Fraunhofer
ISI

FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR SYSTEM- UND INNOVATIONSFORSCHUNG ISI

TECHNOLOGIE-ROADMAP LITHIUM-IONEN-BATTERIEN 2030



VORWORT



Prof. Dr. Martin Winter

Das Thema Elektromobilität hat in Deutschland deutlich an Fahrt aufgenommen. Diese Dynamik ist im „Nationalen Entwicklungsplan Elektromobilität" der Bundesregierung im August 2009 sowie mit der „Nationalen Plattform Elektromobilität" im Mai 2010 auch politisch eindrucksvoll dokumentiert. Das Herzstück der Elektromobilität sind sicherlich die Batterien und deren Komponenten und Materialien. Als besonders attraktive Kandidaten für den mobilen Einsatz von Energiespeichern bei Hybrid- und Elektrofahrzeugen gelten die Lithium-Ionen-Batterien. Sie sind die Schlüsseltechnologie für die Einführung und den Marktdurchbruch der Elektromobilität.

Im November 2007 hat das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) die Innovationsallianz „Lithium-Ionen-Batterie (LIB 2015)" initiiert. Innerhalb der Innovationsallianz arbeiten mehr als 60 Partner aus Industrie und akademischer Forschung eng zusammen. Ein Industriekonsortium mit führenden Unternehmen wie BASF, Bosch, Evonik, Li-Tec und VW hat sich verpflichtet, in den nächsten Jahren 360 Millionen Euro für die Forschung und Entwicklung an Lithium-Ionen-Batterien zu investieren. Dazu kommen Fördermittel des BMBF in Höhe von 60 Millionen.

Innerhalb der Innovationsallianz werden künftige Generationen von Lithium-Ionen-Batterien anwendungsnah erforscht und entwickelt. Der erste zeitliche Meilenstein ist das Jahr 2015:

Die Batterien sollen bis dahin deutlich leistungsfähiger, kostengünstiger und sicherer sein. Die Forschungsaktivitäten in der Innovationsallianz umfassen die gesamte Wertschöpfungskette, von der Materialforschung und Elektrochemie, Aspekten der Rohstoffverfügbarkeit und des Recyclings über das Batteriemanagement bis hin zu geeigneten Herstellverfahren und zur Systemintegration sowie Bestrebungen zur Standardisierung und Normung. Ob Lithium-Ionen-Batterien tatsächlich performanter, günstiger und sicherer und damit „besser" werden, hängt aber letztendlich wesentlich von verbesserten Batteriematerialien ab. Das Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (Fraunhofer ISI) begleitet mit einem sozialwissenschaftlichen Forschungsprojekt die experimentellen Projekte der Innovationsallianz. Das Spektrum dieses ISI-Projektes reicht von der Betrachtung stofflicher Aspekte und der Verfügbarkeit kritischer Rohstoffe über Anwendungsszenarien in verschiedenen Einsatzfeldern bis hin zu einem integrierten „Roadmapping", mit dem über das Jahr 2015 hinaus die technologischen Entwicklungen mit den Anforderungen der Märkte bis 2030 abgeschätzt werden sollen.

Die „Technologie-Roadmap Lithium-Ionen-Batterien 2030" liefert ein erstes wichtiges Zwischenergebnis. Ein Expertenteam hat sie beim zweiten Jahrestreffen der Innovationsallianz 2010 in Münster erstellt. Für die Beobachtung und Bewertung der künftigen technologischen Entwicklungen zur Lithium-Ionen-Batterie ist die Technologie-Roadmap ein Meilenstein. Sie schärft den Blick der Akteure, und sie liefert eine anschauliche visuelle Orientierung. Der damit angestoßene Prozess bietet die Chance für eine langfristig angelegte, koordinierte und kontinuierlich aktualisierte Abschätzung der Chancen und Perspektiven der Lithium-Ionen-Batterie. Damit ist die Technologie-Roadmap ein essentiell wichtiger Baustein und Treiber für den Erfolg der Innovationsallianz LIB 2015.

Martin Winter

Prof. Dr. Martin Winter
Sprecher der Innovationsallianz

EINLEITUNG

LITHIUM-IONEN-BATTERIEN – SCHLÜSSEL ZUR ELEKTROMOBILITÄT?

Die Leistungsfähigkeit neuer Speichermedien für elektrische Energie sowie starke Preisschwankungen bei fossilen Brennstoffen machen die Elektromobilität zum Hoffnungsträger für eine langfristige Zukunft individueller Mobilität. Dafür gibt es gewichtige politische Ziele z. B.: vom Öl weniger abhängig zu sein, Energie effizienter umzuwandeln, den CO_2-Ausstoß deutlich zu verringern sowie Emissionen im Verkehr spürbar zu senken. All das sind wichtige Treiber für Elektromobilität.

Elektromobilität ist insgesamt ein strategisch bedeutsames umwelt-, wirtschafts- und gesellschaftspolitisches Thema. Der „Nationale Entwicklungsplan Elektromobilität" der Bundesregierung im August 2009 sowie die im Mai 2010 eingerichtete „Nationale Plattform Elektromobilität" unterstreichen die Priorität in eindrucksvoller Weise. Im Koalitionsvertrag sind zwei Ziele zur Umsetzung gesteckt: „Deutschland zum Leitmarkt für die Elektromobilität bis 2020" zu entwickeln und „eine Million Elektrofahrzeuge bis 2020" auf die Straße zu bringen. Die Grundlage für zukunftsweisende elektrische Antriebssysteme liegt bei Batterien, aufgrund der Vorzüge vor allem bei Lithium-Ionen-Batterien. Sie können ein Schlüssel für die Elektromobilität sein.

Vor der Markteinführung mit serienmäßiger Massenproduktion sind allerdings Herausforderungen zu bewältigen. Lithium-Ionen-Batterien gelten heute zwar als Schlüsseltechnologie. Sie müssen allerdings hinsichtlich Kosten, Energiedichte, Gewicht, zyklischer und kalendarischer Lebensdauer sowie Ladegeschwindigkeiten noch deutlich verbessert werden. Um einen robusten Plan mit konkreten Meilensteinen zur künftigen Entwicklung der Lithium-Ionen-Batterien zu erhalten, bietet sich eine Navigation in die Zukunft in Form einer Technologie-Roadmap an.

TECHNOLOGIE-ROADMAP LITHIUM-IONEN-BATTERIEN 2030

Die Technologie-Roadmap Lithium-Ionen-Batterien 2030 liefert eine grafische Repräsentation der Zellkomponenten, Zelltypen und Zelleigenschaften von Lithium-Ionen-Batterien und ihren Verknüpfungen einschließlich des sie umgebenden Technologiefeldes von heute bis ins Jahr 2030. Damit vermittelt sie eine weitreichende Orientierung auf dem Weg in die Zukunft, und sie konkretisiert die „Roadmap: Batterieforschung Deutschland" des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF): Die Entwicklungen der Lithium-Ionen-Batterien sind bis ins Jahr 2030 identifiziert, so wie sie sich heute aus der Expertensicht in der Batterieentwicklung und in angrenzenden Bereichen abzeichnen.

Die Technologie-Roadmap Lithium-Ionen-Batterien 2030 führt zu einem Konsens zwischen den zentralen Akteuren über die künftige Marschrichtung in technologischer Hinsicht z. B. über anvisierte Entwicklungsziele. Darüber hinaus fördert sie die Zusammenarbeit in Politik, Forschung und Industrie. Nicht zuletzt liefert die Technologie-Roadmap die Grundlage für gezielte F&E-Strategien sowie für umfangreiche Kooperationsvorhaben.

