Betriebszeiten von 1h56' beziehungsweise 3:15' zu vergleichen. **Die maximale Betriebszeit ist beim SESAM-Traktor beim Straßentransport also 8mal und beim Schwergrubbern 10mal kürzer als beim Referenztraktor.**

Die Feldversuche im SESAM-Projekt bestätigen folglich die deutliche Verkürzung der maximalen Betriebszeit bei einem batterieelektrischen Traktor im Vergleich zu einem dieselebetriebenen. Die gemessene Verkürzung entspricht beim Straßentransport der für eine Batterie mit niedriger volumetrischer Kapazität berechneten, beim Schwergrubbern liegt die Verkürzung deutlich darüber. Dies kann darauf zurückgeführt werden, dass beim Schwergrubbern der Elektromotor öfter nahe der Volllast gefahren wird und der Effizienzvorteil des elektrischen gegenüber dem dieselmotorischen Antrieb geringer ist.

Wäre die volumetrische Energiedichte der Batterie des SESAM-Traktors in der Nähe des oberen von (Sterner & Stadler, 2014) angegebenen Werts, betrüge die Verkürzung der maximalen Betriebszeit nur etwas mehr als der Faktor 4.

Wie (Kegel, 2015) zeigt, muss jedoch noch eine Sicherheitsreserve für Leistungsspitzen vorgesehen werden, so dass die **Verkürzung der Betriebszeit beim aktuellen SESAM-Traktor bis zum 14fachen** betragen kann.

⁸⁵ www.2ndvegoil.eu

⁸⁶ Die Klassifizierung von Maschinenarbeiten im 2ndVegOil-Projekt basiert ihrerseits auf dem Dokument „Erfahrungssätze für überbetriebliche Maschinenarbeiten 2009“ der Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen, sowie einem Dokument des Landesbetriebs Landwirtschaft Hessen vom 22. Dezember 2009, das aktuell nicht mehr auf dessen Internetportal gefunden werden kann [Abrufversuch am 15. September 2015].

⁸⁷ Siehe Fußnote 83

6.2.3 Gravimetrische Energiedichte

Der Vergleich der gravimetrischen Energiedichten von Li-Ionen-Batterien mit denen verschiedener anderer Energiespeicher fällt ähnlich aus wie der der volumetrischen Energiedichten. Die gravimetrische Energiedichte von Li-Ionen-Batterien liegt aber trotz der günstigen elektro-chemischen Eigenschaften von Lithium mit 0,11-0,19 kWh/kg um den Faktor 62-107 unter der von Dieselkraftstoff (11,8 kWh/kg⁸⁸). Legt man die Batterie wie oben beschrieben aus, womit sich je nach Batterie die maximale ununterbrochene Betriebszeit des Traktors bei gleichem Arbeitsvorgang um den Faktor 4-8 verkürzt, sprich, die Batterie 16-32mal weniger elektrische Energie speichert als im Referenzfall der volle Dieseltank chemische Energie⁸⁹, ist beträgt die **Masse der Li-Ionen-Batterie etwa das 4,1-4,6fache der Masse des Diesels im Referenzfall**⁹⁰. Wird der Dieseltank des 6830-Traktors von John Deere mit einem Volumen von 325 l zu Grunde gelegt, beträgt die Masse des darin speicherbaren Diesels 277 kg⁹¹, die Masse der wie genannt ausgelegten Batterie je nach gravimetrischer Energiedichte also 1.209-1.382 kg.

Die Batterie des SESAM-Traktors wiegt 1.010 kg (Zellen). Hinzu kommen ca. 1.000 kg für die Tragestruktur.⁹² Das von (Kegel, 2015) zitierte Datenblatt gibt mit 133 Wh/kg für die gravimetrische Energiedichte der Zellen einen geringfügig höheren Wert als den hier für die gesamte Batterie berechneten an. Er liegt etwas über dem unteren von (Sternier & Stadler, 2014) angegebenen Wert von 0,11 kWh/kg.

Diese Masse ist noch mit sonstigen Gewichtsveränderungen zu verrechnen: Wegfall des Dieselmotors, des Dieseltanks und der Abgasnachbehandlung, Änderungen an den Tragstrukturen, den Kühleinrichtungen, etc. Der SESAM-Traktor wiegt insgesamt 8.100 kg, der Referenztraktor 6890 im Vergleich dazu 5.880 kg mit leerem Tank.⁹³ Beim Schwergrubbern wurde der Traktor nach (Kegel, 2015) mit einem zusätzlichen Frontgewicht von 2.400 kg ausgestattet. Der Grubber selbst wiegt 700 kg.

Sprich, die niedrige gravimetrische Energiedichte von Li-Ionen-Batterien führt zu einem **Mehrgewicht des Traktors, das etwa dem eines zusätzlichen Frontgewichts bei schweren Arbeiten entspricht**, dieses aber durch die andere Gewichtsverteilung nicht vollkommen ersetzt. Bei leichteren Arbeiten ist das Mehrgewicht eher nachteilig.

⁸⁸ Siehe Fußnote 79

⁸⁹ Siehe Fußnote 82

⁹⁰ Angenommen die Batterie habe den oberen Wert der gravimetrischen Energiedichte von 1/62 der Energiedichte von Dieselkraftstoff, dann hat sie auch den oberen Wert der volumetrischen Energiedichte von 1/26 derer von Dieselkraftstoff und die unter Fußnote 82 für diese Fall dargelegten Überlegungen greifen. Dann ist die maximale ununterbrochene Betriebszeit des Traktors bei gleichem Arbeitsvorgang halb so groß wie im Dieselreferenzfall und die in der Batterie gespeicherte Energie 1/9 der im Dieselreferenzfall gespeicherten. Die Masse der Batterie ist dann das 62/9fache, also etwa das Siebenfache der Masse des Diesels.

Hat die Batterie den unteren Wert der gravimetrischen Energiedichte von 1/107 von der von Dieselkraftstoff, ist die maximale ununterbrochene Betriebszeit des Traktors bei gleichem Arbeitsvorgang nur ein Viertel von der des Dieselreferenzfalls, die in der Batterie gespeicherte Energie 1/17 der im Dieselreferenzfall im Tank gespeicherten, und die Masse der Batterie 107/17, also auch etwa das Siebenfache der Masse des Diesels.

⁹¹ Die Dichte von Diesel beträgt im Mittel 0,84 kg/l; <https://de.wikipedia.org/wiki/Dieselmotoren#Eigenschaften> [abgerufen am 26. Juni 2015]

⁹² Siehe Fußnote 84

⁹³ Mitteilung von Volker Kegel, John Deere, per Email vom 1. September 2015

6.2.4 Leistungsdichte

Batterien zeichnen sich dadurch aus, dass sie sehr hohe Leistungen bereitstellen können. Das von (Kegel, 2015) zitierte Datenblatt gibt 540 W/kg für die Leistungsdichte der SESAM-Batterie an. Die Spitzenleistung einer Zelle beträgt 3 kW, die der gesamten Batterie 545 kW, also fast das Siebenfache der Nennleistung des diesel-betriebenen Referenztraktors 6830 von 82 kW.⁹⁴ Mithin können für batterie-betriebene Landmaschinen durchaus Li-Ionen-Batterien eingesetzt werden, die auf eine hohe Energiedichte hin optimiert sind. Deren Leistungsdichte ist allemal immer noch hervorragend und kann auch Leistungsspitzen gut abdecken.

6.2.5 Leistungs- und energiespezifische Investitionskosten

Die Kosten von Speichersystemen sind weitgehend durch die Investitionskosten bestimmt, die Betriebskosten im Vergleich dazu unbedeutend. (Sternier & Stadler, 2014) geben 1-5 % der Investitionskosten für die jährlichen fixen Betriebskosten an. Darum werden hier nur Investitionskosten betrachtet. Li-Ionen-Batteriespeicher liegen **mit energiespezifischen Investitionskosten von 170-600 €/kWh und leistungsspezifischen von 170-600 €/kW im Mittelfeld** der Speichertechnologien. Allerdings konnten in den vergangenen Jahren rasante Preisreduzierungen dank der anlaufenden Massenproduktion und verbesserter Produktionstechniken erzielt werden.⁹⁵ Verschiedene Prognosen, z.B. in (Thielmann, Sauer, Isenmann, Wietschel, & Plötz, 2012), sagen **weitere starke Preissenkungen bis 2020 beziehungsweise 2030** voraus.

6.2.6 Lebensdauer

Die erreichbare Zyklenzahl von 400-1.900 von Li-Ionen-Batterien übertrifft die von Blei-Säure-Batterien (203-1.315) und liegt ähnlich hoch wie die von Nickel-Batterien (350-2.000). Übertroffen wird dies jedoch von den meisten anderen Energiespeichersystemen, zum Beispiel Redox-Flow-Batterien (5.755-8.593), vor allem aber Kondensatoren (1 Million) und supraleitenden Spulen (>1 Million). Die kalendarische Lebensdauer liegt mit 15 Jahren über der von Blei-Säure-Batterien (10 Jahre). Für Nickel-Batterien fehlen bei (Sternier & Stadler, 2014) die Angaben. Die kalendarische Lebensdauer wird folglich nur erreicht, wenn die Landmaschine nur einen Batteriezklus alle 3-14 Tage durchläuft.⁹⁶ Das ist unrealistisch wenig und darum **wird die Lebensdauer durch die maximal erreichbare Zyklenzahl begrenzt**.

Wie die Messungen von (Kegel, 2015) gezeigt haben, führt die Rekuperation von Leistung beim Bremsen nicht zu einer Rückeinspeisung von elektrischer Energie in die Batterie, da

⁹⁴ https://www.deere.de/de_DE/products/equipment/tractors/6r_series/6140r/6140r.page [abgerufen am 15. September 2015]

⁹⁵ Von Juni 2014 bis Juni 2015 sanken die Kosten für Batteriespeichersysteme für PV-Anlagen um 25 %, <http://www.pv-magazine.de/nachrichten/details/beitrag/preise-fr-photovoltaik-speicher-deutlich-gesunken-100019520/> [abgerufen am 30. Juni 2015]; vergleichbare Kosten- und Preissenkungen gab es bereits in den Vorjahren. So hat Sonnenbatterie auf der Intersolar 2014 bereits ein im Vergleich zur vorangegangenen Produktgeneration um 50 % günstigeres PV-Speicher-System mit einer Li-Ionen-Batterie vorgestellt.

⁹⁶ 15 Jahre · 365 Tage/ Jahr / 400 Zyklen = 14 Tage, 15 Jahre · 365 Tage/ Jahr / 1.900 Zyklen = 3 Tage

die Rekuperationsleistung jeweils vollständig anderen Verbrauchern aufgefangen wird. Folglich treten keine Be- und Entladezyklen von kurzer Dauer beim Betrieb eines Traktors auf. Allerdings weist der Entladestrom der Batterie beim Traktorbetrieb auf kurzen Zeitskalen starke Schwankungen auf. Die Frequenzanalysen des Batteriestroms zeigen, dass dieser starken Schwankungen im Bereich bis 5 Hz ausgesetzt ist.

Eine Option, den auf kurzen Zeitskalen stark schwankenden Strombezug aus der Batterie zu vermeiden, und diese somit zu schonen, ist die **Kombination der Batterie mit einem Kondensator sehr hoher Kapazität**^{97,98}, der als Ultra-Kurzspeicher fungiert. Kondensatoren haben zwar sehr hohe spezifische Investitionskosten von 5.150-12.000 €/kWh, doch genügt die Ergänzung der Batterie durch einen Kondensator mit erheblich geringerer Kapazität als die Batterie selbst, um die Reaktionszeit des Gesamtsystems zu verkürzen (von 2-5 s auf 20 ms⁹⁹) und starke Lastwechsel abzuf puffern. Dies verlängert die Lebensdauer der Batterie und senkt damit unmittelbar die Umweltfolgen und die Kosten. Die Kombination einer Batterie mit einem Kondensator zwecks Verkürzung der Reaktionszeit wurde am Beispiel einer Vanadium-Redox-Flow-Batterie in einem Forschungsprojekt zu Unterbrechungsfreien Stromversorgungen bereits erprobt.¹⁰⁰ Redox-Flow-Batterien haben eine Reaktionszeit von mehreren Sekunden, da bei ihrem Betrieb mechanische Pumpen zum Einsatz kommen.

6.2.7 Wirkungsgrad

Mit einem **Ladeenergie-zu-Entladeenergie-Wirkungsgrad** von 90-97 % liegen Li-Ionen-Batterien gemeinsam mit Kondensatoren **an der Spitze aller Energiespeicheroptionen**, wenn nur die Batterie selbst betrachtet wird. Allerdings ist dieser Wirkungsgrad noch mit dem der Wandler zu multiplizieren, die erforderlich sind, weil die Batterie nicht durchgängig auf dem gleichen Spannungsniveau betrieben werden kann, wie der Motor und andere Verbraucher, und weil die Energie zum Laden üblicherweise in Form von Wechselstrom vorliegt. Darum kann der Ladeenergie-zu-Entladeenergie-Wirkungsgrad des gesamten Lithium-Ionen-Speichersystems durchaus deutlich niedriger ausfallen. Angenommen der DC-DC oder AC-DC-Wandler beim Ladevorgang habe einen Wirkungsgrad von 95 % und der DC-DC oder DC-AC Wandler beim Entladevorgang ebenfalls, liegt der Speichersystemwirkungsgrad zwischen 81 und 88 %. **Im Mittel beträgt der Speicherverlust also etwa 15 %**. Die Parallelschaltung eines Kondensators verbessert die Situation in diesem Punkt nicht, da auch diese über Wandler be- und entladen werden.

Der Ladeenergie-zu-Entladeenergie-Wirkungsgrad beträgt nach dem Ergebnis der von (Kegel, 2015) durchgeführten Messungen beim SESAM-Traktor 91 %, liegt also wie die vo-

⁹⁷ Eine Ergänzung durch eine supraleitende Spule kommt nicht in Betracht, da die Spule mindestens mit flüssigem Stickstoff, wenn nicht mit flüssigem Helium gekühlt werden müsste. Supraleitende Spulen scheiden aus diesem Grund für mobile Anwendungen aus, ausgenommen große Schiffe.

⁹⁸ Mit Kapazität wird beim Kondensator das spannungsspezifische Ladungsfassungsvermögen ausgedrückt. Die Einheit ist 1 Farad = 1 F = 1 As/V. Im Gegensatz dazu wird bei Batterien mit Kapazität das absolute Energiefassungsvermögen ausgedrückt. Die Einheit ist 1 Ws = 1 J oder 1 kWh = 3,6 Mio J. Allerdings hat ein Kondensator mit hohem spezifischem Ladungsfassungsvermögen auch ein hohes absolutes Energiefassungsvermögen, das jedoch proportional zur Ladeendspannung ist.

⁹⁹ Fa. Maxwell im ees-Forum der Intersolar/ EES 2015

¹⁰⁰ http://www.pv-magazine.de/nachrichten/details/beitrag/redox-flow-batterien--fraunhofer-ict-verbessert-usv---gildemeister-realisiert-neues-projekt_100019964/ [abgerufen am 25. August 2015]

lumetrische und gravimetrische Energiedichte am unteren Ende der von (Sternier & Stadler, 2014) genannten Bereiche.

6.2.8 Selbstentladung

Von den Umwandlungsverlusten zu unterscheiden ist die Selbstentladung, die zu Verlusten führt, während Energie gespeichert ist. Die Selbstentladung von Li-Ionen-Batterien liegt mit 0,008-0,041 % pro Tag deutlich unter der von Blei-Säure-Batterien (0,17 % pro Tag) und reicht fast an die von Kondensatoren heran (0,004-0,013 %). Zu den meisten anderen Speichertechnologien liegen keine gesicherten Werte vor. Die geringe Selbstentladung macht **Li-Ionen-Batterien auch als Energiespeicher für längere Zeiträume bis zu zwei Wochen** interessant. Die ausschließliche Verwendung als Energiespeicher für Zeiträume von mehr als zwei Wochen ist jedoch ökonomisch nicht interessant, da dann die maximale Zyklenzahl in der kalendarischen Lebensdauer nicht erreicht werden kann.

Neben einem Kondensator kommt auch ein Schwungmassenspeicher als Ergänzung einer Li-Ionen-Batterie zwecks Senkung der Zahl schneller Lastwechsel und der Reaktionszeit des Gesamtspeichersystems in Betracht. Allerdings haben Schwungmassenspeicher eine wesentlich höhere Selbstentladung von 72-100 % pro Tag als Kondensatoren, was ihre Tauglichkeit für den stationären Einsatz einschränkt. Auch der Wirkungsgrad von Schwungmassenspeichern liegt mit 83-93 % unter dem von Kondensatoren mit 90-97 %. Allerdings sind Schwungmassenspeicher mit 650-2.625 €/kWh günstiger als Kondensatoren. Die Leistungspreise liegen mit 125-300 €/kW für diese und 125-275 €/kW für jene jedoch fast gleich.

