

## 1. Einleitung

Der eNOVA Strategiekreis Elektromobilität erhebt aus industriepolitischer Sicht den Bedarf an Forschung und Entwicklung für die Elektrifizierung des Automobils und trägt so dazu bei, die Voraussetzungen für eine nachhaltige Mobilität zu schaffen. Die Lithium-Ionen-Batterie ist eine der Schlüsseltechnologien für die Elektromobilität. Ihre Energiedichte hat einen direkten Einfluss auf die Reichweite des Elektrofahrzeugs und ihre Leistungsdichte ist entscheidend für die Dynamik, das Rekuperationsvermögen und die Ladedauer. Beide Parameter beeinflussen, zusammen mit den Kosten der Batterie, nachhaltig die Kundenakzeptanz. Darüber hinaus werden insbesondere bei zunehmender Energiedichte die Sicherheitsanforderungen an Lithium-Ionen-Batterien auch zukünftig eine entscheidende Rolle spielen, um die gesellschaftliche Akzeptanz der Elektromobilität sicherzustellen.

Der Weiterentwicklung der Lithium-Ionen-Batterie als derzeit fortschrittlichster Speichertechnologie kommt daher eine besondere Bedeutung zu. Industrie und öffentliche Hand haben dies schon früh erkannt. Erste große Förderprogramme wurden 2008 durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) mit dem Förderkonzept „Stromspeicher“ und durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) mit der Förderung der Innovationsallianz Lithium-Ionen-Batterie im Rahmen der Hightech-Strategie aufgelegt. Der Nationale Entwicklungsplan Elektromobilität, in dem die Bundesregierung 2009 die Maßnahmen für die Entwicklung Deutschlands zum Leitanbieter und Leitmarkt für Elektromobilität vorgezeichnet hat, hat die zentrale Rolle der Batterietechnologie noch einmal betont. In der Arbeitsgruppe Batterietechnologie der 2010 gegründeten Nationalen Plattform Elektromobilität wurden die Aktivitäten von Wirtschaft, Industrie und Politik in diesem Bereich zum Ziel der Leitanbieterschaft schließlich gebündelt.

Auch dank dieser gezielten Förderaktivitäten haben Wissenschaft und Industrie gute Fortschritte in der Batterietechnologie erzielt. Die nachfolgende Analyse aus Sicht des eNOVA Strategiekreises Elektromobilität stellt eine Bestandsaufnahme des aktuellen Stands der Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten im Bereich der Lithium-Ionen-Batterien für Elektrofahrzeuge dar und gibt einen Ausblick auf zukünftige Technologie-Entwicklungen.

## 2. Stand der Technik

Ein Lithium-Ionen-Batteriepack für Elektrofahrzeuge besteht aus individuellen Zellen, die in Modulen über ein Batteriemanagementsystem miteinander verschaltet sind. In Automobilanwendungen werden heute je nach Hersteller zylindrische oder prismatische Zellen in Metallgehäusen oder in Folie eingeschweißte Flachzellen (sog. Pouch-Zellen) verwendet. Die Hauptkomponenten der Li-Ionen-Zelle sind eine positive und eine negative Elektrode (Kathode bzw. Anode), an denen die Redoxreaktionen ablaufen, ein für Li-Ionen durchlässiger Separator, der Kathode und Anode voneinander trennt, und ein Elektrolyt zur Ionenleitung (Abb.1).

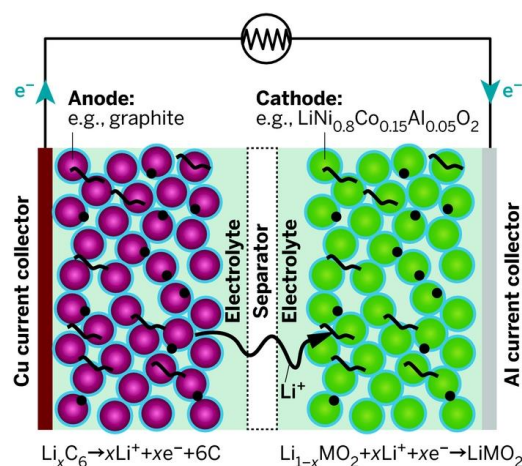


Abb. 1: Schematischer Aufbau einer Lithium-Ionen-Zelle.