„Die Roadmap gibt einen ersten Überblick. Er ist meiner Meinung nach gut getroffen, und er erfasst die wesentlichen Mainstreams. Diese Roadmap ist ein guter technologischer Kompass geworden."

Dr. Peter Birke, Continental Batteriesysteme

„Insgesamt gibt die Roadmap einen schönen Überblick, wenngleich der Zeitstempel für die eine oder andere Technologie wie z. B. Li-Metall etwas optimistisch ist."

Dr.-Ing. Matthias Vetter,
Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme

METHODIK UND VORGEHENSMODELL

Das Vorgehen des Technologie-Roadmapping basiert auf einer abgestimmten Kombination qualitativer und quantitativer Forschungsmethoden in vier Schritten:

- Expertenbefragung
- Bibliometrische Analysen
- Monitoring-System
- Roadmap-Erstellung

Die Technologie-Roadmap wurde am Freitag, 30. April 2010, an der Universität Münster erstellt. Der Workshop war eingebettet in das zweite Jahrestreffen der Innovationsallianz LIB 2015, die das BMBF fördert. Am Workshop nahmen mehr als zehn renommierte Fachleute der Batterieentwicklung aus Deutschland teil, aus Forschung und Industrie.

Nach Prüfung und Feedback der Teilnehmenden sowie Ergänzungen im erweiterten Kreis von Fachleuten liegt die Technologie-Roadmap derzeit in zweiter Version vor: LIBRoad_v2 (Stand: Juni 2010). In dieser Technologie-Roadmap sind die technologischen Entwicklungen bei Lithium-Ionen-Batterien durch einzelne Zellkomponenten, Zelltypen und deren Eigenschaften sowie komplementäre und konkurrierende Technologien inhaltlich erfasst und für den Zeitraum von 2010 bis zum Jahr 2030 abgeschätzt.

„Nach 2015–2025 ist unserer Meinung nach mit einer ganzen Reihe an technologischen Entwicklungen zu rechnen. Sie werden das Zeug haben, die Li-Ionen-Zellen zu Standard-Energiespeichern zu machen."

Dr. Reinhard Mörtel,
Fraunhofer-Institut für Siliziumtechnologie

Schritt 1 → EXPERTENBEFRAGUNG

Ziel
Identifikation der technologischen Entwicklungen und Bestandsaufnahme der Expertise: „LIB 2015"

Vorgehen
15 Experteninterviews in Innovationsallianz

Ergebnis
Input für Bibliometrie und Monitoring: Technologische Entwicklungen

Schritt 2 → BIBLIOMETRISCHE ANALYSEN

Ziel
Quantifizierung der techno-log. Entwicklungen und Akteure durch Publikationen und Patente

Vorgehen
Publikations- und Patentrecherchen

Ergebnis
Input für Monitoring: Akteure, Länder, internationaler Vergleich, Technologiefeld

Schritt 3 → MONITORING – SYSTEM

Ziel
Identifikation der Entwicklungen im Technologiefeld

Vorgehen
Technologiefeldanalyse

Ergebnis
Input für Roadmap: Konkurrenz-, Komplementär-, Substitutionstechnologien

Schritt 4a → TECHNOLOGIE-ROADMAPPING (JUNI 2010)

Ziel
Erfassung technolog. Entwicklungen; Bewertung

Vorgehen
Workshop Batterieentwickler

Ergebnis
Technologie-Roadmap

Schritt 4b → PRODUKT-ROADMAPPING (ENDE 2010)

Ziel
Anwendungen der Batterietechnologie; Bewertung

Vorgehen
Workshop Batterienutzer

Ergebnis
Produkt-Roadmap

Schritt 4c ROADMAP-INTEGRATION (2011)

Ziel
Verknüpfung Technologie-Produkt-Roadmap; Bewertung

Vorgehen
Workshop Batterieentwickler und -nutzer

Ergebnis
Gesamt-Roadmap

BIBLIOMETRISCHE ANALYSEN

Die bibliometrischen Analysen knüpfen an eine Reihe vorausgehender Experteninterviews an, die mit Ansprechpartnern der Konsortien in der Innovationsallianz LIB 2015 geführt wurden.

Bei diesen qualitativen Interviews ging es zunächst darum, die versammelte Fachexpertise in einer Bestandsaufname zu bündeln und die für Li-Ionen-Batterien relevanten technologischen Entwicklungen zu identifizieren. Dazu gehören: Trends bei Zellmaterialien und -komponenten, stoffbezogene Aspekte der Rohstoffverfügbarkeit und des Recyclings, Herstellverfahren, grundlegende Anforderungen und Leistungsmerkmale sowie Technologiefeldanalyse und Marktanforderungen.

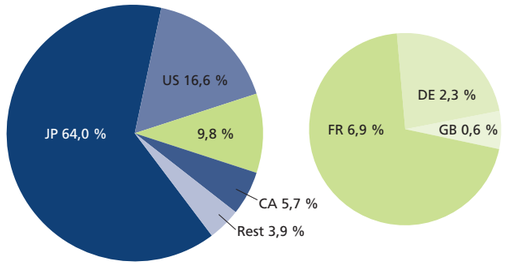
Auf der qualitativen Grundlage setzt die Bibliometrie mit Patent- und Publikationsanalysen an. Die bibliometrischen Analysen liefern vertiefende Einblicke zur Dynamik der technologischen Entwicklungen rund um Lithium-Ionen-Batterien, und sie bieten durch die Untersuchung akademischer Publikationen und weltweiter Patentanmeldungen quantifizierte Erkenntnisse zur internationalen Wettbewerbssituation mit Fragen wie:

- Wo steht Deutschland heute im internationalen Vergleich?
- Wie spezialisieren sich die bislang führenden Länder?
- Welche Zellmaterialen zeichnen sich als Erfolg versprechend ab?
- Und welche Komplementär- und Konkurrenztechnologien sind für Lithium-Ionen-Batterien zu erwarten?
- Welche Entwicklungen zeichnen sich speziell bei aussichtsreichen Zelltypen ab?
- Zeigen die eingeleiteten staatlichen Fördermaßnahmen für Lithium-Ionen-Batterien bereits erste Wirkungen?

