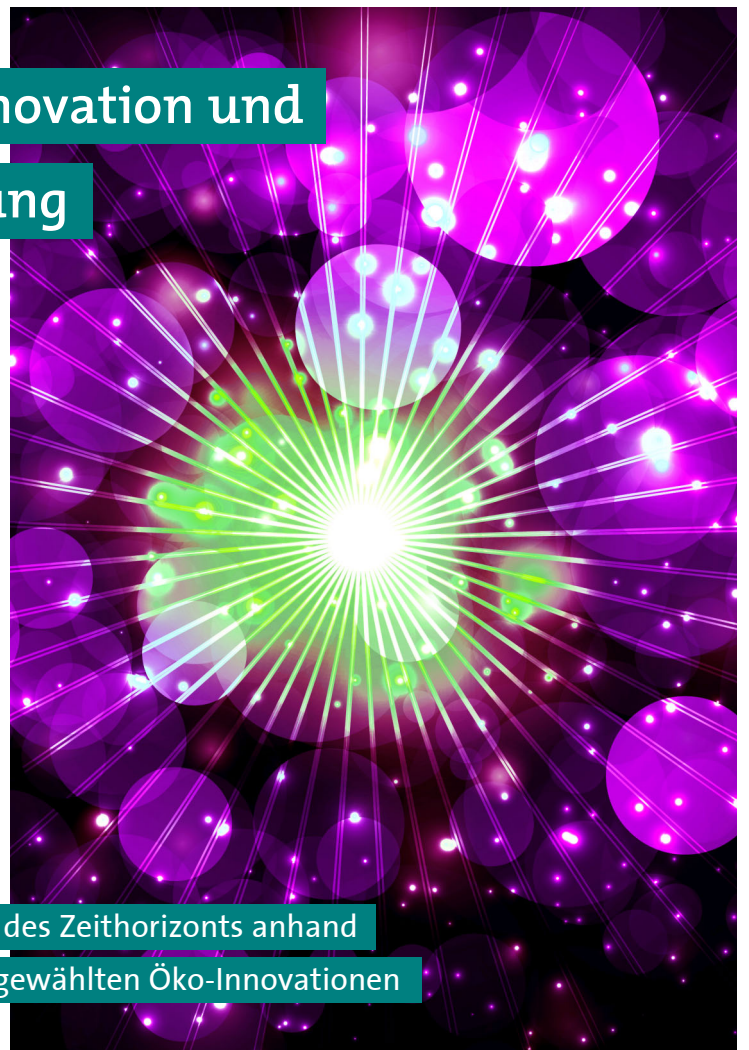


Öko-Innovation und Forschung

Betrachtung des Zeithorizonts anhand
von drei ausgewählten Öko-Innovationen



ÖKO-INNOVATION UND FORSCHUNG

Betrachtung des Zeithorizontes anhand von drei
ausgewählten Öko-Innovationen

Helmut Frischenschlager

REPORT
REP-0473

Wien, 2014

Projektleitung

Helmut Frischenschlager

Autor

Helmut Frischenschlager

Lektorat

Maria Deweis

Satz/Layout

Elisabeth Riss

Umschlagphoto

© iStockphoto.com/grki

Diese Publikation wurde im Auftrag des BMLFUW erstellt.

Weitere Informationen zu Umweltbundesamt-Publikationen unter: <http://www.umweltbundesamt.at/>

Impressum

Medieninhaber und Herausgeber: Umweltbundesamt GmbH
Spittelauer Lände 5, 1090 Wien/Österreich

Eigenvervielfältigung

Gedruckt auf CO₂-neutralem 100 % Recyclingpapier

© Umweltbundesamt GmbH, Wien, 2014

Alle Rechte vorbehalten

ISBN 978-3-99004-278-6

INHALT

ZUSAMMENFASSUNG	5
1 EINLEITUNG.....	10
2 ÖKO-INNOVATIONEN – CHANCEN FÜR UMWELT, MENSCH UND WIRTSCHAFT	11
3 VON DER IDEE ZUR ÖKO-INNOVATION	13
3.1 Innovationsprozess, Innovationsmanagement und Rolle der Forschung	13
3.2 Technologieentwicklung – kontinuierlicher Verbesserungsprozess & Technologiesprünge	16
4 F&E UND TECHNOLOGIEENTWICKLUNG ANHAND VON DREI ÖKO-INNOVATIONEN	19
4.1 Fallbeispiel Solarkollektor.....	19
4.2 Fallbeispiel Windturbine.....	32
4.3 Fallbeispiel Akkumulator/Sekundärzelle (Li-Ionen-Akku).....	47
5 LITERATURVERZEICHNIS.....	59

ZUSAMMENFASSUNG

Technologiesprünge bei Öko-Innovationen werden als essenzieller Lösungsansatz für zentrale Herausforderungen im Umwelt- und Klimaschutz gesehen. Anhand von drei technischen Öko-Innovationen¹ – dem **Solarkollektor**, der **Windturbine** sowie der **Lithium-Ionen-Batterie** – wird beispielhaft untersucht, ob und wie die Technologiesprünge in der Entwicklung der Innovationen erkennbar waren und welche Zeithorizonte sie in Anspruch genommen haben. Insbesondere wird der Zusammenhang zwischen Öko-Innovationen und Forschung durchleuchtet.

3 untersuchte Öko-Innovationen

Die Technologieentwicklung der drei betrachteten Öko-Innovationen, die alle drei dem Energiebereich zuzuordnen sind, weist Parallelen auf, vor allem im Zeitraum zwischen 1973 und heute. Sie avancierten, ausgelöst durch die Ölkrise bzw. Energiekrise Mitte der 1970er-Jahre, teilweise innerhalb weniger Jahre von der **Schrittmacher-** zur **Schlüsseltechnologie**. Heute können die drei Öko-Innovationen in einzelnen Anwendungsbereichen bereits zu den **Basistechnologien** gezählt werden oder stehen kurz vor dem Technologiesprung von der Schlüssel- zur Basistechnologie (siehe Abbildungen A bis C).

von der Schrittmacher- zur Basistechnologie

Geschichtliche Entwicklung der untersuchten Öko-Innovationen

Auch wenn die ersten Ideen zu den Öko-Innovationen im Fall der technischen Windnutzung bereits vor über 2.500 Jahren und bei der Solarthermie in der Antike aufgekommen waren, kann der Beginn der Technologieentwicklung durch gezielte Forschungsarbeiten bei allen drei Innovationen um 1800 datiert werden. Der erste Solarkollektor wurde im 18. Jahrhundert von de Saussure gebaut (siehe Abbildung A), 1780 entdeckte Galvani das galvanische Element, 1800 stellte Volta die erste funktionierende Batterie vor und 1841 schlug Nollet die Nutzung der Windenergie für die Erzeugung von elektrischem Strom vor.

erste gezielte Forschungsarbeiten um 1800

Die Forschung spielt bei allen drei Fallbeispielen in der Technologieentwicklung eine wesentliche Rolle. Sie hat sich allerdings im Laufe der vergangenen Jahrzehnte gewandelt. Waren die Innovationen früher vor allem durch neue wissenschaftliche Erkenntnisse und Technologien initiiert und getrieben sowie durch unbestimmte Zeithorizonte bis zu unterschiedlichen Anwendungen gekennzeichnet (Science/Technology Push, wie z. B. die Einführung von Batteriesystemen mit Lithium im Jahr 1949, siehe Abbildung C), orientiert sich die Forschung aktuell hauptsächlich an den vorherrschenden Marktbedürfnissen, die zunehmend Treiber der Innovationen werden (Market Pull, wie z. B. die Entwicklung von Röhrenkollektoranlagen zur Prozesswärmegewinnung Ende der 2000-er-Jahre, siehe Abbildung A).

Rolle der Forschung in der Technologieentwicklung

Bereits in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts stehen die Windturbine als dezentrale Stromerzeugungseinheit und der Akkumulator als Traktionsbatterie zum elektrischen Antrieb von Kraftfahrzeugen und U-Booten kurz vor dem Technologiesprung zur Schlüsseltechnologie. Der Siegeszug der fossilen Ener-

Entwicklung von Windturbine und Akkumulator

¹ Güter und Technologien für die Bereiche Umweltschutz und Ressourcenmanagement gemäß EGSS-Definition der Eurostat (STATISTIK AUSTRIA 2011), die Umweltbelastungen über den gesamten Lebenszyklus verringern, die Widerstandsfähigkeit gegen Umweltbelastungen stärken oder eine effizientere und verantwortungsvollere Nutzung natürlicher Ressourcen bewirken.

gieträger lässt die Weiterentwicklung beider Innovationen jedoch ab Mitte des Jahrhunderts wesentlich langsamer verlaufen. 1968 wird die Windenergieforschung in der damaligen Bundesrepublik Deutschland sogar zur Gänze eingestellt.

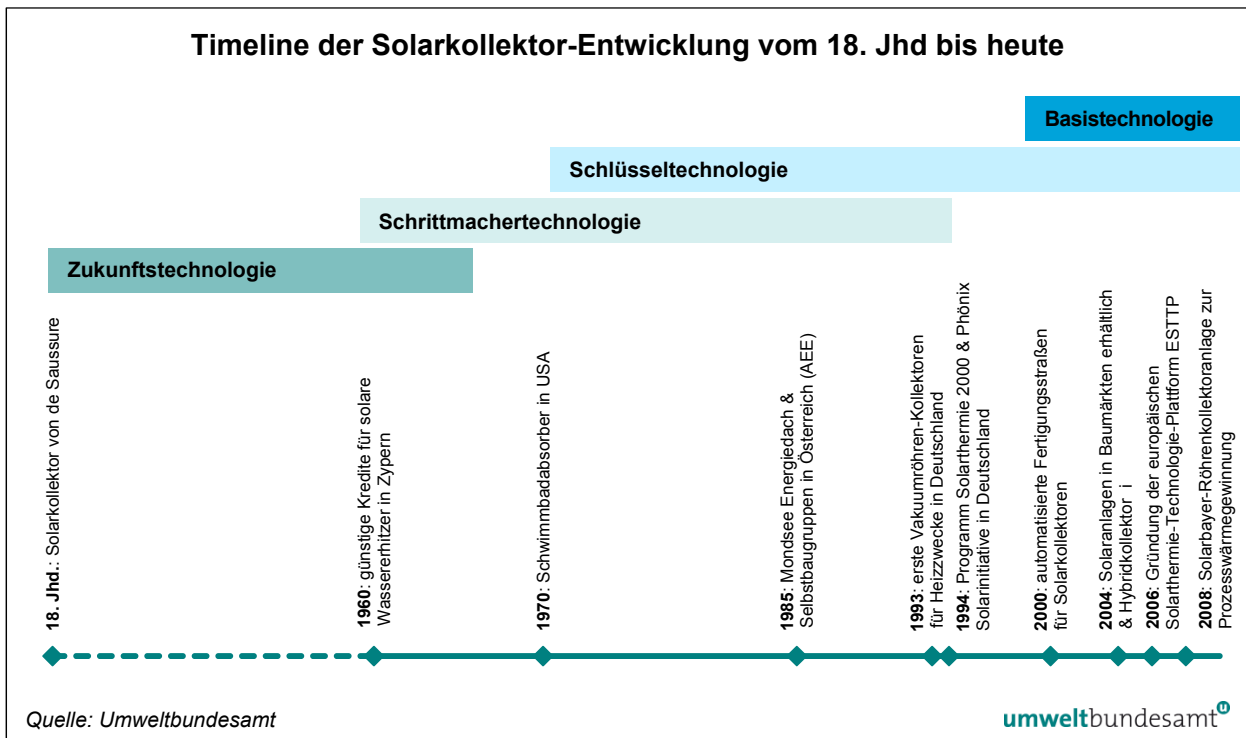


Abbildung A: Timeline der Solarkollektor-Entwicklung vom 18. Jahrhundert bis heute mit einer Abschätzung der Technologiesprünge bzw. Übergänge von der Zukunftstechnologie bis zur Basistechnologie. Die Überlappungen der einzelnen Technologieklassen ergeben sich aufgrund der verschiedenen Kollektortypen, Anwendungsbereiche und der unterschiedlichen Marktdurchdringung in den betreffenden Regionen.

**erneuerbare
Energien werden
wiederentdeckt**

**die Marktdurch-
dringung nimmt
rasant zu**

zusätzliche Treiber

Nach dem Ölembargo der OPEC und der daraus resultierenden ersten Energiekrise 1973/74 werden die Innovationen u. a. auf Initiative engagierter Bevölkerungsgruppen und Vereine wie der dänischen Tvind-Schule im Fall der Windturbine (siehe Jahr 1978 in Abbildung B) oder der Solarthermie-Selbstbaugruppen in Österreich (siehe Jahr 1985 in Abbildung A), als erneuerbare Energien wiederentdeckt. Zu dieser Zeit werden auch wieder weltweit Forschungs- und Förderungsprogramme zur Weiterentwicklung der Technologien aufgelegt, womit der **Technologiesprung zur Schlüsseltechnologie** endgültig bewältigt wird. Von da an verläuft die Technologieentwicklung der Öko-Innovationen äußerst rasant und die Marktdurchdringung nimmt überproportional zu. Dies führt bei der Technologieentwicklung der Windturbine und ihrer Komponenten sogar so weit, dass es in den 2000er-Jahren zu einem erheblichen Nachfrageüberhang kommt.

Die bei Öko-Innovationen zusätzlichen treibenden Kräfte der letzten Jahre (Bedarf nach Ressourceneinsparung sowie der Klima- und Umweltschutz) bewirken insbesondere dann Technologiesprünge, wenn sie durch **rechtliche Rahmenbedingungen** (z. B. Gebäuderichtlinie, Erneuerbare-Energien-Gesetz, Ökostromgesetz etc.) ausgelöst werden.

Die in Verbindung mit den Rechtsnormen entwickelten themenspezifischen Förderungsprogramme tragen zusätzlich zu massiven Steigerungen der Durchdringungsraten der Technologien bei, wie z. B die erste österreichische Förderregelung für Windkraft im Jahr 1994 oder die Programme Solarthermie 2000 und die Phönix Solarinitiative in Deutschland (siehe Abbildung A und Abbildung B).

themenspezifische Förderungsprogramme

Die verstärkten Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten zur Verbesserung der Effizienz und Kostenreduktion der Öko-Innovationen (z. B. durch automatisierte Fertigung, siehe Jahr 2000 in Abbildung A oder Jahr 2010 in Abbildung B) sowie die steigenden Preise für fossile Energieträger führen letztendlich nach dem Jahrtausendwechsel zur breiten Anwendung dieser Öko-Innovationen in relevanten Durchdringungsgraden des Marktes.

breite Anwendung der Öko-Innovationen

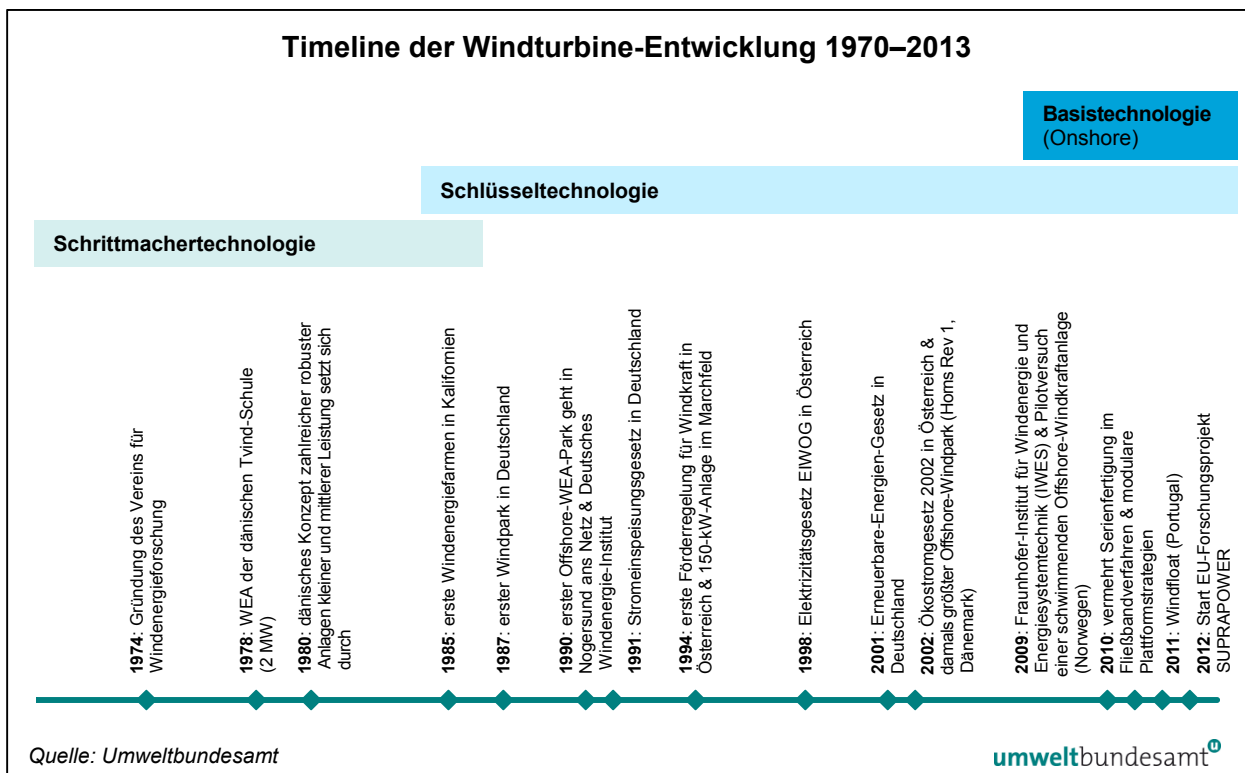


Abbildung B: Timeline der Windturbine-Entwicklung nach der Wiederaufnahme von Forschungsaktivitäten in den 1970er-Jahren bis 2013 mit einer Abschätzung der Technologiesprünge bzw. Übergänge von der Schrittmacher- bis zur Basistechnologie im Onshore-Bereich.

Allen drei Fallbeispielen ist gemein, dass Forschung und Entwicklung dann am ehesten einen wesentlichen Beitrag zu Technologiesprüngen bei Öko-Innovationen leisten, wenn das Ergebnis der Forschungsaktivitäten **neue Anwendungsgebiete** erschließt und sich daraus auch ein **wesentlicher Nutzen und Mehrwert für die KundInnen** ableiten lässt (z. B. die Erschließung des Raumwärme-Bereichs mit preisoptimierten Solarthermie-Kombianlagen oder der Einsatz von Lithium-Ionen-Akkus in mobilen Elektronikgeräten ab 1991, siehe Abbildung C). Während eine Technologie in einem Marktsegment oder bestimmten Anwendungsgebiet bereits den Status einer Basistechnologie erreicht hat, kann in einem neuen Anwendungsbereich den Technologiesprung dorthin noch nicht vollzogen sein (z. B. Solarkollektor im Prozesswärmebereich, siehe Abbildung A oder Windturbinen im Offshore-Bereich, siehe Abbildung B).

unterschiedliche regionale Rahmenbedingungen

Die Marktbedürfnisse und Anwendungsfelder, die auch durch gezielte Forschungs- oder Förderungsprogramme steuerbar sind, können in einzelnen Regionen und Staaten, abhängig von den regionalen Rahmenbedingungen, stark variieren. Demnach kann auch die Entwicklung der Technologien und ihrer Marktdurchdringung sehr unterschiedlich verlaufen (z. B. Dominanz der einfachen Thermosiphon-Systeme mit Vakuumröhrenkollektoren in China sowie verglaste Flachkollektoren mit Wärmeträgerflüssigkeit in Europa).

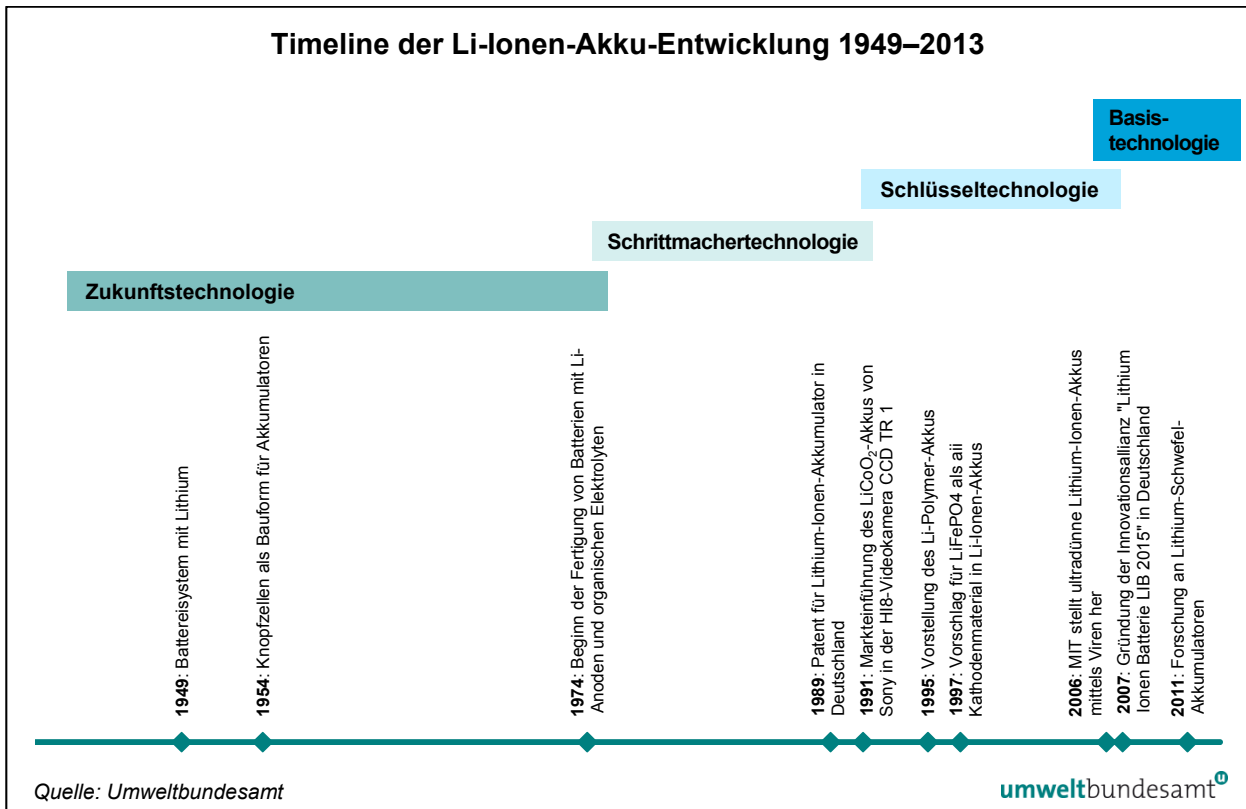


Abbildung C: Timeline der Lithium-Ionen-Akku-Entwicklung mit der Einführung der Lithium-Chemie in das Batteriesystem im Jahr 1949 bis 2013 mit einer Abschätzung der Technologiesprünge bzw. Übergänge von der Zukunfts- bis zur Basistechnologie.

Bewertungsindikatoren für Öko-Innovationen

Generell können zur Bewertung des Erfolgs bzw. der Relevanz von Öko-Innovationen neben Input-Größen (z. B. F&E-Aufwendungen), intermediären Output-Größen (z. B. Anzahl der Patente) und direkten Messgrößen (z. B. Verkaufsdaten von Umwelttechnologien und -dienstleistungen) auch indirekte Messgrößen, wie z. B. Veränderungen im Ressourcenbedarf oder die Minderung von Emissionen, als Indikatoren herangezogen werden.

Gründung von Technologieplattformen

Ende der 2000er-Jahre werden bei allen drei Öko-Innovationen auf nationaler, europäischer oder internationaler Ebene Technologieplattformen gegründet, die durch eine stärkere Vernetzung der beteiligten Akteure (Technologieanbieter und -anwender, Wissenschaft und Forschung, Politik etc.) den Fortschritt in der Forschung und Entwicklung der Technologien beschleunigen sollen und damit auf eine stärkere Marktdurchdringung der jeweiligen Öko-Innovationen abzielen (z. B. die Europäische Technologieplattform für erneuerbares Heizen und Kühlen (ESTTP), die europäische TPWind oder die deutsche Innovationsallianz „Lithium Ionen Batterie LIB 2015“).

Im Rahmen von Technologie-Roadmaps werden jeweils Ziele definiert und zur Erreichung dieser Ziele werden **strategische Forschungsagenden** erstellt, in denen die Forschungsschwerpunkte und unterstützende Maßnahmen zur Weiterentwicklung dieser Öko-Innovationen festgelegt sind. Damit ist der Weg zur Weiterentwicklung der Technologien und der stärkeren Marktdurchdringung in allen Anwendungsfeldern vorbereitet.

**Technologie-Road-
maps definieren
Ziele**

1 EINLEITUNG

Technologiesprünge bei Öko-Innovationen werden als essenzieller Lösungsansatz für zentrale Herausforderungen im Umwelt- und Klimaschutz gesehen. Für manche bedeutende Technologien (wie beispielsweise das Elektroauto) überschreitet der Zeithorizont – ausgehend von angewandter Forschung oder Grundlagenforschung bis zur Anwendung in relevanten Durchdringungsgraden des Marktes – die derzeit üblichen Projektionszeiträume von 20 bis 40 Jahren deutlich.

Untersuchungsumfang

In diesem Folgereport zu Öko-Innovation und Forschung wird, analog zu der im Jahr 2012 durchgeführten Recherche (UMWELTBUNDESAMT 2012) und inhaltlich um drei weitere Beispiele ergänzt, untersucht,

- ob und wie Technologiesprünge in der Entwicklung von Öko-Innovationen erkennbar waren,
- welche Faktoren bzw. Auslöser dafür ausschlaggebend waren und
- welche Zeithorizonte der Innovationsprozess jeweils beansprucht hat.

Fragestellungen

Insbesondere folgende Fragestellungen werden dabei anhand von Recherchen in der wissenschaftlichen Literatur bearbeitet:

- Woran sind relevante Öko-Innovationen erkennbar?
- Woran sind Technologiesprünge bei Öko-Innovationen erkennbar?
- Welche Faktoren sind ausschlaggebend für Technologiesprünge bei Öko-Innovationen und welche Zeithorizonte nehmen sie in Anspruch? Wie und wann führt F&E zu Technologiesprüngen bei Öko-Innovationen?

Ableitung von Erkenntnissen

Aus der Beantwortung dieser Fragestellungen soll gegebenenfalls abgeleitet werden, wann absehbar ist, dass aus Ideen relevante Öko-Innovationen werden können und welche Maßnahmen dazu im F&E-Bereich, insbesondere in den ersten Phasen der Innovationskette, erforderlich sind. Gegebenenfalls wird das Verbreitungspotenzial der Öko-Innovationen für die Zukunft abgeschätzt.

2 ÖKO-INNOVATIONEN – CHANCEN FÜR UMWELT, MENSCH UND WIRTSCHAFT

Unter einer Öko-Innovation wird jede Form von Innovation verstanden, die entscheidend und nachweisbar zur Verwirklichung des Ziels der nachhaltigen Entwicklung beiträgt. Entscheidend dabei sind die Kriterien

- Verringerung von Umweltbelastungen,
- Stärkung der Widerstandsfähigkeit gegen Umweltbelastungen bzw.
- effizientere und verantwortungsvollere Nutzung natürlicher Ressourcen.