6.3 Sicherheit von Li-Ionen-Batteriesystemen

Die extrem hohe chemische Reaktionsbereitschaft des Alkali-Metalls Lithium führt zu einer Reihe von Sicherheitsproblemen bei der Nutzung und dem Umgang mit Li-Ionen-Batterien, die gegenwärtig noch Gegenstand sehr kontroverser Diskussionen sind. Neu angefacht wurde diese Diskussion durch das Karlsruher Institut für Technologie (KIT) mit einer Pressemitteilung zur und einen Standauftritt bei der Intersolar 2014, wo Ergebnisse von Sicherheitsprüfungen von Li-Ionen-Batteriespeichern präsentiert und Konsequenzen formuliert wurden.

Die Meldung des KIT wurde teilweise mit großer Dramatik aufgegriffen, etwa in einem Artikel des Vereins Deutscher Ingenieure (VDI) mit der Überschrift „Risiko Solarspeicher: ‚Einfamilienhäuser werden brennen‘“¹⁰¹, teils als sensationsheischend kritisiert¹⁰².

Die Pressemitteilung des KIT¹⁰³ selbst kommt unaufgeregter daher. Sie beginnt mit einem Verweis darauf, dass Li-Ionen-Batterien in kommerziellen Elektrofahrzeugen sich bereits als „effizient, zuverlässig und sicher“ erwiesen haben und formuliert die Forderung, die Stan-

¹⁰¹ vdi-nachrichten.com, Rubrik Technik & Gesellschaft, Artikel „Risiko Solarspeicher: ‚Einfamilienhäuser werden brennen‘“, Autor Peter Trechow, Ausgabe 21 vom 23. Mai 2014; <http://www.vdi-nachrichten.com/Technik-Gesellschaft/Risiko-Solarspeicher-Einfamilienhaeuser-brennen> [abgerufen am 7. Juli 2014]

¹⁰² http://www.pv-magazine.de/nachrichten/details/beitrag/reaktionen-auf-die-sicherheits-checkliste-fr-batteriespeicher_100015888/ [abgerufen am 4. Juli 2014]

¹⁰³ http://www.kit.edu/kit/pi_2014_15187.php [abgerufen am 7. Juli 2014]

dards, welche die Automobilindustrie entwickelt hat, auf Heimspeicher zu übertragen. Fast trivial wirkt die Zusammenfassung der Kernbotschaft: „Lithium-Ionen-Batterien können extrem betriebssicher gebaut werden, wenn der Hersteller über das notwendige Knowhow verfügt und einige ‚Goldene Regeln‘ einhält.“

Das KIT hat fünf Batteriespeichersysteme deutscher Anbieter gekauft und jeweils nur einen einzigen Fehler verursacht. Das war zum Beispiel ein Fehler im Wechselrichter, durch den eine zu hohe Spannung an der Batterie anliegt, oder etwa ein Fehler beim Batteriemanagementsystem, wenn zum Beispiel dessen Stromversorgung ausfällt. Mehrere Batterien seien so in Flammen aufgegangen.¹⁰⁴ Dadurch wurde etwa die Aussage einiger Hersteller, Lithiumeisenphosphat-Batterien könnten nicht brennen, revidiert. Allerdings hat das KIT gezielt nur Speichersysteme untersucht, die kein UN38.3-Sicherheitszertifikat vorweisen können. Mithin lautet auch die erste Forderung des KIT, dass für Speichersysteme dieses Sicherheitszertifikat vorliegen sollte.¹⁰⁵

Tabelle 5: Kurz-Checkliste des KIT für Li-Ionen-Heimspeicher

Quelle: KIT

Technische Merkmale	Punktzahl
2 elektro-mechanische, stromlos offene Gleichstrom-Relais zur redundanten Abschaltung der Batterie	50
Über- und Unterspannungsüberwachung auf Zellebene mit redundanter Auslösung der Batterieabschaltung	10
Einzelzelltemperaturüberwachung an jeder Zelle oder „Current Interrupt-Device (CID)“ in jeder Zelle	20
Sicherer Schutz vor einer Wiederinbetriebnahme nach Tiefentladung oder anderer signifikanter Schädigung der Batterie	20
Keine ungesicherte, direkte Parallelschaltung von Zellen ohne „Current Interrupt Device (CID)“ in jeder Zelle	10
Aktive Stromregelung als Funktion von Zellspannung und Zelltemperatur	20
Metallisches, geschlossenes Batteriegehäuse, alternativ geschlossener Metallbatterieschrank	10
Transport-Tests nach UN38.3 für das Batteriesystem bzw. für ein Batteriemodul	10
Gesamtpunktzahl	110

¹⁰⁴ Siehe Fußnote 102

¹⁰⁵ http://www.pv-magazine.de/nachrichten/details/beitrag/warnung-vor-solarstrom-speichern-ohne-sicherheitszertifikat_100015387/#ixzz32o8vICG1 [abgerufen am 7. Juli 2014]

Zur genaueren Orientierung hat das KIT eine Kurz-Checkliste veröffentlicht, in der die wichtigsten sicherheitstechnischen Merkmale aus seiner Sicht dargestellt und durch Punktzahlen je Merkmal gewichtet sind (s. Tabelle 5).¹⁰⁶ Wenn ein System weniger als 110 Punkte erreicht, muss es laut KIT näher geprüft werden.¹⁰⁷

Die in Tabelle 5 aufgeführten technischen Merkmale geben nach Auskunft des KIT nur eine erste grobe Indikation zur Bewertung der sicherheitsrelevanten Baugruppen. Die Sicherheit sei darüber hinaus durch die Betriebsweise, den Aufstellungsort und die Installation beeinflusst und in jedem Fall separat zu prüfen. Zusätzlich müssten die geltenden internationalen Normen und Richtlinien (IEC, DIN EN, UN) erfüllt sein. Empfehlenswert sei ebenfalls die Zertifizierung gemäß Entwurf DIN EN 62619.

Der VDI, der nach den Untersuchungen des KIT pointiert die Sicherheitsprobleme, nicht ihre Lösbarkeit hervorgehoben hat, fasst selbst die wichtigsten Aussagen zur Sicherheit wie folgt zusammen:¹⁰⁸

„Als Faustformel gilt: Lithium-Cobalt-Oxid oder Lithium-Nickel-Cobalt-Aluminium-Oxid sind kritischer zu bewerten als etwa das Mischoxid Nickel-Mangan-Cobalt-Oxid oder Lithium-Eisenphosphat. Vor allem kommt es auf die technische Ausführung und die Schutzvorrichtungen gegen Kurzschlüsse, Überladung und Überhitzung an.

Neben Zellen ohne Zertifizierung gibt es welche, die ausschließlich nach den UN-Transportvorschriften zertifiziert sind und solche, die harte Sicherheits- und Missbrauchs-Tests bestanden haben. Immer wieder werden Fälle bekannt, in denen Zellen ohne Deklaration transportiert werden – ein Indiz, dass selbst ein UN-Transportzertifikat fehlt.

Die Autoindustrie unterzieht Zellen harten Tests. Gewertet wird nach einer Skala von 0 (kein sichtbarer Effekt) bis 7 (Explosion). Bis Level 4 (kein Feuer, keine Explosion) gelten sie als „überladungssicher“.

Sicher werden Zellen u.a. durch Additive, die Gasbildung bei Überspannung unterdrücken, durch druck- und temperaturgesteuerte Schalter, die die Stromzufuhr unterbinden oder durch keramische Separatoren.

Bei Überladung reagiert Elektrolyt an den Elektroden. Es bilden sich giftige, explosive Gasgemische. Eine einzige 40-Ah-Zelle setzt bis zu 200 l davon frei. Das Gefahrenpotenzial von Kurzschlüssen hängt vom Widerstand ab. Es droht ein sogenannter Thermal-Runaway: Reaktion an den Elektroden, Gasbildung und (wegen hoher Temperaturen in der Zelle) mit hoher Wahrscheinlichkeit Entzündung/ Explosion. Das Batteriemanagement muss auch kurzzeitige Kurzschlüsse detektieren und melden. Wenn nicht, droht beim nächsten Ladevorgang ein interner Kurzschluss mit Thermal-Runaway.“

¹⁰⁶ <http://www.kit.edu/kit/15184.php> [abgerufen am 4. Juli 2014]

¹⁰⁷ Siehe Fußnote 102

¹⁰⁸ S. Fußnote 101, Texteingang „Große Qualitätsunterschiede bei Lithium-Ionen-Akkus“

6.4 Synthese der Ergebnisse zu sonstigen Aspekten der Technikbewertung

Die Untersuchungen zur Technikbewertung von Li-Ionen-Batterien können wie folgt zusammengefasst werden:

Verfügbarkeit von Lithium

- Die bekannten Reserven und Ressourcen von Lithium sind sehr groß und reichen für die erwartete Produktion an Li-Ionen-Batterien für den Zeitraum bis etwa 2030 sicher aus. Es ist auf Grund des hohen Anteils von Lithium an den chemischen Elementen in der Erdkruste auch zu erwarten, dass weiterhin neue Reserven und Ressourcen bekannt werden.
- Nimmt man jedoch ein Wachstum des Lithium-Verbrauchs von jährlich 10%, was dem Anstieg von 2013 auf 2014 entspricht, und ein Wachstum der Automobil- und Nutzfahrzeugproduktion von jährlich 3 % bei sofortiger kompletter Umstellung auf vollelektrische Fahrzeuge an, kann dies nur bei einer zügigen Steigerung der Recyclingquote auf 60 % ab Mitte der 2020er Jahre bis zur Mitte des Jahrhunderts fortgesetzt werden. Bei einer Fortsetzung dieser Wachstumsraten und unveränderter Annahmen zu Batteriegröße und Lithiumbedarf je Kilowattstunde Batteriekapazität wird dann auch erst im Jahr 2063 die Hälfte der aktuell bekannten Ressourcen verbraucht sein.

Sicherheit von Li-Ionen-Batterien

- Lithium-Ionen-Batterien können extrem betriebssicher gebaut werden, wenn der Hersteller über das notwendige Knowhow verfügt und einige ‚Goldene Regeln‘ einhält. Landmaschinen mit elektrischen Antrieben, die Energie in mitgeführten Li-Ionen-Batterien speichern, können als sicher betrachtet werden, wenn die aktuellen Sicherheitsvorschriften auf allen Ebenen eingehalten werden. Dazu gehört mindestens, dass ein UN38.3-Sicherheitszertifikat vorliegt.
- Li-Ionen-Batterien übertreffen mit einer volumetrischen Energiedichte von 190-375 kWh/m³ alle anderen Energiespeichersysteme, ausgenommen chemische Energiespeicher. Sie sind darum als Energiespeicher für vollelektrifizierte Landmaschinen prädestiniert.

Praxistauglichkeit batterie-betriebener Landmaschinen

- Im Vergleich zu Diesel haben Li-Ionen-Batterien effektiv eine 65-128mal geringere volumetrische Energiedichte. Da jedoch der Wirkungsgrad des elektrischen Antriebs etwa viermal größer ist als der des dieselmotorischen, muss die Batterie nur 16-32mal größer ausgelegt werden als ein Dieseltank, wenn für gleiche Arbeitsvorgänge die gleiche Betriebszeit zwischen zwei Lade- beziehungsweise Tankvorgängen erreicht werden soll. Das übertrifft dennoch in der Regel das verfügbare Volumen.
- Dimensioniert man zum Beispiel die Li-Ionen-Batterie doppelt so groß wie den Dieseltank einer Landmaschine verkürzt sich die maximale Betriebszeit zwischen zwei Ladevorgängen je nach volumetrischer Energiedichte der Batterie mindestens um den Faktor 4-8 im Vergleich zur maximalen Betriebszeit zwischen zwei Tankvorgängen einer Landmaschine mit Dieselmotorantrieb.

- Die Ladezeit der Batterie einer vollelektrischen batterie-betriebenen Landmaschine ist mit 2-3 Stunden deutlich länger als ein Tankvorgang einer diesel-betriebenen Landmaschine.
- Es entfällt bei vollelektrischen Landmaschinen der Motorölwechsel.
- Die im Vergleich zu Diesekraftstoff geringere gravimetrische Energiedichte von Li-Ionen-Batterien führt zu einem Mehrgewicht diesel-betriebener Traktoren in der Größenordnung eines üblichen Frontgewichts für schwere Arbeiten. Dieses Mehrgewicht kann das Frontgewicht wegen der anderen Gewichtsverteilung jedoch nicht vollständig ersetzen. Bei Arbeiten, die kein Frontgewicht erfordern, ist das Mehrgewicht einer batterie-betriebenen Landmaschine nachteilig.
- Die Leistungsdichte von Li-Ionen-Batterien ist wesentlich höher als für Landmaschinen erforderlich und kann Leistungsspitzen problemlos bedienen.
- Die Lebensdauer einer Li-Ionen-Batterie wird im Wesentlichen durch die maximale Zyklenzahl von 400-1.900 begrenzt, nicht durch die vergleichsweise hohe kalendarische Lebensdauer von 15 Jahren. Sie kann als ausreichend betrachtet werden.

Optimierungsmöglichkeiten

- Feldversuche zeigen, dass es zwar nicht zu häufigen Mikro-Zyklen infolge kurzer Rückspeisung in die Batterie kommt, wohl aber zu schnellen Lastwechseln. Diesen können vermieden und die Lebensdauer der Batterie erhöht werden, indem der Batterie ein hinreichend großer Kondensator parallel geschaltet wird. Die Erhöhung der Lebensdauer der Batterie, verringert nicht nur die Umweltfolgen, die in umgekehrt proportionalem Verhältnis zur Lebensdauer stehen, sondern senkt auch die Kosten und erhöht die Praxistauglichkeit.
- Alternativ zu einem Kondensator kann ein Schwungmassenspeicher eine Li-Ionen-Batterie sinnvoll ergänzen, hat aber etwas schlechtere technischen Eigenschaften, vor allem eine für den stationären Betrieb untauglich hohe Selbstentladung, ist dafür aber zu etwa 5-10mal geringeren energiespezifischen Investitionskosten (€/kWh) zu haben.

Die Einschränkungen bei der Praxistauglichkeit vollelektrischer batterie-betriebener Landmaschinen hat die Konsequenz, dass sie eher für Arbeiten in Frage kommen, die nur eine geringe Leistung erfordern und in der Nähe von Ladestationen, zum Beispiel auf dem Hof, durchgeführt werden. Das prädestiniert batteriebetriebene vollelektrische Landmaschinen für den Einsatz auf viehhaltenden Betrieben, wo hinreichend viele Arbeiten direkt auf dem Hof anfallen. Die Einschränkungen werden dadurch kompensiert, dass vollelektrischer batterie-betriebener Landmaschinen auf Grund der geringeren Schallemissionen zeitlich flexibler eingesetzt werden und dank des elektrischen Energiespeichers im stationären Betrieb für weitere Anwendungen nutzbar gemacht werden können:

- Bereitstellung einer elektrischen Last und eines Speichers zur Optimierung des Eigenverbrauchs von elektrischer Energie aus erneuerbaren Quellen, die in dem landwirtschaftlichen Betrieb vor Ort selbst erzeugt wird
- Bereitstellung von Regelenenergie und Blindleistung
- Bereitstellung eines Beitrags zu einer Notstromversorgung

7 Schlussfolgerungen

Aus den Untersuchungen zu den Umweltauswirkungen und der Technikbewertung der Nutzung von Li-Ionen-Batterien in vollelektrischen Landmaschinen können folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:

Potenzial

- Elektrische Landmaschinen bieten im Vergleich zu dieselbetriebenen Landmaschinen mit Verbrennungsmotor, die fossile Energieträger nutzen, großes Potenzial, die Umweltauswirkungen zu senken. Damit dieses Potenzial ausgeschöpft wird, muss die Energie für elektrische Landmaschinen jedoch so weit wie möglich aus erneuerbaren Quellen bereitgestellt werden.
- Li-Ionen-Batterien für vollelektrische Landmaschinen haben im Vergleich zu Nickel-Metallhydrid und NMC-Batterien die geringsten Umweltauswirkungen. Im Vergleich zu anderen Energiespeichern, ausgenommen chemischen Energiespeichern, haben sie die größte Energiedichte, was sie für mobile Anwendungen prädestiniert.
- Lithium ist weltweit in ausreichender Menge verfügbar, selbst wenn der gesamte Transportsektor auf elektrische Antriebe umgestellt wird. Entscheidend dafür ist jedoch eine hohe Wiedergewinnungsquote von Lithium durch Recycling von mindestens 60% ab Mitte der 2020er Jahre.