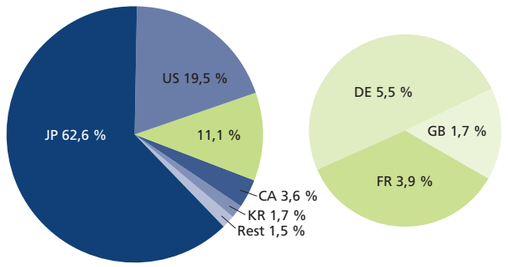
Die Analyse transnationaler Patentanmeldungen, einschließlich europäische (EP) und Weltpatente (WO), ermöglicht es, international führende Länder anhand ihrer Patentaktivitäten bei Lithium-Ionen-Batterien zahlenmäßig zu vergleichen: Dazu hat das Fraunhofer ISI umfassende Recherchen in den Datenbanken EPPATENT und WOPATENT mit speziell abgestimmten Suchstrategien durchgeführt. Bei den Suchstrategien wurden IPC- (Internationale Patentklassifikation) und Stichwortsuchen kombiniert und für den Zeitraum zwischen 1990 bis 2008 ausgewertet; jeweils in 5-Jahres-Zeiträumen, wobei die aktuell verfügbaren Daten bis zum Jahr 2008 reichen (Stand 2010):

- Japan zählt bis heute zu den weltweit führenden Ländern im Bereich der Lithium-Ionen-Batterietechnologie. Jedoch haben andere asiatische Länder gerade in den letzten Jahren stark aufgeholt.
- Während Japan Anfang der 1990er Jahre die Technologieentwicklungen mit 64% Anteil der Patentaktivitäten maßgeblich bestimmte, haben vor allem Südkorea und China in den vergangenen Jahren ihre technologischen Aktivitäten bei Patenten kontinuierlich ausgebaut, und zwar deutlich auf Kosten des japanischen Anteils.
- Die Experteninterviews stützen diese quantifizierten Entwicklungen bei den Patenten. Das Bild bei den Patentaktivitäten schlägt sich auch in Marktanalysen nieder. So zeigt sich eine zunehmend diversifizierte asiatische Konkurrenz bei globalen Marktanteilen und bei den Anteilen an der Zellproduktion von Lithium-Ionen-Batterien.
- Ganz anders haben die USA und Europa ihre Anteile in den letzten 20 Jahren durchgängig gehalten. Unter den wichtigsten europäischen Akteuren hat Deutschland seinen Anteil an weltweiten Patentaktivitäten von 2,3% Anfang der 1990er Jahre auf etwa 5% gesteigert und langfristig sichern können.
- Der Blick auf die kommenden 20 Jahre in der Lithium-Ionen-Batterietechnologie wird vermutlich stark von staatlichen Förderaktivitäten und industriellen Anstrengungen in diesen Schlüsselländern abhängen.

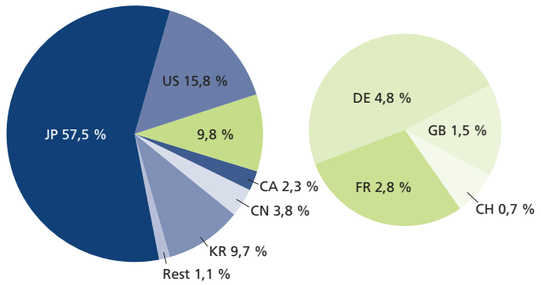
Patente zu Li-Ionen weltweit (1990 – 1994)



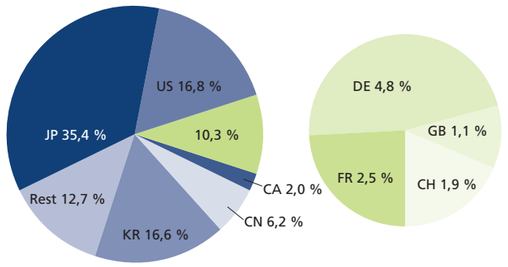
Patente zu Li-Ionen weltweit (1995 – 1999)



Patente zu Li-Ionen weltweit (2000 – 2004)



Patente zu Li-Ionen weltweit (2005 – 2008)



CA Kanada
CH Schweiz
CN China
DE Deutschland
FR Frankreich
GB Großbritannien
JP Japan
KR Südkorea
US Vereinigte Staaten von Amerika

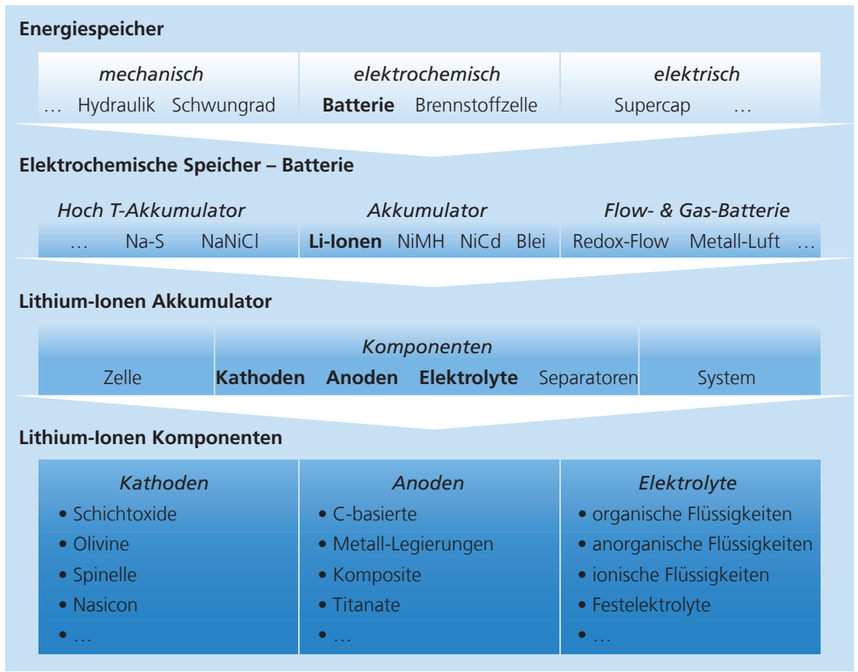
MONITORING-SYSTEM

Das Monitoring-System speist sich aus den vorausgehenden Erkenntnissen der Experteninterviews einerseits und der bibliometrischen Analysen zu Patenten und Publikationen andererseits. Es ist wie ein Radarschirm konzipiert, und es bietet einen umfassenden Überblick über: den aktuellen Stand der Technik, die technologischen Entwicklungen, sich abzeichnende Trends und Innovationsindikatoren für Lithium-Ionen-Batterien sowie alternative Energiespeicher.

Mit dem aufgebauten Monitoring-System lassen sich vielfältige Fragen untersuchen, darunter z. B.: zur Dynamik der Energiespeichertechnologien, zur Entwicklung und zu Anteilen führender Länder und von Einzelakteuren wie z. B. Unternehmen und anderen Institutionen, aber auch zur spezifischen Ausrichtung der Länder in technologischen Teilbereichen und ihren relativen Stärken im internationalen Vergleich.

Das Monitoring-System ist modular aufgebaut: Schlüsseltechnologien und Materialentwicklungen sind jeweils als untergeordnete Suchstrategien eines übergreifenden Referenzsystems definiert. Die modulare Architektur mit sukzessiver Verfeinerung bietet zwei Vorzüge: Es lassen sich nahezu beliebig viele und feinere untergeordnete technologische Entwicklungen einbeziehen. Ferner können auch alternative Technologien künftig problemlos integriert, fortlaufend gepflegt und selbst in ihrer Granularität wieder angepasst werden.

Das Monitoring-System wird künftig parallel mit der Technologie-Roadmap weitergeführt.



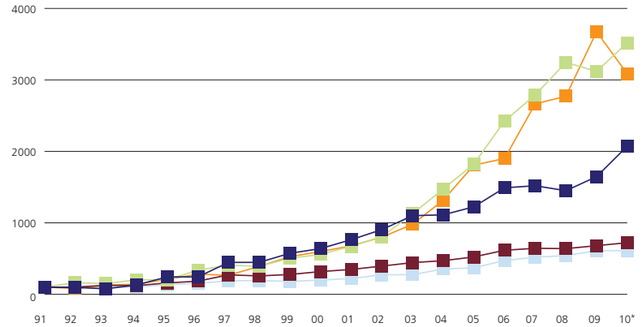
- Die Entwicklungsdynamik ausgewählter Energiespeichertechnologien in den letzten 20 Jahren (normiert auf 100 im Basisjahr 1991) zeigt einen starken Anstieg wissenschaftlicher Publikationen zu Brennstoffzellentechnologie bzw. Wasserstoffspeicher. Batteriesysteme im Allgemeinen ebenso wie Supercaps entwickeln sich hingegen vergleichsweise weniger dynamisch.