Damit ruft eine Öko-Innovation als neue (oder signifikant verbesserte) kommerzielle Anwendung von Wissen eine direkte oder indirekte ökologische Verbesserung hervor. Dabei kann die „neue Anwendung“ prinzipiell eine echte Weltneuheit, eine Marktneuheit oder aus Sicht eines einzelnen Unternehmens, der MitarbeiterInnen etc. eine subjektive Neuheit bedeuten. In einem Artikel aus dem Jahr 1997 definiert Peter James Öko-Innovationen als „*neue Produkte und Prozesse, die einen Kundennutzen und Mehrwert bringen, aber Umweltauswirkungen deutlich verringern*“ (JAMES 1997). Der Begriff Öko-Innovation wird auch oft generell für Ideen der Themenfelder rund um den umweltfreundlichen, technologischen Fortschritt bis hin zu sozial verträglichen innovativen Wegen zur Nachhaltigkeit verwendet.

Das Eco-Innovation Observatory hat eine Definition für Öko-Innovation eingeführt, die die wichtigsten Umweltaspekte und Life-Cycle-systemisches Denken in die Definition von Innovation integriert: „*Öko-Innovation ist die Einführung eines neuen oder merklich verbesserten Produkts (Gut oder Dienstleistung), Prozesses, einer Organisationsänderung oder Marketinglösung, die die Nutzung der natürlichen Ressourcen (einschließlich Mineralien, Energie, Wasser und Boden) reduziert und die Freisetzung von Schadstoffen über den gesamten Lebenszyklus verringert.*“ Dieser Zugang stützt sich auf die Definitionen von Innovation der Eurostat und der OECD, wie sie im Oslo-Handbuch der OECD aus dem Jahr 2005 eingeführt worden sind, und auf die Literatur, die sich mit Umweltökonomie und Ressourceneffizienz befasst (EIO 2010).

In der Literatur werden Innovationen nach ihrem Grad an „Neuheit“ (Innovation als Neuerung oder Erneuerung) unterschieden, wobei die Neuartigkeit wahrnehmbar sein muss. Dabei wird die Kombination aus Zweck (und dem daraus resultierenden Nutzen) eines Produkts und den Mitteln, womit dieser Zweck erreicht wird, berücksichtigt. Erreicht eine Innovation in beiden Dimensionen hohe Werte, so wird dies als **radikale, disruptive oder revolutionäre Innovation** bezeichnet.

Die Neuartigkeit einer Innovation kann auch darin bestehen, dass Zweck und Mittel in einer bisher nicht bekannten Form miteinander verknüpft werden. Diese Verknüpfung muss sich auf dem Markt oder innerbetrieblich (wirtschaftlich) bewähren. Bezogen auf die technische Öko-Innovation heißt das, dass die Verknüpfung von Zweck und Mittel des neuen Produktes entscheidend und nachweisbar zur **Verwirklichung des Ziels der nachhaltigen Entwicklung** beitragen muss. So kann ein gegebener Zweck (zum Beispiel Antrieb eines Pkw) mit neuen Mitteln (Wasserstoff, Strom, Erdgas etc.) erreicht werden oder mit gegebenen Mitteln (beispielsweise einer bestehenden Telefonleitung) ein neuer Zweck geschaffen werden (z. B. Nutzung auch zur Datenübertragung für das Internet,

Definitionen für Öko-Innovation

ökologische Verbesserung

Life-Cycle-systemisches Denken

Kriterium der Neuartigkeit

Verknüpfung von Zweck und Mittel

beispielsweise für Videokonferenzen). Insbesondere radikale Öko-Innovationen werden als essenzieller Lösungsansatz für zentrale Herausforderungen im Umwelt- und Klimaschutz gesehen.

Arten von Innovationen

Während **Produktinnovationen** generell darauf abzielen, die Bedürfnisse von KundInnen besser zu befriedigen, sind **Prozessinnovationen** meist auf Verbesserung von Effektivität und Effizienz von Verfahren ausgerichtet. Neben dem Nutzen für KundInnen und der Steigerung des Mehrwerts haben Öko-Innovationen per Definition darüber hinaus das Ziel, Umweltbelastungen über den gesamten Lebenszyklus zu verringern, die Widerstandsfähigkeit gegen Umweltbelastungen zu stärken oder eine effizientere und verantwortungsvollere Nutzung natürlicher Ressourcen zu bewirken. In diesem Report bezieht sich der Begriff Öko-Innovation primär auf **technische Innovationen** und hierbei insbesondere auf Güter und Technologien für die Bereiche Umweltschutz und Ressourcenmanagement gemäß EGSS-Definition der Eurostat (STATISTIK AUSTRIA 2011).

3 VON DER IDEE ZUR ÖKO-INNOVATION

In diesem Abschnitt werden die wichtigsten Grundlagen zu Innovation, Innovationsprozessen und Technologieentwicklung kurz zusammengefasst. Eine ausführlichere Erörterung der Begriffe und eine Darstellung der Theorie finden sich im ersten zu diesem Themenbereich veröffentlichten Report des Umweltbundesamtes (UMWELTBUNDESAMT 2012).

3.1 Innovationsprozess, Innovationsmanagement und Rolle der Forschung

Innovationsforschung

Die Innovationsforschung beschäftigt sich zum einen mit der Frage, unter welchen Bedingungen und in welchen sozio-ökonomischen Prozessen Innovationen zustande kommen – d. h. der Genese neuer Problemlösungsanwendungsfeld-Kombinationen und der Herausbildung und Entwicklung eines regionalen und/oder nationalen Innovationssystems. Das kann eine Produktinnovation betreffen, aber auch eine neue Organisationsform, Technologie, ein Verfahren oder ein neues Anwendungsfeld. Zum anderen interessiert die Innovationsforschung, wie diese Ziele realisiert werden können. Im Mittelpunkt der Prozessbetrachtung stehen Prozessformen, beispielsweise bewusst gesteuerte, sich selbst organisierende oder informell bzw. en passant ablaufende Prozesse sowie die Möglichkeiten und Grenzen einer gezielten Gestaltung oder Beeinflussung. Neuerdings gilt das Forschungsinteresse zunehmend der Pfadabhängigkeit von Innovationsprozessen und deren Ergebnissen. Im Mittelpunkt steht dabei die Annahme, dass die Entwicklungsvergangenheit einer Organisation, eines Produktes, einer Technologie etc. künftige Entwicklungsmöglichkeiten und -vorgehensweisen beeinflusst und begrenzt.

Pfadabhängigkeit von Innovationsprozessen

Innovationsmanagement

Aufgabe und Ziel des Innovationsmanagements (IM) ist die ganzheitliche, systematische Unterstützung des gesamten Innovationsprozesses. Dies reicht von der Generierung neuer Ideen, der Planung, Steuerung und Kontrolle von Innovationen in Organisationen, bis hin zu deren Umsetzung in neue Produkte, Dienstleistungen, Fertigungsprozesse, Organisationsstrukturen, Managementprozesse etc. Inhalte, Aufgaben und Ziele des Innovationsmanagements haben sich erst allmählich zu dem entwickelt, was sie heute sind. Ursprünglich standen Technologien, Allokation von F&E-Ressourcen und das Management der F&E-Aktivitäten als Einheit im Zentrum der Anfänge eines systematischen Innovationsmanagements (IM erster Generation). Innovationen wurden vor allem durch neue wissenschaftliche Erkenntnisse und Technologien getrieben (Science/Technology Push) und waren durch einen Mix an Projektportfolios, unbestimmte Zeithorizonte und das Engagement der ForscherInnen als Einzelpersonen gekennzeichnet.

IM 1. Generation: Science/Technology Push

Im Laufe der Zeit kam der Antrieb zur Innovation zunehmend vom Markt (Market Pull). Dabei werden die Innovationen durch die Bedürfnisse der KundInnen, die durch ein neues Produkt oder Verfahren befriedigt werden können, initiiert

Market Pull als Innovationstreiber

und durch die Anforderungen des Marktes konkretisiert. Bei Öko-Innovationen spielen zudem der angestrebte Umweltnutzen oder die gewünschte Ressourceneinsparung über den gesamten Lebenszyklus der Technologie eine wesentliche Rolle, wobei hier meist auch rechtliche Rahmenbedingungen als Innovationstreiber fungieren.

**systematische Nutzung
von Innovations
netzwerken**

Neue Ansätze zum Innovationsmanagement beziehen nicht nur ausdrücklich die Gesamtheit der internen und externen Quellen von Wissen und Innovationen (z. B. KundInnen, F&E-Einrichtungen etc.) ein, sondern zielen auf deren systematische Nutzung durch eine entsprechende Prozessunterstützung und den strategischen Auf- und Ausbau sowie das Management von Innovationsnetzwerken (MÜLLER-PROTHMANN & DÖRR 2011).

Innovationsprozess und Prozessmodelle

Stage-Gate-Modell

Damit Ideen, Visionen oder Erfindungen zu Innovationen verwertet werden können, muss ein Innovationsprozess durchlaufen werden, wobei die Forschung in sämtlichen gängigen Modellen zum Innovationprozess einen wesentlichen Faktor darstellt. Ein weit verbreitetes Innovationsprozess-Modell ist beispielsweise das Stage-Gate-Modell nach Robert G. Cooper, bei dem der Innovationsprozess in sequenziell ablaufende Phasen (Stufen) zerlegt wird und nach jeder Phase an einem Gate der Projektfortschritt überprüft sowie über den weiteren Fortgang entschieden wird.

**parallel ablaufende
Phasen im Chain-
linked Modell**

Lineare Prozessmodelle mit einem sequenziellen Ablauf der einzelnen Phasen vermitteln zwar ein gutes Grundverständnis von Innovationsprozessen, bilden die Realität aber nur ungenügend ab und sind für das Innovationsmanagement in der Praxis oftmals wenig hilfreich. Neuere Ansätze modellieren Innovationsprozesse in Form von **iterativen Schleifen**, bei denen die verschiedenen Phasen mehrfach, teilweise auch parallel durchlaufen werden, und berücksichtigen damit verbundene Lernprozesse. Ein Beispiel, das in verschiedenen Variationen und Ergänzungen weiterentwickelt wurde, ist das Chain-linked Modell, das von Kline und Rosenberg 1986 (MÜLLER-PROTHMANN & DÖRR 2011) vorgestellt wurde (siehe Abbildung 1).

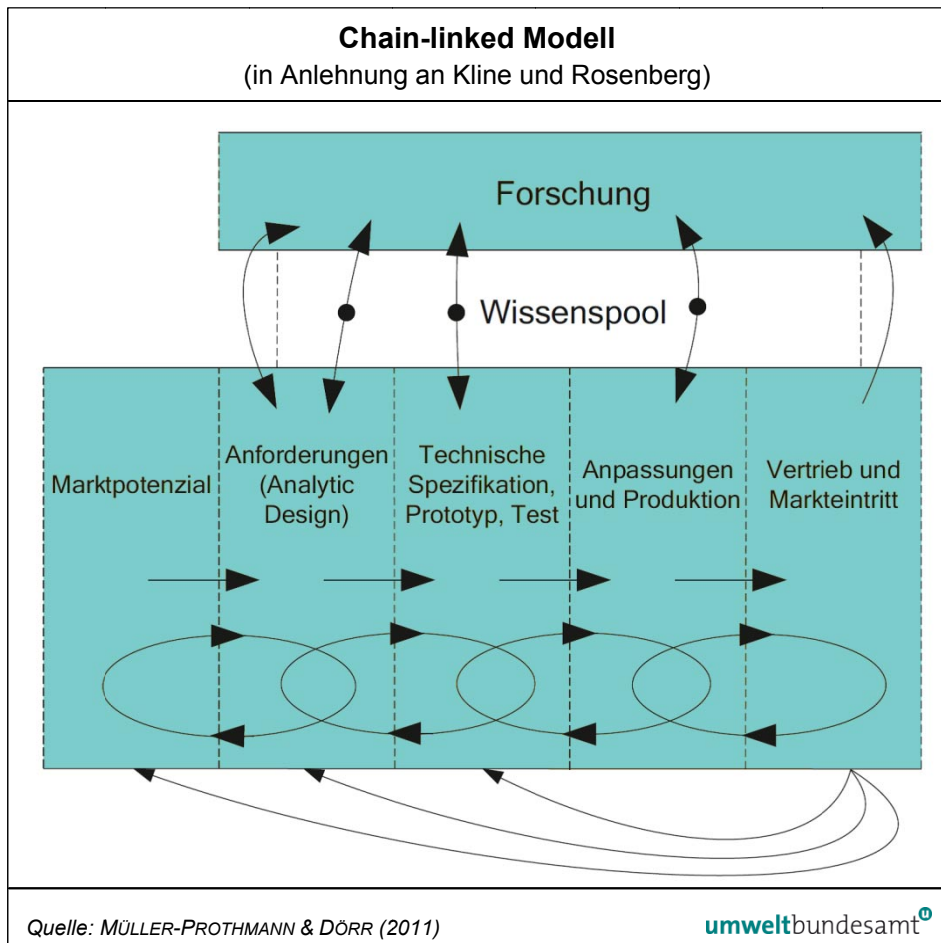


Abbildung 1: Chain-linked Modell in Anlehnung an Kline und Rosenberg, 1986.

Bedeutsam in diesem Modell sind die eigenständige Berücksichtigung eines **Wissenspools**, die **Entkopplung der Forschung** von den übrigen Teilprozessen und die Abbildung von Feedback-/Feedforward-Schleifen. Gerade hinsichtlich der Gestaltung von Kooperationsprozessen in einem integrierten Innovations- und Wissensmanagement sind solche Modelle für die praktische Umsetzung ein großer Erkenntnisgewinn. Forschung ist nicht Voraussetzung des Gesamtprozesses, sondern Forschung wird als eine Serviceleistung für den gesamten Innovationsprozess gesehen und ist in jeder Phase für die gezielte Lösungssuche verfügbar. Die strikte Trennung zwischen der Grundlagenforschung und der angewandten Forschung bzw. F&E ist bei dieser Betrachtungsweise des Innovationsprozesses nicht mehr vorgesehen (MÜLLER-PROTHMANN & DÖRR 2011).

Forschung als Serviceleistung

Für das Innovationsmanagement sind neben F&E noch viele weitere Faktoren innerhalb und außerhalb der Organisation von Bedeutung. Diese stehen zudem untereinander in Wechselwirkung und beeinflussen das Innovationsklima eines Unternehmens. Darunter fallen beispielsweise die Branche, das Marktsegment, die KundInnenstruktur, die Unternehmenskultur, Motivation und Teamarbeit, der Rechtsrahmen – insbesondere gewerbliche Schutzrechte –, oder auch die etwaige Kooperation mit anderen Unternehmen der Wertschöpfungskette sowie die Kooperation mit wissenschaftlichen Einrichtungen (Hochschulen, Forschungsinstitute).

weitere Faktoren eines IM

3.2 Technologieentwicklung – kontinuierlicher Verbesserungsprozess & Technologiesprünge

Schritte im Innovationsprozess

Generell umfasst ein Innovationsprozess die Stufen **Vorentwicklung**, **Technologieentwicklung** (worunter allgemein die Entwicklung neuer sowie die Steigerung der Effektivität und Effizienz vorhandener Technologien verstanden wird) und **Produktentwicklung**. Letztere bezeichnet die Konzeption und Erstellung von Design, Prototyp und Produktionsplan. Das vorliegende Konzeptpapier beschränkt sich primär auf die Betrachtung des Zusammenhanges zwischen Forschung und Technologieentwicklung, insbesondere im Hinblick auf Technologiesprünge bei Öko-Innovationen.

vier Technologieklassen

In der Regel wird zwischen vier verschiedenen Technologieklassen unterschieden, die die herkömmliche Einteilung von Technologien nach deren Verbreitungs- und Neuheitsgrad im Lebenszyklus beschreiben: Zukunftstechnologien, Schrittmachertechnologien, Schlüsseltechnologien und Basistechnologien (siehe auch Abbildung 2). Als **Technologiesprung** wird der Übergang von einer Technologieklasse zu einer anderen bezeichnet.

- **Zukunftstechnologien** (auch als Embryonische Technologien bezeichnet) stehen im Lebenszyklus vor den Schrittmachertechnologien im ganz frühen Stadium der Entwicklung oder befinden sich sogar noch im Stadium der Grundlagenforschung.
- **Schrittmachertechnologien** ganz am Anfang des Lebenszyklus stehen und die potenziellen Schlüsseltechnologien von morgen sind.
- **Schlüsseltechnologien** stehen in der Mitte des Lebenszyklus und befinden sich in einer starken Wachstumsphase, während
- Als **Basistechnologien** werden diejenigen Technologien bezeichnet, die ihre Wachstumsphase bereits überschritten haben und den Stand der Anwendung in einer Branche darstellen.

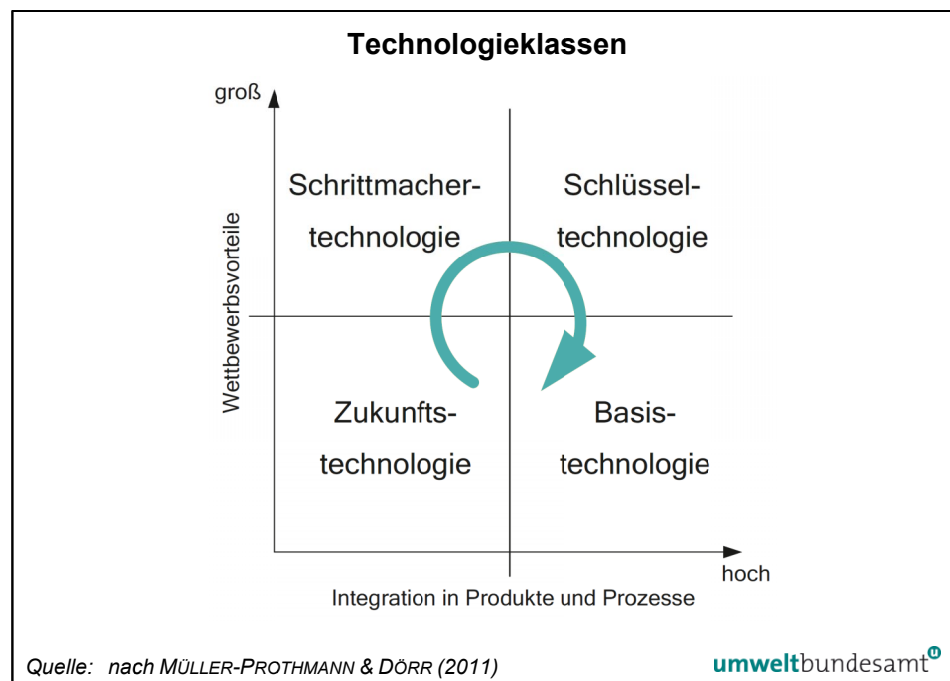


Abbildung 2: Technologieklassen.

Viele Umwelttechnologien, insbesondere end-of-pipe- bzw. nachgelagerte Technologien, sind inkrementelle Öko-Innovationen. Sie werden als kurzfristig taugliche, handlungsorientierte Schritte gesehen, um negative Auswirkungen auf Umwelt und Klima zu vermeiden oder zu minimieren bzw. eine effizientere Nutzung natürlicher Ressourcen zu bewirken. Dabei werden sie allerdings in bestehenden Systemen angewendet.

inkrementelle Öko-Innovationen in bestehenden Systemen

Im Gegensatz dazu sind disruptiv technologische und radikale Öko-Innovationen mit einem **Systemwechsel** verbunden. Dennoch können auch inkrementelle Öko-Innovationen über die Zeit eine wesentliche Rolle spielen, zumal Sequenzen von inkrementellen Verbesserungen im Laufe der Zeit radikale Veränderungen hervorrufen können (z. B. Elektroauto). Einerseits bereiten inkrementelle Verbesserungen den Markt für radikalere Öko-Innovationen vor, andererseits können kleine Veränderungen, im großen Maßstab angewandt (beispielsweise auf Makroebene), radikale Verbesserungen bewirken (EIO 2010) (siehe auch Abbildung 3).

disruptiv technologische & radikale Öko-Innovationen

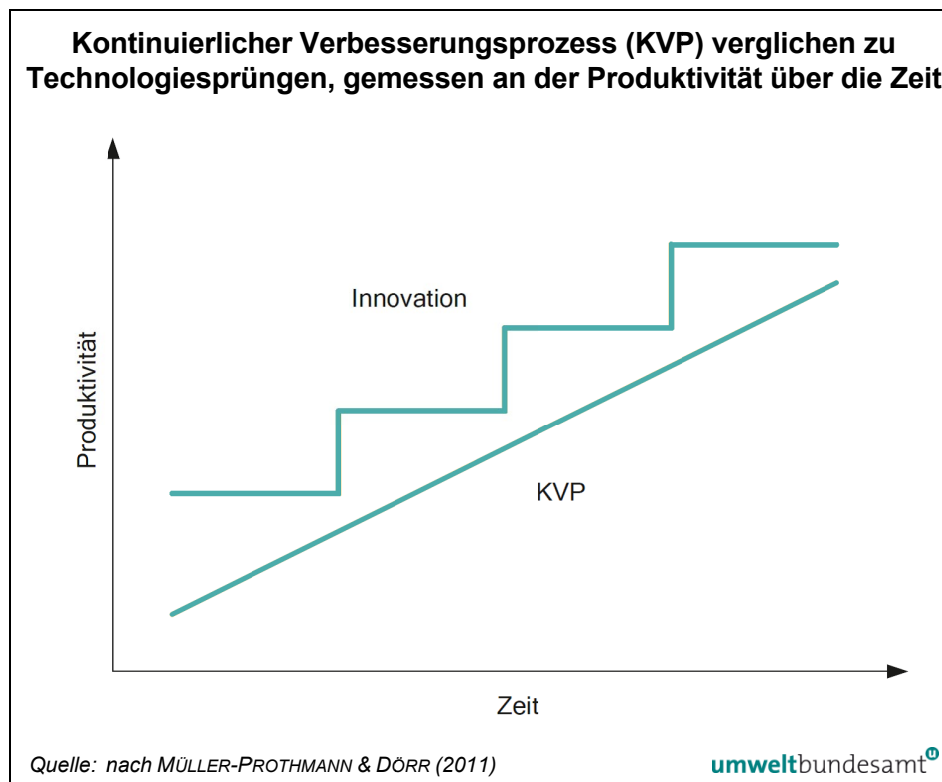


Abbildung 3: Kontinuierlicher Verbesserungsprozess (KVP) verglichen zu Technologiesprüngen, gemessen an der Produktivität über die Zeit.

Um den technologischen Wandel, die Technologieentwicklung und Technologiesprünge bei Öko-Innovationen quantitativ erfassbar zu machen, werden in der Praxis vier Zugänge verwendet (KEMP & PEARSON 2007):

quantitative Messgrößen

- **Input-Größen:** z. B. F&E-Ausgaben, F&E-Personal, ForscherInnen und Innovationsaufwendungen (mit und ohne immaterielle Investitionen wie Ausgaben für Design, Software- und Marketing-Kosten);
- **intermediäre Output-Größen:** z. B. Anzahl der Patente, Anzahl und Art der wissenschaftlichen Publikationen;

- **direkte Messgrößen** des innovativen Outputs: z. B. Anzahl der Innovationen und Beschreibungen einzelner Innovationen, Verkaufsdaten neuer Produkte, Produktivitätszahlen etc.;
- **indirekte Messgrößen**, die aus aggregierten Daten abgeleitet werden können: z. B. Veränderungen in der Ressourceneffizienz und Produktivität nach entsprechender zerlegender Auswertung.

Der mögliche Zusammenhang zwischen dem Innovationsfaktor F&E und der Technologieentwicklung von Öko-Innovationen wird im Folgenden anhand dreier Beispiele qualitativ dargestellt.

4 F&E UND TECHNOLOGIEENTWICKLUNG ANHAND VON DREI ÖKO-INNOVATIONEN

4.1 Fallbeispiel Solarkollektor

Technologische Komponenten und Kenngrößen

Der Sonnenkollektor oder auch Solarkollektor ist der Teil der Solaranlage, der einen großen Teil der Energie des Sonnenlichtes mittels Absorption aufnimmt. Dabei wird in thermischen Solaranlagen mit hohem Wirkungsgrad nahezu das gesamte Strahlungsspektrum des Sonnenlichtes ausgenutzt, gleichzeitig aber – trotz eigener Erwärmung – nur wenig Energie als Wärmestrahlung wieder abgegeben. Die absorbierte Wärme wird im Solarkreislauf der thermischen Solaranlage möglichst verlustfrei auf die sogenannte Solarflüssigkeit (oder zirkulierende Luft im Fall von Luftkollektoren) übertragen. Zu diesem nicht-konzentrierenden Kollektortyp, der in diesem Fallbeispiel näher betrachtet wird, zählen die klassischen, von vielen Häuserdächern bekannten Flachkollektoren, Schwimmbadabsorber sowie die Vakuumröhrenkollektoren. Mit Letzteren sind bei guter Isolierung Temperaturen bis zu 120 °C erreichbar. Die so aus dem Sonnenlicht gewonnene Wärme wird meist in der **Gebäudetechnik**, beispielsweise am häufigsten zum Erhitzen von Brauchwasser für den Haushalt (Waschen, Baden, Spülen etc.) und für Heizzwecke, oder auch in der **Prozesstechnik** nutzbar gemacht. Dabei spielt die Kopplung mit entsprechend effektiven Speichersystemen und/oder Wärmepumpen eine wichtige Rolle.

nicht-konzentrierende Kollektoren

Für höhere Verfahrenstemperaturen werden konzentrierende Kollektoren benötigt, die nicht im Fokus dieses Fallbeispiels stehen. Dazu zählen sogenannte Parabolrinnen und Fresnel Kollektoren. Bei dieser Technologie wird die direkte Sonneneinstrahlung auf ein zentral im Brennpunkt verlaufendes Wärmeträgermedium (z. B. Wärmeträgeröl) übertragen und die verfügbar gemachte Energie wird in weiterer Folge mittels Wärmetauscher dem späteren Verwendungszweck zugeführt. Bei diesen Anlagen ist ein Trackingsystem notwendig und es wird nur die direkte Sonnenstrahlung genutzt. Damit werden Temperaturen bis zu 400 °C erreicht, die z. B. in thermischen Solarkraftwerken zur Stromerzeugung genutzt werden können. Zu den Sonnenkollektoren werden auch offene Solarteiche gezählt, bei denen die Sonnenenergie eine wässrige Salzlösung aufheizt, wobei eine darüber geschichtete Süßwasserschicht als Isolator dient (KHAMMAS 2013a).

konzentrierende Kollektoren

Solarteiche

Die Idee, Sonnenstrahlen „einzufangen“, um ihre Wärme gezielt zu nutzen, ist alt. Brenn- und Hohlspiegel gab es schon in der Antike. Jahrhundertlang beschäftigten sich Erfinder mit dem Einfangen von Sonnenenergie und hierbei insbesondere mit der Verwendung von Brenngläsern. Die Solarkollektoren, die in der Solarthermie verwendet werden, gehen auf eine Erfindung des Schweizer Naturforschers *Horace Bénédicte de Saussure* zurück. Dieser baute im 18. Jhd. einen „einfachen Sonnenkollektor“, der aus einem Holzkasten mit schwarzem Boden bestand und mit Glas abgedeckt war. Sein Sonnenkollektor absorbierte die Sonnenwärme, und Saussure gab an, in seinem Kasten Temperaturen von annähernd 90 °C zu erreichen.

erster Solarkollektor im 18. Jhd.