Praxistauglichkeit

- Landmaschinen mit elektrischen Antrieben, die Energie in mitgeführten Li-Ionen-Batterien speichern, können als sicher betrachtet werden, wenn die aktuellen Sicherheitsvorschriften auf allen Ebenen eingehalten werden. Dazu gehört mindestens, dass ein UN38.3-Sicherheitszertifikat vorliegt.
- Landmaschinen mit elektrischen Antrieben, die Energie in mitgeführten Li-Ionen-Batterien speichern, haben eine mindestens 4-8mal geringere maximale Betriebszeit zwischen zwei Ladevorgängen als vergleichbare dieselbetriebene Landmaschinen bei gleichen Arbeitsvorgängen zwischen zwei Tankvorgängen. Dies liegt an der spezifischen Energiedichte von Li-Ionen-Batterien, die auch durch weitere technische Entwicklung nur begrenzt erhöht werden kann. Diese im Vergleich zu Dieselkraftstoff niedrige spezifische Energiedichte schränkt die Praxistauglichkeit batteriebetriebener vollelektrischer Landmaschinen deutlich ein und reduziert ihren Anwendungsbereich auf Arbeiten mit kleinem Leistungs- und Energiebedarf in der Nähe von Batterieladestationen, also zum Beispiel auf dem Hof. Dies beschränkt den Anwendungsbereich de facto auf viehhaltende Betriebe.
- Vollelektrische Landmaschinen benötigen keinen Motorölwechsel. Das erspart diese Tätigkeit, die damit verbundenen Kosten, und senkt das Risiko von Öleinträgen in Boden, Gewässer und Grundwasser.

Empfehlungen für den Einsatz auf landwirtschaftlichen Betrieben

- Es ist aus ökologischen, betriebsökonomischen und Ressourcengründen wichtig, dass die in vollelektrischen Landmaschinen verwendeten Li-Ionen-Batterien eine möglichst lange Lebensdauer erreichen und während ihrer Lebensdauer möglichst umfassend genutzt werden.
- Die Batterie sollte möglichst parallel zu ihrem Einsatz als Energiespeicher in einer elektrischen Landmaschine und nach Unterschreiten der dafür erforderlichen Mindestkapazität (vergleichbar mit den im Automobilbereich angesetzten mindestens 80 %) noch für weitere Zwecke dienen. Dies senkt die Umweltauswirkungen für die Nutzung in der Landmaschine dank der Allokation auf verschiedene Dienstleistungen. Da eine Landmaschine üblicherweise nur den kleineren Teil der Stunden eines Jahres in Betrieb ist, kann sie zum Beispiel in der restlichen Zeit als stationärer Puffer für elektrische Energie an das Netz zur allgemeinen Versorgung angeschlossen werden. Ist ihre Restkapazität so weit abgesunken, dass sie als Traktionsbatterie nicht mehr verwendet werden kann, kann sie ganzjährig noch einige Zeit stationär verwendet werden.

Empfehlungen an Hersteller von batterieelektrischen Landmaschinen

- Es ist für eine hohe Recyclingquote und dadurch verringerte Umweltauswirkungen wünschenswert, dass durchgängige Geschäftsbeziehungen, möglichst industrieller Akteure, über den gesamten Lebenszyklus eines Produkts bestehen. Daraus kann die Empfehlung abgeleitet werden, dass ein Hersteller von batteriebetriebenen Landmaschinen entweder alleine oder mittels Kooperationen, Strukturen zur Wiederverwendung und –verwertung sowie dem Recycling für Batterien und elektronische Komponenten aufbaut oder vorhandene Strukturen erweitert und optimiert, um eine hohe Rücklaufquote für wertvolle Grund- und Rohstoffe zu ermöglichen.
- Als Maßnahmen zur Erhöhung der Lebensdauer der Batterien sollten unter anderem folgende erwogen werden:
 - Vermeidung von Über- und Tiefentladungen durch entsprechende Steuerstrategien;
 - Ergänzung der Batterie um einen parallel geschalteten Kurzzeitspeicher, der Mikrozyklen und starke Lastwechsel sowie hohe Be- und Entladeströme vermeiden hilft, idealerweise durch einen Kondensator mit ultra-hoher Kapazität; unter Umständen reichen dazu bereits die am Eingang von Wandlern üblicherweise vorhandenen Kondensatoren
 - Installation der erforderlichen Schnittstellen für die Zweitnutzung der Batterien als stationäre Energiespeicher in Zeiten, in denen die Landmaschine nicht für landwirtschaftliche Tätigkeiten zum Einsatz kommt.

Netzintegration batteriebetriebener Landmaschinen und Erneuerbarer Energien

- Vollelektrische batteriebetriebene Landmaschinen sind in erster Linie für viehhaltende Betriebe geeignet. Diese, insbesondere solche mit Milchviehhaltung, haben ein Lastprofil, das im Gegensatz zu allen anderen Verbrauchern das elektrische Netz sehr schlecht ausnutzt, da es durch zwei sehr ausgeprägte Leistungsspitzen am Morgen und am Abend geprägt ist. Es stellt sich darum nicht nur die Frage nach der Netzintegration batteriebetriebener Landmaschinen und Erneuerbarer Energien, sondern

auch schon die nach der Verbesserung der Netzintegration von Milchviehbetrieben im Sinne einer besseren Ausnutzung der Netzkapazität.

- Eine batteriebetriebene Landmaschine stellt eine zusätzliche Last da, die nicht per se die Netzbelastung senkt.
- Die Last durch das Laden der Batterie beträgt bis zum Dreifachen des durchschnittlichen Leistungsbezugs eines Viehhaltungsbetriebs. Sie ist umso höher und belastet das Netz umso stärker, je höher die Ladeleistung ist, das heißt praktisch, je schneller die Ladung erfolgt.
- Eine nächtliche Ladung der Batterie über einen Zeitraum von etwa acht Stunden führt zu einer besseren Ausnutzung des Netzes und führt nicht dazu, dass dieses verstärkt werden muss.
- Eine schnelle Ladung am Tag, selbst zur Zeit des Lastminimums am Nachmittag führt jedoch zu einer deutlich stärkeren Belastung des Netzes und kann eine Netzverstärkung erforderlich machen.
- Die Auswirkungen einer PV-Anlage auf das Netz sind im Wesentlichen gegenläufig zu denen eines am Nachmittag geladenen SESAM-Traktors und die negativen Effekte auf das Netz kompensieren sich.
- Optimal ist die Kombination einer 50 kW PV-Anlage mit einem SESAM-Traktor, dessen maximale Batterieladeleistung ebenfalls 50 kW beträgt, für die Nutzung des Netzes zur allgemeinen Versorgung in einer Vielzahl von Fällen.
- Bei einer etwas größeren PV-Anlage weichen die Effekte nur gering vom Optimum ab, bei einer kleineren sehr stark.
- In Gebieten, in denen der Leistungsbezug durch Milchviehhaltungsbetriebe dominiert, wird das Netz gleichmäßiger und damit effizienter genutzt. In Gebieten mit hoher Einspeisung elektrischer Leistung aus PV-Anlagen wird diese signifikant verringert, wodurch insgesamt mehr PV-Anlagen betrieben werden können, ohne dass die Erzeugungsleistung aufgrund von Netzengpässen gedrosselt werden muss.

8 Weiterer Untersuchungsbedarf

Folgender weiterer Untersuchungsbedarf konnte identifiziert werden:

- Es bedarf noch einer LCA-Analyse einer konkreten elektrischen Landmaschine von der Gewinnung der Rohstoffe bis zum Recycling der Materialien.
- Die maximale Nutzungsdauer einer Landmaschine zwischen zwei Ladevorgängen muss für verschiedene Arbeitsgänge noch mittels Feldmessungen genauer untersucht werden.
- Die Erhöhung des Fahrzeuggewichts durch die Batterien führt bei Bussen zu einem ähnlich hohen zusätzlichen Primärenergieverbrauch - und bei einem überwiegend fossilen Strom-Mix auch zu einem ähnlich hohen zusätzlichen Treibhauspotenzial - in der Nutzungsphase wie die Herstellung der Batterien. Es sollte bei einer LCA-Analyse einer konkreten Landmaschine untersucht werden, ob dieser Effekt bei diesen auch zum Tragen kommt.
- Die Reduzierung der Lärmemissionen durch die Elektrifizierung von Landmaschinen ist signifikant, bedarf aber noch genauerer Messungen.
- Erneuerbare Energien könnten in ländlichen Gebieten deutlich stärker genutzt werden, wenn in größerem Umfang elektrifizierte Landmaschinen zum Einsatz kommen, deren Batterien die erzeugte elektrische Energie vor Ort verbrauchen oder zwischenspeichern. Zu untersuchen wäre genauer, welche Pufferfunktion elektrifizierte Landmaschinen oder ergänzende stationäre Speicher, die am Netz zur allgemeinen Versorgung angeschlossen sind, einnehmen können.
- Die Einschränkung der Praxistauglichkeit vollelektrischer Landmaschinen mit Batteriespeicher aufgrund der geringeren maximalen Betriebszeit bedarf einer genaueren Betrachtung.

Literaturverzeichnis

- Amarakoon, S., Smith, J., & Segal, B. (2013). *Application of Life-Cycle Assessment to Nanoscale Technology: Lithium-ion Batteries for Electric Vehicles*. Studie, United States Environmental Protection Agency.
- Baumann, H., & Tillmann, A.-M. (2004). *The Hitch Hiker's Guide to LCA - An orientation in life cycle assessment methodology and application*. Studentliteratur.
- Buchert, M. (2013). E-Schrottreycling - Eine ökologische Bewertung. T.R.E.N.D. Hamburg.
- Buchert, M., Jenseit, W., Merz, C., & Schüler, D. (2011). *Ökobilanz zum "Recycling von Lithium-Ionen-Batterien" (LithoRec)*. Darmstadt: Öko-Institut e.V. Institut für angewandte Ökologie.
- DLR, IWES, & IFNE. (2010). *Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global - Leitstudie 2010*.
- Green Car Congress. (21. April 2011). Von <http://www.greencarcongress.com/2011/04/ntnu-20110421.html> abgerufen
- Helms, H., Pehnt, M., Lambrecht, U., & Liebich, A. (2010). *Electric vehicle and plug-in hybrid energy efficiency and life cycle, in: Proceedings of 18th International Symposium Transport and Air Pollution*. Dübendorf, Schweiz: EMPA.
- ISE, F. (2014). *Stromgestehungskosten Erneuerbarer Energien*.
- ISE, F. (2015). *Current and Future Cost of Photovoltaics. Long-term Scenarios for Market Development, System Prices and LCOE of Utility-Scale PV Systems. Study on behalf of Agora Energiewende*.
- Kaiser, T., Dieringer, S., Wunderlich, T., & Innerhofer, S. (2012). *2nd VegOil Deliverable 5.2 - Stage 3A vehicle field testing*. Research project report.
- Kegel, V. (2015). *Batterieelektrischer Traktor*. Dissertation, Mannheim.
- Kwak, M., Kim, L., Sarvana, O., Kim, H. M., Finamore, P., & Hazewinkel, H. (2012). Life Cycle Assessment of Complex Heavy Duty Equipment. *Proceedings of the ASME 2012 International Symposium on Flexible Automation*. St. Louis, MO, USA.
- Majeau-Bettez, G., Hawkins, T. R., & Stromman, A. H. (20. April 2011). Life Cycle Environmental Assessment of Lithium-Ion and Nickel Metal Hydride Batteries for Plug-In Hybrid and Battery Electric Vehicles. *Environmental Science & Technology* (45 (10)), S. 4548-4554.
- Olofsson, Y., & Romare, M. (2013). *Life Cycle Assessment of Lithium-ion Batteries for Plug-in Hybrid Buses*. Master of Science Thesis, Chalmers University of Technology, Department of Energy and Environment/ Department of Applied Physics, Gothenburg.
- Ritthoff, M., & Schallaböck, K. (2012). *Ökobilanzierung der Elektromobilität Themen und Stand der Forschung; Teilbericht im Rahmen der Umweltbegleitforschung Elektromobilität im Förderschwerpunkt „Modellregionen Elektromobilität“ (FKZ 03KP5003)*. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH.
- Schott, B. (8. Juni 2010). *Lithium - begehrter Rohstoff der Zukunft, eine Verfügbarkeitsanalyse*. Abgerufen am 23. Juni 2015 von Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW): www.zsw-bw.de/infportal/downloads/studien.html
- Sterner, M., & Stadler, I. (2014). *Energiespeicher - Bedarf, Technologien, Integration*. ISBN 978-3-642-37379-4. Springer Vieweg.

Thielmann, A., Sauer, A., Isenmann, R., Wietschel, M., & Plötz, P. (Februar 2012). *Produkt-Roadmap Lithium-Ionen-Batterien 2030*. (Fraunhofer-ISI, Hrsg.) Abgerufen am 30. Juni 2015 von <http://www.isi.fraunhofer.de/isi-de/profil/publikationen.php>

US Geological Survey. (30. Januar 2015). *Mineral Commodity Summaries 2015*. Abgerufen am 23. Juni 2015 von <http://dx.doi.org/10.3133/70140094>

Glossar

Akkumulator

„Ein Akkumulator oder Akku ist ein wieder aufladbarer Speicher für elektrische Energie auf elektrochemischer Basis. Das lateinische Wort *accumulator* bedeutet „Sammler“ (lat. *cumulus* „Haufen“, *accumulare* „anhäufen“). Eine frühere Bezeichnung für Akkumulatoren war *Sammler*. Die umgangssprachliche Bezeichnung als „Batterie“ ist streng genommen nicht korrekt.“¹⁰⁹ In diesem Dokument wird statt des Begriffs „Akkumulator“ dennoch der Begriff „Batterie“ verwendet, da Akkumulatoren in der Diskussion über elektrochemische Energiespeicher gemeinhin so bezeichnet werden. Zudem werden im Englischen Akkumulatoren und Batterien beide als „battery“ bezeichnet. Ein äquivalenter Begriff für „Akkumulator“ ist „wieder aufladbares galvanisches Speicherelement“ oder „Sekundärzelle“. Dabei werden auch mehrere zusammengeschaltete Sekundärzellen als Akkumulator bezeichnet.