Komponente		Industriell verwendete Materialien	Auswirkungen auf Systemebene	Anteil an Materialkosten	Innovationsdynamik
Anode	1	Graphit und graphitische Kohlenstoffpartikel auf Kupferstromsammler	Standard	Mittel	Mittel
	2	Graphitische Siliziumblends auf Kupferstromsammler	Energiedichte	Hoch	Hoch
	3	„LTO“ : $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ auf Aluminiumstromsammler	Leistungsdichte, Zyklenstabilität, Sicherheit	Hoch	Hoch
Kathode	1	„LMO“: $\text{LiMnO}_2$ , z.T. in Blends mit Ni-Oxiden auf Al-Stromsammler	kleinere Zyklenstabilität	Niedrig	Niedrig
	2	„NMC 111“: $\text{Li}(\text{Ni}1/3\text{Mn}1/3\text{Co}1/3)\text{O}_2$ , auf Al-Stromsammler z.T. in Blends	Leistungsdichte, Energiedichte, Sicherheit, Zyklenstabilität	Hoch	Hoch
	3	„NCA“: $\text{Li}(\text{Ni}0.85\text{Co}0.1\text{Al}0.05)\text{O}_2$ ,	Leistungsdichte, Energiedichte	Hoch	Niedrig
	4	„LFP“: $\text{LiFePO}_4$ auf Aluminiumträger	Sicherheit, Leistungsdichte	Mittel	Niedrig
Elektrolyt	1	Flüssigelektrolyte: Mischung organischer Lösungsmittel + $\text{LiPF}_6$ + Additive	Standard: Leitfähigkeit, Strombelastbarkeit, Lebensdauer	Mittel	Hoch
	2	Gelpolymerelektrolyte: Mischung Polymer + organische Lösungsmittel + $\text{LiPF}_6$ + Additive	Sicherheit	Mittel	Hoch
	3	Polyelektrolyte	Sicherheit	Hoch	Hoch
Separator	1	poröse Polymermembranen, meistens Polyolefin	Standard	Niedrig	Niedrig
	2	Vliese (Non Wovens), z.T. aus HT-Polymeren	Alternative zum Standard	Niedrig	Mittel
	3	1 o. 2 mit Keramikzusatz	Sicherheit, Porenstabilität	Mittel	Hoch
Sonstige		Tabs, Tapes, Sicherheitsventile, Verpackung	Standard	Niedrig	Niedrig

Tabelle 1:  
Übersicht über die Komponenten einer Lithium-Ionen-Zelle.

Zur Herstellung der Anode werden die Aktivmaterialien wie Graphit, Hard-Carbon oder Soft Carbon (5-20 µm Teilchengröße) zusammen mit Leitfähigkeitsadditiven und einem Binder als Paste auf eine dünne Kupferfolie aufgebracht. Für die Kathode werden entsprechend die Aktivmaterialien zusammen mit Leitfähigkeitsadditiven und Binder auf eine ca. 15 µm dicke Al-Folie aufgetragen. Als Kathodenmaterialien werden meist Metalloxide aus Li und Ni, Co, Mn, Fe eingesetzt, um die Batterieeigenschaften hinsichtlich Energie- und Leistungsdichte, Sicherheit und Kosten zu optimieren. Eine Übersicht über die gängigsten Materialien gibt Tab. 1<sup>i</sup>. Durch stetige Prozess- und Materialverbesserungen konnte die spezifische Energie kommerzieller Lithium-Ionen-Zellen in den letzten Jahren bis auf etwa 250 Wh/kg gesteigert werden<sup>ii</sup>.

Bei der Verschaltung von Lithium-Ionen-Zellen zu einem Batteriepack entsteht durch den Einbau von Strukturbauteilen, Steuerungselektronik sowie Kühlkreisläufen jedoch zusätzliches Gewicht. Zudem spiegelt die Systemleistung einen Durchschnitt über alle Zellen eines Batteriepacks wieder, so dass auf der Ebene des Batteriepacks gegenwärtig maximal eine spezifische gravimetrische Energie von etwa 150 Wh/kg erreicht wird. In Abbildung 2 sind die Entwicklungen von Energiedichten und Kosten von Batterien bis einschließlich 2013 zusammengefasst<sup>iii</sup>.