Verbesserung des Wirkungsgrades

Wärmedämmung

Vorrangiges Ziel aller Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zu Solarkollektoren ist die Verbesserung ihres Wirkungsgrades, der typischerweise bei etwa 60 % bis 80 % liegt. Um die unvermeidlichen Wärmeverluste zu reduzieren, ist eine gute Wärmedämmung des Absorbers gegenüber der Umgebung notwendig, die mit unterschiedlichen Dämmtechniken (z. B. mit Dämmmaterial, Vakuum) erzielt wird. Um eine möglichst hohe Absorption der Sonnenenergie zu erreichen, ist die der Sonne zugewandte Oberfläche des Absorbers entweder schwarz eingefärbt oder mit einer speziellen Beschichtung versehen. Diese wirkt selektiv, das heißt, die von außen kommende, relativ kurzwellige Sonnenenergie wird möglichst gut aufgenommen und die langwellige Wärmeenergie des Absorbers nur schlecht abgegeben. Mit sogenannten hoch-selektiven Beschichtungen werden Absorptionswerte von ca. 94 % für das Sonnenlicht (0,4–0,8 µm Wellenlänge) und Emissionswerte (Infrarot mit Wellenlängen um 7,5 µm) von weniger als 6 % erreicht. Diese wellenlängenselektive Absorption wird insbesondere bei Vakuumkollektoren angewandt.

wellenlängenselektive Absorption bei Vakuumkollektoren

Beschichtungsverfahren

Schwarzchrom-Beschichtung

Eine der ersten Beschichtungen mit selektiver Absorption, die serienmäßig hergestellt werden konnte, war die sogenannte Schwarzchrom-Beschichtung. Sie wurde in einem galvanischen Verfahren auf das aus Kupfer oder Aluminium bestehende Absorberblech aufgebracht. Sehr vereinfacht gesagt besteht sie aus mikroskopischen Chromhärchen, die das Sonnenlicht zwischen sich einfangen, jedoch aufgrund ihrer geringen Größe bei größeren Wellenlängen wenig emittieren.

Nickelbeschichtung

Bis etwa 1997 war die Schwarzchrom-Beschichtung marktbeherrschend. Mittlerweile erlauben aber neuere Beschichtungen nicht nur höhere Wirkungsgrade, sondern gelten – vor allem wegen des Verzichtes auf galvanische Prozesse – auch unter Produktions- und Recycling-Aspekten als umweltfreundlicher. Eine inzwischen nicht mehr auf dem Markt verfügbare Alternative zu Schwarzchrom war eine – ebenfalls galvanisch aufgebrachte – Nickelbeschichtung („Schwarz-nickel“). Beide Beschichtungen lassen sich bisher nur auf Absorberblechen aus Kupfer aufbringen; entsprechende Techniken für Aluminiumabsorber sind erst seit Kurzem auf dem Markt. Auch diese Aluminiumabsorber verwenden jedoch zur Wärmeabführung mittels der „Solarflüssigkeit“ eine Verrohrung aus Kupfer, die per Laser-Schweißverfahren mit dem Absorber verbunden wird.

Absorptions-substanzen & Folien

Es gibt außerdem die Möglichkeit, die Glasabdeckplatten mit lichtdurchlässigen Absorptionssubstanzen zu beschichten, wodurch der Reflektionsindex derartiger halbleitenden Schichten um 40–60 % größer wird als der von rein transparenten Trägern wie z. B. Glas. Zum Beschichten eignen sich beispielsweise Kupferoxid, Cadmiumoxid, Zinnoxid, Indiumoxid und Cadmiumstannat. Der Wirkungsgrad kann auch mit einer zusätzlichen „Innenverglasung“ aus einer Teflon-FEP-Fluorkohlenstoff-Folie verbessert werden, mit der eine um 30 % gesteigerte Energiesammelfähigkeit erzielt werden kann.

Wärmeübergang auf die Wärmeträgerflüssigkeit

Neben der Wärmedämmung und Absorption hat der Wärmeübergang vom erhitzten Absorber auf die in fest mit dem Absorber verbundenen Kupfer- oder Aluminiumrohren fließende Wärmeträgerflüssigkeit einen Einfluss auf den Wirkungsgrad des Solarkollektors, wodurch sich Kollektoren auch in ihrem prinzipiellen Aufbau unterscheiden.

Häufig sind **Vollflächenabsorber**, die aus einem einzigen Absorberblech bestehen, anzutreffen. Die Verrohrung ist bei diesen Absorbern serpentin- bzw. mäanderartig oder in Harfenform auf der Rückseite aufgelötet oder -geschweißt. Daneben gibt es **Streifenabsorber**, die aus einzelnen Finnen bestehen – etwa 10–15 cm schmalen Streifen, auf deren Rückseite jeweils ein dünnes Rohr aufgeschweißt ist. Die Finnen werden dann an beiden Enden in ein Sammelrohr eingelötet, sodass eine Art „Harfe“ entsteht. Eine dritte Bauform sind die **Kissenabsorber**. Wie Vollflächenabsorber bestehen sie aus einem einzigen durchgehenden Absorberblech, auf das aber rückseitig statt einer Rohrleitung ein pressgeformtes zweites Blech aufgebracht ist. Die Wärmeträgerflüssigkeit strömt zwischen diesen beiden Blechen.

Grundsätzlich weisen Vollflächenabsorber die besten Leistungswerte auf. Da anfangs die Hersteller der neuen hochselektiven Beschichtung nur Kupferbleche verarbeiten konnten, die eine bestimmte Breite nicht überschritten, werden vor allem in älteren Kollektormodellen noch überwiegend Absorberfinnen eingesetzt. Inzwischen sind Absorberbleche in Breiten bis 1.200 mm erhältlich, was eine große Flexibilität in der Absorbergeometrie ermöglicht. Im Unterschied dazu erlauben Absorberfinnen ausschließlich die Verrohrung in Harfenform; andererseits lassen Finnen auf einfacherem Wege Anpassungen an die Dachform zu (maßgeschneiderte Kollektoren).

Zur Steigerung des Gesamtwirkungsgrades wird neben der Nutzung von Wasser als Wärmeträgermedium auch mit Öl und mit Wasser-Glycol-Mischungen experimentiert.

Absorber-Typen

beste Leistungswerte bei Vollflächenabsorbern

Wärmeträgermedien

Historische Entwicklung der Solarkollektoren

1960er-Jahre

Die Entwicklung von solaren Wassererhitzern wurde bereits seit den 1960er-Jahren von der zypriotischen Regierung in Form von günstigen Krediten an HauseigentümerInnen und HotelbesitzerInnen unterstützt. Im Jahr 1999 erwärmten über 90 % der Privathaushalte und über 50 % der Hotels ihr Wasser mit Sonnenenergie, womit die Insel weltweit die meisten Kollektoren pro EinwohnerIn besaß und auch 2011 noch im Bereich der Solarthermienutzung, bezogen auf die Einwohnerzahl, weltweit führend war (KHAMMAS 2013a).

1970er-Jahre

Anwendung in Schwimmbädern

Die ersten großflächigen Anwendungen waren seit der Energiekrise der 1970er-Jahre die Beheizung von öffentlichen und zunehmend auch privaten Schwimmbädern mit sogenannten Schwimmbadabsorbern bzw. Absorbermatten. Für die Erwärmung großer Wassermassen in Schwimmbädern ist Sonnenenergie besonders gut geeignet. Hier wird nur ein geringer Temperaturanstieg gewünscht, dafür ist der Wasserdurchlauf sehr groß. Schon 1978 gab es in den USA mehr als 100.000 solarbeheizte, zumeist private Schwimmbäder. Dieser Technologiesprung wurde auch durch den Einsatz einer neuen Rotationsgießmaschine bei Krauss-Maffei unterstützt, mit der Kunststoffkollektoren ohne das aufwendige Hochdruckverfahren hergestellt konnten und damit der Quadratmeterpreis auf unter 100 DM gesenkt werden konnte. In den USA gehören die robusten Wabenelemente, die *Jerry Plunketts* aus Papier und Phenolmasse in Sandwichbauweise hergestellt hat, und die sich wie Dachpappe ausrollen lassen, zu den preisgünstigsten Kollektoren; ebenso wie die Sunmat-Systeme der *Calmac Corp.* aus New Jersey oder die EPDM-Absorbermatten, die später in Lizenz von der österreichischen Firma *Solkav* hergestellt wurden (KHAMMAS 2013a).

Rotationsgießmaschine

rekupierender Solarabsorber

Im Jahr 1978 erreichte der deutsche Erfinder *Hans-Joachim Dietzsch* mit seinem rekupierenden Solarabsorber sehr hohe **Wirkungsgrade bis zu 60 %**. Mittels eines nur 4 cm dicken Kapillarkörpers aus einem zusammengeschweißten Gespinst von Polykarbonat-Röhrchen nutzte er den Raum statt nur der Fläche, wie die anderen Kollektoren. Bei einem Test erreichte sein Kollektor eine Lufttemperatur von 132,6 °C, bei einer Außentemperatur von minus 5 °C.

1980er-Jahre

Warmwasserkollektoren boomen

Auf dem deutschen Markt gab es inzwischen zunehmend mehr und mehr Anbieter, und die Anwendung der Solarthermie verbreitete sich rapide. Noch vor den bisher bekanntesten Anwenderländern Australien und Israel, in denen es 1984 jeweils etwa 100.000 Haushalte gab, die Kollektoren zur Warmwassererzeugung besaßen, schien in den 1980er-Jahren Japan mit der Installation von über 5 Mio. Warmwasserkollektoren das Rennen zu machen. Doch auch in China gab es 1985 bereits über 40.000 Anlagen, bei rapidem Zuwachs. Zu dieser Zeit arbeiteten auch eine stets größer werdende Zahl von Hobby- und Alternativbastlern an Eigenproduktionen, die meist wesentlich preisgünstiger waren als die Markenprodukte.

Mondsee Energiedach

Bereits 1985 entwickelte die österreichische *VÖEST-Alpine AG* ein „Mondsee Energiedach“, dessen Elemente von ca. 0,4 m² Fläche aus hochwertigen beschichteten, wellenförmig gepressten und rückseitig isolierten Blechen nebst passender Polycarbonat-Abdeckung bestehen. Das System wird drucklos gefahren, d. h. nach dem Hochpumpen auf den First erwärmt sich die Trägerflüssigkeit beim Abfließen durch die Wellentäler und wird an der Dachtraufe über Sammlermodule in den Speicher zurückgeführt. Die Elemente haben ein sehr geringes Gewicht, zeichnen sich durch absolute Hagelsicherheit und eine variable Farbgebung aus und sind unbeschränkt begehbar.

90er-Jahre

Nachdem von 1983 bis 1993 in Österreich bereits über 16.000 Solaranlagen mit einer Gesamtfläche von ca. 160.000 m² zur Gewinnung von Warmwasser und Heizenergie von Selbstbaugruppen unter der Anleitung der mehrfach ausgezeichneten *Arbeitsgemeinschaft Erneuerbare Energie (AEE)* aufgestellt worden waren, wurde das Konzept der Selbstbaugruppen auch in der Schweiz eingeführt. Durch den Selbstbau beträgt die Investitionseinsparung rund 50 %. Dabei unterstützen AEE-Baugruppen, bestehend aus 10 bis 50 Personen, mit Plänen, Werkzeugen und Know-how. Nach dem eigenständigen Materialeinkauf werden die Kollektoren gemeinsam gefertigt, wobei den Baugruppen die dazu notwendigen Werkzeuge wie Sickenpresse, Biege- und Löttische gegen eine Mietgebühr zur Verfügung gestellt werden. Diese Werkzeuge sind speziell für den dezentralen Einsatz konzipiert und können leicht auf Pkw-Anhängern transportiert werden. Die Montage erfolgt entweder in Eigenleistung oder unter Einbezug des örtlichen Installationsgewerbes.

Konzept der Selbstbaugruppen

Nach einer Befragung Ende 1993 durch das Ministerium für Wissenschaft und Forschung gaben 91 % der österreichischen Anlagenbetreiber an, dass sie auch nach den gemachten Erfahrungen noch einmal eine Solaranlage in einer Selbstbaugruppe fertigen würden. Auf einer Zufriedenheitsskala von 0 bis 20 Punkten bewerteten 70 % der Befragten ihre Anlage mit der maximalen Punktzahl 20, weitere 16 % stufen ihre Anlagen zwischen 16 und 19 ein. 1998 waren in Österreich fast 1,7 Mio. m² Sonnenkollektoren in Betrieb – was fast der Hälfte der Fläche des Fürstentums Monaco entspricht (KHAMMAS 2013a).

Im Jahr 1993 kamen in Deutschland die ersten Vakuumröhren-Kollektoren für Heizzwecke auf den Markt, die in großem Maßstab erstmals 1994/1995 bei einer Solaranlage mit 100 m² in Schwäbisch Gmünd eingesetzt wurden.

Vakuumröhren-Kollektoren

Im Jahr 1994 startete das deutsche *BMFT* sein Programm Solarthermie 2000, das drei Schwerpunkte hatte:

Programm Solarthermie 2000

- Untersuchung zum Langzeitverhalten von thermischen Großanlagen in bundeseigenen Gebäuden,
- Feldversuche mit solarthermischen Demonstrationsanlagen in öffentlichen Gebäuden (Schwerpunkt Neue Bundesländer),
- Pilotanlagen zur solaren Nahwärmeversorgung mit saisonalen Wärmespeichern (Solare Nahwärme).

In das Programm wurden auch alle Aktivitäten der solaren Nahwärme – also die Wärmeversorgung ganzer Wohnkomplexe durch mehr als 100 m² große Solar Kollektoren – integriert. Das Programm lief bis 2002.

Ebenfalls 1994 startete in Deutschland der *Bund der Energieverbraucher* die Phönix Solarinitiative, bei der durch bundesweite Großeinkäufe standardisierter Solaranlagen die Preise für den Endverbraucher um ein Drittel gesenkt werden konnten (auf 5.000 bis 8.000 DM). Das Gründerteam bestand u. a. aus ExpertInnen vom Fraunhofer Institut, dem Öko-Institut und der Deutschen Gesellschaft für Solarenergie. Ähnlich wie in Österreich und der Schweiz engagierten sich in dem Projekt zahlreiche Solargruppen und brachten ihre jahrelangen Erfahrungen mit ein. Ein großes ehrenamtliches Beraternetz informierte die InteressentInnen durch Vorträge, Gespräche, Videofilme und Besichtigungen gut funktionierender Anlagen. Die BeraterInnen vermittelten den Bezug der Anlagen und organisierten oder leiteten die Selbstmontage, wenn sich dafür Gruppen zusammenfanden.

Solarinitiative Phönix

Der Einbau der Solaranlagen in Eigenregie und auf Basis gegenseitiger Nachbarschaftshilfe brachte ebenfalls eine Kostenreduzierung. Das Projekt Phönix arbeitete ohne jegliche staatliche Förderungen, Zuschüsse oder Subventionen, wurde aber von allen großen Umweltverbänden, wie dem BUND, Naturschutzbund, WWF, Greenpeace, Eurosolar etc. aktiv unterstützt. Bis Ende 1997 hatte Phönix bereits über 8.000 Solaranlagen vermittelt. Inzwischen unterstützten viele Städte die Initiative durch Partnerschaften, darunter Sindelfingen, Memmingen, St. Wendel und Frankfurt/Main. Später kamen noch Stuttgart, Düsseldorf und Saarbrücken dazu. Durch diesen überwältigenden Erfolg wurde Phönix bald die größte Solarinitiative Europas.

**Entwicklung des
Solector**

Die 1994 in Berlin gegründete Firma *KBB Kollektorbau* entwickelte mit dem Solector einen neuartigen Kollektor, der aus einer großflächigen Platte besteht, die aus einem Stück hergestellt wird – und nicht mehr wie bisher aus mehreren Einzelteilen.

**deutsche
Solaranlagen-VO**

In Deutschland sollte bis Jänner 1996 als Ergänzung zum Energieeinspargesetz (EnEG) von der Umweltverwaltung eine Solaranlagenverordnung erarbeitet werden, wonach der Senat eine Rechtsverordnung erlassen darf, die bei Neubauten mit zentraler Wasseraufbereitung die solare Erwärmung von 60 % des Brauchwassers vorschreibt. Im Oktober 1997 wurde zwischen dem damaligen Umweltsenator *Peter Strieder* und Vertretern der Berliner Wirtschaft eine freiwillige Vereinbarung unterzeichnet, nach der bei 75 % aller Neubauten Solarkollektor-Flächen realisiert werden sollten. Außerdem sollte der Kohlenstoffdioxid-Ausstoß durch fossile Heizungen jährlich um 15.000 t gesenkt werden.

2000er-Jahre

**automatisierte
Produktion von
Kollektoren**

Bis Ende der 1990er-Jahre wurden Solarkollektoren zumeist in Manufakturarbeit hergestellt. Ab den 2000er-Jahren begann mit dem Umzug der Firma *UFE Solar GmbH* nach Eberswalde die Herstellung von Solarkollektoren auf automatisierten Fertigungsstraßen. Parallel dazu konzentrierte man sich auch auf die Entwicklung eines **kleinvolumigen Adsorptionsspeichers**, der mit Hilfe von Silikagel die Solarwärme fast verlustfrei über einen langen Zeitraum speichern kann. Dieser saisonale Wärmespeicher wurde ab 2000 in Österreich und Finnland Feldversuchen unterzogen, bei denen es in erster Linie darum ging, die computergesteuerte Ventilsteuerung zu optimieren, die bei dieser Speicheremethode den Wasserdampf-Durchfluss steuert.

**Titan/Nitrit-
Beschichtung**

Außerdem arbeitete man bei UFE Solar an einer neuen Generation von Absorbern, bei denen statt der Galvanisierung eine Titan/Nitrit-Beschichtung eingesetzt wird, die die Leistung um 10–15 % steigern sollte. Bereits Ende der 1980er-Jahre untersuchte man an der Universität München eine neuartige selektive Absorberschicht, die durch das Aufdampfen von Titan erzeugt wird. Die Weiterentwicklung dieser Technologie wurde später durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie gefördert. Während der 1990er-Jahre wurden physikalische Hochvakuum-Verdampfungsverfahren im industriellen Maßstab beherrschbar. Die Titan-Nitrit-Oxid-Absorber (TiNOX), die ab 1996/1997 auf den Markt kamen, standen allerdings von nun an auch in Konkurrenz mit einer Reihe neuartiger Beschichtungen, wie Cerments-, a-C:H-Metall- oder Ni-NiO-Beschichtungen, mit denen Absorptionswerte bis zu 96 % erreicht werden konnten.

Im Jahr 2003 präsentierte *Alex Kee* aus Malaysia seine „solare Thermoskanne“, die als mobile Einheit konzipiert ist und überall für heißes und sogar desinfiziertes Wasser sorgen kann. Dabei handelt es sich um ein Doppelrohr aus Glas mit einer dazwischenliegenden Vakuumisolation – quasi ein einfacher Vakuumröhren-Kollektor. Die sogenannte Solar Kettle-Thermos Flask (SK-TF) hat eine einzige verschließbare Öffnung, durch die das Gefäß befüllt und auch wieder entleert wird. Durch die schwarze Beschichtung des inneren Glasrohres heizt sich das Wasser innerhalb von ein bis zwei Stunden auf 100 °C auf.

Solar Kettle– Thermos Flask

Im Jahr 2004 wurden Solaranlagen erstmals auch in Baumärkten angeboten, wobei die Preise dieser Solarbausätze recht moderat ausfielen: Eine Kollektorfläche von 6,3 m² nebst einem 300 l Speicher (für 3–5 Personen ausreichend) kostete rund 2.500 €.

Ein System, bei dem thermische Solarkollektoren auch bei einem totalen Netzausfall weiter betrieben werden können, wurde im März 2004 von der Firma *Soli fer* in Freiberg/Sachsen vorgestellt. Dabei werden in die Glasfelder der Kollektoren Fotovoltaik-Module integriert. Der Solarstrom wird mittels Akku gespeichert. Bei einem Netzausfall werden die Pumpen der Kollektor-Anlage weiterhin mit Strom versorgt. Diese Hybridtechnik bietet die Möglichkeit, Kollektor-Anlagen grundsätzlich ohne Stromnetzanschluss zu betreiben.

integrierte Fotovoltaik-Module

Im Jahr 2006 entwickelten Ingenieure vom *Institut für Textil- und Verfahrenstechnik* in Denkendorf eine transparente Wärmedämmung auf Textilbasis. Die Idee für den Dämmstoff entnahmen die TechnikerInnen der Natur. Pate für das flexible, transparente Textil aus Polyesterfasern, das die bislang starren Wärmedämmstoffe in den Kollektoren ablösen soll, ist das gelblich-weiße Eisbärfell. Die Luft in dem Fasernetzwerk wirkt genau wie bei den Fellhaaren als Isolierschicht. Der Polyester-Wärmedämmstoff ist leicht und lässt sich flexibel verformen. Messungen zufolge besitzt das Material einen Wärmedurchgangskoeffizienten von 2,2 bis 3,0.

Wärmedämmung auf Textilbasis

Ende Mai 2006 wurde mit Unterstützung der EU-Kommission in Brüssel die europäische *Solarthermie-Technologie-Plattform (ESTTP)* gegründet, in der Forschung, Industrie und Politik zusammenwirken, um eine gemeinsame europäische Forschungsstrategie für den Breitereinsatz der Solarwärme zu erarbeiten. Übergeordnete Ziele der ESTTP waren anfangs, innerhalb der folgenden zwei Jahre eine Vision zur Nutzung der Solarthermie in Europa im Jahr 2030 zu entwickeln, die Steigerung der Forschungsaktivitäten in diesem Bereich sowie die Verbreitung und Entwicklung der entsprechenden Technologie. Erstes konkretes Ziel der ESTTP war es, die Solarthermie als Basistechnologie für die Beheizung von Gebäuden zu etablieren. Die Mehrheit der Neubauten sollte bis 2030 allein durch Solarthermie beheizt werden. Nach Ablauf der zweijährigen Arbeitsphase blieb die Internetseite als eine Art Wissensspeicher weiter bestehen, um die erzielten Erkenntnisse wiederzugeben.

Solarthermie-Tech- nologie-Plattform

Im Mai 2008 begann man in der *Hofmühl-Brauerei* in Eichstätt am Aufbau der weltweit ersten thermischen Solarbayer-Röhrenkollektoranlage zur **Prozesswärmegewinnung** (> 100 °C). Europas bis dahin größte Röhrenkollektoranlage hat eine Fläche von 1.389 m² und zwei Schichtleit-Pufferspeicher mit jeweils 60 m³ Fassungsvermögen, wobei hier unterschiedliche Temperaturniveaus genutzt werden, um den Energiebedarf der Brauerei von der Flaschenwaschanlage über Entkeimungsanlagen bis zur Heizungsunterstützung zu einem Großteil mit Solarenergie zu decken.

Solarbayer- Röhrenkollektor- anlage

Der Zeithorizont der Solarkollektor-Entwicklung mit einer Abschätzung der Technologiesprünge bzw. Übergänge von der Zukunftstechnologie bis zur Basistechnologie wird anhand der Timeline in Abbildung 4 dargestellt:



Abbildung 4: Timeline der Solarkollektor-Entwicklung vom 18. Jahrhundert bis heute mit einer Abschätzung der Technologiesprünge bzw. Übergänge von der Zukunftstechnologie bis zur Basistechnologie. Die Überlappungen der einzelnen Technologieklassen ergeben sich aufgrund der verschiedenen Kollektortypen, Anwendungsbereiche und der unterschiedlichen Marktdurchdringung in den betreffenden Regionen.

Marktentwicklung der Solarkollektoren

Unterstützt durch Investitionsförderungen und Forschungsprogramme konnten in der Vergangenheit zahlreiche technische Barrieren überwunden werden. Damit machte die Markteinführung von solarthermischen Systemen in den vergangenen 20 Jahren bemerkenswerte Fortschritte. Die Anwendungsgebiete thermischer Solaranlagen reichen mittlerweile von Systemen zur Warmwasserbereitung im Einfamilienhausbereich bis hin zu kommerziellen Großanlagen im Megawattbereich, Kühl- und Klimaanlage sowie die Bereitstellung von Prozesswärme für die Industrie. Einige dieser Anwendungen sind über die Lebensdauer betrachtet bereits heute konkurrenzfähig mit Strom oder Gas (BIERMAYR et al. 2013). Vor allem Systeme zur Warmwasserbereitung in Einfamilienhäusern zählen heute bereits zu den **Schlüsseltechnologien** im Bereich der erneuerbaren Energien und sind in manchen Regionen stark verbreitet.

Anwendungsgebiete

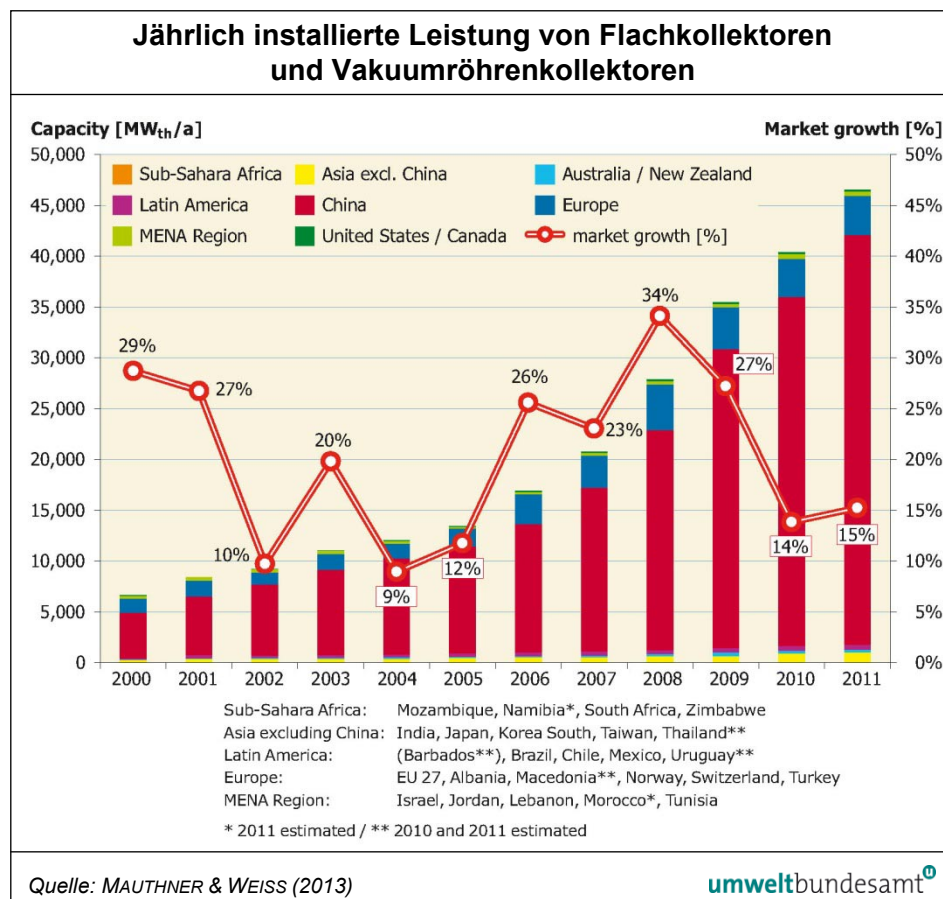


Abbildung 5: Jährlich installierte Leistung von Flachkollektoren und Vakuumröhrenkollektoren 2000–2011.