- Die Publikationen zu Lithium-Ionen-Batterien sind in den Jahren 2009 und 2010 in beträchtlicher Weise gestiegen (Abschätzung 2010 auf Basis des 1. Quartals). Der Anstieg hängt sicherlich mit den initiierten Fördermaßnahmen in vielen Ländern und den technologischen Entwicklungsanstrengungen in der Batterieindustrie zusammen. Das Thema Elektromobilität ist ein maßgeblicher Treiber.

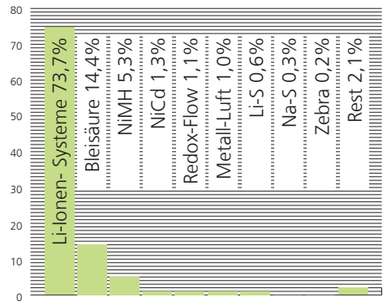
- Die Publikationsdynamik bei Lithium-Ionen-Batterien dürfte die der Brennstoffzellentechnologie zumindest in den nächsten Jahren rasch einholen. Sie unterstreicht die aktuell besondere Bedeutung der Lithium-Ionen-Batterietechnologie bei der Entwicklung elektrochemischer Energiespeicher.

- Innerhalb der Batteriesysteme geben die Publikationsanteile zu Lithium-Ionen-Batterien mit mittlerweile fast 75% in den Jahren 2005–2009 einen deutlichen Hinweis, einerseits auf den hohen Stellenwert dieser Batterietechnologie, andererseits auf die aus heutiger Sicht fehlenden alternativen Batteriekonzepte.

Zusammen mit dem visuell ausgerichteten Roadmapping und der Technologie-, Produkt- und Gesamt-Roadmap, bietet das quantitativ ausgelegte Monitoring-System einen umfassenden Überblick zur Technologievorausschau der Batterieentwicklungen in den kommenden Jahren.

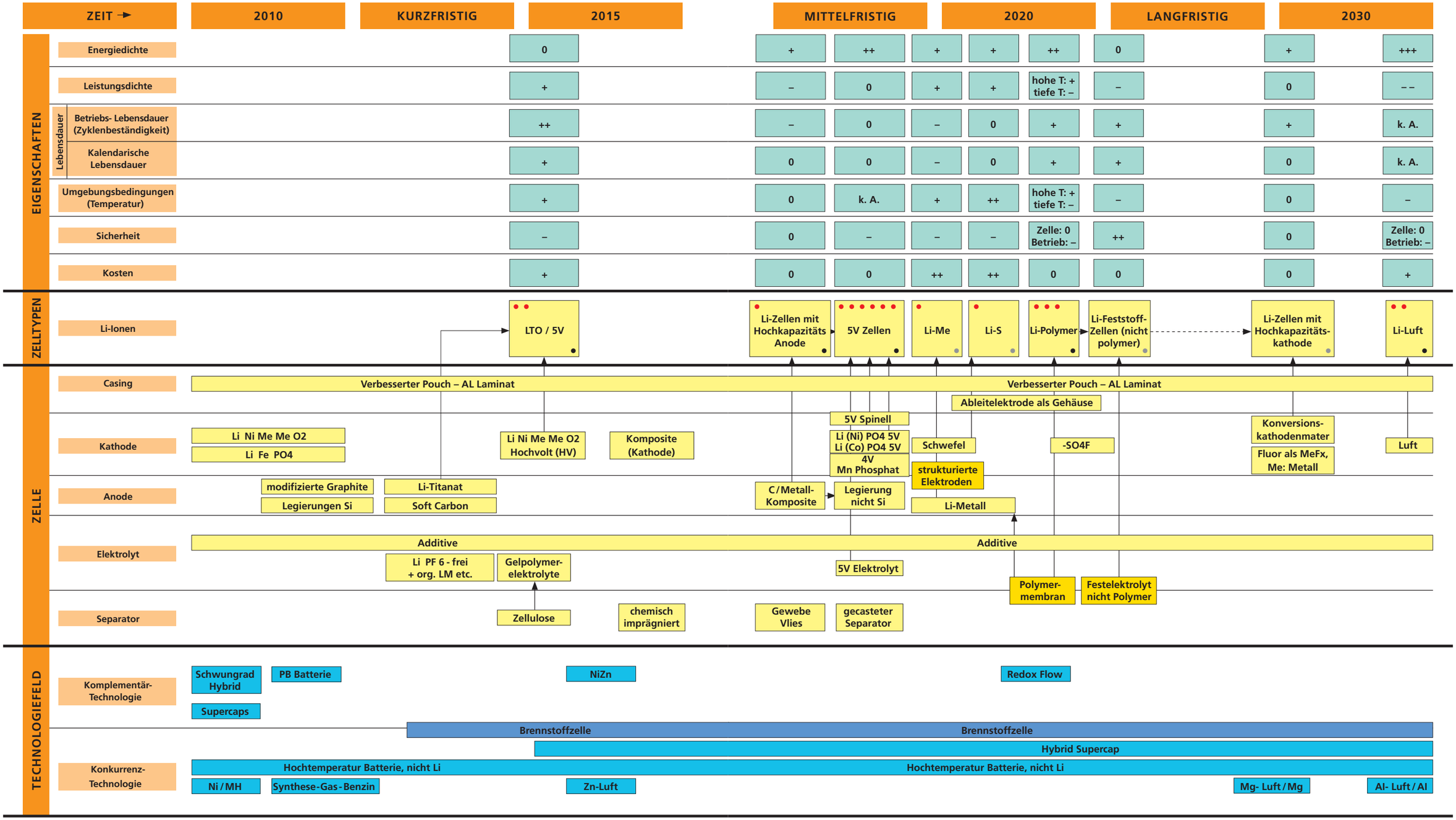


Publikationsdynamik ausgewiesener Energiespeicher (1991–2010) Basisjahr = 100



Publikationsanteile von Batteriesystemen weltweit (2005–2009)

GEFÖRDERT VOM
Bundesministerium für Bildung und Forschung
Fraunhofer ISI
LIB 2015 BMBF Innovationsallianz



TECHNOLOGIE-ROADMAP LITHIUM-IONEN-BATTERIEN 2030

Zeitrahmen:

Frage nach Marktreife der Technologien; Version: LIBRoad_v2

State of the Art vor 2010 für Zellkomponenten:

Kathoden: LCO, LMO

Anode: Graphite, Hard Carbon

Elektrolyte, LiPF6 in organ. Flüssigkeiten,

Separator: Polyolefin

Bewertung nach Eigenschaften gegenüber State of the Art bis 2010:

0 gleich

\+ besser ++ viel besser

– schlechter – – viel schlechter

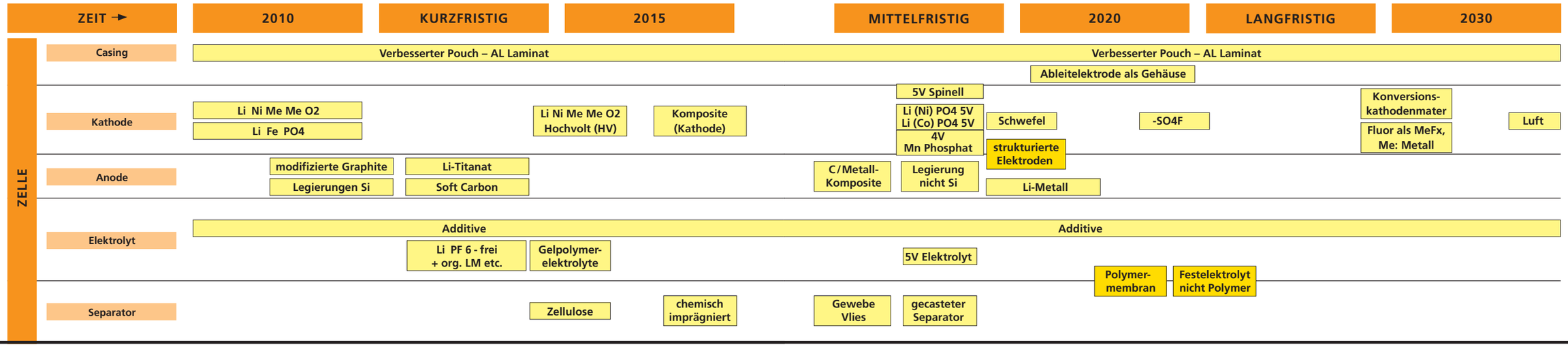
Kombination aus Zellkomponenten:

Nicht alle explizit dargestellt, ohne Anspruch auf Vollständigkeit

Abhängigkeiten:

Darstellung mit Pfeilen

- Auswahl bestimmter aussichtsreicher Zelltypen durch Teilnehmer
- Im Workshop bewertet (LIBRoad_v1)
- Nach Workshop bewertet (LIBRoad_v2)



ZELLE

Komponenten: Die Entwicklungen zu Kathoden, Anoden, Elektrolyten, Separatoren sowie zum Casing sind in der Technologie-Roadmap abgeschätzt und bewertet. Zusammenhängende Entwicklungen sind in Materialklassen gebündelt, darunter z. B. LiNiMeMeO2 mit NMC und NCA als Kathoden, Me = Metall.

Kathoden: Der Entwicklungstrend ist ungebrochen und geht auch in den nächsten Jahren weiter in Richtung Hochvoltmaterialien, insbesondere Spinelle und Phosphate. Mittelfristig sind Entwicklungen bei Sulfiden noch vor 2020 und bei Fluorosulfaten nach 2020 zu erwarten. Mit Konversionskathodenmaterialien, Metallfluoriden sowie Luft ist um 2030 zu rechnen.

Anoden: In den kommenden Jahren dürften modifizierte, z. B. nanostrukturierte Graphite, Soft Carbon, Si-Legierungen sowie Li-Titanate als Anodenmaterialien die aktuell verfügbaren Zelltypen verbessern. Li-Titanate zusammen mit Hochvoltkathoden ermöglichen voraussichtlich bis 2015 erste kommerzielle Hochvoltzellen. Graphit-Metallkomposite, nicht Si-basierte Legierungen sowie Li-Metallanoden dürften mittelfristig bis 2020 zu Innovationen führen.

Elektrolyte: Die kurzfristigen Erwartungen ruhen insbesondere auf LiPF6-freien Elektrolyten sowie auf Gelpolymerelektrolyten. 5V-Elektrolyte werden als mittelfristige Entwicklung eingeschätzt und korrelieren mit der Entwicklung der 5V-Zellen.

Eine Besonderheit beim Batterie-Roadmapping: Für die Materialkombinationen der Zellkomponenten existieren aus heutiger Sicht keine systematisch aufeinander folgenden Entwicklungspfade. Vielmehr wird eine Materialklasse so lange weiter entwickelt, bis sie vollständig charakterisiert ist und ihre materialspezifischen Potenziale ausgeschöpft sind. Die Untersuchung weiterer Materialklassen verläuft nachgelagert oder zeitlich parallel.

EXPERTENSTATEMENTS

„Aufgrund der unterschiedlichen Anforderungen wie hohe Leistung- oder hohe Energiedichte wird es immer unterschiedliche Materialien geben. Es wird meiner Meinung nach kein Material geben, das für alle Anforderungen gleichermaßen geeignet sein wird. Das gilt für die Komponenten: Kathoden, Anoden und Elektrolyt.“

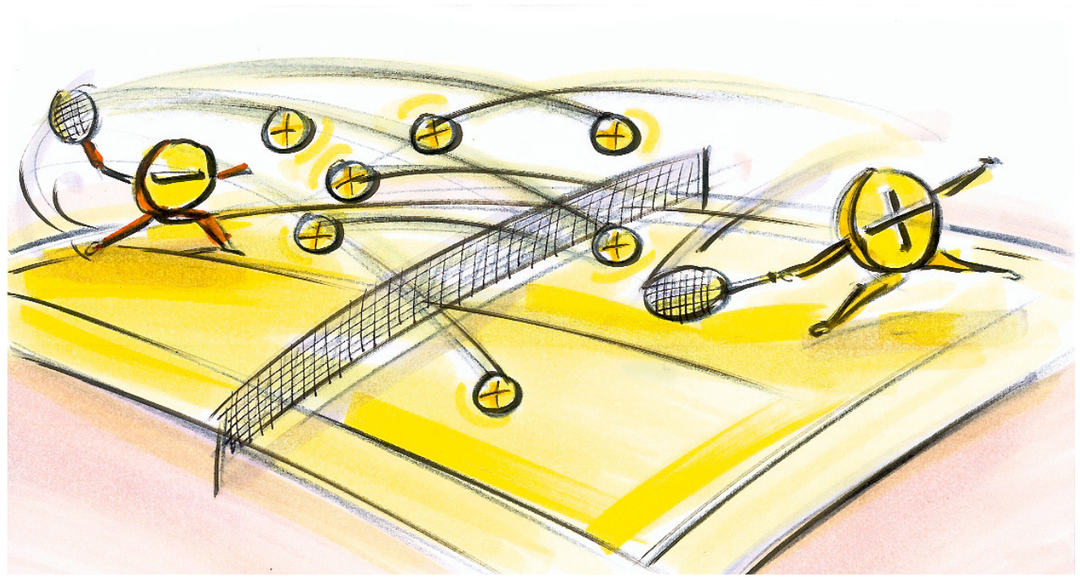
Dr. Rüdiger Oesten, BASF Future Business