„Bei identischer Temperatur weisen Akkumulatoren (Sekundärzellen) ca. ein Viertel bis zur Hälfte der Energiedichte gegenüber Primärzellen auf. Bei 30 °C liegen übliche Akkumulatoren unter bzw. um 200 Wh/kg, während Primärzellen Werte um 400 Wh/kg wie die Zink-Luft-Batterie erreichen. Eine Ausnahme stellen Prototypen wie der Lithium-Schwefel-Akkumulator dar. Oft sind Akkus mit besonders hoher Energiedichte überproportional teuer oder weisen auch andere nachteilige Eigenschaften auf, insbesondere eine beschränkte Lebensdauer. So kosten Bleiakkumulatoren typischerweise 100 €/kWh; Li-Ion-Akkus hingegen derzeit (2012) typischerweise 350 €/kWh (200 €/kWh 2013), Tendenz fallend.“¹¹⁰

Wichtige Parameter von Akkumulatoren, die für die jeweiligen Einsatzfälle als Kriterien dienen, sind:¹¹¹

- Die gravimetrische Energiedichte. Sie sagt aus, wie viel elektrische Energie ein Akkumulator pro Masse (zum Beispiel Kilogramm) liefern kann. Dieser Wert ist besonders interessant für elektrisch angetriebene Fahrzeuge. Herkömmliche Bleiakkumulatoren erreichen hier rund 25-40 Wh/kg, Lithium-Ionen-Akkus (Li-Ion-Akkus) 110-190 Wh/kg (Sternier & Stadler, 2014).
- Die volumetrische Energiedichte. Sie sagt aus, wie viel Wh elektrischer Energie ein Akkumulator pro Volumen (zum Beispiel pro Liter Rauminhalt) liefern kann. Hier liegt der Wert für herkömmliche Bleiakkumulatoren bei 25-65 Wh/l, bei Li-Ion-Akkus etwa 190-375 Wh/l (Sternier & Stadler, 2014).
- Der maximal mögliche Entladestrom. Er ist wichtig für alle Anwendungen, bei denen kurzzeitig sehr hoher Leistungsbedarf besteht. Dieses ist zum Beispiel beim Starten von Fahrzeugmotoren der Fall, aber auch bei Elektrowerkzeugen und Autofokus-Kameras, insbesondere mit integrierten Blitzgeräten.
- Die möglichen Dimensionen (Abmessungen und Gewicht) und Bauformen der Akkuzelle. Sie sind entscheidend, wenn der Akkumulator auf möglichst kleinem Raum in elektronischen Geräten integriert werden soll. Ein gasdichter Aufbau etwa eines Gel-

¹⁰⁹ <http://de.wikipedia.org/wiki/Akkumulator> [abgerufen am 14. Juli 2014]

¹¹⁰ Siehe Fußnote 109

¹¹¹ Siehe Fußnote 109

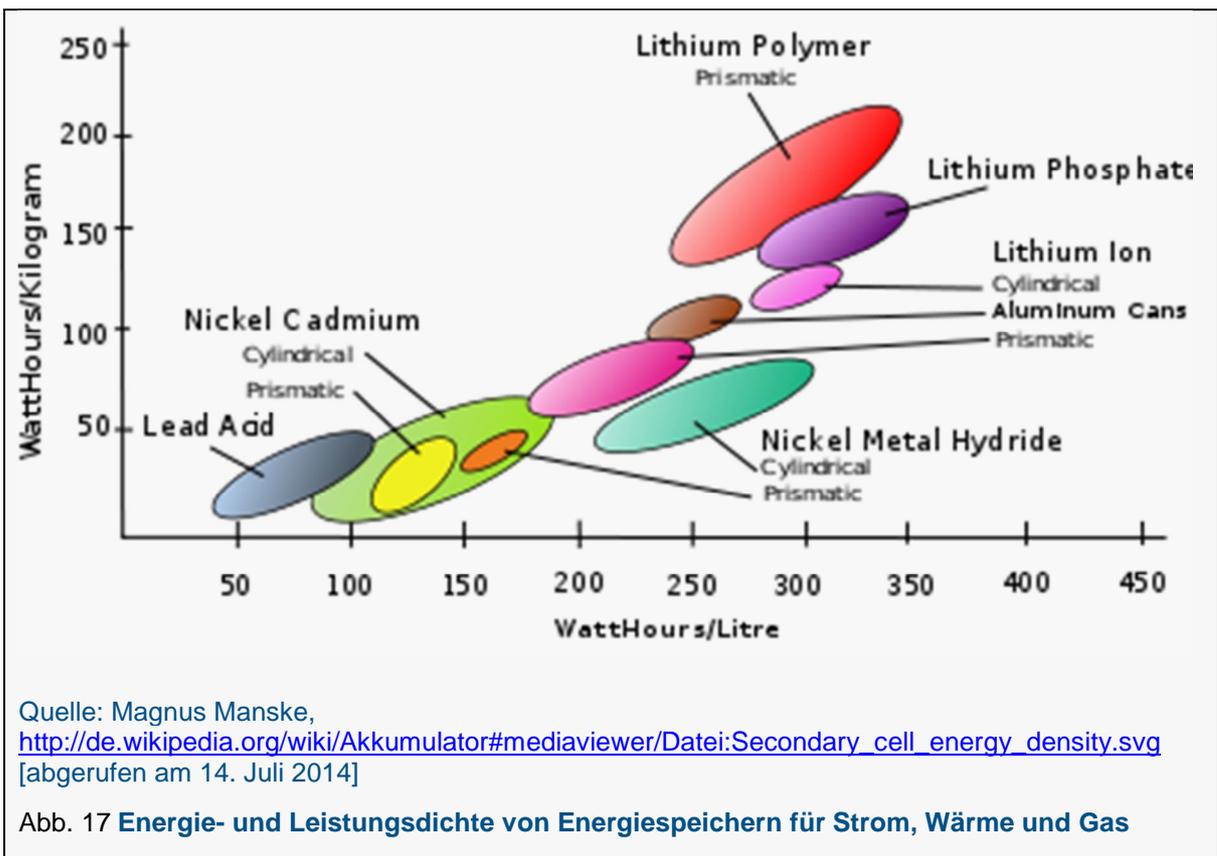
- Bleiakkumulators ermöglicht den lageunabhängigen Einsatz ohne Gefahr durch auslaufenden Elektrolyt oder korrosive Gase.
- Der Memory-Effekt bei NiCd oder Batterieträgheitseffekt bei NiMH tritt abhängig vom Lade- und Entladeverfahren auf und führt zu erheblichen Verringerungen der Kapazität (NiCd) oder der Spannung (NiMH). In Anwendungen, bei denen der Akkumulator nicht regelmäßig vollständig entladen und wieder voll aufgeladen wird, sollten deshalb Akku-Arten verwendet werden, die für diese Effekte nicht anfällig sind, zum Beispiel Blei-Akkus.

Tabelle 6: Energiedichte und Ladewirkungsgrad verschiedener Akkumulatortypen

Quelle: <http://de.wikipedia.org/wiki/Akkumulator> [abgerufen am 14. Juli 2014]

Akkumulatortyp	Energiedichte (Wh/kg)	Ladewirkungsgrad (Stand 2007)	Besonderheit
Bleiakkumulator	30	60–70 %	
Lithium-Ionen-Akkumulator auf der Basis von LiCoO ₂	120–210	90 %	neuere Modelle schnellladefähig
Lithium-Polymer-Akkumulator	140–260	90 %	praktisch beliebige Bauform möglich
Lithium-Eisen-Phosphat-Akkumulator	80–130	90 %	schnellladefähig, hochstromfähig, eigensicher
Lithium-Titanat-Akkumulator	70–90	90–95 %	schnellladefähig
Lithium-Schwefel-Akkumulator	350	-	Labor-Prototyp
Natrium-Nickelchlorid-Akkumulator (Zebra-Batterie)	100–120	80–90 %	300 °C Betriebstemperatur, keine Selbstentladung, aber Heizverluste 10–20 %
Natrium-Schwefel-Akkumulator	120–220	70–85 %	300 °C Betriebstemperatur, keine Selbstentladung, aber Heizverluste 15–30 %
Nickel-Eisen-Akkumulator	40	65–70 %	sehr unempfindlich gegen Über- und Tiefentladung
Nickel-Cadmium-Akkumulator	40–60	70 %	EU-weit verboten, aber mit vielen Ausnahmen. Erlaubt unter anderem im medizinischen Bereich, bei Elektrowerkzeugen und bei Elektroautos
Nickel-Metallhydrid-Akkumulator	60–110	70 %	

Nickel-Wasserstoff-Akkumulator	60	75%	
Nickel-Zink-Akkumulator	50	65 %	
Silber-Zink-Akkumulator	65–210	83 %	teuer, kurzlebig, empfindlich, sehr hohe Kapazität
Zinn-Schwefel-Lithium-Akkumulator	1100	-	Experimenteller Prototyp



Anion

„Ein Anion [ˈanio:n, sprich: An-Ion] ist ein negativ geladenes Ion.“¹¹² Das Gegenstück dazu ist ein Kation. Ein Anion bewegt sich im Elektrolyten eines Galvanisches Element immer in

¹¹² <http://de.wikipedia.org/wiki/Anion> [abgerufen am 14. Juli 2014]

Richtung der Anode. Diese gibt zum Ladungsausgleich Elektronen an den äußeren Stromkreis ab. Dies gilt unabhängig davon, ob gerade ein Lade- oder Entladevorgang stattfindet. Abhängig davon ist jedoch, welche der beiden Elektroden eines galvanischen Elements gerade die Anode ist. In der Literatur wird oft eine der beiden Elektroden als Anode bezeichnet, so als ob dies unabhängig davon wäre, in welcher Richtung der Ladungszustand sich gerade ändert. Es ist jedoch wichtig zu beachten, dass solch eine Zuordnung bei Akkumulatoren nur für einen der beiden Prozesse, Ladung oder Entladung, korrekt ist. Meist wird diejenige Elektrode als Anode bezeichnet, die bei der Entladung die Anode ist.

Anode

„Eine Anode (von griechisch ἄνοδος ánodos „Aufstieg“, wörtlich „Weg nach oben“) ist eine Elektrode, die beispielsweise aus einem Vakuum freie Elektronen aufnimmt oder aus einem Elektrolyten unter Elektronenaufnahme Anionen entlädt oder Kationen erzeugt, also Oxidationsreaktionen stattfinden. Eine Anode entspricht somit einem Elektronenakzeptor bzw. verhält sich formal wie ein Oxidationsmittel. Die Anode ist die Gegenelektrode zur Kathode. ... Es werden Elektronen ... über den elektrischen Anschluss abgegeben.“¹¹³ Sprich: Die Anode ist der Minuspol (Pol, dem Elektronen in den äußeren Stromkreis entströmen) eines Galvanischen Elements. Sie ist die negative Elektrode einer Batterie oder eines Akkumulators, der entladen wird. Im Fall einer Batterie ist immer die gleiche (negativ bezeichnete) Elektrode die Anode. Im Fall eines Akkumulators ist jedoch mal die eine, mal die andere Elektrode die Anode, je nachdem, ob der Akkumulator gerade geladen oder entladen wird.

Batterie

„Mit dem Begriff der elektrischen Batterie wird eine Zusammenschaltung mehrerer gleichartiger galvanischer Zellen bzw. Elemente bezeichnet, als welche zunächst, z. B. in der voltaschen Säule oder Zambonisäule, nur nicht wiederaufladbare (sogenannte „Primärzellen“ bzw. „Primärelemente“) zur Verfügung standen. Mit der Entwicklung wirtschaftlich einsetzbarer wiederaufladbarer „Akkumulatoren“, auch „Sekundärzellen“ bzw. „Sekundärelemente“, z. B. des Bleiakkumulators um 1850 bis 1886, wurde die Benutzung des Begriffs „Batterie“ auch auf die Zusammenschaltung mehrerer solcher Zellen erweitert, z. B. in den späteren Starterbatterien von Kraftfahrzeugen oder Traktionsbatterien von U-Booten usw.

In letzter Zeit schließlich hat sich die Verwendung des Begriffs „Batterie“ auch auf einzelne Primär- oder Sekundärzellen ausgedehnt, wobei für letztere die Bezeichnung „Akkuzelle“ oder abgekürzt „Akku“ verwendet wird. Der geschilderte Wandel des Sprachgebrauchs wurde in der DIN-Norm 40729 Akkumulatoren; Galvanische Sekundärelemente; Grundbegriffe angesprochen, welche unter Batterie ‚immer mehrere verbundene Zellen‘ verstanden hat, diese Begrifflichkeit sich bei der alltäglichen ‚Unterscheidung jedoch verwischt‘ hat.“¹¹⁴ In diesem Dokument spielen nur Akkumulatoren eine Rolle, keine Batterien im engeren, ursprünglichen Sinne.

¹¹³ <http://de.wikipedia.org/wiki/Anode> [abgerufen am 14. Juli 2014]

¹¹⁴ http://de.wikipedia.org/wiki/Batterie_%28Elektrotechnik%29 [abgerufen am 16. Juli 2014]

Bilanzieller Ausgleich

Die Energie eines geschlossenen Systems ist konstant (Energieerhaltungssatz).¹¹⁵ Dieser fundamentale Satz der Physik bedeutet, dass in einem Energieversorgungssystem Erzeugung, Verbrauch und Speicherung von Energie immer im Gleichgewicht stehen müssen. Umgangssprachlich als Energieverluste bezeichnete Energieflüsse gelten dabei als Verbräuche. Notiert man Erzeugung und Einspeicherung von Energie z.B. mit einem positiven, Verbrauch und Ausspeicherung mit dem umgekehrten Vorzeichen, muss die Summe von Erzeugung, Verbrauch und Speicherung von Energie immer Null sein.

In einem Energieversorgungssystem hat der Energieerhaltungssatz zur Konsequenz, dass entweder Anlagen zur Erzeugung, Verbrauch oder Speicherung von Energie, oder auch Elemente von zwei oder drei dieser Kategorien zugleich so gesteuert werden müssen, dass die von ihnen bestimmten Energieflüsse im Gleichgewicht stehen.

Liegt z.B. im elektrischen Energieversorgungssystem zur allgemeinen Versorgung die Erzeugung über dem Verbrauch, steigt die Frequenz im Stromnetz, was bedeutet, dass das Stromnetz sehr geringfügig mehr elektrische Energie speichert und auch etwas mehr abstrahlt. Vor allem aber bewirkt der Frequenzanstieg einen unerwünschten, weil unnötigen, wenn nicht sogar schädlichen Anstieg des Verbrauchs einiger Geräte. Die Leistungsaufnahme von Asynchronmotoren ist z.B. direkt proportional zur Frequenz des Stromes. Liegt umgekehrt der Verbrauch unter der Erzeugung, sinkt die Frequenz – auch mit unerwünschten Folgen. Im europäischen Verbundnetz liegt der Frequenzgradient der Regelleistung, $\frac{dP(f)}{df}$ (50 Hz), der diesen Zusammenhang reflektiert, bei etwa 20 GW/Hz.¹¹⁶

Zur Herstellung eines bilanziellen Ausgleichs müssen in elektrischen Energieversorgungssystemen, welche im Gegensatz zu Wärme- und Kälteversorgungssystemen üblicherweise nur sehr kleine inhärente Energiespeicher aufweisen, insbesondere Erzeugung und Verbrauch zeitsynchron sein. Siehe Näheres unter Flexibilität.

Blindleistung

Bei elektrischen Wechselspannungen und –strömen schwingen Spannung bzw. Strom im Takt der Frequenz zwischen positiven und negativen Werten hin und her. Sind beide im Gleichtakt, wird ausschließlich nutzbare elektrische Wirkleistung erbracht. Dies ist z.B. bei

¹¹⁵ Diese Aussage ist ungenau – wie viele andere in der Physik. Physik ist ungenau und genau deswegen ist sie exakt. Die große Kunst bei der Behandlung physikalischer Sachverhalte besteht darin, unterschiedliche Grade von Genauigkeit zu unterscheiden und den passenden Grad an Genauigkeit zu wählen, bei dem sinnvolle Aussagen zur betrachteten Situation möglich sind. Einen Grad genauer genommen als hier zitiert gilt der Energieerhaltungssatz nur im zeitlichen Mittel. Für kurze Zeiten Δt kann die Gesamtenergie eines Systems um den Betrag $\Delta E \leq \frac{h}{2\pi\Delta t} = \frac{1,055 \cdot 10^{-34} \text{ Js}}{\Delta t}$ vom Mittel abweichen. Für Betrachtungen im Zusammenhang mit Energieversorgungsfragen sind diese mikroskopischen Abweichungen jedoch völlig irrelevant, ihre Berücksichtigung wäre lächerlich. Dies zu erkennen ist hier Fall einfach, in anderen Fällen ist jedoch eine ausführlichere Diskussion dessen, was in die Betrachtung einzubeziehen ist und was vernachlässigt werden kann notwendig. Für diese Fälle ist diese an sich überflüssig erscheinende Notiz hier vermerkt.

¹¹⁶ Regelleistung (Stromnetz), in: Wikipedia; http://de.wikipedia.org/wiki/Regelleistung_%28Stromnetz%29 [abgerufen am 26. September 2013]

elektrischen Heizstäben der Fall. Die meisten elektrischen Verbraucher verschieben jedoch die Schwingungen von Spannung und Strom gegeneinander, man spricht von einer Phasenverschiebung. Diese wird in Grad angegeben und kann theoretisch Werte zwischen -180° und $+180^\circ$ annehmen. Die elektrische Wirkleistung ist gleich dem Produkt aus Strom und Spannung und dem Cosinus der Phasenverschiebung.

Beträgt die Phasenverschiebung genau $+90^\circ$ oder -90° , ist der Cosinus gleich Null und es wird keine elektrische Wirkleistung erbracht bzw. übertragen. Dieser Fall tritt nie ein, aber es sind Situationen möglich, in denen die Phasenverschiebung sehr groß und der Cosinus der Phasenverschiebung sehr klein wird. Auch in diesen Fällen müssen Generatoren laufen, um Spannung und Strom aufrecht zu erhalten, und die elektrischen Netze werden durch die nach wie vor fließenden Ströme beansprucht. Es findet weiterhin eine elektrische Leistungserbringung statt, allerdings nun überwiegend in Form von Blindleistung, die keine elektrische Arbeit erbringen kann. Diese ist gleich dem Produkt aus Strom und Spannung und dem Sinus der Phasenverschiebung. Eine größere Phasenverschiebung bzw. ein größerer Blindleistungsanteil sind unerwünscht, weil dadurch die Stromversorgungsinfrastruktur in Anspruch genommen wird, ohne dass nennenswert elektrische Arbeit verrichtet wird.