Abbildung 5 zeigt die Entwicklung der weltweit jährlich installierten Leistung von Flachkollektoren und Vakuumröhrenkollektoren in MW_{th/a} im Zeitraum 2000 bis 2011. Die weltweite Marktentwicklung dieser Solarkollektoren wird durch ein stetiges Wachstum in den letzten 11 Jahren geprägt. Zwischen 2000 und 2011 lag die durchschnittliche Wachstumsrate weltweit bei rund 20 % und die installierte Kollektorfläche stieg um das Siebenfache (MAUTHNER & WEISS 2013). Insbesondere in China ist der Markt von einem stetigen Wachstum gekennzeichnet, während der zweitgrößte Markt, Europa, von großen Schwankungen geprägt ist. Nach einem Rückgang zwischen 2008 und 2010 erfolgte allerdings eine Stabilisierung im Jahr 2011.

Die Anwendungsfelder der Solarthermie variieren weltweit stark von Region zu Region. Demnach hat sich die Marktdurchdringung der unterschiedlichen Kollektortypen und Anlagensysteme in den Regionen auch unterschiedlich entwickelt. Es lässt sich daher nur schwer ableiten, wann es bei der Entwicklung der unterschiedlichen Solarkollektortypen bzw. -systeme generell zu Technologiesprüngen gekommen ist. Beispielsweise werden einfache Systeme mit Vakuumröhrenkollektoren, bei denen die inneren Rohre mit Wasser gefüllt sind und über den Kollektor direkt mit dem Speicher unter Nutzung des Thermosiphon-Effekts verbunden sind, vor allem in China verwendet, nicht jedoch in Europa. In Nordamerika werden nach wie vor hauptsächlich Schwimmbadabsorber bzw. unverglaste Kollektoren eingesetzt. Verglaste Flachkollektoren kommen vor allem in Asien (ohne China), der MENA-Region und in Europa zur Anwendung.

nationale Unterschiede bei Solarsystemen

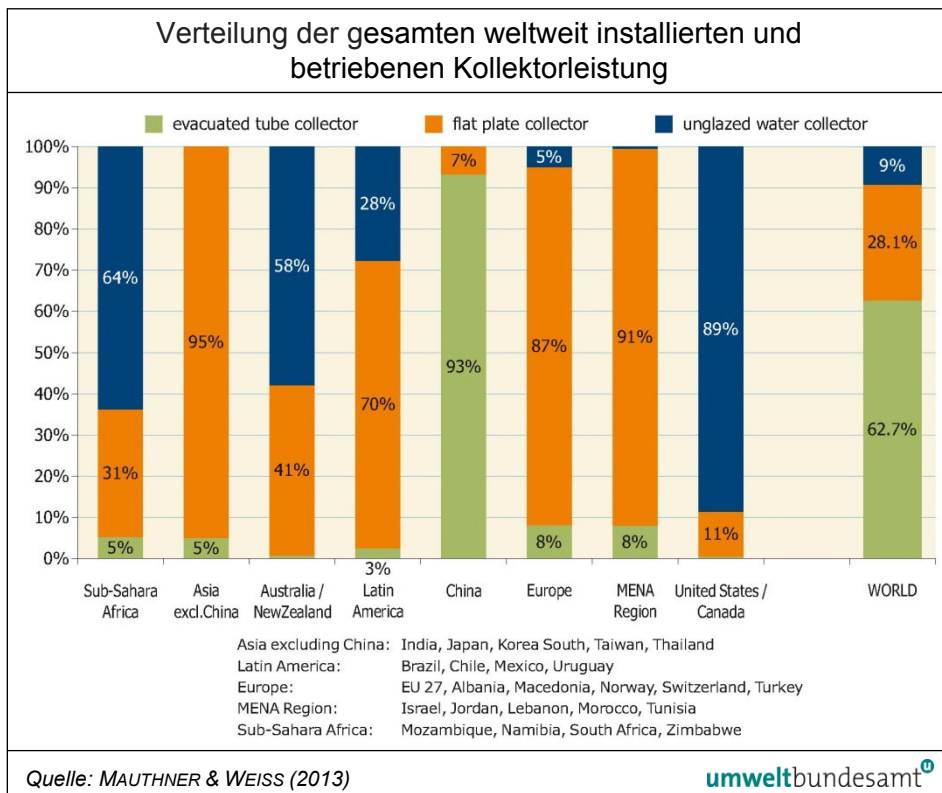


Abbildung 6: Verteilung der gesamten weltweit installierten und betriebenen Kollektorleistung nach Solarkollektortype bis Ende 2011.

Thermosiphon-systeme weltweit führend

Mehr als drei Viertel aller weltweit installierten Solaranlagen sind Thermosiphon-systeme, der Rest sind Solaranlagen, bei denen die Wärmeträgerflüssigkeit im Kreislauf gepumpt wird. Ähnlich wie bei der Verteilung nach Solarkollektortype dominiert auch hier der chinesische Markt im Hinblick auf die Verteilung nach Solaranlagensystem. Im Allgemeinen sind Thermosiphonsysteme in warmen Klimazonen wie in Afrika, Südamerika, Südeuropa und der MENA-Region gebräuchlicher. In diesen Regionen sind Thermosiphonsysteme häufiger mit verglasten Flachkollektoren ausgestattet, während das für China typische Thermosiphonsystem für die Warmwasserbereitung Vakuumröhren aufweist (MAUTHNER & WEISS 2013).

Anwendungsbereich Warmwasserbereitung

In Österreich aber auch in anderen Staaten (z. B. USA, Deutschland etc.) erlebte die thermische Solarenergie im Bereich der Warmwasserbereitung und der Erwärmung von Schwimmbädern ihren ersten Boom bereits in den 1980er-Jahren. Insbesondere bei den Schwimmbadabsorbern scheint der **Technologiesprung von der Schrittmacher- zur Schlüsseltechnologie** zu dieser Zeit innerhalb weniger Jahre vollzogen (siehe Abbildung 7). Wesentlich beschleunigt wurde diese Entwicklung durch die von der AEE initiierte Einrichtung von Selbstbaugruppen (siehe oben).

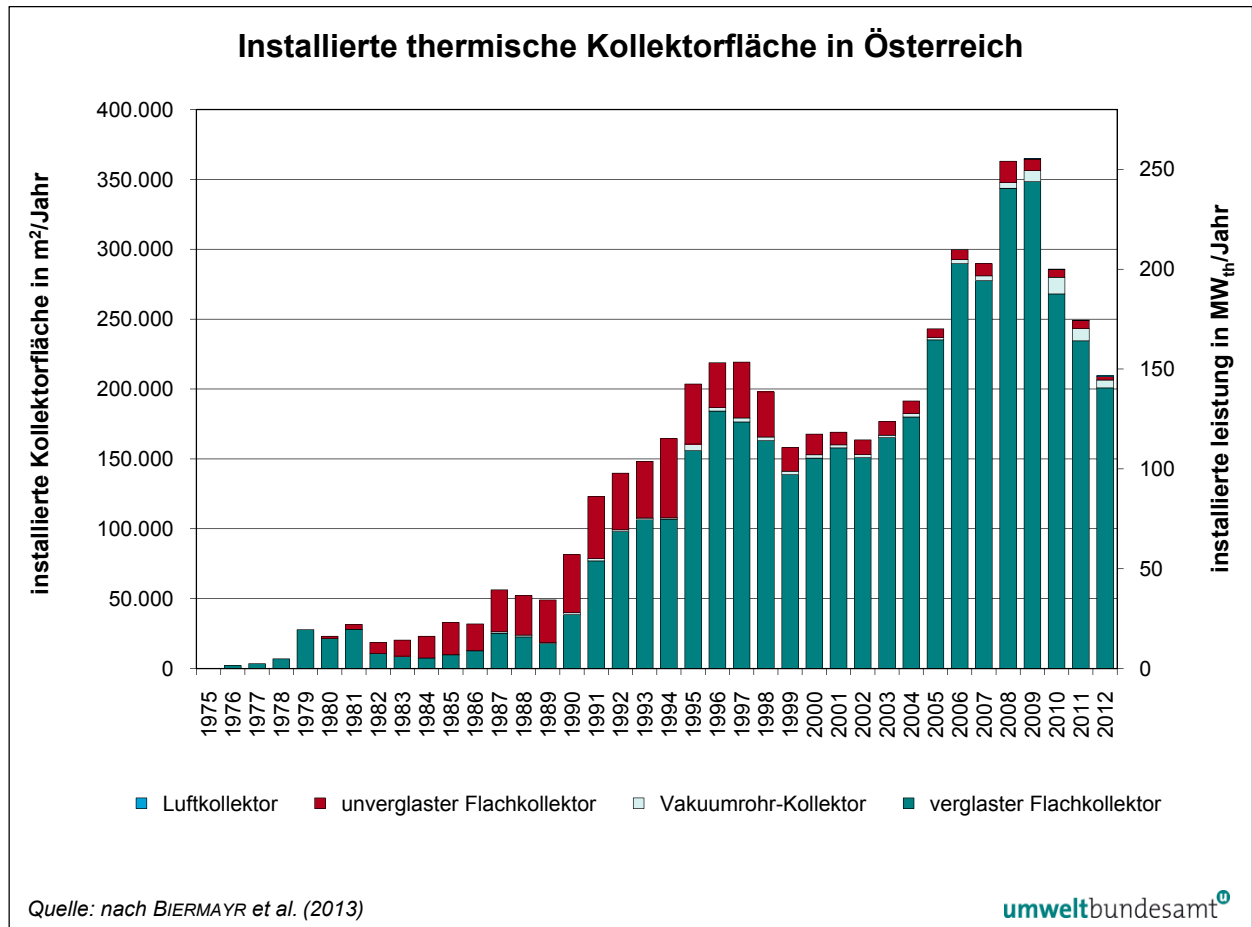


Abbildung 7: Installierte thermische Kollektorfläche (m² und MWth/Jahr) in Österreich in den Jahren 1975 bis 2012 nach Kollektortyp.

Ausgelöst und unterstützt von zahlreichen Forschungs- und Entwicklungsprojekten, wie z. B. die *Phönix Solarinitiative* in Deutschland, gelang es zu Beginn der 1990er-Jahre auch in Deutschland und Österreich, den Anwendungsbereich der Raumheizung für die thermische Solarenergie zu erschließen, in dem auch heute noch fast ausschließlich Flachkollektoren eingesetzt werden. Verstärkt wurde dieser Technologiesprung durch rechtliche Rahmenbedingungen, Vorgaben und Normen. Damit verbunden war man auch daran interessiert, den Wirkungsgrad und das Preis-Leistungsverhältnis der verglasten Flachkollektoren durch inkrementelle Innovationen stetig zu verbessern (siehe oben). Zahlreiche solare Kombianlagen zur Warmwasserbereitung und Raumheizung lösten in der Folge starke Wachstumszahlen am österreichischen Markt aus, womit auch in diesem Anwendungsbereich endgültig der **Technologiesprung von der Schrittmacher- zur Schlüsseltechnologie** vollzogen werden konnte.

**Anwendungsbereich
Raumheizung**

Es folgte eine Phase von sinkenden Erdölpreisen und in der Folge reduzierten sich auch die jährlich neu installierten Kollektorflächen in Österreich. Ab den 2000er-Jahren begann man mit der Herstellung von Flachkollektoren auf automatisierten Fertigungsstraßen. Somit konnten die Produktionskosten zwischen 1995 und dem Jahr 2010 nahezu halbiert werden, wie die Entwicklung der Kollektorproduktionskosten der führenden Unternehmen in Europa zeigt (BIERMAYR et al. 2013). Obwohl die Solarthermiebranche im Gegensatz zur Fotovoltaikbranche diese Kosteneinsparung trotz steigender Produktionszahlen lediglich in

**automatisierte
Herstellung**

moderaten Preissenkungen an die EndkundInnen weitergegeben hat, stiegen die Verkaufszahlen der nicht-konzentrierenden Solarkollektoren in den 2000er-Jahren wieder signifikant an. Dafür verantwortlich waren auch der Anstieg der Energiepreise und der damit verbundene Ausbau der klassischen Einsatzbereiche der thermischen Solarenergie.

neue Anwendungsbereiche

Neben dem Einsatz der Solarthermie zur Warmwasserbereitung und Raumheizung im Einfamilienhausbereich sowie zur Schwimmbaderwärmung konnten durch weltweite, forcierte Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zunehmend auch neue Anwendungsbereiche erschlossen werden und somit entsprechende Solarkollektortypen bzw. Anlagensysteme von der **Zukunftstechnologie zumindest bis zur Schrittmachertechnologie** geführt werden:

- Große Kombianlagen zur Heizungsunterstützung im Geschloßwohnbau,
- solare Nah- und Fernwärme (Großanlagen mit mehreren Megawatt thermischer Leistung),
- Solarwärme für gewerbliche und industrielle Anwendungen,
- Anlagen zum solaren Kühlen und Klimatisieren.

energiepolitische Instrumente

Die Marktdiffusion solarthermischer Anlagen wurde und wird in vielen Staaten von anreizorientierten energiepolitischen Instrumenten maßgeblich beeinflusst. Konkret sind beispielsweise die österreichischen Landesförderungen mit den entsprechenden finanziellen Zuschüssen, welche vorrangig für den Wohnbau bestimmt sind, zu nennen. Thermische Solaranlagen in Gewerbe- und Industriebetrieben sowie im Tourismusbereich werden in Österreich über die Umweltförderung des Lebensministeriums finanziell unterstützt (BIERMAYR et al. 2013).

Anwendungsgebiete der Industrie

Auch Industriebetriebe nutzen die Solarthermie als Beitrag zur Prozessenergie im Niedrigtemperaturbereich. So ist u. a. das Anwärmen von Biomassekulturen – etwa zur Erzeugung von Biogas – längst zur Marktreife gediehen. Werden höhere Verfahrenstemperaturen benötigt, ist mit der herkömmlichen Technik der nicht-konzentrierenden Kollektoren allerdings nur eine Vorwärmung der Wärmeträger möglich. Aktuell entwickelte konzentrierende Solaranlagen (z. B. Parabolrinnentechnik) dürften hier der Solartechnik im nächsten Jahrzehnt ein weiteres, großes Marktpotenzial öffnen (BIERMAYR et al. 2013).

Hindernisse für die Marktdurchdringung und Überwindungsmöglichkeiten

Im Bereich der nicht-konzentrierenden Solarkollektoren scheint es aber nicht nur in Österreich, sondern in ganz Europa Barrieren für ein anhaltendes Marktwachstum zu geben, wie die vergangenen drei Jahre gezeigt haben (MAUTHNER & WEISS 2013). Eine mögliche Ursache für diese Entwicklung wird mittlerweile neben anderen Gründen in den stark gefallen Preisen bei der Fotovoltaik gesehen. Dadurch entstand erstmals ein direkter Wettbewerb zwischen den zwei Solartechnologien (BIERMAYR et al. 2013). Um die Produktionskosten der Solarkollektoren weiter zu senken, arbeiten mehrere Forschungseinrichtungen und Solarunternehmen an der Einführung von Kunststoffen in die Kollektorproduktion (ESTTP 2012). Die Konkurrenzsituation zur Fotovoltaik könnte auch durch Nutzung der Synergien, beispielsweise der Kombination von Solarthermie mit anderen Technologien, überwunden werden, z. B. mittels Hybridkollektoren zur Erzeugung von Wärme und Strom. Diese bieten im Allgemeinen die höchste Ef-

Konkurrenz Fotovoltaik

Hybridkollektoren

fizienz durch Umwandlung von Sonnenstrahlung in Energie pro Fläche. Unverglaste PVT-Kollektoren, eine Kombination von PV-Modul und einem Wärmetauscher, der die Temperatur des PV-Moduls verringert, sind bereits auf dem Markt. In Verbindung mit einer Wärmepumpe können diese auch Warmwasser liefern. Verglaste PVT-Kollektoren, bei denen das PV-Modul-Absorber-Sandwich in einem Kollektorgehäuse eingebaut ist und die auch Warmwasser ohne Wärmepumpe bereitstellen können, sind in Entwicklung (ESTTP 2012).

In der strategischen Forschungsagenda der Europäischen Technologieplattform für erneuerbares Heizen und Kühlen (ESTTP) wird noch viel Raum für die technologische Entwicklung von Solarkollektoren erkannt, die zu Technologiesprüngen von Solarkollektoren und Anlagensystemen führen und damit zur stärkeren Marktdurchdringung führen können. Folgende Ziele könnten demnach durch F&E-Aktivitäten erreicht werden (ESTTP 2012):

- **Verbesserte Wirtschaftlichkeit** der Solarkollektoren wird durch erhöhte Effizienz (z. B. neue innovative Materialien, Beschichtungen, Reflektoren, Dämmstoffe, Entwicklung von anwendungsspezifischen Kollektoren) und geringere Kosten erreicht werden (z. B. eine kontinuierliche Optimierung der Fertigungsverfahren und neue Produktionstechniken für Kollektoren, mit dem Fokus auf Massenproduktion von maßgeschneiderten Systemen und systematische Verwertung von Materialien).
- **Vereinfachte Installation und verbesserte Integration** von Kollektoren in die Gebäudehülle als wichtiger Aspekt für die Akzeptanz von solarthermischen Anlagen beim Anwender/der Anwenderin (z. B. standardisierte Hydraulikan-schlüsse und Plug & Function-Konzepte. Neue Techniken zur Befestigung von Kollektoren an Dach und Fassade).
- **Verbesserte Materialien sowie Bau- und Betreiberkonzepte**, um die Zuverlässigkeit und die langfristige Leistungsstabilität von Solarkollektoren zu erhöhen. Forschungsaktivitäten sind erforderlich für die Entwicklung und Evaluierung neuer Materialien, Beschichtungen sowie Bau- und Betriebsweisen für eine erhöhte Lebensdauer durch Reduzierung von Alterungseffekten und die Vermeidung von Staupunkttemperaturen und Überhitzung der Kollektoren.
- **Entwicklung optimierter Solarkollektoren** für bestimmte Temperaturen, Witterungsbedingungen, Wasserqualitäten und spezielle Anwendungen, um die Wirtschaftlichkeit von solarthermischen Anlagen bei wachsender Nachfrage in den Nischenmärkten zu verbessern.

4.2 Fallbeispiel Windturbine

Definition Als zweites Fallbeispiel zur Untersuchung des Zusammenhanges zwischen Forschung und Technologiesprüngen von Öko-Innovationen wird der Innovationsprozess der Windturbine dargestellt. Unter einer Windturbine (Windenergieanlage (WEA), Windkraftwerk, Windkraftkonverter (WKK), windgetriebenes Stromerzeugungsaggregat; Niw 2013) versteht man eine Windkraftanlage (WKA), die mit ihrem Rotor die Bewegungsenergie des Windes erntet, in elektrische Energie umwandelt und direkt einem Verbraucher zuführt oder in das Stromnetz einspeist.

Technologische Komponenten und Kenngrößen

Rotorblätter Die Rotorblätter stellen die wichtigste Komponente einer Windkraftanlage dar, da durch ihre Drehung der Generator angetrieben und so Energie erzeugt wird. Sie stehen auch bei der technologischen Weiterentwicklung im Mittelpunkt, nicht zuletzt um dem Vorwurf zu begegnen, dass Windkraftanlagen Lärm verursachen. Für die Herstellung der Rotorblätter werden Materialien wie Holz, Stoff, Stahl, Aluminium und Glasfasern verwendet, wobei Glasfasern, Holz und Karbonfasern heutzutage am häufigsten benutzt werden (DCTI 2009).

Energieertrag Der Energieertrag einer Windturbine ist abhängig von der Erntefläche des Windrades (Fläche, die von den Rotorblättern durchquert wird), von der Seehöhe (dünne Höhenluft enthält etwas weniger Masse und damit weniger Energie) und vor allem von der Windgeschwindigkeit. Diese wirkt sich zur dritten Potenz auf den Ertrag aus. Das bedeutet, dass eine geringfügig höhere Windgeschwindigkeit zu stark erhöhten Erträgen führt (AEE NÖ-WIEN 2013). Allerdings bezieht sich diese Berechnung einzig auf die reine Kraft der Windenergie. Wie viel davon tatsächlich in Strom umgewandelt wird, hängt wiederum sehr stark von der Effizienz der Windkraftanlage ab. Maximal können etwa 60 % der Windenergie in Strom umgewandelt werden. Der durchschnittliche Wert liegt jedoch bei ungefähr 45 % (DCTI 2009).

Arten von Windturbinen

Widerstands- & Auftriebsläufer Es gibt verschiedene Arten von Windrädern. Widerstandsläufer, wie es die bereits vor über 1.000 Jahren existierenden Windmühlen waren, sind immer seltener geworden. Abgelöst wurden diese von den effizienteren, schnell drehenden Auftriebsläufern. Die höheren Umdrehungsgeschwindigkeiten sind vor allem für die Stromproduktion günstiger, da man sich ein Getriebe erspart, beziehungsweise einen viel kleineren und damit günstigeren Generator verwenden kann. Die Rotorblätter der Auftriebsläufer sind im Querschnitt geformt wie ein Flugzeugflügel und nutzen genauso den Auftrieb, der durch Unterdruck entsteht, wenn die Luft unterschiedlich lange Wege um ein Hindernis herum in Kauf nehmen muss.

horizontale Drehachse Hier haben sich wieder verschiedenste Bauformen entwickelt. Solche mit vertikaler (senkrechter) Drehachse, wie zum Beispiel der Darrieus-Rotor, fanden wegen verschiedener Nachteile (nicht selbst startend, höhere Materialbelastung) kaum Verbreitung. Der Auftriebsläufer mit horizontaler Drehachse konnte sich aufgrund seiner Eigenschaften durchsetzen und ist jetzt die am weitesten verbreitete Form von Windenergieanlagen. Meist werden Typen mit drei Rotorblättern verwendet, was seinen Vorteil in der resultierenden Drehzahl hat (weniger

Rotorblätter erhöhen die Drehzahl, was günstiger für die Generatorauslegung, aber ungünstiger für Materialbelastung und Geräuschentwicklung ist) (AEE NÖ-WIEN 2013).

Historische Entwicklung der Windkraftnutzung

Die Idee der technischen Windnutzung scheint vor über 2.500 Jahren in Persien aufgekommen zu sein; von der Goldenen Horde wurde sie nach China gebracht, von den Arabern und später auch von Kreuzfahrern nach Europa (KHAMMAS 2013b). In den letzten Jahrhunderten etablierte sich die Windenergie auf breiter Ebene, da sie mittels Windmühlen zum Mahlen herangezogen wurde. Eine andere Anwendungsform diente der Entwässerung der Deiche in den Niederlanden. Mitte des 19. Jahrhunderts existierten in Europa 200.000 Windmühlen, die zu Beginn des 20. Jahrhunderts durch andere Motoren ersetzt wurden (IG WINDKRAFT 2013a).

Windkraftanlagen entwickelten sich aus der Windmühlentechnik heraus. Mit der großtechnischen Nutzung der elektrischen Energie ab 1882 begann die Elektrizität auch für die Bevölkerung ein wichtiges technisches Hilfsmittel zu werden. Die Elektrifizierung der Städte schritt rasch voran, doch die Versorgung der ländlichen Gebiete stellte besondere Anforderungen. Es musste erst ein Übertragungsnetz für elektrische Energie geschaffen werden, und die Elektrizitätswerke mussten überhaupt in der Lage sein, im Verbundbetrieb zu laufen. In Deutschland waren in den 1920er-Jahren schon fast alle Dörfer an das Verbundnetz angeschlossen, jedoch war die Infrastruktur in vielen anderen Ländern noch nicht so weit fortgeschritten. Bereits 1841 schlug der Belgier *Floris Nollet*, Erfinder der ersten großtechnischen Generatoren, die Nutzung der Windenergie für die Erzeugung von elektrischem Strom vor. In der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts gab es verstärkt Versuche, mit Hilfe der Windenergie elektrische Energie zu erzeugen. Da die Windmühlen zu diesem Zeitpunkt noch sehr weit verbreitet waren, gab es mehrfach Gedanken, diese zum Betrieb eines Dynamos umzurüsten. Der Zeithorizont der darauf folgenden Technologieentwicklung mit einer Abschätzung der Technologiesprünge bzw. Übergänge von der Zukunftsbis zur Schlüsseltechnologie im Kleinanlagenbereich wird anhand der Timeline in Abbildung 8 dargestellt.

Die erste belegte Anlage zur Stromerzeugung errichtete 1887 der Schotte *James Blyth*, um Akkumulatoren für die Beleuchtung seines Ferienhäuschens aufzuladen (TREVOR 2004). Seine einfache, robuste Konstruktion mit einer vertikalen Achse von 10 m Höhe und vier auf einem Kreis von 8 m Durchmesser angeordneten Segeln hatte eine bescheidene Effizienz. Nahezu zeitgleich orientierte sich *Charles F. Brush* in Cleveland, Ohio, mit einer 20 m hohen Anlage an der damals bereits fortgeschrittenen Windmühlentechnik und baute eine Windkraftanlage, die er zur Versorgung seines Hauses mit elektrischer Energie aus einem Batteriespeicher benutzte. Brush verwendete eine zweistufige Übersetzung mit Riementrieben, um einen 12-kW-Generator anzutreiben (WIKIPEDIA 2013b).

Der Däne *Poul la Cour* entwickelte um 1900 durch systematische Versuche – unter anderem an aerodynamisch geformten Flügelprofilen in Windkanälen – das Konzept des Schnellläufers – einer Anlage, bei der sich die Flügelspitzen schneller als der Wind bewegen und nur wenige Rotorblätter ausreichen, die Energie der Strömung über die ganze Rotorfläche auszunutzen. Er wandte seine Erkenntnisse als einer der ersten Wissenschaftler auf die Wandlung in elekt-

erste technische Nutzungsformen

Erzeugung von elektrischer Energie

1. Stromerzeugungsanlage

Konzept des Schnellläufers

rische Energie an und errichtete 1891 mit Mitteln seiner Regierung eine erste Versuchsanlage in Askov auf Jütland. Eine von ihm konzipierte Anlage wurde von der Firma *Lykkegaard* als kommerzielles Produkt vermarktet, bis 1908 waren bereits 72 Stück in Dänemark zur Versorgung ländlicher Siedlungen installiert (WIKIPEDIA 2013a, b). Durch die windkraftbetriebenen E-Werke fand in Dänemark als einzigem Land der Erde die Elektrifizierung in ländlichen Gebieten gleichzeitig oder sogar früher statt als in den Städten (IG WINDKRAFT 2013a). Zehn Jahre später waren in Dänemark mit 120 Windenergieanlagen bereits ca. 3 MW Leistung installiert. Leistungsaufnahmen zwischen 10 und 35 kW wurden primär mit umgebauten Windmühlen realisiert, die teilweise bis 1940 in Betrieb waren (LEITLEIN 2007).

Der Bau von Windkraftanlagen bekam durch die Treibstoffverteuerung und -verknappung im Ersten Weltkrieg Aufwind. Nach dem Krieg wurde Treibstoff günstiger und die Technik der Windkraftanlagen blieb für lange Zeit eine Nische der technischen Entwicklung.

1924 schuf der Physiker *Albert Betz* mit der Veröffentlichung seines Buches „Windenergie und ihre Ausnutzung durch Windmühlen“ (BETZ 1926) weitere Grundlagen für die Entwicklung von Windkraftanlagen und begründete damit die moderne physikalische Theorie der WEA. Göttingen wurde mit der Aerodynamischen Versuchsanstalt Göttingen, deren Leiter Betz war, das Zentrum der aerodynamischen Versuche und physikalischer Theorie. Das Betz'sche Gesetz zeigte, dass das physikalische Maximum der Ausnutzung der kinetischen Energie des Windes bei 59,3 % liegt. Seine Theorie zur Formgebung der Flügel ist auch heute noch Grundlage für die Auslegung der Anlagen.