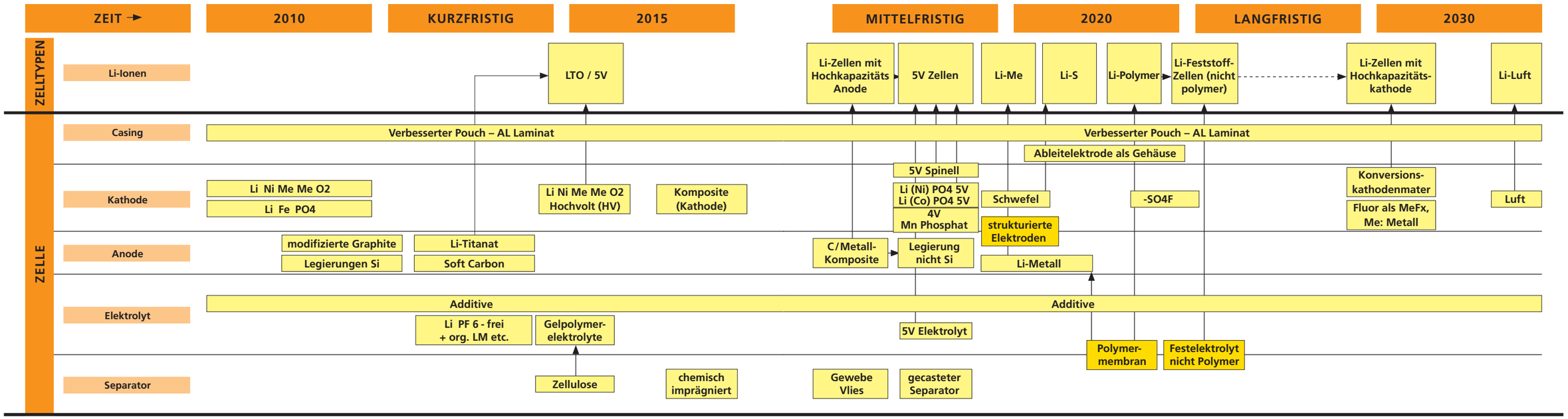
„Bereits heute gibt es Erfolg versprechende Materialinnovationen bei Anoden z. B. auf Basis von Si-basierten Legierungen, Graphit-Metallkompositen sowie Li-Metallanoden, z. B. die Produktfamilie Nexelion von Sony. Allerdings ist die Stabilität der Zyklen noch mäßig.“

Dr. Kai-C. Möller, Fraunhofer-Institut für Silicatforschung

„Deutschland hat auf der Materialebene ein hohes Potenzial. Firmen sollten neue Anwendungen rechtzeitig als Geschäftsfeld identifizieren. Ein Positivbeispiel aus der Vergangenheit ist die Süd-Chemie mit dem Einstieg in Kathodenmaterialien. Zu den künftigen Optionen zählen z. B. keramische Festelektrolytmembranen für Li-Luft.“

Dr. Peter Birke, Continental Batteriesysteme





ZELLTYPEN

Besonders aussichtsreich erachtete Zelltypen wie 5V-Zellen und Feststoff-Zellen, aber auch konkrete Zelltypen wie z. B. Li-Me-, Li-S- und Li-Luft-Zellen sind in der Technologie-Roadmap eingetragen. Aus den erwarteten Entwicklungen der Zellkomponenten ergeben sich inhaltliche Abhängigkeiten (Pfeile).

Zwischen 2010 und 2015 sind Zelltypen ausgespart, die sich rein aus Permutationen der Materialien auf Komponentenebene und deren Zellkomponenten ergeben. Dazu zählen z. B. Zelltypen auf der Basis der Zellchemien: LFP/C, NMC/C, NCA/C, NCA/LTO, LMO/LTO und LMP/C.

Im Zeitraum 2010 – 2015 ließen sich viele Zelltypen verorten, die internationale Batteriehersteller bereits erforschen und teilweise zur Marktreife entwickeln, darunter z. B. A123 Systems, LG Chemicals, Panasonic, Samsung, Sanyo, JCI-Saft, Hitachi, GS Yuasa, LTC-Gaia, Toshiba und Altair.

Zwischen den einzelnen Entwicklungen sind inhaltliche Abhängigkeiten festzustellen. So können bspw. Li-Polymer-Zellen ab 2020 den Weg für Festkörperionenleiter-basierte Li-Feststoffzellen ebnen.

EXPERTENSTATEMENTS

„Deutschland könnte von seinem Maschinen-Know-how profitieren, um besonders hochwertige Li-Ionen-Zellen für Serienschaltungen und automotive Einsatzgebiete zu produzieren: bei geringer Streuung, geringem Ausschuss und einem hohen Automatisierungsgrad der Produktion. Das sollte als mögliche Chance für Li-Ionen in Deutschland geprüft werden."

Dr. Peter Birke, Continental Batteriesysteme

„Für die Li-S-Zellen und die Li-Luft-Zellen ist ein grundsätzlich neues Design mit neuem Elektrodenkonzept und neuartigem Aufbau notwendig. Diese stellen echte Herausforderungen dar."

Dr. Reinhard Mörtel,
Fraunhofer-Institut für Siliziumtechnologie



ZEIT →	2010	KURZFRISTIG	2015	MITTELFRISTIG		2020		LANGFRISTIG	2030	
EIGENSCHAFTEN – Energiedichte			0	+	++	+	+	++	0	+	+++
EIGENSCHAFTEN – Leistungsdichte			+	–	0	+	+	hohe T: + tiefe T: –	–	0	– –
EIGENSCHAFTEN – Lebensdauer – Betriebs- Lebensdauer (Zyklenbeständigkeit)			++	–	0	–	0	+	+	+	k. A.
EIGENSCHAFTEN – Lebensdauer – Kalendarische Lebensdauer			+	0	0	–	0	+	+	0	k. A.
EIGENSCHAFTEN – Umgebungsbedingungen (Temperatur)			+	0	k. A.	+	++	hohe T: + tiefe T: –	–	0	–
EIGENSCHAFTEN – Sicherheit			–	0	–	–	–	Zelle: 0 Betrieb: –	++	0	Zelle: 0 Betrieb: –
EIGENSCHAFTEN – Kosten			+	0	0	++	++	0	0	0	+
ZELLTYPEN – Li-Ionen			LTO / 5V	Li-Zellen mit Hochkapazitäts Anode	5V Zellen	Li-Me	Li-S	Li-Polymer	Li-Feststoff-Zellen (nicht polymer)	Li-Zellen mit Hochkapazitäts-kathode	Li-Luft

EIGENSCHAFTEN

Für die Charakterisierung der Zelltypen sind sieben Zelleigenschaften zugrunde gelegt: Energiedichte, Leistungsdichte, Betriebs- und kalendarische Lebensdauer, Umgebungsbedingungen, Sicherheit und Kosten. Grundlage der Beurteilung ist eine Fünfer-Skala: – – viel schlechter, – schlechter, 0 vergleichbar, + besser, ++ viel besser. Der State of the Art bildet den Referenzmaßstab der vergleichenden Beurteilung.

Eine Beurteilung der Eignung von Zelltypen für spezifische Anwendungen, insbesondere für die Elektromobilität, erfordert, dass Technologie- und Produkt-Roadmap systematisch miteinander verknüpft werden, indem die technologischen Entwicklungen mit den Anforderungen an Batterien auf den Märkten aufeinander abgestimmt werden. Allerdings liefert die Beurteilung aus technologischer Expertensicht bereits wertvolle Hinweise über besonders interessante Kandidaten.

Die Beurteilung der Eigenschaft: Sicherheit folgt dem Denken in Zelltypen. Produktionsbedingungen sind hier nicht berücksichtigt. Die Sicherheit von Li-Ionen-Batterien ist zentral für den Einsatz in Elektrofahrzeugen. Deshalb dürften Li-Feststoffzellen, die ab 2020 erwartet werden, zu den künftig wohl wichtigsten Zelltypen zählen.

In punkto Kosten könnten vor allem Li-Me- und Li-S-Zellen bis 2020 interessante Impulse liefern.