Insbesondere die zahlreichen elektrischen Verbraucher mit Spulen, dazu gehören alle Elektromotoren, führen zu einer Phasenverschiebung. Diese wird in der Regel direkt im Verbrauchsgerät so gut wie möglich kompensiert. Die verbleibende Phasenverschiebung ist durch Normen begrenzt. So findet man auf den Typenschildern elektrischer Haushaltsgeräte eine Angabe der Art „cos 0,92“, die angibt, welchen Wert der Cosinus der Phasenverschiebung hat.¹¹⁷

Die verbleibende Phasenverschiebung im elektrischen Netz zur allgemeinen Versorgung muss in den Kraftwerken oder Umspannwerken kompensiert werden. Mit dem Anwachsen der Stromerzeugung aus EE müssen auch EE-Anlagen zunehmend zu dieser Kompensation beitragen. Man spricht dabei von Bereitstellung von Blindleistung mit umgekehrtem, d.h. kompensierendem Vorzeichen.

Eigendeckung (zeitsynchron)

Bezeichnet hier den Anteil des eigenen Verbrauchs elektrischer Energie innerhalb eines kurzen Zeitintervalls, z.B. einer Viertelstunde, der durch eine zeitgleiche eigene Erzeugung elektrischer Energie gedeckt wird. Sie wird in Prozent angegeben und kann Werte zwischen 0 und 100% annehmen. Der Begriff kommt fast ausschließlich im Zusammenhang mit der Versorgung von Energieverbrauchern, einzelnen Haushalten, landwirtschaftlichen Betrieben oder auch ganzen Kommunen oder Regionen mit Energie aus erneuerbaren Quellen zur Anwendung.

Eine hohe zeitsynchrone Eigendeckung mit elektrischer Energie erhöht die Autonomie des versorgten Verbrauchers und sichert ihn gegen Versorgungsengpässe und Energiepreisturbulenzen. Ist der Bedarf an elektrischer Energie eines Verbrauchers oder einer Gruppe von Verbrauchern in allen Zeitintervallen zu 100% eigengedeckt, spricht man auch von Leistungsautarkie.

¹¹⁷ S. z.B. <http://de.wikipedia.org/wiki/Phasenverschiebung> [abgerufen am 19. Dezember 2013]

Eine offene Frage ist, ob überhaupt innerhalb kleinerer Gebiete, die keine Inseln oder sonst wie geographisch weitgehend isoliert sind, Leistungsautarkie, bzw. auf welcher Ebene eine nahe an 100% liegende zeitsynchrone Eigendeckung des Energiebedarfs sinnvollerweise angestrebt werden sollte. Zweifellos ist eine zeitsynchrone Eigendeckung nahe 100% auf der Ebene eines einzelnen Hauses nicht sinnvoll, da dann selbst Ausgleichsmöglichkeiten zwischen benachbarten Häusern nur unvollkommen genutzt werden und der Speicherbedarf sehr hoch wird. Vermutlich ist es sinnvoll eine weitgehend zeitsynchrone Eigendeckung des Energiebedarfs innerhalb von Verteilnetzen anzustreben, die über wenige Netzverbindungen überregional angebunden sind.

Seitens der Europäischen Kommission wird ganz in der Linie sonstiger Maßnahmen zur europäischen Integration nicht die Leistungsautarkie, ja nicht einmal die viel weniger anspruchsvolle Energieautarkie einzelner Regionen, sondern das Gegenteil, die möglichst starke Verknüpfung verschiedener Regionen durch leistungsfähige elektrische Netze gefördert. Dies wird mit der mehr vermuteten als explizit nachgewiesenen Erzielung ökonomischer Vorteile begründet, lässt sich jedoch auch als historisch und politisch plausiblen Reflex verstehen.¹¹⁸

Eigendeckung (saldierend)

Von der Eigendeckung (zeitsynchron) zu unterscheiden ist die saldierende. Diese wird durch Division der selbst erzeugten elektrischen Energie durch die selbst verbrauchte Energie in einem bestimmten, i.d.R. längeren Zeitraum, üblicherweise einem Kalenderjahr, berechnet. Dabei können auch Werte über 100% auftreten. Die saldierende Eigendeckung ist immer mindestens so hoch wie die zeitsynchrone, meistens aber deutlich höher. Ihre Relevanz schwindet in dem Maße, wie der Beitrag von Erneuerbare Energien (EE) zur Stromversorgung in Deutschland insgesamt steigt. Das Ziel der saldierenden Eigendeckung des Energiebedarfs aus EE wird zunehmend durch das Ziel der wesentlich anspruchsvolleren zeitsynchronen Eigendeckung abgelöst.

Eine rein saldierende und zeitasynchrone Eigendeckung erhöht nicht die Autonomie des versorgten Verbrauchers und sichert ihn nicht gegen Versorgungsengpässe und Energiepreisturbulenzen, wohl aber leistet sie einen Beitrag zur Sicherung der Gesamtheit der Energieverbraucher gegen diese Risiken.

Liegt eine saldierende Eigendeckung von 100% vor, wird auch von Energieautarkie gesprochen. Diese ist wesentlich weniger anspruchsvoll als die Leistungsautarkie und markiert auch keine so scharfe Grenzlinie wie letztere, welche das Abkoppeln der autark versorgten Verbrauchseinheit vom übergeordneten Stromnetz erlaubt.

¹¹⁸ S. Analyse der EU Politik und Gesetzgebung zu EE und Speichern in Kap. 6 und 7, in: M. Stöhr, AlpStore National Frameworks: The case of the European Union, September 2013; Download von: <http://www.alpstore.info/Download.html>.

Eigenverbrauch

Bezeichnet hier den selbst verbrauchten Anteil der von einer selbst betriebenen Erzeugungsanlage erzeugten elektrischen Energie. Er ist maximal so hoch wie die selbst erzeugte Energie. Auf letzte bezogen und in Prozent ausgedrückt nimmt er maximal den Wert 100% an.

Der Begriff Eigenverbrauch ist ein kaufmännischer Begriff. Die Zuordnung eines bestimmten Teils der erzeugten Energie zur selbst verbrauchten Energie geschieht mittels Zählern, welche sich verbrauchs- wie erzeugungsseitig vor dem Hauptnetzanschluss des Verbrauchers/ Erzeugers (Prosumers) befinden.

Eigenverbrauch elektrischer Energie kann betriebswirtschaftlich von Vorteil gegenüber dem Fremdbezug sein, wenn die mittleren Bezugskosten der verbrauchten elektrischen Energie damit gesenkt werden können. Die Bedeutung des Eigenverbrauchs hat seit Ende 2011 rapide zugenommen, vor allem in privaten Haushalten, weil zu diesem Zeitpunkt die Gesteuerungskosten von PV-Strom den durchschnittlichen Haushaltsstromtarif unterschritten. Allerdings ist der Anteil der Energie aus PV-Anlagen an der gesamten eigenerzeugten elektrischen Energie immer noch sehr gering.

Physikalisch wird immer die auf einem Grundstück erzeugte elektrische Energie zuerst auf diesem Grundstück oder in der näheren Umgebung verbraucht, auch wenn im kaufmännischen Sinn kein Eigenverbrauch vorliegt. Dies führt dazu, dass eine Erzeugungsanlage immer zunächst den Bezug elektrischer Leistung aus dem Netz reduziert. Übersteigt die Erzeugungsleistung die Leistungsaufnahme der mit dem gleichen Netzpunkt verbundenen elektrischen Verbraucher, kommt es zu einer Leistungseinspeisung in das Netz. Das Netz wird entlastet, solange die Erzeugung elektrischer Energie nicht höher ist als das Doppelte der Leistungsaufnahme der elektrischen Verbraucher, die mit dem gleichen Netzpunkt verbunden sind.¹¹⁹

Bei landwirtschaftlichen Betrieben mit einer PV-Anlage wird i.d.R. das Netz immer entlastet, bei einer Windkraft- oder Biogasanlage dagegen sehr oft nicht. Insbesondere Biogasanlagen, deren Maximalleistung im Zusammenhang mit der Steigerung der Flexibilität der elektrischen Energieerzeugung aus EE auf überregionaler Ebene erhöht wurde, steigern die Netzbelastung unmittelbar beim landwirtschaftlichen Betrieb selbst und in der näheren Umgebung und machen eine Netzverstärkung erforderlich.

Elektrode

Konstituierender Teil eines Galvanisches Element. Dieses besteht aus zwei Elektroden und einem Elektrolyt, in dem sich Ionen zwischen den Elektroden bewegen, sofern mit einer äü-

¹¹⁹ Es sei die Leistungsaufnahme durch die Verbraucher elektrischer Energie auf einem Grundstück $P_{\text{Verbrauch}}$. Die Erzeugung von elektrischer Energie mit einer Leistung $P_{\text{Erzeugung}}$ auf dem Grundstück führt zu einer Reduktion der Leistungsentnahme aus dem Netz und ab einer Erzeugungsleistung, die gleich hoch ist wie die Leistungsaufnahme durch die Verbraucher, zu einem Leistungsfluss in umgekehrter Richtung. Die Belastung des Netzes ist unabhängig von der Richtung des Leistungsflusses und beträgt $P_{\text{Netzbelastung}} = |P_{\text{Verbrauch}} - P_{\text{Erzeugung}}| < P_{\text{Verbrauch}}$ solange $P_{\text{Erzeugung}} < 2 \cdot P_{\text{Verbrauch}}$.

ßeren leitenden Verbindung zwischen den Elektroden ein vollständiger Stromkreis hergestellt wird. Wird dabei in dem galvanischen Element chemische Energie in elektrische Energie umgewandelt, spricht man von Entladung des galvanischen Elements. Dabei wird im äußeren Teil des Stromkreises elektrische Leistung zur Verfügung gestellt. Dies ist der Fall bei nicht wieder aufladbaren Batterien und bei Akkumulatoren, die geladen werden. Wird umgekehrt in dem galvanischen Element elektrische Energie in chemische Energie umgewandelt, spricht man von Ladung des galvanischen Elements. Dabei muss im äußeren Teil des Stromkreises elektrische Leistung bereitgestellt werden.

Die beiden Elektroden werden als Anode und Kathode bezeichnet. An der Anode finden Oxidations-, an der Kathode Reduktionsvorgänge statt. Zum Ladungsträgerausgleich gibt die Anode dabei Elektronen an den äußeren Teil des Stromkreises ab, die Kathode nimmt Elektronen aus dem äußeren Teil des Stromkreises auf. Auf Grund dieser Funktion wird die Anode auch als Minuspol, die Kathode als Pluspol bezeichnet. Je nachdem, in welcher Richtung die Ladungszustandsänderung eines galvanischen Elements erfolgt, ist mal die eine, mal die andere Elektrode die Anode (Minuspol) beziehungsweise die Kathode (Pluspol).

Sowohl das Begriffspaar Anode/ Kathode, als auch das Begriffspaar Minuspol/ Pluspol eignet sich zwar zur festen Bezeichnung der Elektroden von Batterien, nicht aber von Akkumulatoren. In vielen Dokumenten wird dennoch eine feste Zuordnung mit diesen Begriffspaaren auch bei Akkumulatoren vorgenommen. Sie ist dann üblicherweise bei der Entladung korrekt, bei der Ladung nicht.

Da jedoch die beiden Elektroden für die praktische Anwendung unterschieden werden müssen, müssen ihnen Namen gegeben werden, die unabhängig davon korrekt sind, ob ein Lade- oder Entladevorgang stattfindet. Mehr noch: Es müssen ihnen einfache Symbole zugeordnet werden, die sich leicht auf konkreten Batterien und Akkumulatoren anbringen lassen. Hier wird üblicherweise ein „+“ oder „-“ verwendet. Einige Dokumente verwenden entsprechend das Begriffspaar positive/ negative Elektrode. Das Attribut „positiv“/ „negativ“ gibt dabei an, welchen Ladungszustand die jeweilige Elektrode gegenüber der anderen und gegenüber der Umgebung hat. So enthält etwa die positive Elektrode einer Li-Ionen-Batterie neben Lithium-Übergangsmetallverbindungen einen leichten Überschuss an positiv geladenen Lithium-Ionen, deren Ladung nicht vollständig durch freie Elektronen oder negativ geladene Ionen kompensiert wird. Umgekehrt enthält die negative Elektrode einen leichten Überschuss an freien Elektronen, der nicht vollständig durch positive Ionen kompensiert wird.

Das Begriffspaar „positive/ negative Elektrode“ wird in diesem Dokument zur eindeutigen und von der aktuellen Ladungszustandsänderungsrichtung unabhängigen Unterscheidung der beiden Elektroden übernommen. Die positive Elektrode ist diejenige, die bei nicht wieder aufladbaren Batterien beziehungsweise Akkumulatoren, die entladen werden, der Pluspol ist, die negative diejenige, die dann der Minuspol ist. Bei Akkumulatoren, die geladen werden, ist die positive Elektrode der Minuspol, die negative der Pluspol.

Elektrolyt

„Als Elektrolyt (Maskulinum, von gr. ἤλεκτρον elektron, „Bernstein“ i. ü. S. „elektrisch“ und λυτικός lytikós, „auflösbar“) bezeichnet man eine chemische Verbindung, die im festen, flüssigen oder gelösten Zustand in Ionen dissoziiert ist und die sich unter dem Einfluss eines

*elektrischen Feldes gerichtet bewegt. Oft wird mit Elektrolyt auch das feste oder flüssige Material bezeichnet, das die beweglichen Ionen enthält.*¹²⁰

Der Elektrolyt einer Lithium-Ionen-Batterie „besteht aus aprotischen Lösungsmitteln wie Ethylencarbonat, Propylencarbonat, Dimethylcarbonat, Diethylcarbonat oder 1,2-Dimethoxyethan und gelösten Lithiumsalzen wie LiPF₆.“¹²¹

Energieautarkie

Im Zusammenhang mit geographischen Einheiten wie Inseln, isolierten Dörfern, Regionen u.a. Gebieten wird von Energieautarkie gesprochen, wenn innerhalb des Gebietes eine Eigendeckung (saldierend) des Elektrizitätsbedarfs aus Erzeugungsanlagen innerhalb des Gebietes von 100% oder mehr vorliegt. Die Energieautarkie ist ein wesentlich weniger anspruchsvolles Ziel als die Leistungsautarkie.

Energiedienstleistung

Bezeichnet hier nicht eine Dienstleistung für die Bereitstellung von Energie, sondern eine Dienstleistung, für deren Erbringung Energie benötigt wird. Dies trägt der Tatsache Rechnung, dass Energie an sich kein Gut ist, das von irgendjemandem benötigt würde, wohl aber ein Gut, das mittelbar benötigt wird, um unmittelbar benötigte Güter bereitzustellen. In diesem Sinn sind Energiedienstleistungen: Beleuchtung, Raumerwärmung, Kühlung von Lebensmitteln, Transport von Gütern und Personen, etc.

Im Zusammenhang mit der Suche nach Energieeinsparmöglichkeiten und Flexibilität im Energieversorgungssystem weitet der Begriff „Energiedienstleistung“ und der damit verbundene Blick auf die letztendlich benötigte Dienstleistung oder das Gut, für deren bzw. dessen Bereitstellung Energie eingesetzt wird, die Perspektive. Dies gibt der Fantasie weiteren Raum bei der Suche nach innovativen Lösungen für das zukünftige, weitgehend auf EE basierende Energieversorgungssystem.

Ein Beispiel aus dem Feld der Energieeinsparung, das dies verdeutlicht, ist die Nutzung von Abwärme auf einem hohen Temperaturniveau zur Bereitstellung von Kälte mittels Absorptionswärmepumpen anstatt der separaten Erzeugung von Kälte. Diese Option gerät nicht in den Blick, wenn verengend angenommen wird, man bräuchte zur Erzeugung von Wärme eben eine Einrichtung, die Wärme erzeugt, und für die Erzeugung von Kälte, ein Einrichtung, die Kälte erzeugt, und beides habe nichts miteinander zu tun – ein verengter Blick, der in nicht wenigen Fällen dazu führt, dass in industriellen Anlagen tatsächlich Strom-, Wärme- und Kältebereitstellungsanlagen in großer Zahl unverbunden nebeneinander stehen und insbesondere Teile der verfügbaren Wärme oft ungenutzt an die Umgebung abgegeben statt dorthin geleitet zu werden, wo ein Wärmebedarf besteht.¹²²

¹²⁰ <http://de.wikipedia.org/wiki/Elektrolyt> [abgerufen am 29. Juli 2014]

¹²¹ <http://de.wikipedia.org/wiki/Lithium-Ionen-Akkumulator> [abgerufen am 29. Juli 2014]

¹²² Mündliche Mitteilung von B.A.U.M.-Mitarbeitern, die als Ökoprot-Berater für Unternehmen arbeiten.