Betz'sches Gesetz

Darrieus-Rotor

Der Franzose *Georges Darrieus* patentierte 1931 in den USA den Darrieus-Rotor, einen Schnellläufer mit vertikaler Achse.

Großwindkraftwerke

In Deutschland gab es in den 1930er-Jahren zahlreiche Ideen und Versuche zu WEA, wie z. B. von *Wilhelm Teubert*, *Ferdinand Porsche*, *Hermann Honnef*, *Franz Kleinhenz* (MAN) und der 1939 in Weimar gegründeten *Ventimotor GmbH*. *Hermann Honnef* verfolgte dabei die kühnsten Ideen von Großwindkraftwerken, mit denen er 1932 an die Öffentlichkeit trat. Er kann damit als Pionier der großen WEA bezeichnet werden. Allerdings war seine vorgeschlagene Doppel-Rotor-Technik ein technischer Irrweg. Es gelang ihm unter anderem, ein Versuchsfeld mit Anlagen bis zu 17 kW errichten zu lassen – in der Nähe von Berlin, in Bötzow auf dem Mathiasberg. 1939 wurde in Deutschland die *Reichsarbeitsgemeinschaft Windkraft (RAW)* gegründet, ein Zusammenschluss von Vertretern aus Industrie, Wissenschaft und Politik. 1943 wurden die WEA-Aktivitäten der *Ventimotor GmbH* zugunsten des Flugzeugbaus weitgehend eingestellt. Der Leiter der Konstruktionsabteilung von Ventimotor und Leiter der aerodynamischen Abteilung der Weimarer Ingenieursschule *Ulrich W. Hütter* wurde später als deutscher „Windenergiepapst“ bekannt (LEITLEIN 2007).

Smith-Putnam-Anlage

Ein weiterer Meilenstein war im Jahr 1941 der Bau der *Smith-Putnam-Anlage* in Vermont mit einer Kapazität von 1,25 MW, deren Planung schon Mitte der 30er-Jahre begonnen hatte. Die Anlage lief mit Unterbrechungen bis 1943, dann brach einer der Flügel und die Anlage wurde 1945 abgerissen. Die für diese Anlagen-größe notwendigen Materialien bzw. Materialqualitäten waren damals noch nicht verfügbar (LEITLEIN 2007).

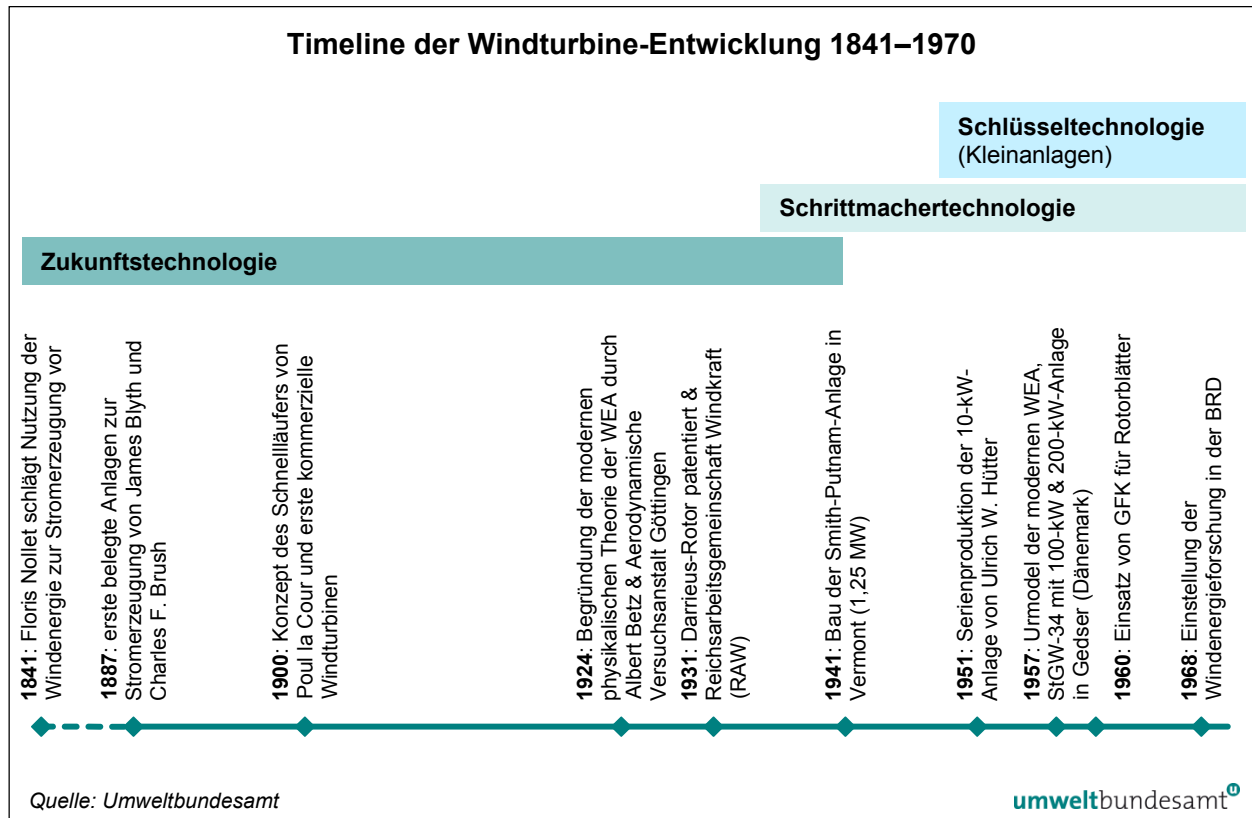


Abbildung 8: Timeline der Windturbine-Entwicklung von 1841 bis zur Einstellung der Windenergieforschung in der damaligen BRD im Jahr 1968 mit einer Abschätzung der Technologiesprünge bzw. Übergänge von der Zukunfts- bis zur Schlüsseltechnologie im Kleinanlagenbereich. Die Überlappungen der einzelnen Technologieklassen werden auf die unterschiedlichen Strategien bezüglich der WEA-Größe zurückgeführt.

Mit der zunehmenden Verfügbarkeit kostengünstiger fossiler Brennstoffe ging die Nutzung der Windenergie in der Mitte des 20. Jahrhunderts stark zurück. Einzelne Forscher beschränkten sich auf die Weiterentwicklung und Optimierung bestehender Technologien und Konzepte. 1951 entwarf der deutsch-österreichische Windkraft-Pionier *Ulrich W. Hütter* eine 10-kW-Anlage mit 11 m Rotordurchmesser, die von der Firma *Allgaier Werke* in Serie hergestellt wurde. An die 200 Stück wurden vor allem in die Länder Südafrika, Argentinien und Indien exportiert. Auf der Schwäbischen Alb bei Geislingen an der Steige errichtete er 1957 das Urmodell aller modernen Windkraftanlagen, die 100-kW-Anlage StGW-34 mit 34 m Rotordurchmesser. Sie erhielt 1969 neue Rotorblätter aus glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK). Dieser Werkstoff wurde bereits seit zehn Jahren beim WEA-Bau eingesetzt, Faserverbund-Bauteile von 17 m Länge waren jedoch für diese Zeit ungewöhnlich (LEITLEIN 2007).

**100-kW-Anlage
StGW-34**

Ebenfalls um 1957 errichtete *Johannes Juul* in Gedser (Dänemark) eine 200-kW-Windkraftanlage. Sie hatte drei Flügel, die aus Stabilitätsgründen untereinander abgespannt waren. Die Anlage lief bis 1966, dann wurde sie aus Kostengründen stillgelegt. Sie wurde nicht abgebaut und wurde 1977 im Rahmen eines Abkommens einer dänischen Institution mit der NASA wieder in Betrieb genommen und diente so mehrere Jahre als Versuchsanlage (WIKIPEDIA 2013a).

**200-kW-
Windkraftanlage**

Verbesserung der Profilgeometrien

Die durch die Luftfahrt vorangetriebene Verbesserung der Profilgeometrien in den 1950er- und 1960er-Jahren auf Gleitzahlen weit über 50 erlaubte extreme Schnellläufer mit nur noch einem einzigen Rotorblatt. Rotoren mit mehr als zwei Blättern galten als rückständig.

Im Jahr 1968 wurde die Windenergieforschung auch in der damaligen Bundesrepublik Deutschland eingestellt, nachdem sich andere Energieträger als kostengünstiger erwiesen. Nach dem Ölembargo der OPEC und der daraus resultierenden ersten Energiekrise 1973/74 wurde die Windenergie ab 1974 als erneuerbare Energiequelle wiederentdeckt und der *Verein für Windenergieforschung* wurde gegründet. Um die Erdölabhängigkeit zu reduzieren, sollten in Dänemark in Zukunft nur noch Atomkraftwerke gebaut werden. Aufgerüttelt durch diese Pläne, begannen engagierte Praktiker, an ihren eigenen Energiekonzepten zu arbeiten. Die Windräder wurden zum Symbol der Anti-Atom-Bewegung und immer mehr Leute wollten mit ihren „Windmühlen“ ein Zeichen setzen. Auf Eigenleistung einer Bürgerinitiative in Dänemark ging im März 1978 die WEA der dänischen *Tvind-Schule*, mit 3 Rotorblättern aus GFK auf der Luvseite des Turms und einer Kapazität von 2 MW in Betrieb. Die WEA, die von Freiwilligen errichtet wurde, war mit Unterbrechungen auch 34 Jahre später noch in Betrieb (IG WINDKRAFT 2013a, LEITLEIN 2007). Die USA legten ein großes Forschungsprogramm auf und ließen durch die NASA verschiedene Konzepte erproben (LEITLEIN 2007). Abbildung 9 zeigt die Timeline der weiteren Technologieentwicklung der Windturbine nach der Wiederaufnahme von Forschungsaktivitäten in den 1970er-Jahren bis 2013:

Windenergiefarmen in den USA

Während man in Deutschland und den USA zunächst auf Großprojekte wie den zweiflügeligen GROWIAN setzte, die sich jedoch aufgrund großer technischer Probleme als Fehlschläge erwiesen, setzte sich Anfang der 1980er-Jahre das dänische Konzept zahlreicher robuster Anlagen kleiner und mittlerer Leistung durch. Der Durchbruch für die dänische Windkrafttechnologie wurde 1985 durch Steuerabschreibungs-Regelungen in Kalifornien eingeleitet (IG WINDKRAFT 2013a). Die in großen Stückzahlen in die USA exportierten Anlagen, wo die ersten Windenergiefarmen geplant und realisiert wurden, hatten drei starre Rotorblätter (Stall-Regelung) und eine ohne Frequenzumrichter ans Netz gekoppelte Asynchronmaschine mit ein oder zwei festen Drehzahlen (Kurzschlussläufer). Die Leistungsbegrenzung erfolgte durch Strömungsabriss. Diese Konstruktionsweise blieb bis Anfang der 1990er-Jahre und Anlagen unterhalb etwa 500 kW vorherrschend (WIKIPEDIA 2013a, b).

Im Jahr 1982 begann in Deutschland die Netzeinspeisung von Windenergie (LEITLEIN 2007). Auch in Österreich weckte die Energiekrise das Interesse an erneuerbaren Energien im Allgemeinen und auch an der Windenergie. Die staatlichen Forschungsanstrengungen konzentrierten sich auf kleine Anlagen. Trotz ansehnlicher technischer Lösungen blieb der rasche Erfolg in Österreich jedoch aus. Die Beruhigung auf dem Energiemarkt und vor allem das Fehlen einer Erprobungs- und Absatzmöglichkeit auf dem Heimmarkt brachten die österreichischen Forschungsanstrengungen in der zweiten Hälfte der 80er-Jahre zum Erliegen (IG WINDKRAFT 2013a).

Windmessungen in Österreich

Lange Zeit wurde angenommen, dass das österreichische Windpotenzial für eine Nutzung durch Windkraftanlagen unzureichend sei. Erst eigene Messungen von Windenergieliebhabern Ende der 1980er-Jahre zeigten die guten Windverhältnisse auf. Viele Standorte in Ostösterreich, speziell im Burgenland, können selbst mit windreichen Gebieten an der dänischen Küste und im Norden Deutschlands konkurrieren (IG WINDKRAFT 2013a).

Auf dem ehemaligen GROWIAN-Versuchsgelände entstand ab 1987 der erste Windpark Deutschlands mit 30 kleinen Anlagen nach dänischem Vorbild, der Windenergiepark Westküste. Anfang 1991 wurde dieser damals größte Windpark Europas ans Stromnetz angeschlossen und lieferte pro Jahr rund 19 Mio. kWh Strom (HARENBERG 1991). Die verwendeten kommerziellen Windkraftanlagen waren mit Netzumrichter drehzahlvariabel und hatten vor dem Turm laufende Dreiblattrotoren mit Blattwinkelverstellung. Mitte der 1980er-Jahre wird bei Ebeltoft in Dänemark der erste Prototyp eines Offshore-Windenergieparks mit einer Kapazität von 880 kW in Betrieb genommen. Das Projekt wurde von der dänischen Regierung gefördert. Zu dieser Zeit wird auch die Firma *NORDEX AG* gegründet (LEITLEIN 2007).

1. Windpark Deutschlands

Im Jahr 1990 wird die Forschung am Darrieuskonzept (WEA mit zwei bis drei Flügel, bei sich der Stromgenerator am unteren, leicht zugänglichen Ende der vertikalen Drehachse befindet) vom *Daimler-Benz-Konzern* eingestellt, da die Rotoren in Folge technischer Probleme kein befriedigendes Betriebsergebnis bringen. Zur gleichen Zeit geht in Nordersund ein erster Offshore-WEA-Park ans Netz (LEITLEIN 2007).

1. Offshore-Park

In den 1970er-Jahren gab es in den USA, wie in Deutschland, eine breite Förderung der Windenergie, die sich allerdings nach der Investitionssumme richtete, womit der Anreiz zur Errichtung ertragreicher WEAs fehlte. 1991 kam in Deutschland die breite Förderung der Windenergienutzung, die mit dem Strom-einspeisungsgesetz auf den Ertrag ausgerichtet war, indem die Stromnetz-Betreiber zur Abnahme des erzeugten Stroms zu definierten Preisen verpflichtet wurden. Weil sich Unterschiede im Ertrag nun deutlicher bemerkbar machten, wurden nicht nur mehr, sondern auch bessere Anlagen errichtet. Investoren achteten darauf, dass Versprechungen der Hersteller über die Leistung in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit und über geringe Ausfallzeiten vertraglich festgeschrieben wurden. Das Gesetz wurde in den folgenden Jahren mehrmals abgeändert und galt als ein wichtiger „Investitionsmotor“ und Innovationstreiber. Diese politischen Rahmenbedingungen trugen mitunter dazu bei, dass die deutschen WEA-Hersteller auf diesem Gebiet des Maschinenbaus die Technologie- und Weltmarktführerschaft erlangten. Den zügigen WEA-Ausbau verstärkte im Jahr 2001 das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) noch einmal, sodass gegen Ende des Jahres 2003 etwa zwei Drittel der europäischen Windkraftanlagen in Deutschland installiert waren. Auch in anderen Staaten führten Förderungen zu jährlichen Wachstumsraten von über 40 % in der WEA-Branche (IG Windkraft 2013a). Neben geförderten Investitionen in Windkraftanlagen oder Einspeisevergütungen existieren weltweit noch weitere Fördermechanismen wie z. B. Mindestquoten für Strom aus regenerativen Quellen, Steuerergünstigungen und dergleichen.

Förderung der Windenergienutzung

In Österreich kam es 1994 zu einer ersten Förderregelung für Windkraft, in deren Folge im Marchfeld die erste größere Windkraftanlage Österreichs mit einer Leistung von 150 kW errichtet wurde. Ein Jahr später wurde die erste Windkraftanlage mit Bürgerbeteiligung in Michelbach errichtet, die von mehr als hundert Ökostrom-Befürwortern gemeinsam finanziert wurde (KHAMMAS 2013b). Die österreichische Windkraft und Bürgerbeteiligungen sind seit dieser Zeit sehr eng miteinander verbunden. Bereits 1996 hatten die Windkraftanlagen eine Leistung von einem halben MW erreicht. Die Hartlauer-Anlagen in Vösendorf wurden auch in diesem Jahr errichtet (IG Windkraft 2013a).

erste Windkraftanlagen in Österreich

**gesetzliche
Auswirkungen in
Österreich**

Mit dem Elektrizitätsgesetz EIWOG wurde 1998 in Österreich erstmals eine Abnahmepflicht zu festen Tarifen (Einspeisetarifen) für Ökostromanlagen geschaffen, welches im Ökostromgesetz 2002 weiter ausgebaut wurde. Das Gesetz löste einen Bauboom aus. Im Jahr 2006 erfolgten durch eine Novelle des Ökostromgesetzes wieder stark einschränkende Maßnahmen. Einspeisetarife werden seither nur noch für jene Anlagenbetreiber vergeben, welche einen Vertrag mit der Ökostromabwicklungsstelle OeMAG erhalten. Es ist ein jährliches Kontingent an Fördermitteln für Neuanlagen vorhanden, nur solange dieses nicht erschöpft ist, gibt die OeMAG Verträge aus. Diese Regelung führte in Kombination mit äußerst niedrigen Einspeisetarifen dazu, dass in den Jahren 2007 bis 2009 bis auf wenige Ausnahmen fast keine Windkraftanlagen in Österreich errichtet wurden. Erst die im Oktober 2009 in Kraft getretenen Verbesserungen des Ökostromgesetzes sowie der für 2010 verordnete Einspeisetarif in Höhe von 9,7 ct/kWh brachten den Windkraftausbau in Österreich wieder in Gang. Aber erst mit dem Ökostromgesetz 2012 hat die zweite große Ausbaustufe der Windkraft in Österreich begonnen (IG Windkraft 2013a).

**Forschungs-
einrichtungen**

Seit Windkraftanlagen in größerer Zahl hergestellt wurden, ist zudem auch die staatliche Forschung in Universitäten und außeruniversitären Forschungseinrichtungen verstärkt worden. In Deutschland wurde 1990 beispielsweise das mittlerweile privatisierte *Deutsche Windenergie-Institut (DEWI)* in Wilhelmshaven gegründet. Das *Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik (IWES)* befasst sich mit anwendungsorientierter Forschung; es ist 2009 aus dem ehemaligen Fraunhofer-Center für Windenergie und Meerestechnik CWMT in Bremerhaven sowie dem Institut für Solare Energieversorgungstechnik (ISET) in Kassel hervorgegangen.

**Nennleistung
moderner
Großturbinen**

Inzwischen haben Firmen die Marktführerschaft in der Windenergiebranche übernommen, deren WEA zuverlässiger als die Forschungsanlagen liefern. 1993 startete die EU mit einer Studie über die zwölf marktgängigen Prototypen der MW-Klasse (LEITLEIN 2007). Auf Basis dieser nach heutigen Maßstäben kleinen Anlagen fand in den 1990er- und 2000er-Jahren die weitere Entwicklung hin zu den modernen Großturbinen statt. Die Nennleistung der 1990 in Deutschland neu installierten Windkraftanlagen betrug im Durchschnitt 164 kW. Die mittlere Nennleistung der im Jahr 2000 aufgestellten WKA überschritt erstmalig die Marke von 1 MW, 2009 die Marke von 2 MW. Im Jahr 2011 lag sie bei über 2,2 MW, wobei Anlagen mit einer installierten Leistung von 2,1 bis 2,9 MW mit 54 % aller Anlagen dominierten. Ein weiterer Anstieg der Nennleistung ist aufgrund der Einführung der 3-MW-Klasse durch die meisten Hersteller von Onshore-Windkraftanlagen sowie dem Ausbau der Offshore-Windenergie, wo hauptsächlich Anlagen mit einer Nennleistung zwischen 3,6 und 6 MW zum Einsatz kommen, absehbar. Entsprechend stieg der Rotordurchmesser. Noch bis Ende der 1990er-Jahre lag er meist unter 50 m, nach etwa 2003 meist zwischen 60 und 90 m.

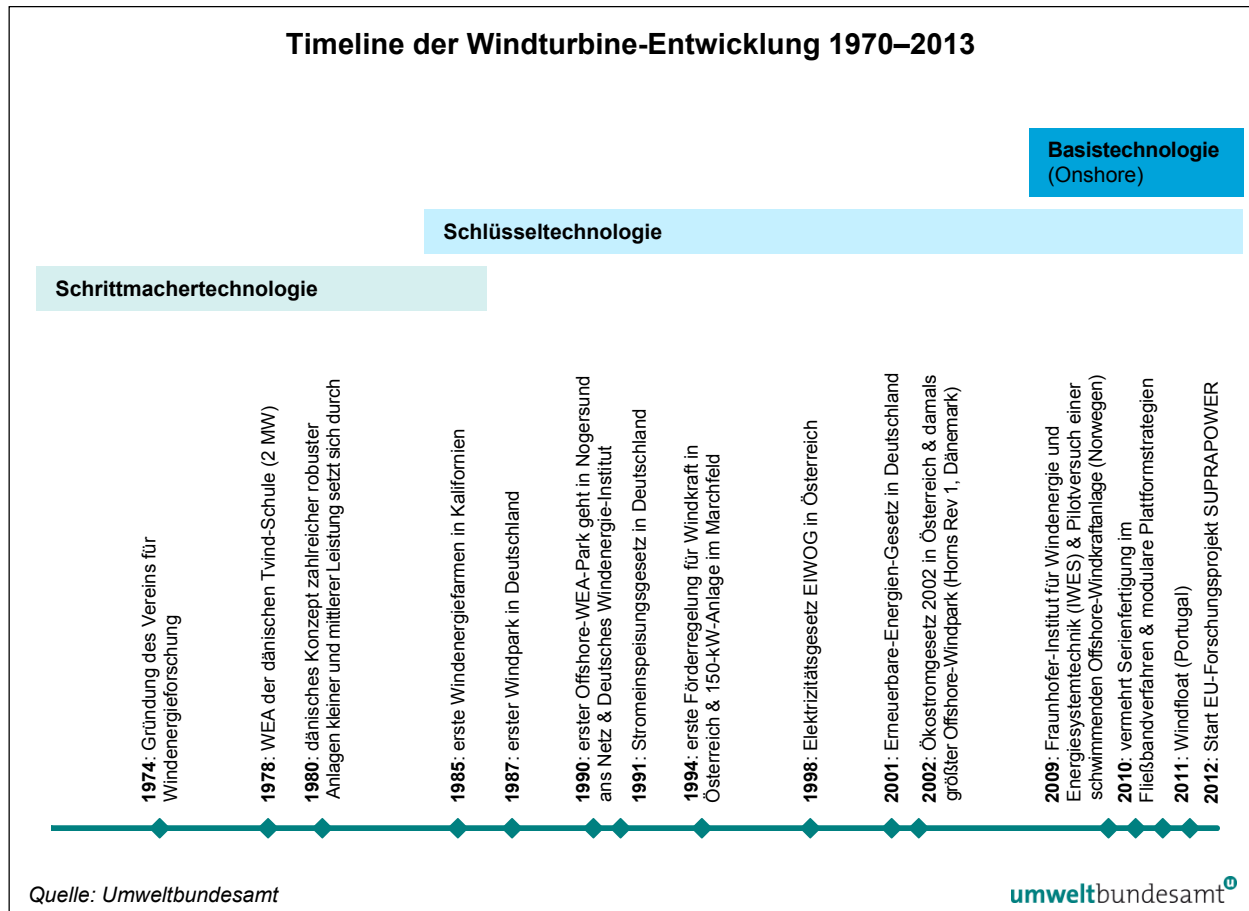


Abbildung 9: Timeline der Windturbine-Entwicklung nach der Wiederaufnahme von Forschungsaktivitäten in den 1970er-Jahren bis 2013 mit einer Abschätzung der Technologiesprünge bzw. Übergänge von der Schrittmacher- bis zur Basistechnologie im Onshore-Bereich.

Zwischen der Effizienz einer Anlage und deren Größe besteht ein direkter Zusammenhang. Grundsätzlich gilt: je größer und höher die Turbine, desto höher ist ihre Leistungsfähigkeit. Somit kann die „Höhensteigerung“ der Triebswerkgondel von einem Meter eine zusätzliche jährliche Leistung von 0,5–1 % erbringen. Folglich ist auch in Zukunft damit zu rechnen, dass die durchschnittliche Anlagengröße weiter zunehmen wird, wenn auch etwas moderater als in den letzten Jahren (DCTI 2009).

Technologische Weiterentwicklungen

Mit steigender Anlagengröße wurde auch die Windenergietechnik weiterentwickelt bzw. wird auch in Zukunft eine weitere Optimierung der Turbinentechnologie von großer Bedeutung sein (z. B. Verbesserung der Aerodynamik der Rotorblätter). Die maximale Leistung großer Anlagen im MW-Bereich erfolgt durch Drehen (Torsion) der Rotorblätter (Pitchen), was eine variable Drehzahl zur Folge hat. Der Generator erzeugt i.d.R. Gleichstrom, womit man sowohl von der Drehzahl als auch von der Netzfrequenz (50 Hz) unabhängig ist. Durch die Pitch-Mechanik kann für jede Windgeschwindigkeit die jeweils mechanisch optimale Drehzahl mit dem größten Wirkungsgrad eingeregelt werden und der lärmintensive Stalleffekt unterhalb der Nennleistung tritt nicht mehr auf (WIKIPEDIA 2013a).

Pitch-Mechanik

Rotordurchmesser Seit 2008 kommen oft auch Windkraftanlagen mit Rotordurchmessern über 90 m zum Einsatz, was 2012 bereits der Durchschnittswert der in Deutschland neu installierten Anlagen ist. Analog stiegen die durchschnittliche Nabenhöhe und Nennleistung auf 110 m bzw. 2,4 MW sowie der Rotordurchmesser auf 89 m. Moderne Schwachwindanlagen weisen mittlerweile Rotordurchmesser bis etwa 130 m auf, die Nabenhöhen können dabei bis zu 150 m erreichen, wobei die Gesamthöhe der Anlagen bisher 200 m in aller Regel nicht überschreitet. Im Offshore-Bereich sind Anlagen mit Rotordurchmessern von über 170 m im Testbetrieb (WIKIPEDIA 2013b).

Serienfertigung im Fließbandverfahren Windkraftanlagen wurde bis etwa 2010 stationär per Dockmontage gefertigt; seitdem setzen Hersteller aus Kostengründen vermehrt auf Serienfertigung im Fließbandverfahren und auf eine Industrialisierung und Standardisierung der Produkte. Parallel dazu setzen sich – wie im Automobilbau seit Langem Standard – modulare Plattformstrategien durch, bei denen auf der gleichen technischen Basis Anlagentypen für verschiedene Windklassen entwickelt werden; z. B. durch unterschiedliche Rotorgrößen bei weitgehend identischem Triebstrang oder unterschiedlichen Generatorkonzepten bei gleichem Rotordurchmesser (DE VRIES 2013).