Aufgrund der erreichbaren Energiedichten erscheinen 5V-Zellen zwischen 2015 und 2020, Li-Polymer-Zellen um 2020 sowie Li-Luft-Zellen ab 2030 als aussichtsreiche Kandidaten.

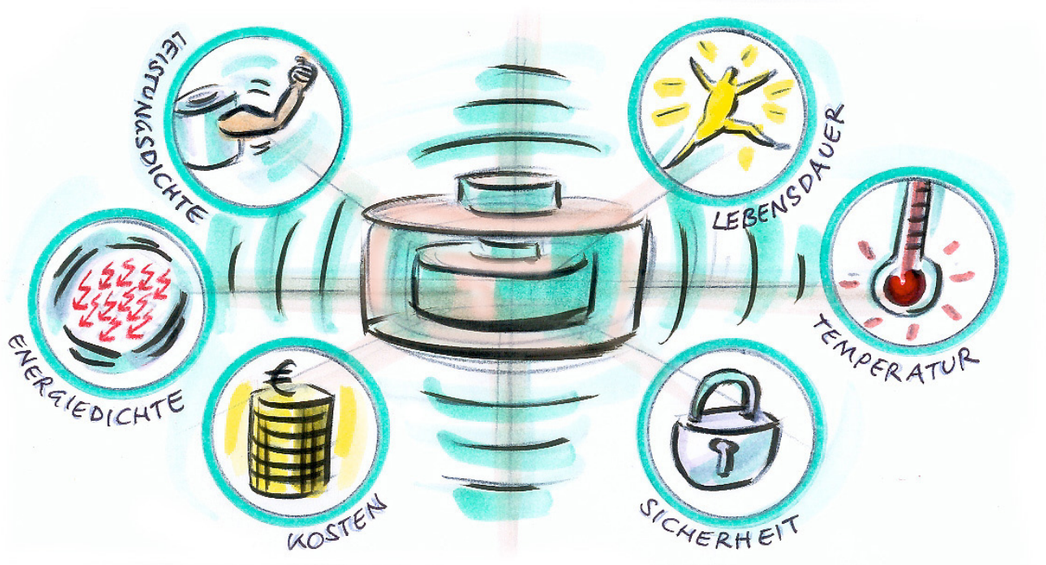
EXPERTENSTATEMENTS

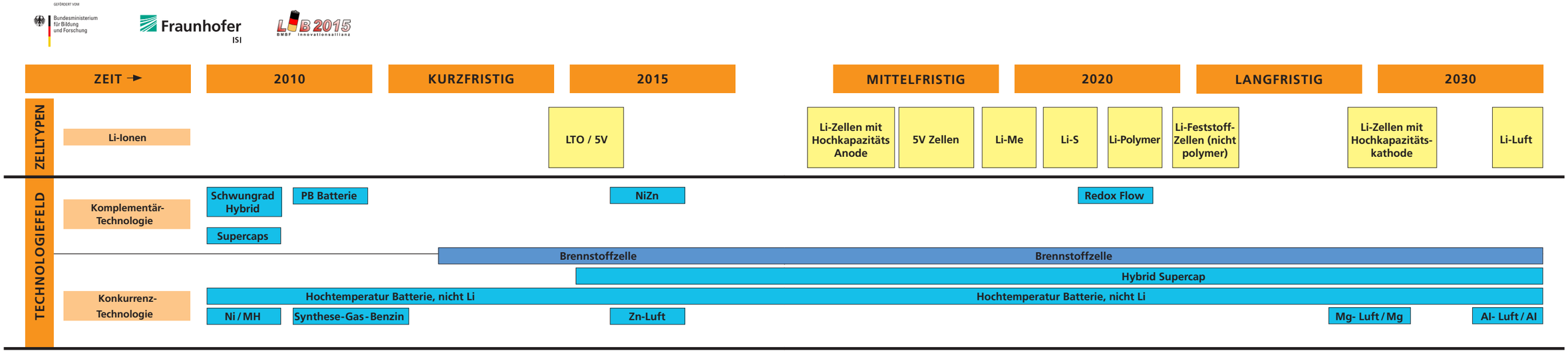
„Wenn es um Elektromobilität geht, dann ist auf jeden Fall die Energiedichte eine Schlüsseleigenschaft“

Dr. Rüdiger Oesten, BASF Future Business

„Die gesamte Entwicklung ist im Wesentlichen von der Energiedichte getrieben.“

Dr. Peter Birke, Continental Batteriesysteme





TECHNOLOGIEFELD

Im Technologiefeld sind komplementäre und konkurrierende Technologien von Li-Ionen-Batterien erfasst und deren technologische Entwicklungen abgeschätzt. Das Technologiefeld ist sozusagen eine benachbarte Fahrspur in der Roadmap-Architektur.

Als komplementäre Technologien zählen aus Sicht der Experten mechanische Energiespeicher wie z. B. Schwungrad, elektrische wie z. B. Supercaps, aber auch andere elektrochemische Energiespeicher, etwa auf Basis von Bleisäure und NiZn sowie die Redox-Flow-Batterie.

Die Brennstoffzellentechnologie kann je nach Anwendung den Einsatzbereich von Li-Ionen-Batterie ergänzen und z. B. mit einer Hochleistungsbatterie ein Hybridsystem bilden oder aber mit ihr konkurrieren. Sie ist sowohl Komplementär- als auch Konkurrenztechnologie.

Die NiMH-Batterie ist derzeit noch als Konkurrenz zur Li-Ionen-Batterie zu sehen. Mittelfristig um 2020 deuten sich weitere konkurrenzfähige Alternativen zu Li-Ionen-Batterien an, z. B. Zn-Luft für stationäre Anwendungen, langfristig um 2030 z. B. Mg-Luft/Mg- und Al-Luft/Al-Systeme sowie nicht Li-basierte Hochtemperaturbatterien. Auch hybride Supercap-Technologien dürften ab 2015 eine Konkurrenz für Li-Ionen-Batterien in spezifischen Einsatzgebieten darstellen.

EXPERTENSTATEMENTS

„Mg-Luft/Mg-, Al-Luft/Al-Systeme sowie weitere nicht Li-basierte Hochtemperaturbatterien könnten ab 2030 als Konkurrenz auftreten, Zink-Luft Systeme vielleicht ab 2020. Bis 2025–2030 wird es sicher keine ernsthafte Konkurrenz geben, die Li-Ionen-Batterien überholen oder überflüssig machen wird.“

Dr. Kai-C. Möller, Fraunhofer-Institut für Silicatforschung

„Die Brennstoffzellentechnologie für die Elektromobilität leidet unter dem Riesenproblem der Wasserstofferzeugung und der Infrastruktur für H_2. Dass dies flächendeckend möglich ist, sehe ich noch nicht. Auch mit Brennstoffzellen betriebene Autos enthalten Lithium-Ionen-Batterien, um eine hohe Leistung zu erzielen.“

Dr. Rüdiger Oesten, BASF Future Business

„Es wird schwer sein, echte Alternativen zu Li-Ionen zu finden, bis diese durch mögliche Nachfolger ab 2020 zusehends ergänzt und teilweise abgelöst werden. Dazu ist das elektrochemische System Li-Ionen zu herausragend in seiner Stellung.“

Dr. Peter Birke, Continental Batteriesysteme



AUSBLICK

Aktualisierung der Roadmap ...