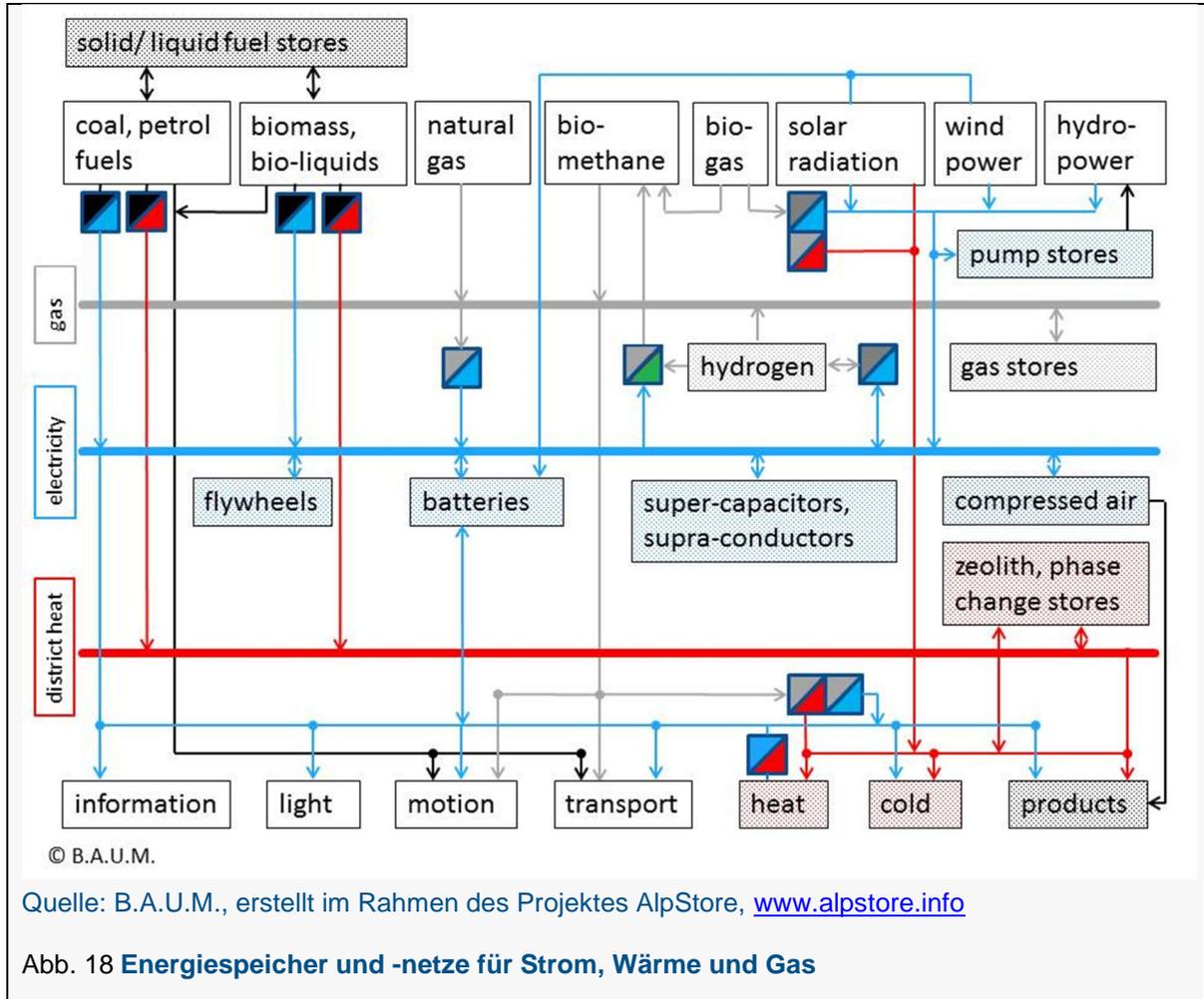
Bei der Suche nach Flexibilitäten im Energieversorgungssystem weitet der Begriff der „Energiedienstleistung“ den Blick insbesondere auf verbrauchsseitige Erschließung von Flexibilitäten, mit anderen Worten: auf Möglichkeiten des Lastmanagement.

Energiespeicher

Energieversorgung umfasst im Allgemeinen ein komplexes Geflecht von Energieumwandlungs- und –transportprozessen, in dem verschiedene Energieformen auftreten. Energiespeicher können am Anfang, in der Mitte oder am Ende von Energieumwandlungsketten stehen.

Energiespeicher, bei denen elektrische Energie direkt gespeichert oder in eine andere Energieform umgewandelt, in dieser Form gespeichert und anschließend wieder in elektrische Energie zurückverwandelt wird, sind eher die Ausnahme. Bei einer Unterscheidung nach auftretenden Energieformen können z.B. wie folgt fünf Arten von Energiespeichern unterschieden werden:

1. Speicher für feste, flüssige oder gasförmige Energieträger wie Biomasse, Biotreibstoffe oder Biomethan am Anfang von Energieumwandlungsketten.
2. Speicher, die direkt elektrische Energie speichern. Dies sind entweder Kondensatoren, Spulen oder Kombinationen von beiden (Schwingkreise). Im Zusammenhang mit der Nutzung als Energiespeicher sind insbesondere die Ausführungen mit großer Speicherkapazität relevant, Superkondensatoren und supraleitende Spulen. Diese Speicher haben eine vergleichbar geringe Energiespeicherkapazität, können jedoch sehr schnell, d.h. mit hohen Leistungen be- und entladen werden. Sie sind eher als Pufferspeicher in Energieversorgungsanlagen integriert als an das Netz zur allgemeinen Versorgung angeschlossen.
3. Speicher, die beim Laden elektrische Energie in eine andere Energieform um- und beim Entladen wieder in elektrische Energie zurückverwandeln (Batterien, Wasserstoff, Schwungräder, Pumpspeicherkraftwerke, Druckluft, flüssige Luft, etc.). Diese Speicher können an das elektrische Netz zur allgemeinen Versorgung angeschlossen sein, kommen aber auch oft im Zusammenhang mit autonomen Elektrizitätsversorgungssystemen zum Einsatz.
4. Speicher für thermische Energie, die diese beim Laden in chemische Energie um- und bei der Entladung wieder in thermische Energie zurückverwandeln (Phasenwechselmaterialien, Zeolith, etc.).
5. Speicher für Energie in der Form, in der sie genutzt wird, d.h. am Ende einer Energieumwandlungskette. In der Regel sind dies inhärente Speicher, die eine Pufferfunktion erfüllen. Zu dieser Kategorie gehören Wassertanks, dort, wo mit Energieaufwand Wasser bereitgestellt wird; Fernwärmenetze, die Teile der bereitgestellten Wärme in ihren Leitungen speichern; Kühl- und Gefrierhäuser, in denen selbst Kälte gespeichert wird, ohne dass es eines separaten Speichers bedürfte; Tanks für verflüssigte Gase, wo solche verwendet werden; und nicht zuletzt jedes unter Einsatz von Energie hergestellte industrielle Zwischen- oder Endprodukt.



Das Gesamtbild verschiedener Speicheroptionen und ihrer Verbindungen zu Energieerzeugungs- und -verbrauchsanlagen ist recht komplex. Abb. 18 zeigt einen Überblick über die wichtigsten Verbindungen. Sie unterscheidet insbesondere (1) Gas (Erdgas, Bio-Methan, Wasserstoff und Mischungen dieser Gase, deren chemische und physikalische Eigenschaften im Bereich der Norm für Erdgas liegen, was erlaubt, sie über die existierenden Erdgasnetze zu transportieren und zu verteilen und in existierenden Erdgasspeichern zu lagern (grau), (2) Elektrizität (blau), und (3) Wärme (rot). Umwandlungseinrichtungen, die Energie zwischen diesen Formen umwandeln sind durch diagonal geteilte zweifarbige Quadrate gekennzeichnet. Weiterhin zeigt Abb. 18 feste und flüssige Kraftstoffe, Wasser und Produkte, die allesamt Arten von Energiespeichern sind (schwarz).

Erneuerbare Energien

Erneuerbare Energien (EE) sind nach **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** in der Fassung vom 17. August 2012¹²³ Wasserkraft einschließlich der Wellen-, Gezeiten-, Salzgradienten- und Strömungsenergie, Windenergie, solare Strahlungsenergie, Geothermie, Energie aus Biomasse einschließlich Biogas, Biomethan, Deponiegas und Klärgas sowie aus dem biologisch abbaubaren Anteil von Abfällen aus Haushalten und Industrie bereitgestellte Energie aus Biomasse. Diese Definition wird hier übernommen.

Erzeugungsmanagement

Veränderung der Ausgangsleistung von Energieerzeugungsanlagen mit dem Ziel der Herstellung des Bilanzieller Ausgleich innerhalb eines Energieversorgungssystems.

Flexibilität

Bezeichnet hier die Fähigkeit eines Elements des Energieversorgungssystems die Leistungsaufnahme oder –abgabe in Abhängigkeit von externen Erfordernissen zu verändern. Die übergeordnete externe Erfordernis ist, dass in einem zusammenhängenden Energieversorgungssystem Energieerzeugung, -verbrauch und –speicherung sich zu jedem Zeitpunkt die Waage halten müssen (Bilanzieller Ausgleich).

Daneben gibt es wirtschaftliche Erfordernisse, etwa das Ziel der Gewinnmaximierung, technische Grenzen (ein Speicher ist voll oder leer), der Schutz von Personen und Gütern (Abschaltung von Kernkraftwerken im Fall einer Störung oder von Windkraftanlagen bei Starksturm), Umweltbelange (Drosselung flusswassergekühlter thermischer Kraftwerke bei Überschreiten einer kritischen Flusswassertemperatur) oder andere Gründe, die alle eine externe Erfordernis darstellen können, Energieerzeugung, -verbrauch oder –speicherung zu beeinflussen. Eine wichtige, sowohl ökonomische als auch sicherheitsrelevante Erfordernis ist z.B., dass keine unerwünschten Energieverbräuche (zu hohe Verluste, Überlastung von Geräten, etc.) auftreten.

Im engeren Sinn wird im Zusammenhang mit der Stromversorgung über ein Netz der allgemeinen Versorgung von Flexibilität gesprochen. Dabei sind die Frequenz und Spannung die Parameter, deren Werte anzeigen, ob der notwendige Bilanzieller Ausgleich in gewünschter Weise erzielt wird.

Die Bedingung, dass Erzeugung, Verbrauch und Speicherung zu jedem Zeitpunkt bilanziell ausgeglichen sein müssen gilt auch für jedes Teilsystem der Energieversorgung. Allerdings sind die Teilsysteme i.d.R. offen, so dass der Ausgleich auch durch Zu- oder Abfluss aus dem Teilsystem, d.h. im Fall von elektrischer Energie über Netzleitungen hergestellt werden kann. Eine Grenze stellt dabei die Übertragungskapazität der Netzleitungen dar, welche das Teilsystem mit anderen Teilen des Stromversorgungssystems verbinden.

¹²³ „Gesetz zur Änderung des Rechtsrahmens für Strom aus solarer Strahlungsenergie und zu weiteren Änderungen im Recht der erneuerbaren Energien“ vom 17. August 2012 in der am 23. August 2012 im Bundesgesetzblatt (BGBl. I S. 1754) veröffentlichten Fassung. In dieser Studie abkürzend „EEG 2012“ genannt.

Eine hohe Flexibilität ist gegeben, wenn die erforderliche Veränderung zur Herstellung des Bilanzieller Ausgleich schnell und in großem Umfang erfolgen kann; anders ausgedrückt: wenn große Leistungsänderungen möglich sind.

Flexible Elemente können Energieerzeugungsanlagen, Verbrauchsaggregate oder Energiespeicher sein. Je nachdem zu welcher dieser Gruppen flexibler Elemente eine Einrichtung gehört, deren Flexibilität genutzt wird, wird von Erzeugungsmanagement, Lastmanagement oder Energiespeicher gesprochen.

Der Begriff der Flexibilität hat in der energiewirtschaftlichen Diskussion durch den starken Anstieg der Stromerzeugung aus Erneuerbare Energien (EE) an Bedeutung gewonnen, obgleich er zunächst nichts mit EE zu tun hat; denn auch eine rein konventionelle Energieversorgung benötigt und verfügt über flexible Elemente aller drei genannten Kategorien. Allerdings ist bei PV- und Windkraftanlagen, den Anlagen zur Stromerzeugung aus EE mit dem bei weitem größten Potenzial, das Maximum der Ausgangsleistung von nicht kontrollierbaren Faktoren (Sonneneinstrahlung und Windgeschwindigkeit) abhängig, wenngleich die Ausgangsleistung im Intervall zwischen Null und der momentanen Maximalleistung sehr wohl gesteuert werden kann. Da aber die Grenzkosten der Stromerzeugung von PV- und Windkraftanlagen nahezu Null sind, besteht wenig Interesse daran, sie unterhalb des momentanen Maximums der Ausgangsleistung zu betreiben, solange es andere Möglichkeiten des Bilanzieller Ausgleich gibt, deren Nutzung i.d.R. wirtschaftlich sinnvoller ist. Mithin richtet sich der Blick zunehmend darauf, mit welchen Elementen die meist im schwankenden Maximum der Ausgangsleistung betriebenen PV- und Windkraftanlagen innerhalb des Energieversorgungssystems sinnvoll ergänzt werden. Dabei ist die Flexibilität der PV und Windkraft ergänzenden Elemente ein entscheidendes Kriterium für ihre Berücksichtigung.

Eine Besonderheit der Anlagen zur Nutzung von EE zur Stromerzeugung ist, dass sie zu den am schnellsten regelbaren Stromerzeugungsanlagen überhaupt gehören. Zudem ist ihre Leistung zwischen 0 und 100% der momentanen Maximalleistung regelbar. Dies gilt insbesondere für PV- und Windkraftanlagen, deren Leistung binnen Sekunden rein elektronisch (PV) bzw. aerodynamisch (Windkraft) zwischen 0 und 100% der momentanen Maximalleistung geregelt werden kann. Die elektrische Ausgangsleistung von Biogas-BHKW kann binnen ca. 15 Minuten zwischen 0 und 100% geregelt werden. Ähnlich flexibel sind mit Erdgas befeuerte Gaskraftwerke. In scharfem Gegensatz dazu benötigen Steinkohlekraftwerke 2-4 Std. für einen Heiß- und 6-8 Std. für einen Kaltstart. Die Kaltstartzeiten von Braunkohle- und Kernkraftwerken liegen sogar bei 9-15 bzw. 24 Std.¹²⁴

Galvanisches Element

„Eine galvanische Zelle [gal'va:nɪfə tʃɛlə], galvanisches Element oder galvanische Kette ist eine Vorrichtung zur spontanen Umwandlung von chemischer in elektrische Energie. Jede Kombination von zwei verschiedenen Elektroden und einem Elektrolyten bezeichnet man als galvanisches Element, und sie dienen als Gleichspannungsquellen. Der charakteristische

¹²⁴ J.N. Mayer, N. Kreifels, B.Burger: Kohleverstromung zu Zeiten niedriger Börsenstrompreise, Fraunhofer-Institut für solare Energiesysteme, Freiburg, August 2013; <http://www.ise.fraunhofer.de/de/downloads/pdf-files/aktuelles/kohleverstromung-zu-zeiten-niedriger-boersenstrompreise.pdf> [abgerufen am 17. September 2013]

Wert ist die eingepreiste Spannung. Unter der Kapazität eines galvanischen Elements versteht man das Produkt aus Entladungsstromstärke mal Zeit. ... Galvanische Zellen werden systematisch in drei Gruppen unterteilt:

- Primärzellen, umgangssprachlich auch als Batterie bezeichnet. Kennzeichnend ist, dass nach Zusammenfügen die Zelle aufgeladen ist und einmalig entladen werden kann. Die Entladung ist irreversibel und die Primärzelle kann elektrisch nicht mehr aufgeladen werden.
- Sekundärzellen, umgangssprachlich auch als Akkumulator oder kurz Akku bezeichnet. Nach einer Entladung können Sekundärzellen durch eine gegenüber der Entladung gegenläufigen Stromrichtung wieder neu aufgeladen werden. Die chemischen Prozesse in der Zelle laufen, limitiert durch die Zyklenanzahl, reversibel ab. Die Energiedichte von Sekundärzellen ist im Vergleich zu Primärzellen bei identischer Temperatur geringer.
- Brennstoffzellen, auch als Tertiärzellen bezeichnet. Bei diesen galvanischen Zellen wird der chemische Energieträger nicht in der Zelle gespeichert, sondern von extern kontinuierlich zur Verfügung gestellt. Die externe Zuführung ermöglicht einen kontinuierlichen und im Prinzip zeitlich unbeschränkten Betrieb.