Repowering Nicht alle neu installierten Anlagen stehen an neuen Standorten. Teilweise werden alte Anlagen abgebaut und durch leistungsstärkere ersetzt, was als Repowering bezeichnet wird. Die übliche Leistung einer Windkraftanlage im Jahr 1995 betrug rund 0,5 MW, wohingegen im Jahr 2007 aufgrund des technologischen Fortschritts die durchschnittliche Leistung von Onshore-Anlagen bereits rund 2 MW betrug (DCTI 2009). Innerhalb von Windparks sinkt dabei in der Regel die Anzahl der Anlagen, während zugleich installierte Leistung und Ertrag deutlich steigen. Diese Entwicklung wird beispielsweise in Deutschland auch durch die geltenden politischen Rahmenbedingungen begründet. Neben der allgemeinen Förderung von Onshore- und Offshore-Strom sieht das deutsche Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) auch für das Repowering explizit eine Bonus-Leistung vor. Voraussetzung für die Zahlung des Bonus ist, dass die neue Anlage im gleichen oder im benachbarten Landkreis neu gebaut wird, und dass die Altanlage mindestens zehn Jahre alt ist. Zudem muss die neue Anlage mindestens eine doppelt so hohe Leistung aufweisen, darf jedoch die fünffache Leistung der Altanlage nicht überschreiten (DCTI 2009).

Windenergienutzung auf dem Meer Großes Potenzial wird der Windenergienutzung auf dem Meer zugeschrieben, wo der Wind beständiger und stärker als auf dem Festland weht. Damit ergeben sich Standortvorteile, aber auch größere Herausforderungen, wie der erhöhte Aufwand für die komplexe Installation auf hoher See, die Verlegung geeigneter Stromleitungen sowie die erforderliche robuste Technik und korrosionsbeständige Werkstoffe. Im Dezember 2002 ging in Dänemark mit *Horns Rev 1* der damals größte Offshore-Windpark der Welt ans Netz: Dort stehen in der Nordsee auf 20 km² 80 Windräder in zehn Reihen mit je 8 Windrädern. Sie erzeugen jährlich 600 GWh Energie, genug für 150.000 dänische Haushalte (WIKIPEDIA 2013a). Deutschland bemühte sich zur selben Zeit mit Multimegawattanlagen auf dem Gebiet der Offshore-Windparks Fuß zu fassen und gründete eine Offshore-Stiftung zum Testen von zwölf 5-MW-Anlagen in der Nordsee.

In der deutschen Ausschließlichen Wirtschaftszone (EEZ) befindet sich in der Nordsee seit Ende 2003 die Forschungsplattform *FINO 1*, auf der u. a. die Bedingungen für Windkraftanlagen im Meer untersucht werden. In der Ostsee wurde zu diesem Zweck die Plattform *FINO 2* errichtet. In der Nordsee ist die dritte Forschungsplattform *FINO 3* in Bau (WIKIPEDIA 2013a).

Am 20. Oktober 2004 hat eine 108 m hohe *E-112-Testanlage* mit 4,5 MW Leistung in der Ems in unmittelbarer Nähe zum Ufer das erste Mal Strom ins öffentliche Netz eingespeist. Dieser Anlagentyp besaß zu diesem Zeitpunkt den größten Rotordurchmesser und leistungsstärksten Generator (WIKIPEDIA 2013a).

Im Sommer 2008 begann bei der Forschungsplattform *FINO 1* der Bau des ersten deutschen Offshore-Windparks „alpha ventus“. Am 27. April 2010 fand die offizielle Inbetriebnahme mit einer vorläufig installierten Gesamtleistung von 60 MW statt (12 Anlagen à 5 MW).² Seit September 2009 wird in einem Pilotversuch eine schwimmende Offshore-Windkraftanlage ca. 10 km vor der norwegischen Küste getestet (FAIRLEY 2008). Seit 2011 wird vor Portugal Windfloat mit einer 2 MW Windkraftanlage von *Vestas* getestet (VESTAS 2013). Die Europäische Union fördert seit Dezember 2012 bis Ende 2016 das Forschungsprojekt *SUPRAPOWER* (SUPERconducting, Reliable, lightweight, And more POWERful offshore wind turbine). Das Ziel sind 10-MW-Offshore-Windkraftanlagen mit Supraleiter-Generatoren (IWR 2013).

Nachfrageüberhang und Wertschöpfungsstufen der Windenergie

Die Wertschöpfungsstufen der Windenergie verdienen im Zusammenhang mit Forschung und Entwicklung sowie den betreffenden Innovationsprozessen besondere Beachtung. In den 2000er-Jahren war die Windindustrie vorwiegend von einem erheblichen Nachfrageüberhang geprägt. Im Allgemeinen war das Zusammenspiel zweier wesentlicher Faktoren für diese Entwicklung verantwortlich: Zum einen konnten einige Komponentenhersteller nicht mit der Geschwindigkeit des technologischen Fortschritts mithalten. So sind in manchen Komponentenzweigen Engpässe entstanden, die wiederum die Angebotsseite negativ beeinflusst haben. In diesem Zusammenhang stellte vor allem die Lieferung von Getrieben für größere Windkraftanlagen eine große Herausforderung dar. Zum anderen wurde, während das Angebot begrenzt war, die Nachfrage durch eine Vielzahl von Förderprogrammen stimuliert (DCTI 2009).

Um dieser Situation gerecht zu werden, haben einige Turbinenhersteller wie etwa *Suzlon* oder *Gamesa* zunehmend auf die Strategie der vertikalen Integration gesetzt, indem sie Unternehmen im Upstream-Bereich übernommen und in ihren Herstellungsprozess eingegliedert haben (DCTI 2009). Zur gleichen Zeit konnte beobachtet werden, dass Turbinenhersteller mit Akteuren aus dem Downstream-Bereich der Wertschöpfungskette zunehmend Kooperationsprojekte eingegangen sind. Für beide Seiten gibt es in diesem Zusammenhang auch heute gute Gründe für den Aufbau langfristiger Kooperationen: Einerseits haben etwa WEA-Betreiber einen höheren Einfluss auf Arbeitsabläufe im Downstream-Bereich und können Erfahrungswerte für Abläufe künftiger Projekte sammeln, da sie verstärkt mit einzelnen Turbinenherstellern kooperieren. Andererseits erhöhen derartige Partnerschaften sowohl den Planungshorizont der Turbinenhersteller als auch die Kontinuität der Erträge durch Serviceleistungen (DCTI 2009). Obwohl die Wertschöpfungskette mit allen Einflussfaktoren nur schwer in vollem Umfang abbildbar ist, da jede einzelne Stufe ihrerseits einen komplexen Aufbau aufzeigt und sich die Wertschöpfungskette z. B. für onshore und offshore deutlich unterscheidet, werden die beschriebenen Tendenzen und Zusammenhänge in Abbildung 10 vereinfacht dargestellt:

Strategie der vertikalen Integration

² Tagesschau.de: Erster Windpark vor deutscher Küste geht in Betrieb. Bericht vom 27. April 2010

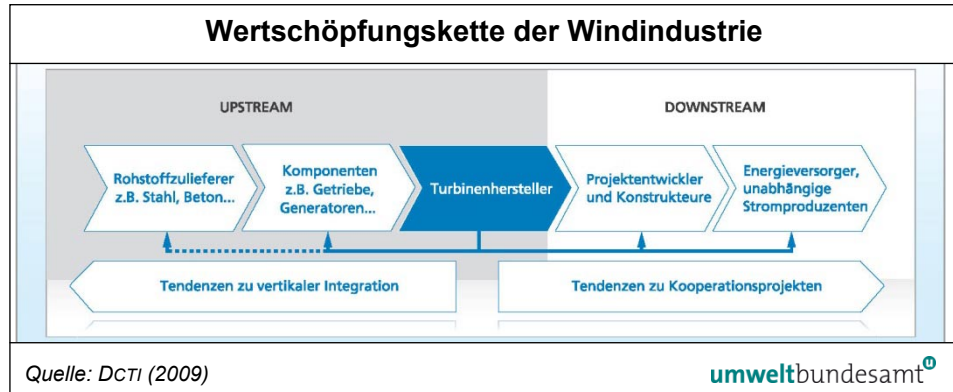


Abbildung 10: Wertschöpfungskette der Windindustrie.

rasantes Wachstum der Windindustrie

Der Windsektor wächst sowohl aus monetärer Sicht als auch bezogen auf die installierte Gesamtleistung stetig und in einem rasanten Tempo (siehe Abbildung 11). Betreffend die jährlich neu installierte Leistung kann beobachtet werden, dass sich der Schwerpunkt immer mehr nach Asien verlagert. Diese Entwicklung wird in Abbildung 12 für die Periode 2004 bis 2008 veranschaulicht. Während bis 2007 Windanlagen vorwiegend in Europa neu installiert wurden (2004: 70 % Marktanteil), ist 2008 die Verteilung der Marktanteile auf die Regionen Europa, Nordamerika und Asien deutlich ausgeglichener. Hinsichtlich der installierten Gesamtleistung ist Europa jedoch weiterhin führend und wird wohl auch in Zukunft ein wichtiger Standort für Windkraft bleiben (DCTI 2009).

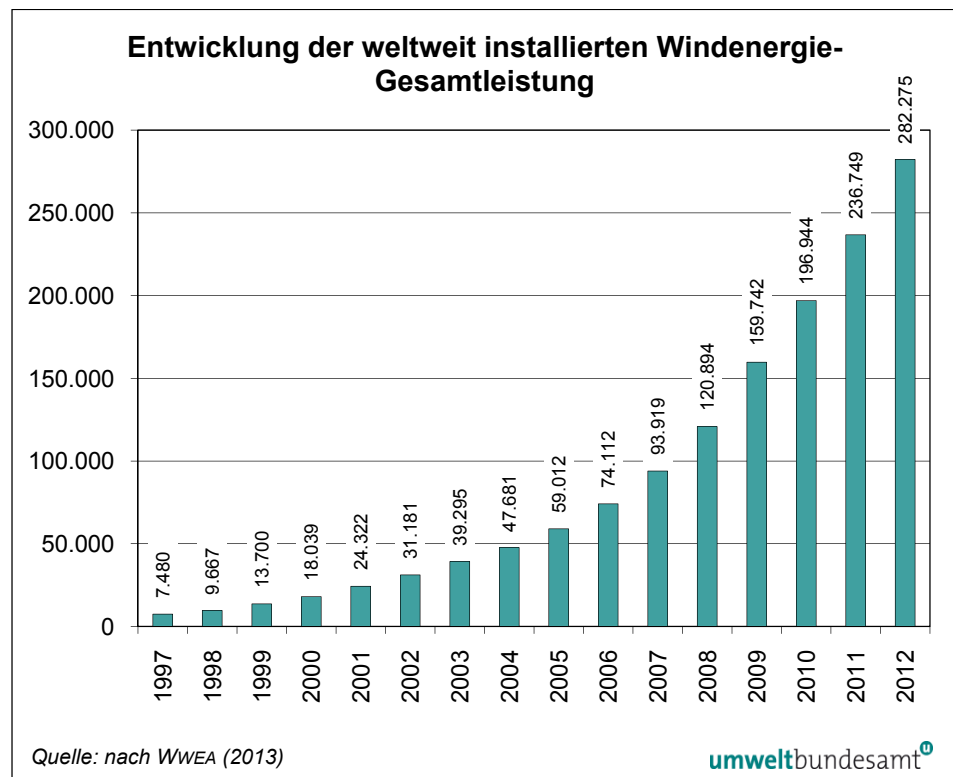


Abbildung 11: Entwicklung der weltweit installierten Windenergie-Gesamtleistung.

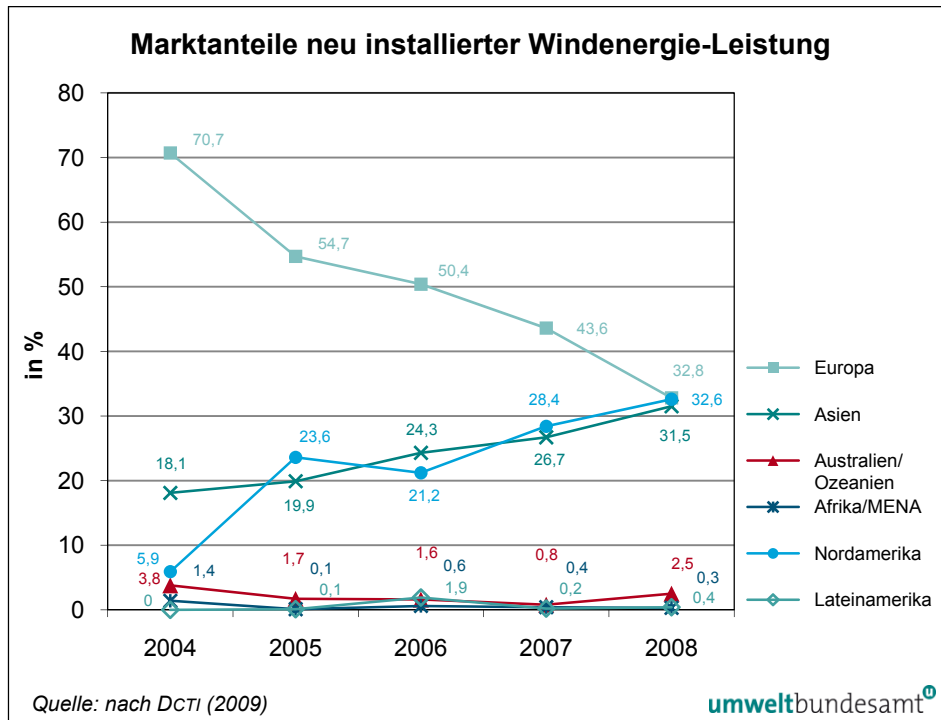


Abbildung 12: Geschätzte neu installierte Kapazität in den Weltregionen von 2004 bis 2008.

Rahmenbedingungen der Marktentwicklung

Die Marktentwicklung der Windenergie verlief in den einzelnen Staaten, wie USA, Deutschland, Spanien, Dänemark, China, Indien etc., aufgrund der verschiedenen geografischen, meteorologischen und technologischen Voraussetzungen, politischen Rahmenbedingungen und nationalen Förderinstrumente sowie des mehr oder weniger starken Einflusses der Wirtschaftskrise Ende der 2000er-Jahre sehr unterschiedlich. Insofern lassen sich **generell** für WEA **keine Zeitpunkte der Technologiesprünge** ableiten. Während die WEA-Technologie in Europa in den meisten Staaten mitunter aufgrund der hohen Ausschöpfung des vorhandenen Windpotenzials (insbesondere im Onshore-Bereich) bereits zu den **Basistechnologien** gezählt werden können, sind sie in Regionen wie Australien und teilweise auch Asien den **Schlüsseltechnologien** zuzurechnen (siehe Abbildung 13). In den bereits etablierten europäischen Märkten, wie beispielsweise Deutschland, liegt das zukünftige Potenzial in der Offshore-Technologie. Ab 2013 wird der Bau von großen Offshore-Windkraftanlagen in der Nord- und Ostsee einen wesentlichen Teil des Wachstums ausmachen, während Onshore-Anlagen verhältnismäßig an Bedeutung verlieren werden (DCTI 2009).

national unterschiedlicher Technologie-Status

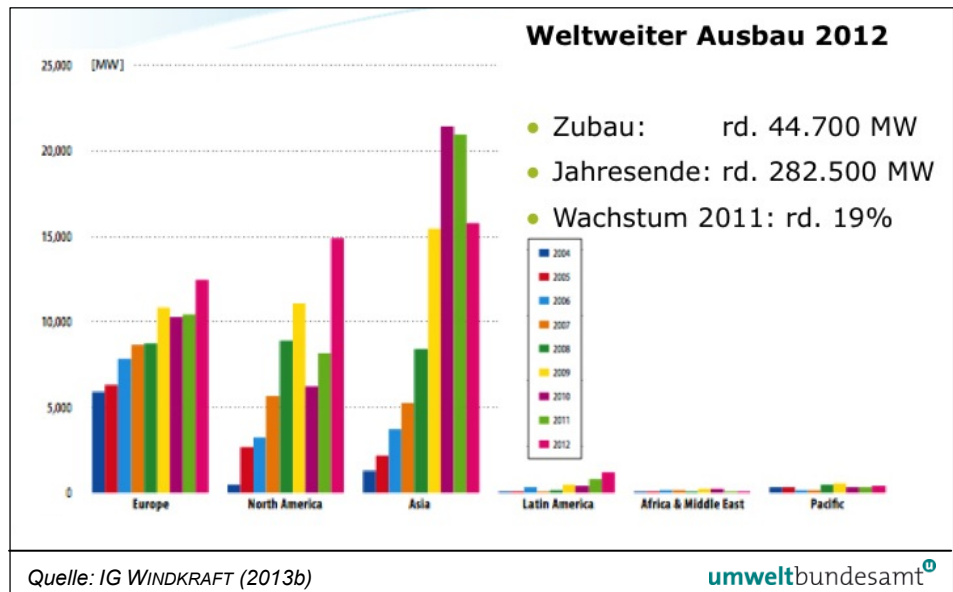


Abbildung 13: Weltweiter Ausbau der Windkraft ab dem Jahr 2004.

Ausbauboom ab 2012

In Österreich wurden 2012 27 % der bestehenden Windkraftleistung neu zugebaut. Mit 295,65 MW Windkraftleistung war dieses Jahr das stärkste Ausbaujahr aller Zeiten. Damit lieferten Ende 2012 763 Windräder mit einer Leistung von 1.378 MW Strom in das Netz (siehe Abbildung 14). Im Jahr 2013 wird sich der neue Ausbauboom der Windkraft noch steigern. Mehr als 150 Windkraftanlagen mit rund 420 MW Leistung sollen errichtet werden. Das Ökostromgesetz 2012 war die entscheidende Grundlage für diese Entwicklung (IG WINDKRAFT 2013b).

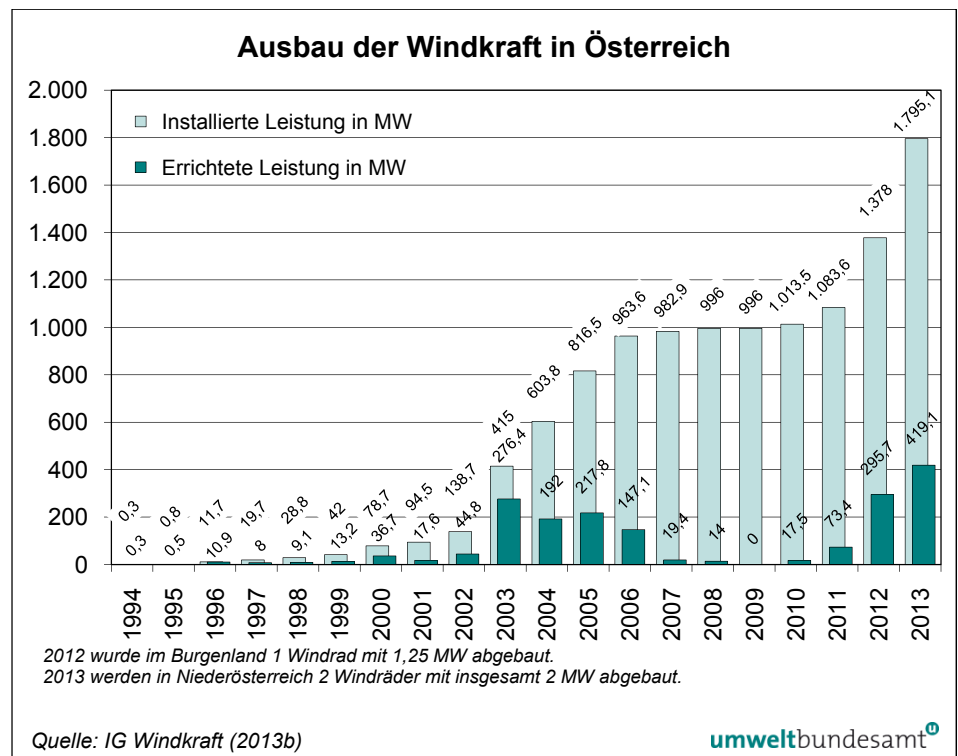


Abbildung 14: Ausbau der Windkraft in Österreich ab dem Jahr 1994.

Treibende bzw. hemmende Faktoren für die Entwicklung der Windindustrie

Die Entwicklung der Windindustrie in den einzelnen Staaten wird auch in Zukunft vom Zusammenspiel unterschiedlicher Treiber und Hindernisse bestimmt werden. Abhängig davon, ob Markttreiber oder -hindernisse überwiegen, wird sich die Windkraft mehr oder weniger als führende erneuerbare Energie in den einzelnen Ländern durchsetzen und eine konkurrenzfähige Alternative zu konventionellen Kraftwerken darstellen (DCTI 2009).

Insgesamt lassen sich zwei wesentliche Faktoren identifizieren, die den Erfolg der Windkraft beeinflussen. Eine übergeordnete Rolle spielt die nationale Umweltpolitik d. h. verbindliche Ziele und Rahmenbedingungen, die von den einzelnen Regierungen definiert werden. Bisher haben sich festgelegte Einspeisetarife als die wirksamste Fördermaßnahme erwiesen. Im Jahr 2008 wurden ca. 52 % der weltweit installierten Anlagen durch Einspeisetarife unterstützt. Ferner ist auch die Geschwindigkeit des technologischen Fortschritts ein wichtiger Erfolgsfaktor für die Durchsetzung von Windkraftanlagen. Der Fortschritt hängt u. a. mit der Bereitstellung von Fördergeld für Forschung und Entwicklung zusammen. Durch neue Technologien können zunehmend sowohl Kosten- als auch Effizienzfaktoren verbessert werden, wodurch die Rentabilität und Wettbewerbsfähigkeit von Windkraftanlagen gesteigert wird. Kosten könnten in Zukunft vor allem durch die zunehmende Verwendung von Beton-Stahl-Mischungen anstelle der Verwendung von reinem Stahl gesenkt werden (DCTI 2009).

Neben Kostensenkungen und effizienteren Windturbinen wird in Zukunft auch die Verbesserung von Transportmöglichkeiten stärker an Bedeutung gewinnen. Ein Beispiel hierzu liefern die Rotoren des neuen Enercon E-126, die zweiteilig sind und sich dadurch besser transportieren lassen. Auf diese Weise ist die Lieferung zum Standort mit weniger Aufwand verbunden. Des Weiteren wird der Fokus zunehmend darauf gerichtet, Turbinen herzustellen, die besonderen Umweltbedingungen standhalten können, wie etwa starken Temperaturschwankungen zwischen Sommer und Winter oder harten Witterungsverhältnissen in der Wüste (DCTI 2009).

Neben Treibern gibt es auch Hindernisse, die die Durchsetzung von Windkraftanlagen erschweren. Insbesondere in Entwicklungsländern spielen technische und finanzielle Hürden eine entscheidende Rolle, aber auch Umweltauflagen können Investoren davon abhalten, in den Windsektor einzusteigen. Neben erschweren Transportmöglichkeiten zählen auch schlechte Netzqualität, Spannungsschwankungen und ein erschwerter Netzanschluss zu den technischen Hürden, wodurch die Investition in WEA aufgrund des erhöhten Aufwands aus Sicht von Investoren an Lukrativität verlieren kann. Zudem liegen vor allem in Entwicklungsländern oftmals keine oder unzuverlässige windtechnische Daten vor, die es nicht ermöglichen, eine zuverlässige Renditekalkulation durchzuführen. Nicht zuletzt können Bürgerinitiativen, die aus ökologischen Überlegungen oder wegen befürchteter Lärmbelästigung gegen die Errichtung von Windkraftanlagen sind, ein Hindernis darstellen (DCTI 2009).

Umweltpolitik & Forschungsförderung

Transportmöglichkeit & Klima

hemmende Faktoren

Neue Entwicklungen

„flying electric generator“

Aktuelle Entwicklungen zielen auch darauf ab, das Speicher- und Transportproblem für regenerative Energien wie Windenergie zu überwinden (z. B. mittels Smart Grids, Pumpspeicherwerke, Wasserelektrolyse mit anschließender Methanisierung des CO₂ von Biogasanlagen etc.). Darüber hinaus wird in der Branche auch nach vollkommen neuen Konzepten gesucht. Eine solche Entwicklung ist z. B. der „flying electric generator“ von der Firma *Sky Wind Power*. Die Bewegung der Rotoren sorgt einerseits dafür, dass die Anlage in der Luft schwebt und andererseits für die Erzeugung von Strom. Bei Nachlassen der Windgeschwindigkeit schaltet sich ein Generator ein, der die Windkraftanlage weiterhin in der Luft hält (DCTI 2009).

Technologie-Roadmap

4 Themenfelder für F&E

Im Jahr 2006 startete die europäische Windenergie-Branche die *European Wind Energy Technology Platform* (TPWind), deren Aufgabe es ist, neben neuer und bestehender Forschung und Entwicklung Bereiche für verstärkte Innovation zu identifizieren und zu priorisieren. Das vorrangige Ziel der Plattform ist es, die sozialen, ökologischen und technologischen Kosten der Windenergie zu reduzieren. 2008 veröffentlichte TPWind im Rahmen ihrer europäischen Technologie-Roadmap eine Strategische Forschungsagenda zur Entwicklung des Windenergiemarktes (TPWIND 2008). Basierend auf der Vision, bis zum Jahr 2020 mit einer installierten Gesamtleistung von 180 GW 12–14 % des Stroms in der EU abzudecken und bis zum Jahr 2030 diesen Anteil mit 300 GW installierter Leistung auf 25 % des Stromverbrauchs zu erhöhen, hat die TPWind vier Themenfelder der Forschung und Entwicklung identifiziert, um dies zu erzielen: Windressourcen, Design, Windverhältnisse und Prognose, die Windkraftanlage selbst, die Integration von Windenergie in Stromverteilnetze sowie die weitere Entwicklung und der Betrieb von Offshore-Windenergie.

Themenfeld Windkraftanlage

kosteneffiziente Windturbinen

Das Ziel der Forschung und Entwicklung, die von TPWind zum Themenfeld Windkraftanlage priorisiert wurde, ist es sicherzustellen, dass bis 2030 die Windenergie die kostengünstigste Energiequelle auf dem Markt ist. Dies kann nur durch die Entwicklung von Technologien erreicht werden, die es der europäischen Industrie ermöglichen, sehr kosteneffiziente Windturbinen zu liefern. TPWind legt dabei seinen Fokus auf die Aspekte der WEA-Technologie, sowohl offshore als auch onshore, die das Potenzial haben, die Wettbewerbsfähigkeit der Windenergie zu erhöhen und die Kosten der Stromerzeugung über die gesamte Lebensdauer der Windkraftanlagen zu minimieren.

Forschungsschwerpunkte

Dabei sollten die Forschungsschwerpunkte insbesondere auf die folgenden Bereiche ausgerichtet werden: Energiekosten, spezifische Erstinvestitions-, Betriebs- und Wartungskosten, die Energieeffizienz der gesamten Windkraftanlage sowie die Verfügbarkeit in Bezug auf Zuverlässigkeit, Zugänglichkeit und Lebensdauer. Der Entsorgungsaufwand sollte ebenfalls berücksichtigt werden (TPWIND 2008).

Die identifizierten Forschungsthemen werden nach den technischen Disziplinen und branchenübergreifenden Kriterien kategorisiert, auf denen das integrale Design und der WEA-Betrieb basieren. Als Forschungsschwerpunkte werden von TPWind angegeben: WEA als Strömungsapparat; WEA als mechanische Struktur/Materialien; WEA als Kraftwerk; WEA als Betriebsführungssystem; innovative Konzepte und integriertes Design; Betrieb und Wartung; Standards.

4.3 Fallbeispiel Akkumulator/Sekundärzelle (Li-Ionen-Akku)

Zur Untersuchung des Zusammenhanges zwischen Forschung und Technologiesprüngen in der Innovationskette wird als drittes Fallbeispiel die Technologie der Energiespeicherung mittels Akkumulatoren dargestellt, mit dem Fokus auf Lithium-Ionen-Batterien. Ein Akkumulator (Akku) ist ein wiederaufladbarer Speicher für elektrische Energie auf elektrochemischer Basis und damit eine Ausführungsform der galvanischen Zelle, einer Vorrichtung zur spontanen Umwandlung von chemischer in elektrische Energie.