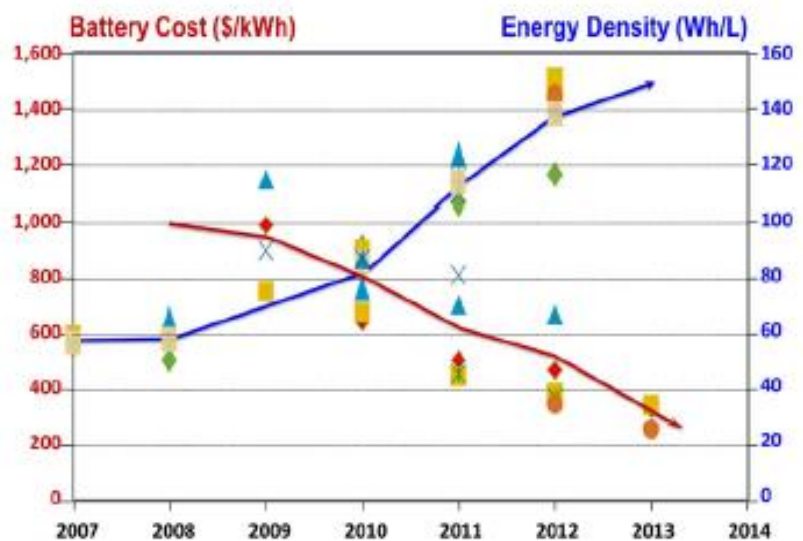


Abbildung 2:  
Kosten- und Kapazitätsentwicklung  
von Lithium-Ionen-Batterien  
(Quelle US DOE).

Die Kosten von Lithium-Ionen-Batterien sind durch Prozess- und Materialverbesserungen in den letzten vier Jahren um 50% gefallen. Skaleneffekte können zur weiteren Verringerung von Produktions- wie Materialkosten führen.

### 3. Marktsituation

Lithium-Ionen-Zellen für Elektrofahrzeuge machen trotz ihres noch kleinen Anteils von etwa 13% (20% inklusive Elektro-Zweiräder) eines der am stärksten wachsenden Segmente des gesamten Marktes für Li-Ionen-Zellen aus, dessen Volumen 2012 etwa 11 Mrd. USD betrug<sup>iv</sup>. Auf dieses Marktsegment entfielen in Q2/2013 insgesamt rund 700 MWh Speicherkapazität<sup>v</sup>. Mit dem Hochlauf des Marktes für Elektrofahrzeuge wird der Bedarf an Lithium-Ionen-Zellen in Europa stark steigen. Die Ausrüstung von einer Million elektrischer Fahrzeuge mit Li-Ionen-Batterien würde ein Vielfaches der heutigen Jahresproduktion erfordern. Gegenwärtig wird der Markt für Lithium-Ionen-Zellen von den asiatischen Herstellern Panasonic, AESC, Samsung und LG Chem dominiert, der Anteil europäischer Hersteller ist dagegen gering. Im Bereich der Modul- und Batteriesystemherstellung sind europäische Zulieferer und Fahrzeughersteller hingegen sehr aktiv.

#### 4. Aktuelle Forschung und Entwicklung weltweit

Der Schwerpunkt der seit den 1990er-Jahren stark gestiegenen Forschungs-, Entwicklungs- und Patentaktivitäten im Bereich der Lithium-Ionen-Batterien lag bei Elektrodenmaterialien<sup>vi</sup>. Japan, das bereits in den 1990er Jahren ein Pionier der Industrialisierung von Li-Ionen-Batterien war, meldete im Zeitraum 2005 bis 2008 mit gut 35% weltweit die meisten Patente in diesem Bereich an, direkt gefolgt von den USA mit 16% im selben Zeitraum. Der Anteil Japans ist seitdem jedoch zugunsten der asiatischen Konkurrenten China und Korea stark zurückgegangen. Deutschland konnte seinen Anteil an den Patentanmeldungen Anfang der 90er-Jahre auf ca. 5% steigern und dort halten<sup>vii</sup>.

Aktuelle Forschungsarbeiten erstrecken sich über die gesamte Technologiekette von den Materialien bis zum Batteriesystem (siehe Tabelle 2).