Die Funktion der galvanischen Zellen beruht auf einer Redoxreaktion. Reduktion und Oxidation laufen räumlich getrennt in je einer Halbzelle (Halbelement) ab. Durch Verbinden der beiden Halbzellen mit einem Elektronenleiter und einem Ionenleiter wird der Stromkreis geschlossen.¹²⁵

Grenzkosten

Mathematisch die erste Ableitung der Energiekosten nach der Energie im Punkt der momentanen Energieerzeugung einer Anlage: $\frac{dK(E)}{dE} |_{E_{mom}}$

Anders ausgedrückt: Die Kosten, um die sich die Kosten der Energieerzeugung aus einer Anlage verändern, wenn die Energieerzeugung ein wenig verändert wird.

Bei PV- und Windkraftanlagen sind die Grenzkosten nahezu Null, da es fast keinen Unterschied macht, ob eine PV- oder Windkraftanlage im momentanen, wetterbedingten Erzeugungsmaximum oder bei einer niedrigeren Leistungsabgabe betrieben wird. Bei Erzeugungsanlagen, die Brennstoffe benötigen, das sind u.a. alle fossilen Kraftwerke und Kernkraftwerke, werden die Grenzkosten im Wesentlichen durch die Brennstoffkosten bestimmt.

Die Grenzkosten sind i.d.R. von den Energiegestehungskosten, im Fall der Stromerzeugung von den Stromgestehungskosten, verschieden, welche die durchschnittlichen Kosten je Energieeinheit über die Laufzeit einer Anlage bezeichnen.

¹²⁵ http://de.wikipedia.org/wiki/Galvanisches_Element [abgerufen am 28. Juli 2014]

Kation

„Ein Kation (*ˈkatjo:n*, gr. κατά κάτω „herab“ und ἰόν ion „Gehendes“ (Partizip Präsens zu ἔναι *énai* „gehen“)) ist ein positiv geladenes Ion.“¹²⁶ Das Gegenstück dazu ist ein Anion. Ein Kation bewegt sich im Elektrolyten eines Galvanisches Elements immer in Richtung der Kathode. Diese nimmt zum Ladungsausgleich Elektronen aus dem äußeren Stromkreis auf. Diese Zuordnung gilt unabhängig davon, ob gerade ein Lade- oder Entladevorgang stattfindet. Abhängig davon ist jedoch, welche der beiden Elektroden eines galvanischen Elements gerade die Kathode ist. In der Literatur wird oft eine der beiden Elektroden als Kathode bezeichnet, so als ob dies unabhängig davon wäre, in welcher Richtung der Ladungszustand sich gerade ändert. Es ist jedoch wichtig zu beachten, dass solch eine Zuordnung bei Akkumulatoren nur für einen der beiden Prozesse, Ladung oder Entladung, korrekt ist. Meist wird diejenige Elektrode als Kathode bezeichnet, die bei der Entladung die Kathode ist.

Kathode

„Eine Kathode [*kaˈto:də*] (auch Katode, von altgriechisch κάθοδος *káthodos* „Rückweg“, wörtlich „Weg nach unten“) ist eine Elektrode, an der Elektronen einem System zugeführt werden. Ein System kann ein Vakuum (Elektronenröhre), eine Gasphase (Gasentladungsröhre), ein Plasma oder ein Elektrolyt sein. Entsprechend der Definition können an dieser Elektrode Reduktionsreaktionen ablaufen, z. B. positive Ionen (Kationen) entladen werden. Die Kathode ist die Gegenelektrode zur Anode. Zwischen diesen Elektroden wandern Ionen oder freie Elektronen. Die Kationen wandern zur Kathode und die Anionen zur Anode.“¹²⁷ Die Kathode ist immer der Pluspol (Pol, am Elektronen aus dem äußeren Stromkreis aufgenommen werden) eines Galvanisches Element. Sie ist die positive Elektrode einer Batterie oder eines Akkumulator, der entladen wird. Im Fall einer Batterie ist immer die gleiche (positive bezeichnete) Elektrode die Kathode. Im Fall eines Akkumulators ist jedoch mal die eine, mal die andere Elektrode die Kathode, je nachdem, ob der Akkumulator gerade geladen oder entladen wird.

Lastmanagement

In vielen Fällen, in denen elektrische Energie zur Bereitstellung einer Energiedienstleistung verwendet wird, etwa bei Wärmeerzeugung mittels Wärmepumpen, Kälteerzeugung mittels elektrisch angetriebener Kältemaschinen, Druckluftherzeugung mittels elektrischer Kompressoren, läuft die elektrisch angetriebene Maschine, welche die Bereitstellung sichert, nicht permanent bei konstanter Leistung, sondern nur intervallweise. In den Zeiten zwischen diesen Intervallen wird die erbrachte Energiedienstleistung (Wärme, Kälte, Druckluft, etc.) gespeichert. Dies ist eine indirekte Form der Stromspeicherung.

Oft ist es nun direkt oder nach Vergrößerung des sowieso vorhandenen Energiedienstleistungsspeichers (Warmwasserbehälter, Kühlhaus, Druckluftflasche, etc.) möglich, den Zeitpunkt des Betriebs der elektrisch angetriebenen Maschine zu verschieben, ohne dass dies auf die Erbringung der gewünschten Energiedienstleistung einen Einfluss hat.

¹²⁶ <http://de.wikipedia.org/wiki/Kation> [abgerufen am 14. Juli 2014]

¹²⁷ <http://de.wikipedia.org/wiki/Kathode> [abgerufen am 15. Juli 2014]

Diese Flexibilität der elektrischen Lastaufnahme kann gezielt genutzt werden, um einen bilanziellen Ausgleich zwischen (fluktuierender) Energieerzeugung und –verbrauch herzustellen. Dies wird als Lastmanagement bezeichnet und ist meist kostengünstiger als Erzeugungsmanagement oder Energiespeicherung in extra und ausschließlich für den bilanziellen Ausgleich installierten Energiespeichern.

Die größten und am einfachsten zu erschließenden Potenziale zum Lastmanagement existieren in der Industrie. So wurde jüngst ein Lastmanagementpotenzial von ca. 1 GW in Unternehmen in den Bundesländern Baden-Württemberg und Bayern identifiziert, welches für durchschnittlich eine Stunde aktiviert werden kann. D.h. eine Leistungsaufnahme von 1 GW kann um durchschnittlich eine Stunde verschoben werden.¹²⁸ Die beiden süddeutschen Bundesländer sind von der bereits erfolgten und weiter geplanten Abschaltung von Kernkraftwerken am meisten betroffen und verfügen im Gegensatz zu den nördlicheren Bundesländern nicht mehr um große Überkapazitäten bei der Stromerzeugung. Da zudem der Ausbau von Übertragungsnetzverbindungen nach Norddeutschland wie der „Thüringer Strombrücke“ verzögert erfolgt, haben beide Bundesländer einen größeren aktuellen und weiter wachsenden Bedarf an Flexibilität im Stromversorgungssystem.

Lastmanagement wird in der Industrie bereits seit langem angewandt, um die Strombeschaffungskosten zu optimieren. Im Kleingewerbe, Landwirtschaft und privaten Haushalten ist es vergleichsweise neu aber auch nicht unbekannt: Die An- und Abschaltung von Nachtspeicherheizungen und Wärmepumpen mittels eines Rundsteuersignals des Netzbetreibers ist eine bereits länger verbreitete Form des Lastmanagements. Dank neuer Möglichkeiten der Informations- und Kommunikationstechnologie wird sich Lastmanagement zunehmend leichter und mit kleineren Energiemengen und größerer zeitlicher Variabilität durchführen lassen als bisher.

Leistungsautarkie

Im Zusammenhang mit geographischen Einheiten wie Inseln, isolierten Dörfern, Regionen u.a. Gebieten wird von Leistungsautarkie gesprochen, wenn innerhalb des Gebietes eine Eigendeckung (zeitsynchron) des Elektrizitätsbedarfs aus Erzeugungsanlagen innerhalb des Gebietes von 100% vorliegt. Die Leistungsautarkie ist ein wesentlich anspruchsvolleres Ziel als die Energieautarkie und verlangt einen genau abgestimmten Einsatz von Flexibilitätsoptionen.

Life-Cycle-Assessment (LCA)

Life-Cycle-Assessment (LCA), deutsch Ökobilanzierung, untersucht die Umweltauswirkungen von Technik. Das Ziel einer LCA-Studie ist, unter zwei oder mehreren Produkten oder Dienstleistungen, die jeweils einen vergleichbaren Nutzen haben, das oder diejenige mit den

¹²⁸ Lastmanagement als Beitrag zur Deckung des Spitzenlastbedarfs in Süddeutschland, Endbericht einer Studie von Fraunhofer ISI und der Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft im Auftrag von Agora Energiewende, August 2013;
<http://www.agora-energiewende.de/themen/effizienz-lastmanagement/detailansicht/article/endbericht-zum-lastmanagement-erschiene/> [abgerufen am 26. September 2013]

geringsten Umweltauswirkungen zu identifizieren. Dazu wird der gesamte Lebenszyklus der betrachteten Produkt- oder Dienstleistungsalternativen von der Gewinnung der Rohmaterialien bis zur Entsorgung beschrieben und die Umweltauswirkungen jeder einzelnen Lebenszyklusphase werden berechnet und interpretiert.

Memory-Effekt

Vor allem aus NiCd-Akkumulatoren bekannter Effekt des Kapazitätsverlusts als Folge häufiger Teilentladungen anstatt Tiefentladungen. Auch Batteriealterungsprozess genannt. Lithium-Ionen-Batterien weisen nur einen sehr geringen Memory-Effekt auf.

Meta-Studie

Studie, die sich nicht auf eigene Primäruntersuchungen wie Experimente, Berechnungen, Interviews u.a. stützt, sondern bereits vorhandene Studien auswertet und eine Synthese von deren Ergebnissen erstellt. In die Synthese können in geringem Umfang Berechnungen, eigene Recherchen u.a. einfließen, vor allem um die vorgefundenen Ergebnisse auf Plausibilität und Kompatibilität zu überprüfen.

Minuspol

Elektrischer Anschluss eines elektrischen Elementes, über den Elektronen aus dem Element in den äußeren Stromkreis strömen. Das Gegenstück ist der Pluspol. Die Unterscheidung ist nur bei Gleichstromkreisen sinnvoll. Bei Wechselstromkreisen bewegen sich die Elektronen mit der Frequenz des Wechselstromes abwechselnd in die eine und die andere Richtung.

Netzdienliches Verhalten

Ein anderer Ausdruck für Netzkonformes Verhalten. Wird in dieser Studie in einem engeren Sinn als Bezeichnung für bestimmte Betriebsweisen der Batterie verwendet, welche an das elektrische Netz zur allgemeinen Versorgung angeschlossen werden kann. Der Ausdruck könnte jedoch auch für andere Energiespeicher, Erzeugungsanlagen oder Verbrauchseinrichtungen verwendet werden. Die Betriebsweisen werden als netzdienlich bezeichnet, wenn sie helfen, Frequenz und Spannung in den vorgesehenen Grenzen zu halten. Dies geschieht durch gezielte Aufnahme oder Abgabe von Wirk- und/ oder Blindleistung.

Hintergrund für den Bedarf an elektrischen Einrichtungen, die ein netzdienliches Verhalten zeigen ist der starke Ausbau der Stromerzeugung aus PV- und Windkraftanlagen. Diese werden i.d.R. im oder nahe am jeweiligen Erzeugungsmaximum betrieben, welches jedoch von der momentanen solaren Einstrahlung und Umgebungstemperatur, bzw. der Windgeschwindigkeit bestimmt wird. Ein Betrieb unterhalb der jeweils möglichen maximalen Leistung ist für den Betreiber grundsätzlich zunächst ökonomisch unsinnig, da die Grenzkosten von PV- und Windstromerzeugung nahe Null sind und die Vergütung für die erzeugte Energiemenge gewährt wird, nicht für deren grundsätzliche Bereitstellung (Vorhalten von Erzeugungskapazität).

Davon abweichende Vergütungsschemata können auch den Betrieb von PV- und Windkraftanlagen unterhalb des jeweils möglichen Leistungsmaximums (Abregeln) ökonomisch sinnvoll machen. Eine Abregelung geschieht nach EEG §11 (Einspeisemanagement) gegenwärtig immer dann, wenn der Netzbetreiber damit eine Netzüberlastung vermeiden will und ihm andere Mittel nicht zur Verfügung stehen. Nach EEG §12 (Härtefallregelung) ist der Anlagenbetreiber dann jedoch für die grundsätzliche Bereitschaft zur Stromerzeugung zu vergüten.

Netzkonform

Bezeichnet eine Eigenschaft von Stromerzeugungsanlagen und Verbrauchern. Diese werden netzkonform betrieben, wenn sie dazu beitragen, den bilanziellen Ausgleich innerhalb des Stromversorgungssystems herzustellen. Anders als der Begriff vermuten lässt, bezeichnet der Begriff keine Betriebsweise, welche durch Anforderungen des Netzes selbst gewünscht oder erforderlich ist, sondern durch das Verhalten anderer Erzeugungs- und Verbrauchsanlagen notwendig wird.

Ökobilanzierung

s. Life-Cycle-Assessment (LCA)

Oxidation

„Eine Oxidation (veraltete Schreibweise: Oxydation) ist eine chemische Reaktion, bei der ein Atom, Ion oder Molekül Elektronen abgibt. Ihre formale Oxidationszahl wird dabei erhöht. Ein anderer Stoff nimmt die Elektronen auf und wird dadurch reduziert. Mit der Oxidation ist also immer auch eine Reduktion verbunden. Beide Reaktionen zusammen werden als Teilreaktionen einer Redoxreaktion betrachtet.“¹²⁹ „Bei elektrochemischen Elementen, die elektrische Energie erzeugen, finden an der Anode Oxidationsvorgänge statt, d. h., die aus dem Elektrolyten kommenden Anionen werden entladen bzw. neutrale Atome werden zu Kationen.“¹³⁰ Die dabei frei werdenden Elektronen werden über den Elektrodenkontakt an den äußeren Stromkreis abgegeben. Bei einem Akkumulator wird diese Elektrode zur Kathode, wenn der Akkumulator geladen wird. Dann finden an dieser Elektrode Reduktionsvorgänge statt. Das jeweils umgekehrte gilt für die andere Elektrode. Zur eindeutigen Bezeichnung der Elektroden eignet sich das Begriffspaar „positive/ negative Elektrode“.

Pluspol

Elektrischer Anschluss eines elektrischen Elementes, über den Elektronen aus dem äußeren Stromkreis in das Element strömen. Das Gegenstück ist der Minuspol. Die Unterscheidung ist nur bei Gleichstromkreisen sinnvoll. Bei Wechselstromkreisen bewegen sich die Elektro-

¹²⁹ <http://de.wikipedia.org/wiki/Oxidation> [abgerufen am 14. Juli 2014]

¹³⁰ <http://de.wikipedia.org/wiki/Anode> [abgerufen am 14. Juli 2014]

nen mit der Frequenz des Wechselstromes abwechselnd in die eine und die andere Richtung.

Primärzelle

Auch Primärelement genannt. Nicht wieder aufladbares galvanisches (elektrochemisches) Element mit zwei Polen. Werden die beiden Pole durch einen elektrischen Leiter miteinander verbunden, fließt ein Strom. Dabei finden in dem Galvanisches Element nicht wieder umkehrbare chemische Reaktionen statt. Im Gegensatz dazu sind die chemischen Reaktionen in einer Sekundärzelle umkehrbar und solch eine Zelle ist darum wieder aufladbar.

Prosumer

Strommarktteilnehmer, der sowohl elektrische Energie verbraucht als auch selbst erzeugt. Einen Grenzfall stellt ein Verbraucher dar, der durch Lastmanagement und/ oder Energiespeicher seine Energiebeschaffung aktiv optimiert.