Definition

Technologische Komponenten und Kenngrößen galvanischer Zellen

Galvanische Zellen oder Elemente dienen als Gleichspannungsquellen und bestehen aus einer Kombination von zwei verschiedenen Elektroden und einem Elektrolyten. Ihre Eigenschaften sind primär durch die eingeprägte Spannung und ihre Kapazität, die in der galvanischen Zelle gespeicherte elektrische Ladung (Ladungsmenge) bzw. das Produkt aus Entladungsstromstärke mal Zeit (meist angegeben in Amperestunden, Ah) gekennzeichnet.

elektrische Ladung

Die angegebene Nennkapazität beim Akku bezieht sich immer auf einen bestimmten Entladestrom und nimmt insbesondere zu höheren Entladeströmen kräftig ab. Die Leistung einer Zelle ist die Menge an elektrischer Energie, die pro Zeiteinheit entnommen werden kann. Sie wird in der Regel in Watt (W) angegeben und ist das Produkt aus Entladestrom und Entladespannung.

Nennkapazität & Leistung

Eine weitere typische Kenngröße der galvanischen Zelle bzw. Batterie ist der Energieinhalt (elektrische Arbeit bzw. die Energie pro Masse oder pro Volumen, z. B. angegeben in Wh/kg oder Wh/l).

Energieinhalt

Alle galvanischen Zellen unterliegen bei Lagerung einer Selbstentladung. Die Geschwindigkeit der Selbstentladung hängt unter anderem vom Batterietyp und der Temperatur ab. Je niedriger die Lagertemperatur, desto geringer ist die Selbstentladung. Die monatliche Selbstentladung eines Li-Ionen-Akkus liegt bei einem Ladezustand von 60 % und 20 °C bei < 2 % (WIKIPEDIA 2013c).

Selbstentladung

Funktionsweise galvanischer Zellen

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. Die Spannung des elektrischen Stroms lässt sich durch die Nernst-Gleichung berechnen. Sie hängt von der Art des Metalls (elektrochemische Spannungsreihe), der Konzentration in der Lösung der jeweiligen Halbzelle sowie der Temperatur ab.

Redoxreaktion

Galvanische Zellen zur Speicherung elektrischer Energie werden in zwei Gruppen unterteilt (WIKIPEDIA 2013c):

Einteilung galvanischer Zellen

1. **Primärzellen** bzw. Primärelemente, umgangssprachlich auch als Batterien bezeichnet: kennzeichnend für die Primärzelle ist, dass sie nach dem Zusammenfügen aufgeladen ist und nur einmalig entladen werden kann. Auch wenn in diesen Zellen die chemischen Reaktionen der Entladung teilweise umkehrbar sind, führt das jedoch nicht zur Wiederherstellung eines dem Neuzustand ähnlichen Energieinhalts der Zellen.

2. **Sekundärzellen** bzw. Sekundärelemente, auch Akkumulatoren oder kurz Akkus, können nach einer Entladung durch eine gegenüber der Entladung gegenläufigen Stromrichtung wieder neu aufgeladen werden, da die chemischen Prozesse in der Zelle, limitiert durch die Zyklenanzahl, reversibel sind. Allerdings ist die Energiedichte von Sekundärzellen im Vergleich zu Primärzellen bei identischer Temperatur geringer.

Batterie Batterie ist der Oberbegriff für mehrere in Serie geschaltete galvanische Zellen, die zunächst nur als nicht wiederaufladbare Primärzellen zur Verfügung standen und die zu einem Paket zusammengefasst in einem Batteriegehäuse untergebracht sind. Gerade im angelsächsischen Sprachgebrauch, aber auch im Deutschen ist es inzwischen zunehmend üblich, auch einzelne Zellen als Batterien zu bezeichnen. 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 auf die Zusammenschaltung mehrerer solcher wiederaufladbarer Zellen erweitert. Damit ist die sprachliche Abgrenzung der Begriffe „Batterie“, „Primärzellen“ und „Akku“ („Sekundärzelle“) unscharf.

Reihen- & Parallelschaltung Die Zusammenschaltung mehrerer galvanischer Elemente zu Batterien erfolgt entweder in Reihenschaltung zur Steigerung der nutzbaren elektrischen Spannung oder in Parallelschaltung zur Steigerung der nutzbaren Kapazität und deren Belastbarkeit durch hohe Stromstärken (MÖLLER & WINTER. 2005).

Historische Entwicklung der galvanischen Zellen

Voltasche Säule & Spannungsreihe Die Bezeichnung „galvanische Zelle“ geht auf den italienischen Arzt *Luigi Galvani* zurück. Er bemerkte im Jahr 1780, dass ein Froschbein, das in Kontakt mit Kupfer und Eisen kam, immer wieder zuckte und hielt dies für eine elektrische Wirkung. Das mit dem Froschschenkel gebildete Redox-System baute als galvanisches Element Spannung auf, sodass im System elektrischer Strom floss. Die erste funktionierende Batterie wurde in Form der Voltaschen Säule im Jahr 1800 von *Alessandro Volta* vorgestellt, die aus einer Vielzahl zusammengesetzter galvanischer Elemente identischer Bauart bestand, wodurch die elektrischen Effekte der Einzelelemente zu einem Gesamteffekt summiert werden konnten. Ein weiterer bahnbrechender Gedankengang Voltas war es, mit verschiedenen Metallen unterschiedlich starke elektrische Effekte zu erzeugen, was im Jahr 1794 zur Aufstellung der sogenannten Voltaschen Spannungsreihe führte. Die in den folgenden Jahrhunderten durchgeführten intensiven Untersuchungen an Hunderten, wenn nicht Tausenden von Batteriesystemen gehen letztendlich alle auf die Entdeckungen Voltas zurück.

Trockenbatterien Lageunabhängige Trockenbatterien gehen auf die Arbeiten von *Carl Gassner* zurück, der diese im Jahre 1887 patentierte. Im Jahr 1901 setzte *Paul Schmidt* in Berlin erstmals die Trockenbatterie bei Taschenlampen ein (WIKIPEDIA 2013c). Heute ist ersichtlich, dass vermutlich weniger als 20 Batterietypen langfristig eine großtechnische Anwendung erfahren haben bzw. vermutlich erfahren werden (MÖLLER & WINTER. 2005).

Rittersche Säule Die erste Vorform eines Akkumulators, der – im Gegensatz zu den Zellen von *Alessandro Volta* – nach der Entladung wieder aufladbar war, wurde schon 1803 von *Johann Wilhelm Ritter* gebaut, der übrigens auch mit Goethe auf dem Gebiet der Naturwissenschaften zusammenarbeitete. Die sogenannte Rittersche

Säule bestand aus übereinandergeschichteten und mit Tafelsalz getränkten Kupfer- und Kartonscheiben. Diese Vorrichtung konnte mit elektrischem Strom geladen werden und gab bei der Entladung Strom ab (KHAMMAS 2013c).

Der wohl bekannteste Akkutyp, der Bleiakкумуляtor, wurde ein halbes Jahrhundert später (1854) vom Mediziner und Physiker *Wilhelm Josef Sinsteden* entwickelt (WIKIPEDIA 2013c). Der französische Physiker *Gaston Planté* erfand 1859 die wiederaufladbare Bleibatterie, und *Henri Tudor* aus Luxemburg gab ihr 1881 die noch heute übliche Kastenform. Die Markteinführung der Bleibatterie erfolgte bereits im Jahre 1860, also nur ein Jahr nach ihrer Erfindung. Industriell wurde der Bleiakku interessant, als *Emile Alphonse Faure* um 1880 ein Verfahren entwickelte, bei dem bereits nach wenigen Ladezyklen eine hohe Kapazität erreicht werden kann (Formieren) (KHAMMAS 2013c).

Bleiakkumulator

Um 1899 erfanden *Thomas Alva Edison* und unabhängig von ihm der Schwede *Waldemar Jungner* die Nickel-Cadmium-Zelle. Edison wollte die Akkumulatoren für den Betrieb eines Fahrzeugs nutzen, doch dafür war sie noch zu schwach. 1901 erfand er mit der Ni/Fe-Zelle eine äußerst robuste Batterie mit einer hohen elektrischen Kapazität pro Gewichtseinheit. 1912 gelang es Edison, den Ni/Fe-Akkumulator bedingt gasdicht zu machen (KHAMMAS 2013c).

Die Geschichte des Akkumulators ist eng mit der Geschichte der Mobilität verknüpft, und auch der Krieg spielt eine Rolle dabei, denn insbesondere U-Boote, die unter Wasser mobil bleiben wollten, brauchten Akkumulatoren. Im Frühjahr 1904 lieferte die *Accumulatoren Fabrik AG (AFA)* in Berlin-Hagen eine aus Triebwagenzellen entwickelte Batterieanlage für das U-Boot ‚Hagen‘ der schwedischen Marine. Im Grunde bestand damit also schon Ende des 19./Anfang des 20. Jahrhunderts die Chance, den Personen-Nahverkehr vollständig mit Elektrofahrzeugen abzuwickeln. Die Marktdurchdringung der mit fossilen Treibstoffen betriebenen Fahrzeuge ließ die Weiterentwicklung der Akkumulatoren jedoch danach wesentlich langsamer verlaufen. Die gasdichte Ni/Cd-Zelle wurde z. B. erst 1935 patentiert, das Lithium-Batteriesystem 1949, Knopfzellen als Bauform für Akkumulatoren gingen 1954 in die Serienproduktion und die Fertigung von Batterien mit Lithiumanoden und organischen Elektrolyten begann erst 1974. Die Markteinführung der Ni/Metallhydrid-Zelle erfolgte im Jahre 1990 (KHAMMAS 2013c).

Elektrofahrzeuge

Ni/Cd & Ni/Fe-Zellen

Der Zeithorizont der Technologieentwicklung der Akkumulatoren mit einer Abschätzung der Technologiesprünge bzw. Übergänge von der Zukunfts- bis zur Basistechnologie (z. B. Bleiakкумуляtor) wird anhand der Timeline in Abbildung 15 dargestellt:

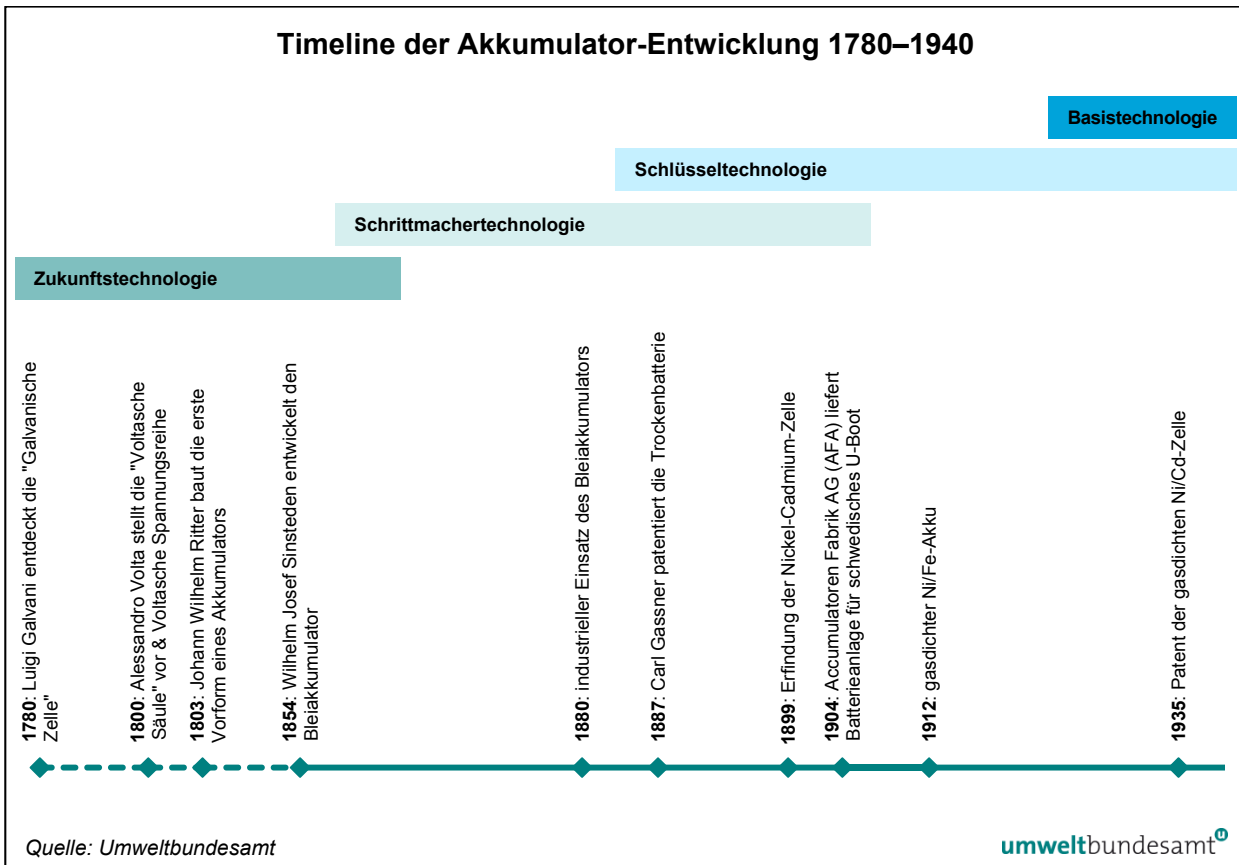


Abbildung 15: Timeline der Akkumulator-Entwicklung von 1780 bis 1935 mit einer Abschätzung der Technologie-sprünge bzw. Übergänge von der Zukunfts- bis zur Basistechnologie. Die Überlappungen der einzelnen Technologieklassen ergeben sich aufgrund der unterschiedlichen Akkumulatortypen.

Bereiche der Forschungs- und Entwicklungsarbeit

eingesetzte Materialien

Bei Akkumulatoren hängen – wie auch bei der Primärzelle – die für eine elektrochemische Zelle typische elektrische Nennspannung, der Wirkungsgrad und die Energiedichte primär von der Art der verwendeten Materialien ab. Daher war und ist es Ziel vieler Forschungs- und Entwicklungsarbeiten, die wesentlichen Kenngrößen von Batterien je nach Nutzungsanforderungen durch Variation und Kombination der verwendeten Materialien zu optimieren.

Energiedichte

Akkubatterien sind zwar teurer als Primärzellen, ihr Einsatz rechnet sich jedoch aufgrund der längeren Nutzungsdauer wegen der Wiederaufladbarkeit. Für viele Anwendungen, insbesondere für mobile Geräte, ist eine hohe Energiedichte, die gespeicherte Energie je Masseneinheit der Batterie, wichtig. Obwohl Akkumulatoren bei identischer Temperatur gegenüber Primärzellen nur ca. ein Viertel bis zur Hälfte der Energiedichte aufweisen³, kommen sie bei den betreffenden Anwendungen trotzdem zum Einsatz, da auch in diesen Fällen die Wiederaufladbarkeit der Akkus eine unverzichtbare Eigenschaft ist. Eine hohe Energie-

³ 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 (WIKIPEDIA 2013c).

dichte ist besonders für elektrisch angetriebene Fahrzeuge von Bedeutung. Herkömmliche Bleiakkumulatoren erreichen hier rund 30 Wh/kg. Bei Li-Ionen-Akkus ist die Energiedichte mehr als doppelt so hoch wie beispielsweise die des Nickel-Cadmium-Akkumulators und liegt bei 95–190 Wh/kg, beziehungsweise 250–500 Wh/l, je nach verwendeten Materialien (siehe auch Abbildung 16; RECHARGE 2013). Akkus mit besonders hoher Energiedichte sind allerdings oft überproportional teuer oder können auch andere nachteilige Eigenschaften aufweisen, insbesondere eine beschränkte Lebensdauer.

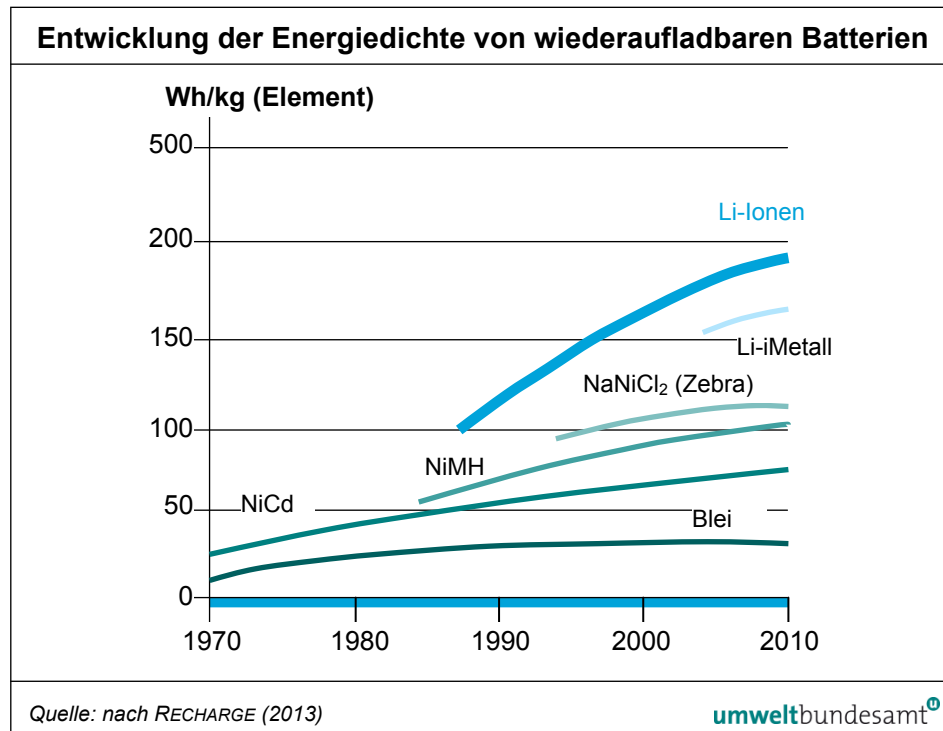


Abbildung 16: Entwicklung der Energiedichte von wiederaufladbaren Batterien.

Ein anderes wichtiges Kriterium für die Auswahl des optimalen Akkumulatortyps für eine bestimmte Anwendung ist der maximal mögliche Entladestrom. Er ist für alle Anwendungen von Bedeutung, bei denen kurzzeitig sehr hoher Leistungsbedarf besteht. Dies ist zum Beispiel beim Starten von Fahrzeugmotoren der Fall, aber auch bei Elektrowerkzeugen und Autofokus-Kameras, insbesondere mit integrierten Blitzgeräten.

Entladestrom

Ein weiteres Forschungsfeld bei Akkumulatoren betrifft die Optimierung des Ladewirkungsgrades (Energieeffizienz), der das Verhältnis der entnehmbaren zu der beim Laden aufzuwendenden Energie bezeichnet. Beim Aufladen und Entladen von Akkumulatoren wird durch den inneren Widerstand der Zellen Wärme freigesetzt, wodurch ein Teil der zum Aufladen aufgewandten Energie verloren geht. Generell sinkt der Ladewirkungsgrad sowohl durch Schnellladung mit sehr hohen Strömen als auch durch schnelle Entladung (Peukert-Effekt), da die Verluste am Innenwiderstand zunehmen. Das optimale Nutzungsfenster ist dabei je nach Zellchemie stark unterschiedlich.

Ladewirkungsgrad

Lithium-Ionen-Akku

Li-Ionen-Akku-Typen

So gilt es, für eine bestimmte Anwendung den entsprechenden Akku mit dem optimalen Preis-Leistungs-Nutzen-Verhältnis zu finden. Aufgrund ihrer im Vergleich unschlagbar hohen Zellspannungen und Energiedichten gehören die Batterien, die metallisches Lithium oder ein lithiumhaltiges Anodenmaterial beinhalten, für viele Anwendungsgebiete zu den derzeit aussichtsreichsten Systemen. Je nach Aufbau bzw. den eingesetzten Elektrodenmaterialien werden Li-Ionen-Akkus weiter untergliedert in Lithium-Cobaltdioxid-Akkumulatoren (LiCoO₂-Akkus), Lithium-Polymer-, Lithium-Titanat-, Lithium-Luft-, Lithium-Mangan-, Lithium-Eisenphosphat- (LiFePO₄-) und Zinn-Schwefel-Lithium-Ionen-Akkumulatoren (siehe auch Tabelle 1) (MÖLLER & WINTER. 2005).

Tabelle 1: Vergleich unterschiedlicher Akkumulatortypen hinsichtlich Energiedichte und Ladewirkungsgrad. (Quelle: WIKIPEDIA 2013c)

Akkumulatortyp	Energiedichte (Wh/kg)	Ladewirkungsgrad (Stand 2007)	Besonderheit, typische Anwendungsgebiete
Bleiakkumulator	30	60–70 %	
Lithium-Ionen-Akkumulator auf der Basis von LiCoO ₂	120–210	90 %	neuere Modelle schnellladefähig; portable elektronische Geräte mit kleinen Abmessungen und langer Betriebszeit (Mobiltelefone, Notebooks, Kameras)
Lithium-Polymer-Akkumulator	140	90 %	praktisch beliebige Bauform möglich; Antriebe im Modellbau, Mobiltelefon, Traktionsbatterie für extreme Reichweiten
Lithium-Eisen-Phosphat-Akkumulator	80–130	90 %	schnellladefähig, hochstromfähig, eigensicher; Antriebe im Modellbau, neue Profiklasse von Elektrowerkzeugen, Fahrzeugakku für hohe Reichweiten
Lithium-Titanat-Akkumulator	70–90	90–95 %	schnellladefähig; Antrieb von Elektrokraftwagen mit großen Reichweiten
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	1.100	?	experimenteller Prototyp

Die Anzahl der Publikationen zu Lithium-Ionen-Batterien ist in den Jahren 2009 und 2010, auch im Vergleich zu anderen ausgewählten Energiespeichertechnologien wie Brennstoffzellen bzw. Wasserstoffspeicher, signifikant gestiegen und dürfte die der Brennstoffzellentechnologie zumindest in den nächsten Jahren rasch einholen. Der Anstieg hängt mit den initiierten Fördermaßnahmen in vielen Ländern und den technologischen Entwicklungsanstrengungen in der Batterieindustrie zusammen, wobei das Thema Elektromobilität als ein maßgeblicher Treiber fungiert. Innerhalb der Batteriesysteme geben die Publikationsanteile zu Li-Ionen-Batterien mit mittlerweile fast 75 % in den Jahren 2005 bis 2009 einen deutlichen Hinweis, einerseits auf den hohen Stellenwert dieser Batterietechnologie, andererseits auf die aus heutiger Sicht fehlenden alternativen Batteriekonzepte (FRAUNHOFER ISI 2013a).

Publikationen zu Li-Ionen-Akkus führend

Vor allem im Bereich portabler, mobiler Anwendungen (z. B. Laptop, Handy) sind Lithium-Ionen-Batterien innerhalb weniger Jahre zur wichtigsten Speichertechnologie geworden (siehe Abbildung 17; PILOT 2012). Sie sind thermisch stabil und unterliegen einem nur sehr geringen Memory-Effekt. Im Verhältnis zu Blei- oder Ni/Cd-Batterien sehr hohe gravimetrische Energiedichten von mehr als 150 Wh/kg stellen in diesem Marktsegment einen entscheidenden Wettbewerbsvorteil dar, sodass auch die bis heute noch teilweise hohen spezifischen Kosten durchgesetzt werden konnten (SAUER 2006).

Wettbewerbsvorteile bei mobilen Anwendungen

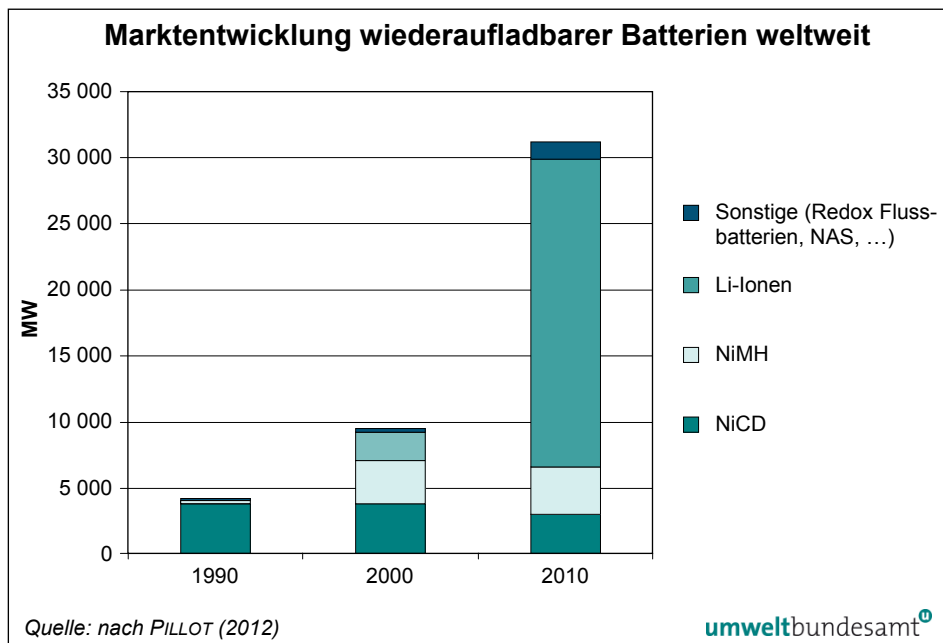


Abbildung 17: Marktentwicklung wiederaufladbarer Batterien weltweit.

Bei der Betrachtung der Lithium-Batterietechnologie muss darauf hingewiesen werden, dass hier nicht von einem einheitlichen Konzept wie z. B. bei Blei- und Ni/Cd-Batterien ausgegangen werden kann. Kenngrößen wie Zellenspannung, Temperaturempfindlichkeit, Lebensdauer oder der maximal erlaubte Lade- oder Entladestrom, variieren bauartbedingt stark und sind wesentlich vom eingesetzten Elektrodenmaterial und Elektrolyt bzw. deren Kombinationen abhängig. Durch die große Zahl der möglichen Materialkombinationen gibt es auch nach wie vor

starke Variationsbreite

hohe Entwicklungsanstrengungen und es ist bis heute nicht klar, welches der Konzepte beispielsweise die besten Eigenschaften für den Einsatz im Bereich von großen Speichersystemen, wie sie im Netz- oder auch im Elektrotraktionsbereich notwendig sind, haben wird. Insbesondere ist bis heute nicht geklärt, wie weit die **Zykluslebensdauer** noch angehoben werden kann. Dieser Parameter ist beispielsweise gerade für die Gesamtkonomie der Speichersysteme von entscheidender Bedeutung (SAUER 2006).

Entwicklung der Li-Ionen-Batterien

Li-Ionen-Batterien zählen in vielen Anwendungsbereichen bereits jetzt zur **Basistechnologie** oder stehen kurz davor, wie z. B. bei der Elektromobilität. Sie müssen allerdings hinsichtlich Kosten, Energiedichte, Gewicht zyklischer und kalendarischer Lebensdauer sowie Ladegeschwindigkeiten noch deutlich verbessert werden (FRAUNHOFER ISI 2013a).