Komponente	Fokus der FuE	Gegenstände der FuE
Anode	Energiedichte (um bis zu 40% erhöht), Lebensdauer, Sicherheit, Rückladefähigkeit	Silizium-Kohlenstoff-Komposite, Legierung, Zinnlegierungen, Titanoxid, Li Metall und Li Legierungen
Kathode	Energiedichte (um bis zu 10% erhöht), Lebensdauer, Sicherheit, Kosten	Hochvoltkathoden; „LMP“: $\text{LiMnPO}_4$ , Hochvoltspinell ( $\text{LiM}_{0,5}\text{Mn}_{1,5}\text{O}_4$ ), $\text{LiCoPO}_4$ ; Hochenergie NCM
Elektrolyt	Elektrochemische Stabilität, Thermische Stabilität, Leistung bei tiefen Temperaturen, Lebensdauer	Polymer-Elektrolyte, Festkörperelektrolyte, Ionic Liquids
Separator	Thermische Stabilität, Lebensdauer, Sicherheit	Keramik, Beschichtungen, Füllstoffe
Gesamtsystem	Energiedichte, Leistungsdichte	Herstellung, Einhausung, Management (elektrisch und thermisch)

Tabelle 2: Aktuelle FuE-Themen zu LIB

In der Forschung und Entwicklung stehen heute Sicherheit, Gewicht, Volumen, kalendari-sche Lebensdauer und damit eng verbunden der Preis sowie das Design und Energiema-nagement von Batterien im Mittelpunkt. Hierzu werden neue Bauformen, leichtere Gehäuse-Materialien und effektivere Schaltungen zur Messung und Regelung des Ladezustandes un-tersucht. Um die Reichweite von Elektrofahrzeugen zu erhöhen, muss zudem die Energie-dichte der Batterien erhöht werden. Dies lässt sich zum einen durch verbesserte Systemin-tegration und optimiertes Batteriemangement erzielen, vor allem aber durch Speicherzellen mit Aktivmaterialien höherer Energiedichte. Eine höhere Energiedichte erfordert aber meist auch neue Sicherheitskonzepte für Li-Ionen-Batterien.

#### 5. Neue Batterietechnologien

Die Reichweite von Elektrofahrzeugen wird sich langfristig nur mit Hilfe neuer Materialien bzw. Materialkombinationen für Kathode und Anode der Batteriezellen erhöhen lassen. Ta-belle 3 gibt eine Übersicht über die wichtigsten Technologien, die sich zurzeit noch im For-schungsstadium befinden. Dabei ist für einzelne Parameter der Grad der Eignung für den Einsatz im Elektrofahrzeug angezeigt. Bei neuen Batterietechnologien versprechen Lithium-Schwefel- und Lithium-Sauerstoff-Zellen große Potenziale für eine Steigerung der Energie-dichte bei gleichzeitiger Kostensenkung. Bei keiner der beiden Technologien konnte bisher

jedoch eine ausreichende Zyklenbeständigkeit erreicht werden. Ein Schlüssel hierzu liegt im Fall der Lithium-Schwefel-Batterien in der Weiterentwicklung des Elektrolyten und der Elektroden-Materialien. Auch Metall-Sauerstoff-Systeme wie die Zink-Sauerstoff-Batterie und die Magnesium-Sauerstoff-Batterie weisen noch keine ausreichende Zyklenbeständigkeit auf und erfordern weitere Grundlagenforschung. Generell sind die Zyklenbeständigkeit und die Kosten von Batterien abhängig von Faktoren wie ihrer Leistungs- und Energiedichte, ihrer Bauform oder dem Fertigungsvolumen.

System	Theoretische spezifische Energie des Systems (Wh/kg)	Geschätzte max. spez. Energie auf Zellebene (Wh/kg)	Zyklenbeständigkeit	Aufwand zur Systemintegration	Kosten	Sicherheit	Technologische Herausforderungen auf Zellebene	TRL
Lithium-Ionen	~700 (a)	300 (a)	>6000	Level 1 (abgeschlossenes System)	200 - 500 \$/kWh	abhängig von Typ, hoch	s.o.	6-9
Lithium-Schwefel	~2600 (a)	600 (a)	~4000 (c)		n.n.	n.n.	Elektrolyt, Anodenmaterialien, Dendriten	3-4
Zink-Sauerstoff	~1200 (b)	540 (b)	<50*	Level 2 (offenes System)	n.n.	n.n.	Planare Abscheidung der Metallelektrode, Reversibilität, CO <sub>2</sub>	1-3
Magnesium-Sauerstoff	~4600 (b)	800 (b)	<50*		n.n.	n.n.	Planare Abscheidung der Metallelektrode, Reversibilität	1-3
Lithium-Sauerstoff	~7600 (a)	>1000 (a) <i>geladener Zustand</i>	<50*		n.n.	n.n.	Planare Abscheidung der Metallelektrode, Elektrodenmaterialien, Elektrolyt, Dendriten	1-3