Gegenwärtig ist der Spielraum für eine aktive Energiebeschaffungsoptimierung noch recht eingeschränkt. Insbesondere spielt eine Rolle, dass das Tagesprofil des Strompreises an der EEX z.Z. recht flach und der Einsatz von Flexibilitäten nicht rentabel ist.

Es ist aber damit zu rechnen, dass mit weiter zunehmendem Anteil von PV- und Windstrom an der Stromerzeugung, die heute bereits zu beobachtenden Nachfragespitzen nach residuärer (konventioneller) Stromerzeugung und damit einhergehende Preisspitzen am frühen Vormittag und am späten Nachmittag bzw. Abend häufiger und ausgeprägter sein werden. Damit wächst auch der wirtschaftliche Vorteil, der durch den Einsatz von Flexibilitäten erzielt werden kann.

Vor allem aber wird es für immer mehr Stromverbraucher interessant, den eigenen Strombedarf selbst durch Anlagen zur Erzeugung von Strom aus erneuerbaren Quellen oder Gas-BHKW zu decken. In Extremfällen, z.B. wenn vor allem Kühlaggregate zu versorgen sind, deren Strombedarf sehr gut mit der Sonneneinstrahlung korreliert, kann selbst mit einer PV-Anlage bis zu 90% des eigenen Strombedarfs selbst gedeckt werden.¹³¹

Redoxreaktion

Oxidation (Abgabe von Elektronen) und Reduktion (Aufnahme von Elektronen) laufen nie getrennt voneinander ab, da die Gesamtladung eines geschlossenen Systems eine Konstante ist. Es wird folglich immer ein Stoff oxidiert, ein anderer zeitgleich reduziert. Die Gesamtreaktion wird als Redoxreaktion bezeichnet.

¹³¹ s. PV-Magazin, Meldung über 8 MW-Anlage auf Gewerbegebäude

Reduktion

„Die Reduktion ist eine chemische Reaktion, bei der Elektronen von einem Atom, Ion oder einem Molekül aufgenommen werden. Die formale Oxidationszahl wird kleiner (Merkhilfe: Bei einer Reduktion wird die Oxidationszahl reduziert). Sie tritt zusammen mit dem umgekehrten Fall, der Oxidation, auf. Beide Phänomene laufen nie unabhängig voneinander ab und werden zusammen als Redoxreaktion bezeichnet.“¹³² Bei Galvanisches Elementen, die elektrische Energie erzeugen, finden an der Kathode Reduktionsvorgänge statt, d. h., die aus dem Elektrolyten kommenden Kationen werden entladen bzw. neutrale Atome werden zu Anionen. Die dabei benötigten Elektronen werden über den Elektrodenkontakt dem äußeren Teil des Stromkreises entnommen. Bei einem Akkumulator wird diese Elektrode zur Anode, wenn der Akkumulator geladen wird. Dann finden an dieser Elektrode Oxidationsvorgänge statt. Das Umgekehrte gilt für die jeweils andere Elektrode. Zur eindeutigen Bezeichnung der Elektroden eignet sich das Begriffspaar „positive/ negative Elektrode“.

Sekundärzelle

Auch Sekundärelement genannt. Wieder aufladbares galvanisches (elektrochemisches) Element mit zwei Polen. Werden die beiden Pole durch einen elektrischen Leiter miteinander verbunden, fließt ein Strom. Dabei finden in dem Galvanisches Element chemische Reaktionen statt und die Sekundärzelle wird entladen. Wird stattdessen eine hinreichend große elektrische Spannung mit umgekehrtem Vorzeichen an den Polen angelegt, fließt ein Strom in umgekehrter Richtung, die chemischen Reaktionen in der Sekundärzelle finden in umgekehrter Richtung statt und die Sekundärzelle wird geladen. Im Gegensatz zu Sekundärzellen sind die chemischen Reaktionen in einer Primärzelle nicht umkehrbar und diese darum nicht wieder aufladbar.

Smart Farm

Landwirtschaftlicher Betrieb, dessen Energieflüsse mit einem hohen Grad an Automatisierung so gelenkt werden, dass sowohl für den landwirtschaftlichen Betrieb selbst als auch für Dritte der Verbrauch an Energie gesenkt und/oder die Erzeugung von Energie maximiert wird, wobei ein möglichst hoher Teil der Energie aus erneuerbaren Quellen bereitgestellt und nach Möglichkeit noch ein sonstiger Nutzen erzielt wird. Ein sonstiger Nutzen ist etwa die Verbesserung der landwirtschaftlichen Produktion selbst oder zusätzliche bzw. besser gesicherte Einnahmen des landwirtschaftlichen Betriebs.

Speicher

s. Energiespeicher

¹³² http://de.wikipedia.org/wiki/Reduktion_%28Chemie%29 [abgerufen am 30. Juli 2014]

Stromgestehungskosten

Spezifische Kosten elektrischer Energie, dargestellt z.B. in ct/kWh, ermittelt aus den Vollkosten einer Stromerzeugungsanlage über die gesamte finanzielle Laufzeit der Anlage, dividiert durch die in dieser Zeit erzeugte elektrische Energie. In die Vollkostenrechnung fließen die Investitions- und Betriebskosten ein. Sie werden den Einnahmen gegenüber gestellt, in denen die Stromgestehungskosten als zu ermittelnde Unbekannte enthalten sind.

Nota bene: Es werden keinerlei Subventionen abgezogen, da es solche in Deutschland für EE-Stromerzeugungsanlagen nicht gibt. Das EEG regelt lediglich, dass Strom aus solchen Anlagen auch ins Netz eingespeist und zu einem Preis abgenommen werden muss, der etwa so hoch wie die Stromgestehungskosten ist.

Wie in der Finanzmathematik bzw. jeder Investitionsrechnung üblich, werden die Kosten und die als Unbekannte in der Rechnung enthaltenen Einnahmen für das Jahr n mit dem Faktor

$q = \left(\frac{1}{1 - \frac{z}{100}} \right)^n$ gewichtet, wobei z die angestrebte Kapitalverzinsung in Prozent ist.

Da bei allen EE-Anlagen, ausgenommen Biomasse-Anlagen, die Vollkosten vor allem von den Investitionskosten zu Beginn der Laufzeit bestimmt sind, während sich die durch die Rechnung zu ermittelnden, durch keine Ausgaben kompensierten und durch den Faktor q^n gewichteten Einnahmen auf einen vergleichsweise langen Zeitraum verteilen, sind die zu ermittelnden Stromgestehungskosten extrem von der angestrebten Kapitalverzinsung abhängig.

Die folgende Graphik zeigt den Einfluss der angestrebten Kapitalverzinsung auf die Stromgestehungskosten am Beispiel einer kleinen PV-Anlage. Diese sei im Herbst 2013 installiert worden und habe folgende Kennwerte:

PV Generatorleistung:	17 kWp
Spezifische Systemkosten:	1.600 €/kWp ¹³³
Spezifischer Jahresertrag:	950 kWh/ kWp
Gesamtinvestition:	27.200 €
Jährliche Betriebskosten:	350 €
Finanzielle Lebensdauer:	20 years

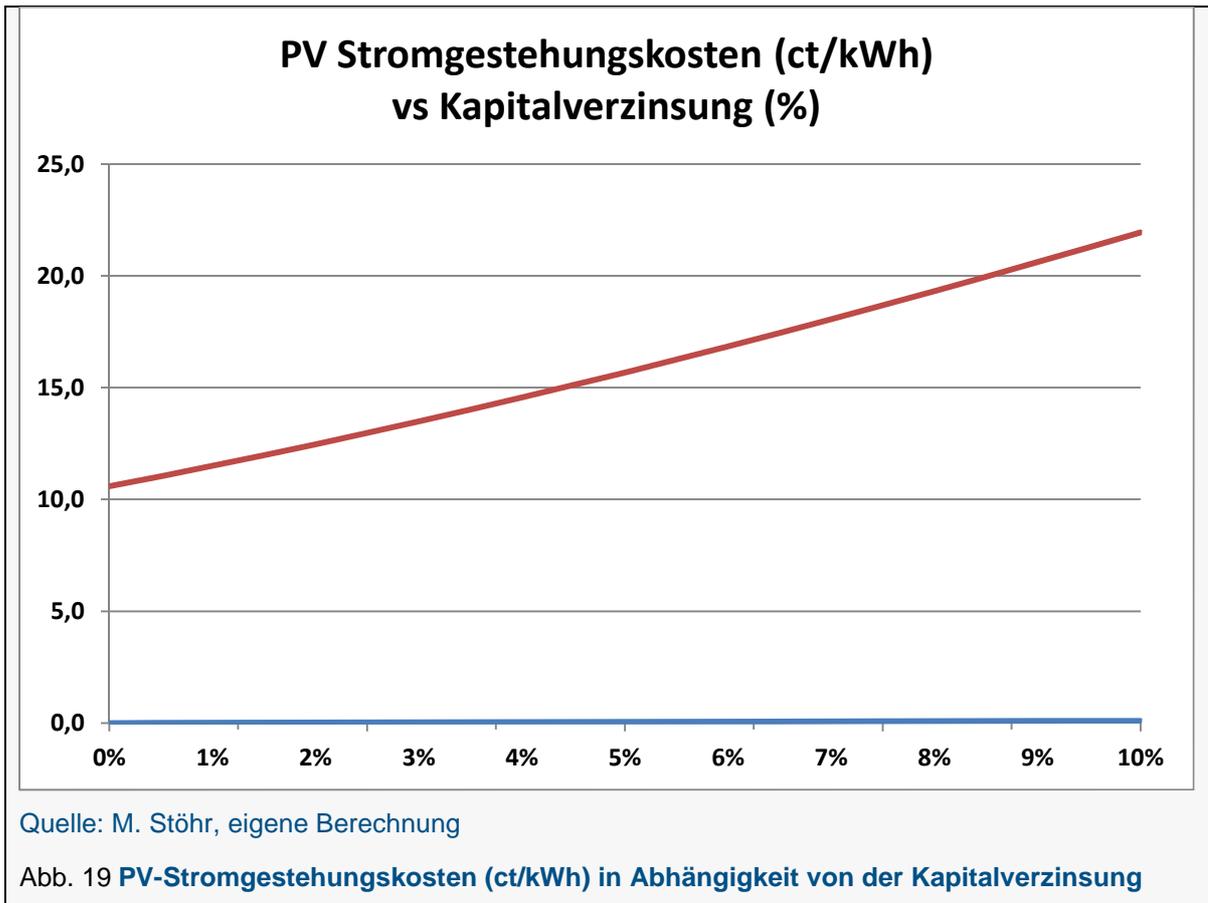
Die angestrebte Kapitalverzinsung ist dabei die effektive Mischverzinsung von Eigen- und Fremdkapital; bei 100% Eigenkapitalfinanzierung ist sie mit der Eigenkapitalrendite identisch.

Die Graphik zeigt, dass die Kapitalverzinsung einen sehr großen Einfluss auf die Stromgestehungskosten hat. Die Kapitalzinsen können wichtiger als die solare Einstrahlung sein.¹³⁴ Daraus folgt, dass indirekt die Eigentümerstruktur einen wesentlichen Einfluss auf die Stromgestehungskosten hat: Während EE-Genossenschaften üblicherweise mit einer Eigenkapitalrendite von 4% zufrieden sind und bei der Aussicht auf eine solche Rendite investieren, müssen börsennotierte Aktiengesellschaften eine etwa doppelt so hohe Eigenkapitalver-

¹³³ Durchschnittliche Systemkosten im September 2013 nach EuPD Research; <http://www.pv-magazine.de/themen/investoren/pv-systempreise/> [abgerufen am 1. Oktober 2013]

¹³⁴ PV Status Report 2012 des Joint Research Centre of the European Commission (EC-JRC) in Ispra, zitiert in: Globaler PV-Markt vor dem großen Boom, Solarthemen 409 vom 10. Oktober 2013, S. 8

zinsung erzielen. Die Stromgestehungskosten steigen dadurch um ein Drittel von 14,56 ct/kWh auf 19,32 ct/kWh in dem aufgezeigten Fall.



Würde der gesamte von der PV-Anlage erzeugte Strom und nicht nur 90%¹³⁵ mit 13,54 ct/kWh¹³⁶, der EEG-Vergütung für Anlagen zwischen 10 und 40 kWp im Oktober 2013, vergütet, betrüge die Kapitalverzinsung geringfügig weniger als 3%. Die genaue Kapitalverzinsung hängt davon ab, wie die verbleibenden 10%, oder auch mehr, genutzt werden.

¹³⁵ Die Vergütung nach EEG 2012 §32 ist nach §33 (1) auf 90% der in einem Kalenderjahr insgesamt erzeugten Strommenge begrenzt.

¹³⁶ Berechnet nach EEG 2012 §32 in Verbindung mit §20b unter Berücksichtigung der veröffentlichten Summe der installierten Leistung geförderter Anlagen; das so erhaltene Ergebnis von 13,54 ct/kWh für Oktober 2013 ist u.a. erwähnt in: [http://www.pv-magazine.de/index.php?id=9&tx_ttnews\[tt_news\]=12571&noMobile=1&cHash=36a6adc36b9844fcd1f9c26c240e7a3b](http://www.pv-magazine.de/index.php?id=9&tx_ttnews[tt_news]=12571&noMobile=1&cHash=36a6adc36b9844fcd1f9c26c240e7a3b) [abgerufen am 1. Oktober 2013]

Technikbewertung

Technikbewertung, oft auch Technikfolgenabschätzung oder Technologiefolgenabschätzung genannt, engl. technology assessment, „ist ein Teilgebiet der Technikphilosophie und -soziologie. Es entstand in den 1960er Jahren in den USA und verbreitete sich von den 1970er Jahren an in Europa. Die Technikfolgenabschätzung befasst sich mit der Beobachtung und Analyse von Trends in Wissenschaft und Technik und den damit zusammenhängenden gesellschaftlichen Entwicklungen, insbesondere der Abschätzung der Chancen und Risiken.“¹³⁷

Einen Leitfaden zur Technikbewertung bietet die VDI-Richtlinie 3780. Sie definiert Technik als „Menge der nutzenorientierten, künstlichen, gegenständlichen Gebilde (Artefakte oder Sachsysteme); die Menge menschlicher Handlungen und Einrichtungen, in denen Sachsysteme entstehen; die Menge menschlicher Handlungen, in denen Sachsysteme verwendet werden. Technikbewertung bezieht sich mithin nicht nur auf die gegenständlichen Sachsysteme, sondern auch auf die Bedingungen und Folgen ihrer Entstehung und Verwendung.“¹³⁸ Die VDI-Richtlinie definiert demnach Technikbewertung als das „...planmäßige, systematische, organisierte Vorgehen, das den Stand einer Technik und ihre Entwicklungsmöglichkeiten analysiert, unmittelbare und mittelbare technische, wirtschaftliche, gesundheitliche, ökologische, humane, soziale und andere Folgen dieser Technik und möglicher Alternativen abschätzt, aufgrund definierter Ziele und Werte diese Folgen beurteilt oder auch weitere wünschenswerte Entwicklungen fordert, Handlungs- und Gestaltungsmöglichkeiten daraus herleitet und ausarbeitet.“¹³⁹

Technikbewertung umfasst demnach auch die Beurteilung der Umweltauswirkungen von Technik und überlappt dabei mit der Ökobilanzierung, geht in der Regel jedoch nicht so sehr ins Detail wie diese und ist hinsichtlich der Betrachtung von Folgen verschiedener Art umfassender.

Umweltauswirkungen

Umweltauswirkungen sind Veränderungen der Umwelt wie:

- Primärenergieverbrauch
- Verbrauch fossiler und mineralischer Ressourcen
- Treibhauspotenzial
- Versauerungspotenzial
- Eutrophizierungspotenzial
- Ozonabbaupotenzial
- photo-chemisches Ozonbildungspotential
- Ökotoxizitätspotenzial
- Humantoxizitätspotenzial
- berufliches Krebsrisiko

¹³⁷ <http://de.wikipedia.org/wiki/Technikfolgenabsch%C3%A4tzung> [abgerufen am 24. Juni 2014]

¹³⁸ https://www.vdi.de/richtlinie/vdi_3780-technikbewertung_begriffe_und_grundlage/ [abgerufen am 24. Juni

2014]

¹³⁹ <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Definition/technikbewertung.html> [abgerufen am 24. Juni 2014]

- sonstige berufliche Risiken

Die letzten beiden Veränderungen fallen, da sie Risiken sind, strenggenommen nicht in den Rahmen einer LCA-Analyse, werden jedoch oft im Rahmen einer solchen berechnet. Emissionen sind selbst noch keine Umweltauswirkungen, führen aber zu solchen.