Die Technologie-Roadmap Lithium-Ionen-Batterien 2030 ist ein lebendiges Planungsdokument. Sie wird fortlaufend aktualisiert und weiterentwickelt (Stand Juni 2010: LIBRoad_v2). Beim Fraunhofer ISI ist eine Projektwebsite eingerichtet, um die Roadmap zu kommentieren und Anregungen für die Weiterentwicklung einfließen zu lassen. Ferner sind dort Hinweise zu Veranstaltungen und über die nächsten Schritte der Weiterentwicklung zu finden: www.isi.fraunhofer.de/libroad.php.

Die Weiterentwicklung der Roadmap sieht bspw. vor, Alternativen zu Lithium-Ionen Batterien genauer zu betrachten sowie Herausforderungen in Form von Bottlenecks wie z. B. mögliche Technologiesprünge, physikalische Grenzen und deren Bedeutung für die Technologieentwicklungen zu identifizieren. Darüber hinaus sollen die bisherigen Bewertungen weiter spezifiziert werden, wie sich z. B. Zelleigenschaften bei Zellalterung verändern und was Sicherheit letztlich ausmacht.

... und nächste Schritte der Weiterentwicklung

Noch im Jahr 2010 ist geplant, die Technologie-Roadmap Lithium-Ionen-Batterien 2030 um eine Produkt-Roadmap zu ergänzen.

- *Die Produkt-Roadmap* umfasst dann die Marktseite: Anforderungen an Batterien, komplementäre und konkurrierende Energiespeicher und Antriebe sowie Anwendungen für Elektromobilität und andere Einsatzfelder für Lithium-Ionen-Batterien.
- Im Jahr 2011 werden dann die jeweils fortlaufend aktualisierte Technologie- und Produkt-Roadmap verknüpft und in einer *Gesamtroadmap* Lithium-Ionen-Batterien 2030 zusammengeführt.

Benachbarte Projekte zur Elektromobilität

Das Fraunhofer ISI bearbeitet eine Reihe von Forschungsprojekten rund um die Elektromobilität, jeweils mit spezifischen Arbeitsschwerpunkten. Das Spektrum reicht von einem systemischen Ansatz mit einer Untersuchung sozio-ökonomischer Aspekte der Elektromobilität über Fragen der Energiebereitstellung, der Ausgestaltung der Beladeinfrastruktur und der Entwicklung von Batterie- und Fahrzeugkonzepten bis hin zu neuen Mobilitätskonzepten und der Nutzerakzeptanz.

Nach Prüfung und Feedback der Teilnehmenden sowie Ergänzungen im erweiterten Kreis von Fachleuten liegt die Technologie-Roadmap derzeit in zweiter Version vor: LIBRoad_v2 (Stand: Juni 2010). In dieser Technologie-Roadmap sind die technologischen Entwicklungen bei Lithium-Ionen-Batterien durch einzelne Zellkomponenten, Zelltypen und deren Eigenschaften sowie komplementäre und konkurrierende Technologien inhaltlich erfasst und für den Zeitraum von 2010 bis zum Jahr 2030 abgeschätzt.

PROJEKT	ARBEITSSCHWERPUNKTE DES FRAUNHOFER ISI	FÖRDERUNG
Begleitforschung LIB 2015	Bewertung der Li-Ionen Entwicklungsmöglichkeiten Roadmapping	BMBF
Fraunhofer Systemforschung Elektromobilität	Sozio-ökonomische Begleitstudie Forum Elektromobilität	BMBF
Sozialwissenschaftliche Begleitforschung der Modellregionen	Einrichtung einer sozialwissenschaftlichen Plattform Kundenakzeptanzanalysen	BMVBS
MeRegioMobil (Pilot Karlsruhe)	Geschäftsmodelle, Steuerung Akzeptanz Fokus auf Smart Home	BMWi
Flottenversuch Elektromobilität	Systemintegration von erneuerbaren Energien	BMU
Vergleich Wasserstoff – Strom	Vergleich Energieträger bei mobilen und stationären Anwendungen	RWE

IMPRESSUM

Herausgeber: Fraunhofer-Institut für
System- und Innovationsforschung ISI
Breslauer Straße 48
76139 Karlsruhe
E-Mail: info@isi.fraunhofer.de
Web: www.isi.fraunhofer.de

Projektbetreuung: Dr. Axel Thielmann
Fraunhofer-Institut für
System- und Innovationsforschung ISI

Förderung: Bundesministerium für Bildung
und Forschung (BMBF)
Referat 511, Neue Werkstoffe, Nanotechnologie
53170 Bonn
Web: www.bmbf.de
Projektbetreuung: Ingo Höllein

Projektträger Jülich
Geschäftsbereich: Neue Materialien
und Chemie, NMT
52425 Jülich
Web: www.fz-juelich.de
Projektbetreuung: Dr. Andreas Volz

Autoren: Dr. Axel Thielmann
Fraunhofer-Institut für
System- und Innovationsforschung ISI
Telefon: 0721 6809-299, Fax: 0721 6809-315
E-Mail: axel.thielmann@isi.fraunhofer.de

PD Dr. habil. Ralf Isenmann
Fraunhofer-Institut für
System- und Innovationsforschung ISI
Telefon: 0721 6809-393, Fax: 0721 6809-330
E-Mail: ralf.isenmann@isi.fraunhofer.de

Prof. Dr. Martin Wietschel
Fraunhofer-Institut für
System- und Innovationsforschung ISI
Telefon: 0721 6809-254, Fax: 0721 6809-272
E-Mail: martin.wietschel@isi.fraunhofer.de

Gestaltung: Sebastian Cremers, Zürich
Illustrationen: Heyko Stöber, Hohenstein
Druck: E & B Engelhardt und Bauer, Karlsruhe

Stand: Juni 2010
1. Auflage: 2.000 Stück

Bestellung:
Fraunhofer-Institut für
System- und Innovationsforschung ISI
Competence Center Neue Technologien
Dr. Axel Thielmann
Breslauer Straße 48
76139 Karlsruhe
Telefon: 0721 6809-299, Fax: 0721 6809-315
E-Mail: axel.thielmann@isi.fraunhofer.de
Web: www.isi.fraunhofer.de

© Fraunhofer-Institut für
System- und Innovationsforschung ISI,
Karlsruhe 2010

GEFÖRDERT VOM
Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

LIB 2015
BMBF Innovationsallianz

DAS FRAUNHOFER ISI

Das Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI analysiert die Rahmenbedingungen von Innovationen. Wir erforschen die kurz- und langfristigen Entwicklungen von Innovationsprozessen und die gesellschaftlichen Auswirkungen neuer Technologien und Dienstleistungen. Auf dieser Grundlage stellen wir unseren Auftraggebern aus Wirtschaft, Politik und Wissenschaft Handlungsempfehlungen und Perspektiven für wichtige Entscheidungen zur Verfügung. Unsere Expertise liegt in der breiten wissenschaftlichen Kompetenz sowie einem interdisziplinären und systemischen Forschungsansatz.

Mit momentan 180 Mitarbeitern in den Bereichen Wissenschaft, Technik und Verwaltung bieten wir ein kompetentes, hoch motiviertes Team, das den vielfältigen Anforderungen unserer Auftraggeber mit wissenschaftlicher Kompetenz und systemischem Forschungsansatz in derzeit 290 Projekten pro Jahr gerecht wird. Die Steigerung des Jahresbudgets auf über 19 Millionen Euro ist Ausdruck dieser erfolgreichen Arbeit.