Tabelle 3: Kennzahlen und Herausforderungen von Post-Lithium-Ionen-Technologien. Die Farbskalierung (grün: gut, gelb: mittel, rot: schlecht) zeigt den Grad der Eignung für den Einsatz im Elektrofahrzeug an \*auf Zell-Level

Referenzen:

(a) EGVI Expert Workshop on Post Lithium Ion Batteries, Jan. 2014

(b) BMBF-Workshop Elektromobilität, Dez. 2013

(c) Presseinformation Fraunhofer IWS 24.09.2014

## 6. Technologien zur Systemintegration

Unabhängig von den verwendeten Materialien und Materialkombinationen in einer Zelle lässt sich die spezifische Energie von Batteriesystemen auch über die Systemintegration erhöhen. Bei einer Verringerung des Gewichts sowie einer Verbesserung von Effektivität und Energieeffizienz dieser Systeme steigt damit auch die mögliche Reichweite von Elektrofahrzeugen.

Der Aufwand zur Systemintegration ist stark mit den jeweiligen Materialien verknüpft und unterscheidet sich deutlich bei den verschiedenen Batteriesystemen (s. Tabelle 4). Während abgeschlossene Systeme wie Lithium-Ionen- und Lithium-Schwefel-Batterien eine Einzelzellüberwachung und -steuerung sowie Strukturmaßnahmen zur Erhöhung der Sicherheit erfordern, stellt bei offenen Systemen wie Zink-Sauerstoff, Magnesium-Sauerstoff und Lithium-Sauerstoff die Möglichkeit unkontrollierter Luftzufuhr eine Herausforderung dar. Diese



kann zu Degradation führen und erfordert entsprechende Isolierungsmaßnahmen. Die Systemintegration der Metall-Luft-Systeme stellt die gleichen Anforderungen an die Integration des Batteriesystems ins Fahrzeug wie die Integration einer Brennstoffzelle. Aus diesem Grunde sind in der Forschungsförderung zu Batterietechnologien die Schwerpunkte Reaktionsgas-Speicherung, aktives Temperaturmanagement und effiziente katalytische Oberflächen zu berücksichtigen. Zudem müssen die Zellreaktion und das Gesamtsystem anders als bei der Brennstoffzelle sowohl in Entlade- als auch in Laderichtung arbeitsfähig sein.

	Abgeschlossene Systeme		Offene Systeme	
	Einzelzellüberwachung & Steuerung	Aktive Kühlung	Reaktionsgas O <sub>2</sub> in separatem Tank	Humidifier zur Elektrolytunterstützung
NiMH	--	(X)	--	
Li-Ionen Batterie	X	(X)	--	
Lithium-Schwefel	X	X	--	--
Zink-Sauerstoff	--*	X	(X)	X
Magnesium-Sauerstoff	--*	X	(X)	X
Lithium-Sauerstoff	(X)*	X	(X)	X

Tabelle 4: Technologische Anforderungen der Systemintegration an verschiedene Batteriesysteme. (Legende: X = wird benötigt, (X) = wird je nach Systemauslegung & Materialkombination benötigt, \* = Elektrolyt auf wässriger / alkalischer Basis kann Verbundüberwachung statt Einzelzellüberwachung ermöglichen)

## 7. Zusammenfassung und Ausblick

In den letzten Jahren haben Industrie und Wissenschaft bedeutende Fortschritte in der Lithium-Ionen-Batterietechnologie erzielt. Die öffentliche Förderung von Forschung und Entwicklung hat dabei einen wichtigen Beitrag zum wissenschaftlich-technischen Kompetenzaufbau in Deutschland und Europa geleistet. Dem stehen jedoch die erfolgreichen Aktivitäten von Mitbewerbern aus dem asiatischen Raum gegenüber, die die seit Jahrzehnten im Bereich der Unterhaltungselektronik gesammelten, mit staatlichen Hilfen geförderten und mit Patenten geschützten Erkenntnisse in erfolgreiche Industrieprodukte umgesetzt haben. Die Entwicklungen im nordamerikanischen Raum stellen die Etablierung einer großen Volumenproduktion von Lithium-Ionen-Zellen in Deutschland bzw. Europa vor zusätzliche Herausforderungen.

Der eNOVA-Strategiekreis regt daher an, den Schwerpunkt der Forschungs-, Entwicklungs- und Innovationsaktivitäten im Bereich der Lithium-Ionen-Batterien auf die Bereiche zu verlegen, in denen deutsche Unternehmen und Forschungsinstitute bereits heute über einen klaren Kompetenzvorsprung verfügen. Dies gilt beispielsweise für die Systemintegration; diese macht einen erheblichen Teil der Wertschöpfung aus. Es gilt, diese Expertise auszubauen und zugleich regelmäßig die Prioritäten der FuE-Aktivitäten insbesondere im Bereich der Forschungsförderung zu bewerten und gegebenenfalls neu zu justieren. Schwerpunkte der Forschungsförderung müssen dabei die Umsetzung technologischer Innovationen in verbesserte Prototypen als Vorläufer wettbewerbsfähiger kostengünstiger Produkte sein, und zwar sowohl im Bereich der Batterietechnologien als auch in der Systemintegration unter Berücksichtigung höherer Energiedichte und Zyklfestigkeit sowie hinsichtlich neuer Sicherheits-

konzepte. Aber auch die neuen Post-Lithium-Ionen-Speicher, deren Erforschung für eine industrielle, insbesondere automobilen Nutzung sich noch im Anfangsstadium befindet, müssen in geeigneten Förderprogrammen adressiert werden. Zudem sollte eine frühzeitige Eingliederung einschlägiger Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten in neu entstehende Wertschöpfungsketten im Bereich Batterien für Elektrofahrzeuge angestrebt werden.

## **Über eNOVA**

Der eNOVA Strategiekreis Elektromobilität ist eine Allianz relevanter Industrieunternehmen aus den Schlüsselbranchen Automobil, Batterien, Halbleiterkomponenten, Elektrotechnik und Materialien für den Leichtbau. Er erarbeitet Empfehlungen für Programme der Förderung von Forschung, Entwicklung und Innovation im Bereich Elektromobilität und stimmt diese mit der Wissenschaft und einem erweiterten Kreis von Unternehmen ab. Er konzentriert sich dabei auf das Gesamtsystem Elektrofahrzeug und die Schnittstelle zur Netzinfrastruktur.

Folgende Unternehmen gehören dem eNOVA Strategiekreis Elektromobilität als Partner an: Audi, Bosch, BMW, Continental, Daimler, ELMOS, Hella, Infineon, Johnson Controls, NXP, Porsche, Schaeffler, Siemens und ZF. Assoziierte Partner sind Heraeus, LEONI und Rehau.

## **Kontakt:**

Geschäftsstelle eNOVA Strategiekreis Elektromobilität bei der  
VDI/VDE Innovation + Technik GmbH  
Steinplatz 1  
10623 Berlin  
Tel. 030 / 310078-155

Dr. Gereon Meyer  
(gereon.meyer@vdivde-it.de)

[www.strategiekreis-elektromobilitaet.de](http://www.strategiekreis-elektromobilitaet.de)

---

<sup>i</sup> Roland Berger, "LIB value chain cost model" 2011

<sup>ii</sup> M. S. Whittingham, "History, Evolution, and Future Status of Energy Storage", IEEE Proc., 100: 1518-1534 (2012).

<sup>iii</sup> US Department of Energy,  
[http://energy.gov/sites/prod/files/2014/02/f8/everywhere\\_road\\_to\\_success.pdf](http://energy.gov/sites/prod/files/2014/02/f8/everywhere_road_to_success.pdf)

<sup>iv</sup> AVICIENNE ENERGY, Batteries 2013

<sup>v</sup> Lux Research

<sup>vi</sup> Lin & Chang, 35th DRUID Celebration Conference 2013

<sup>vii</sup> FhG ISI, Technologie-Roadmap LIB 2030