Bereits in den 1970er-Jahren wurden an der *TU München* das grundlegende Funktionsprinzip der reversiblen Alkalimetall-Ionen-Interkalation in Kohlenstoff-Anoden (BESENHARD & FRITZ 1974, BESENHARD 1976a) und oxidische Kathoden (SCHALLHORN et al. 1976, BESENHARD & SCHALLHORN 1976/77) sowie dessen Anwendung in Lithium-Batterien (BESENHARD & EICHINGER 1976, BESENHARD 1976b) erforscht und veröffentlicht, auch wenn damals die praktische Anwendbarkeit als Elektroden für Lithium-Batterien noch nicht erkannt wurde. Der Lithium-Cobaltdioxid-Akkumulator (LiCoO₂-Akku) war die erste verfügbare Elektrodenchemie eines Lithium-Ionen-Akkumulators. Die Brauchbarkeit als Elektrodenmaterial – die positive Elektrode besteht aus der namensgebenden Substanz Lithium-Cobalt(III)-oxid – wurde 1980 von einer Forschergruppe um *John B. Goodenough* an der University of Oxford entdeckt (MIZUSHIMA et al. 1980). Im November 1989 wurde in Deutschland ein Patent⁴ für einen Lithium-Ionen-Akkumulator angemeldet sowie im Folgenden ein Versuchsmuster angefertigt und erfolgreich getestet. Die deutsche Industrie zeigte damals allerdings kein Interesse an der Weiterentwicklung. Der Zeithorizont der Technologieentwicklung des Lithium-Ionen-Akkus mit einer Abschätzung der Technologiesprünge bzw. Übergänge von der Zukunfts- bis zur Basistechnologie wird anhand der Timeline in Abbildung 18 dargestellt:

LiCoO₂-Akku

Der erste kommerziell erhältliche Li-Ionen-Akku wurde als Lithium-Cobaltdioxid-Akkumulator von *Sony* im Jahr 1991 auf den Markt gebracht und in der Hi8-Videokamera CCD TR 1 eingesetzt. Die Batterie besaß mit zwei seriell verschalteten Zellen eine Zellspannung von 7,2 V und eine Kapazität von etwa 1.200 mAh. Bis heute (2012) werden Akkumulatoren dieser Bauform mit Kapazitäten bis 6.900 mAh angeboten und in einer Vielzahl von Sony-Geräten eingesetzt (WIKIPEDIA 2013c).

Li-Polymer-Akku

Das britisch-amerikanische Unternehmen *Ultralife Batteries* stellte 1995 den Prototyp einer Batterie vor, die überhaupt keinen flüssigen Elektrolyt mehr enthält. Stattdessen wurde dieser durch eine feste Polymerschicht ersetzt, die sich

⁴ Patent DD290979: Galvanisches Element. Angemeldet am 10. November 1989, Erfinder: Peter Busch.

http://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/biblio?locale=de_EP&CC=DD&NR=290979.

zwischen der Anode aus Lithium in einem Kohlenstoffgitter und der Kathode aus mit Manganoxid vermischem Lithium befand. Der Aufbau war so einfach, dass die Batterie sogar in Form einer einen Millimeter dicken Folie hergestellt werden konnte. Außerdem konnte die Batterie rund 1.000-mal aufgeladen werden, womit sie alle bisherigen Modelle um das Fünffache übertraf. Das Unternehmen gab bekannt, rund 30 Mio. DM in den Aufbau einer neuen Fabrik zu investieren. Bei Massenproduktion sollte eine marktübliche Batterie etwa 1,50 DM kosten (KHAMMAS 2013c).

Lithium-Eisen-Phosphat wurde erstmals 1997 als Kathodenmaterial für Lithium-Ionen-Akkus vorgeschlagen. Es ersetzt die häufig eingesetzte Lithium-Cobalt-Kathode. Als Gründe für den Ersatz sind vor allem die niedrigeren Materialkosten, die verbesserte Umweltfreundlichkeit und die höhere Sicherheit zu nennen. Außerdem könnte Cobalt den Bedarf an Lithium-Akkumulatoren bis 2050 nicht mehr decken (KONIETZKO & GERNUKS 2011). Von Süd-Chemie (heute *Clariant*) wurde dazu in Kanada die weltweit größte Produktionsanlage (2.500 t/a) zur Herstellung von Lithium-Eisen-Phosphat nach einem nasschemischen Verfahren errichtet, der Produktionsstart fand im April 2012 statt (CLARIANT AG 2012).

LiFePO4-Akku

Im April 2006 hatte eine Gruppe von Wissenschaftlern des *Massachusetts Institute of Technology* einen Prozess entwickelt, der für die Herstellung von Nanometer-großen Drähten Viren verwendet. Damit konnten ultradünne Lithium-Ionen-Akkus mit der dreifachen der bisher möglichen Energiedichte hergestellt werden (NAM et al. 2006). Im Juni 2006 stellten Forscher aus Frankreich ebenfalls Akku-Elektroden in Nanometer-Größe her, die ein Mehrfaches der Energiedichte im Vergleich zu gewöhnlichen Elektroden besaßen (BULLIS 2006).

Nanotechnologie

Im September 2006 berichteten Forscher der *Universität Waterloo* in Kanada in der Zeitschrift *Nature* von einem neuen Kathodenmaterial, bei dem die Hydroxid-Gruppe der Eisenphosphat-Kathode durch Fluorid ersetzt wurde. Dies hat einen doppelten Vorteil: erstens ergibt sich während eines Ladungszyklus eine geringere Volumenänderung in der Kathode, was eine längere Lebensdauer erwarten lässt. Zweitens erlaubt es den Ersatz des Lithiums durch Natrium beziehungsweise eine Natrium-Lithium-Mischung, weswegen der Akku auch als Alkali-Ionen-Akku bezeichnet wird (ELLIS et al. 2007).

Alkali-Ionen-Akku

Im Dezember 2007 berichteten Forscher der *Stanford University* von einem neuen Anodenmaterial für Lithium-Ionen-Akkus mit dem Zehnfachen der bisher erreichten Energiedichte. Sie verwendeten dazu Silizium-Nanodrähte auf rostfreiem Stahl (SCIENCEDAILY (2007)). Der Leiter des Forschungsteams, *Yi Cui*, erwartete damals, dass diese Technologie etwa 2012 kommerziell erhältlich sein wird⁵. Einen ähnlichen Ansatz mit nanoporösem Silizium verfolgt das Team von *Jaephil Cho* von der *Hanyang University* in Ansan, Südkorea (FAIRLEY 2008).

Silizium-Nanodrähte

Das US-Unternehmen *Altair Nanotechnologies Inc.* (Altairnano) aus Reno, Nevada, stellte im August 2007 unter dem Namen *NanoSafe* eine neue Lithium-Titanat-Batterie vor, die sich durch eine dreifache Kapazität, eine sehr kurze Aufladezeit, eine längere Lebensdauer und auch durch ihre kostengünstigere Herstellung auszeichnet (KHAMMAS 2013c).

Lithium-Titanat-Batterie

⁵ Interview with Dr. Cui, Inventor of Silicon Nanowire Lithium-ion Battery Breakthrough. In: GM-Volt. 21.12.2007. <http://www.gm-volt.com/2007/12/21/gm-voltcom-interview-with-dr-cui-inventor-of-silicon-nanowire-lithium-ion-battery-breakthrough>.

extrem kurze Ladezeiten

Am 12. März 2009 wurde eine Weiterentwicklung der Lithium-Ionen-Akkus durch die beiden MIT-Forscher *Byoungwoo Kang* und *Gerbrand Ceder* veröffentlicht, die sowohl die Lade- als auch die Entladezeit drastisch (10 Sekunden statt 6 Minuten für einen kleinen Test-Akku) reduziert (KAYSER 2009). Die Entwickler erwarteten, dass diese Akkus in relativ kurzer Zeit kommerziell verfügbar sein werden, da keine neuen Materialien für die neue Technologie gebraucht werden.

erhöhte Energiedichte

Etwa im Juni 2011 berichteten Forscher der japanischen Firma *Sumitomo Electric Industries*, dass für den Fall, dass der Ableiter der Kathode, welcher üblicherweise aus Aluminiumfolie besteht, durch den Werkstoff Aluminium-Celmet ersetzt werden würde, dies eine Erhöhung der Akkumulator-Energiedichte um einen Faktor von 1,5 bis 3 ermöglicht (GOPPELT 2011).

Lithium-Schwefel-Akkumulator

Der Lithium-Schwefel-Akkumulator ist ein Akkumulatortyp, an dem zurzeit intensiv geforscht und entwickelt wird, da er eine besonders hohe Energiedichte verspricht. Es existieren Prototypen, aber es gibt noch keine derartigen Akkumulatoren im Handel. Die theoretische Energiedichte ist mit 3.350 Wh/kg eine der höchsten aller Akkumulatoren (GIZMAG 2009). Praktisch realisiert wurde eine Energiedichte bis zu 350 Wh/kg (EV WORLD 2013). Im April 2013 stellten Wissenschaftler des *Dresdner Fraunhofer IWS* ein neues Batteriedesign mit einer Silizium-Kohlenstoff-Anode vor, das die Anzahl der Ladezyklen bei Knopfzellen von 200 auf 1.400 versiebenfachte (FRAUNHOFER IWS 2013).

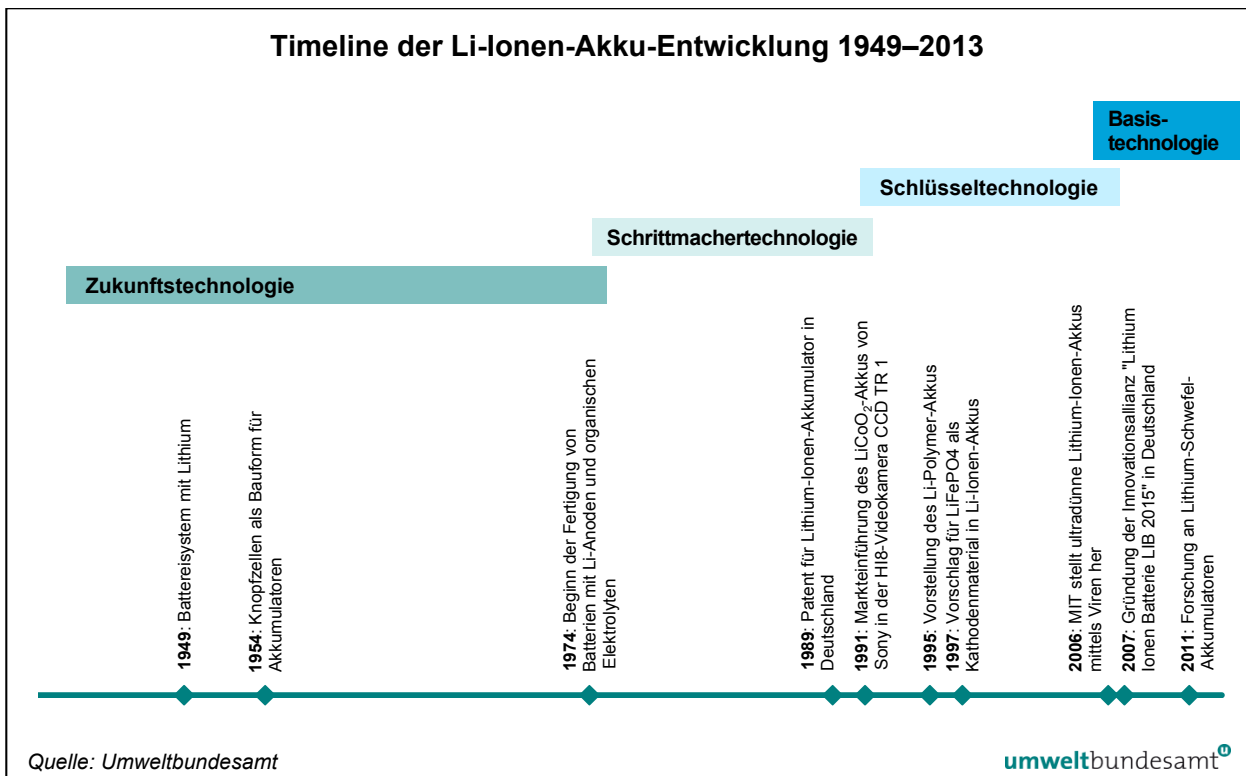


Abbildung 18: Timeline der Lithium-Ionen-Akku-Entwicklung mit der Einführung der Lithium-Chemie in das Batteriesystem im Jahr 1949 bis 2013 mit einer Abschätzung der Technologiesprünge bzw. Übergänge von der Zukunfts- bis zur Basistechnologie.

Nach bibliometrische Analysen der deutschen Innovationsallianz *LIB 2015*, die im Rahmen der Erstellung der *Technologie-Roadmap Lithium-Ionen-Batterien 2030* (FRAUNHOFER ISI 2013a) durchgeführt wurden, können folgende technologische Entwicklungen für die Marktdurchdringung der Li-Ionen-Batterien als relevant eingestuft werden:

relevante technol. Entwicklungen

- Trends bei Zellmaterialien und -komponenten,
- stoffbezogene Aspekte der Rohstoffverfügbarkeit und des Recyclings,
- Herstellverfahren,
- grundlegende Anforderungen und Leistungsmerkmale sowie
- Technologiefeldanalyse und Marktanforderungen.

Akkumulatoren werden verwendet, um elektrische oder elektronische Geräte zu betreiben, die ohne dauerhafte Verbindung zum festen Stromnetz oder zu einem Generator regelmäßig benutzt werden und einen nicht vernachlässigbaren Strombedarf haben. Akkus kommen auch zum Einsatz, um Schwankungen bei der regenerativen Erzeugung von Strom mit Wind oder Sonne auszugleichen, wenn sich eine abgelegene Verbrauchsstelle nicht oder nur zu unverhältnismäßig hohen Kosten an das Stromnetz anschließen lässt, oder dienen in Systemen zur unterbrechungsfreien Stromversorgung (USV) auch zur kurz- bis mittelfristigen Überbrückung von Ausfällen der stationären Energieversorgung (stromversorgung).

Innovationen im Bereich der Batterieforschung sind vor allem getrieben durch den asiatischen Elektronikgerätemarkt und dem damit verbundenen harten Wettbewerb der Batterieindustrie im Hinblick auf IT-Anwendungen (RECHARGE 2013) (siehe Abbildung 19; PILLOT 2012). Lithium-Ionen-Batterien gelten aber auch als die **Schlüsseltechnologie** für die Einführung und den Marktdurchbruch der Elektromobilität (FRAUNHOFER ISI 2013b). In Deutschland sind in diesem Zusammenhang Lithium-Ionen-Akkumulatoren besonders wegen des "Nationalen Entwicklungsplans Elektromobilität" der Bundesregierung im August 2009 in den Blickpunkt der Öffentlichkeit gelangt (WIKIPEDIA 2013c).

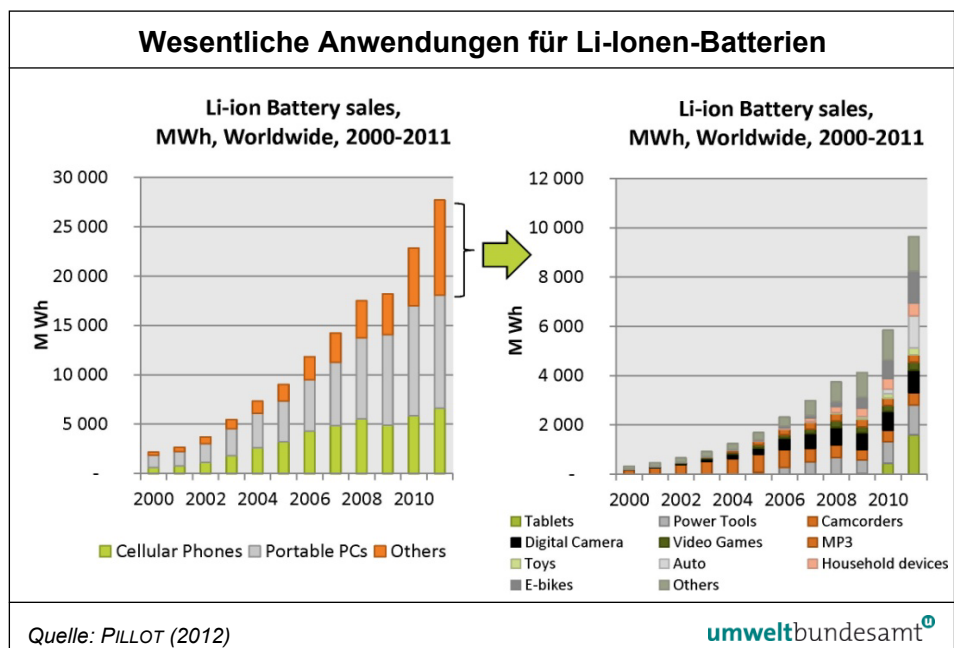


Abbildung 19: Wesentliche Anwendungen für Li-Ionen-Batterien.

Im Jahr 2007 wurde in Deutschland die Innovationsallianz „*Lithium Ionen Batterie LIB 2015*“ gegründet. Sie setzt sich zusammen aus rund 60 Projektpartnern aus Politik, Wirtschaft und Wissenschaft, deren gemeinsames Ziel es ist, für Fortschritt in der Forschung und Entwicklung von effizienten Lithium-Ionen-Batterien zu sorgen. Sichere, leistungsfähige Lithium-basierte Energiespeicher sind ein essenzieller Baustein für die Weiterentwicklung von alternativen Antriebskonzepten für Hybrid- und Elektrofahrzeuge. Darüber hinaus spielen sie eine wichtige Rolle beim Ausbau regenerativer Energietechniken wie zum Beispiel Windkraft. Damit Lithium-Ionen-Akkus serienmäßig eingesetzt werden können, sind neue wissenschaftliche Ansätze notwendig. Diese sollen im Rahmen des Projektes LIB 2015 entwickelt und umgesetzt werden (FRAUNHOFER ISI 2013a).

Technologie-Roadmap des ISI

So vielfältig die unterschiedlichen Anwendungsmöglichkeiten von Batterien zum Antrieb von Elektromobilen sind, so vielfältig werden auch die Entwicklungen auf dem Gebiet der verwendeten Materialien und Batterietypen sein. Das ist das Ergebnis der *Technologie-Roadmap*, welche das Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI im Rahmen der durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gegründeten Innovationsallianz „Lithium Ionen Batterie (LIB 2015)“ veröffentlicht hat (FRAUNHOFER ISI 2013a).

Schon bis zum Jahr 2015 sollen die Batterien deutlich leistungsfähiger, kostengünstiger und sicherer sein. In der Roadmap werden diesbezüglich die technologischen Entwicklungen bei Lithium-Ionen-Batterien wie einzelne Zellkomponenten, Zelltypen und deren Eigenschaften sowie sich ergänzende und konkurrierende Technologien inhaltlich erfasst und für den Zeitraum von 2010 bis 2030 abgeschätzt. Sie zeigt, dass die Batterieentwicklung in den Materialien und Werkstoffen sogar bei den Zellkomponenten und Zellen und damit denkbaren Batteriesystemen vielfältig ist. Es wird somit nicht „den“ Zelltyp beziehungsweise „die“ Batterie für die Elektromobilität geben, sondern anwendungsspezifisch geeignete Batterietypen. Beim Roadmapping der LIB 2015 werden auch Aspekte der Nachhaltigkeit miteinbezogen: Sie umfassen die Charakterisierung und Betrachtung von Batterietypen, der Rohstoffverfügbarkeit der in Lithium-Ionen-Batterien verwendeten Materialien sowie das Recycling, wobei alle Aspekte aus einer (roh-)stofflichen Perspektive analysiert werden (FRAUNHOFER ISI 2013a).

Das Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI) hat in einer Mitteilung im Oktober 2013 festgestellt, dass Hochvolt-Lithium-Ionen-Batterien der sogenannten dritten Generation zwar in den kommenden zehn Jahren neben bereits verfügbaren Batteriesystemen für die Einführung und den Markthochlauf der Elektromobilität relevant sind. Wirkliche Technologiesprünge hinsichtlich Energiedichten und somit hohen Reichweiten, wie mit der Brennstoffzellentechnologie, sind jedoch erst mit Post-Lithium-Ionen-Batterien deutlich jenseits des Jahres 2020 zu erwarten. Insbesondere auf die Lithium-Schwefel-Technologie werden große Hoffnungen gesetzt (ASP 2013).

5 LITERATURVERZEICHNIS

- AEE NÖ-Wien – Arbeitsgemeinschaft Erneuerbare Energie (2013): Energieinfo für Sie/Wind. (abgerufen am 07.10.2013).
<http://www.aee-now.at/cms/index.php?id=51>
- ASP – autoservicepraxis.de (2013): E-Mobilität. Technologiesprünge bei Batterien nicht vor 2020. (abgerufen am 22.10.2013).
<http://www.autoservicepraxis.de/e-mobilitaet-technologiespruenge-bei-batterien-nicht-vor-2020-1174581.html>
- BESENHARD, J. O. (1976a): The Electrochemical Preparation and Properties of Ionic Alkali Metal and NR 4+ Graphite Intercalation Compounds in Organic Electrolytes. CARBON, 14, 111.
- BESENHARD, J.O. (1976b): High Energy Density Lithium Cells. Part II. Cathodes and Complete Cells. J. Electroanal. Chem., 72, 1.
- BESENHARD, J. O. & EICHINGER, G. (1976): High Energy Density Lithium Cells. Part I. Electrolytes and Anodes. J. Electroanal. Chem. 68: 1.
- BESENHARD, J. O. & FRITZ, H. P. (1974): Cathodic Reduction of Graphite in Organic Solutions of Alkali and NR 4+ Salts. J. Electroanal. Chem. 53: 329.
- BESENHARD, J. O. & SCHALLHORN, R. (1976/77): The Discharge Reaction Mechanism of the MoO₃ Electrode in Organic Electrolytes. J. Power Sources 1: 267.
- BETZ, A. (1926): Windenergie und ihre Ausnutzung durch Windmühlen. Göttingen. (Nachdruck der Auflage 1926: Ökobuch, Kassel 1982, ISBN 3-922964-11-7).
- BIERMAYR, P.; EBERL, M.; EHRIG, R.; FECHNER, H.; KRISTÖFEL, C.; EDER-NEUHAUSER, P.; PRÜGGLER, N.; SONNLEITNER, A.; STRASSER, C.; WEISS, W. & WÖRGETTER, M. (2012): Innovative Energietechnologien in Österreich Marktentwicklung 2011. Biomasse, Photovoltaik, Solarthermie und Wärmepumpen. Erhebung für die Internationale Energie-Agentur (IEA). In: Berichte aus Energie- und Umweltforschung. 12/2012. Eigentümer, Herausgeber und Medieninhaber: Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Wien.
- BIERMAYR, P.; EBERL, M.; EHRIG, R.; FECHNER, H.; KRISTÖFEL, C.; LEONHARTSBERGER, K.; MARTELLI, S.; STRASSER, C.; WEISS, W. & WÖRGETTER, M. (2013): Innovative Energietechnologien in Österreich. Marktentwicklung 2012. Biomasse, Photovoltaik, Solarthermie und Wärmepumpen. Berichte aus Energie- und Umweltforschung 17/2013. Eigentümer, Herausgeber und Medieninhaber: Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Wien.
- BKA – Bundeskanzleramt (2011): Potenziale ausschöpfen, Dynamik steigern, Zukunft schaffen. Der Weg zum Innovation Leader. Strategie der Bundesregierung für Forschung, Technologie und Innovation. Medieninhaber (Verleger): Bundeskanzleramt, Bundesministerium für Finanzen Bundesministerium für Unterricht, Kunst und Kultur, Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Bundesministerium für Wirtschaft, Familie und Jugend, Bundesministerium für Wissenschaft und Forschung.
- BULLIS, K. (2006): Higher-Capacity Lithium-Ion Batteries. In: Technology Review. 22. Juni 2006.

- CLARIANT AG (2012): Phostech Lithium Plant Officially Opens.
[http://www.catalysis-energy.clariant.com/C12576850036A6E9/news/A64A8C435CA07323C12579D40067A0D2/\\$File/20120402_Phostech_Lithium_Plant_Officially_Opens.pdf](http://www.catalysis-energy.clariant.com/C12576850036A6E9/news/A64A8C435CA07323C12579D40067A0D2/$File/20120402_Phostech_Lithium_Plant_Officially_Opens.pdf)
- CLEANTECH GROUP (2012): Coming Clean: The Global Cleantech Innovation Index 2012. Cleantech Group and WWF.
- DCTI – Deutsches CleanTech Institut (2009): Windenergie. CleanTech-Branche in Deutschland – Treiber im Fokus. CleanTech Studienreihe, Band 2.
- EIO – Eco-Innovation Observatory (2010): Methodological Report.
http://www.eco-innovation.eu/media/Methodological_Report_2010.pdf
- Ek – Europäische Kommission (2011): Neuer Aktionsplan für Öko-Innovationen zur Förderung von umweltverträglichem Wachstum und umweltfreundlichen Unternehmen. Pressemeldung IP/11/1547, Brüssel.
- ELLIS, B. L.; MAKAHNOUK, W. R. M.; MAKIMURA, Y.; TOGHILL, K. & NAZAR, L. F. (2007): A multifunctional 3.5 V iron-based phosphate cathode for rechargeable batteries. In: Nature Materials 6, Nr. 10, 2007: 749–753.
- ESTTP – European Solar Thermal Technology Panel of the European Technology Platform on Renewable Heating and Cooling (RHC-Platform) (2012): Strategic Research Priorities for Solar Thermal Technology. ESTTP, Brussels.
- EV WORLD (2013): Sion Introduces a Lithium Sulfur Rechargeable Battery. (abgerufen am 19.10.2013).
<http://www.evworld.com/article.cfm?storyid=788>
- FAIRLEY, P. (2008a): Windenergie aus tiefen Gewässern. In: Technology Review. Nr. 7, 2008.
- FAIRLEY, P. (2008b): Realizing Lithium-Battery Potential. In: Technology Review. Nr. 3. Dezember 2008.
<http://www.technologyreview.com/energy/21750>
- FRAUNHOFER ISI – Institut für System- und Innovationsforschung ISI (2013a): Projekt. Roadmapping „Lithium Ionen Batterie LIB 2015“. (abgerufen am 22.10.2013).
<http://www.isi.fraunhofer.de/isi-de/t/projekte/at-lib-2015-roadmapping.php>
- FRAUNHOFER ISI – Institut für System- und Innovationsforschung ISI (2013b): Veröffentlichung für LIB 2015. Technologie-Roadmap Lithium-Ionen-Batterien 2030. (abgerufen am 22.10.2013).
http://www.isi.fraunhofer.de/isi-de/t/projekte/LIB_Broschueren/trm-libroad.php
- FRAUNHOFER IWS (2013): Längeres Leben für Lithium-Schwefel-Batterien, Presseinformation Nr. V, Dresden. (abgerufen am 19.10.2013).
http://www.iws.fraunhofer.de/de/presseundmedien/presseinformationen/2013/presseinformation_2013-05.html
- GIZMAG (2009): Lithium-sulfur batteries could store triple the power of lithium-ion. (abgerufen am 19.10.2013).
<http://www.gizmag.com/next-generation-battery-lithium-sulphur/11926/>
- GLATZEL, G. (2009): MSL-Verschiebung und neue Energiequellen. (abgerufen am 09.01.2009).
<http://www.raumfahrer.net/news/raumfahrt/09012009212623.shtml>

- GOPPELT, G. (2011): „Aluminium-Celmet“ soll die Kapazität von Lithium-Ionen-Batterien verdreifachen. Heise-Internetportal, Rubrik „Auto“, Sektion „News“, 30. Juni 2011. <http://www.heise.de/autos/artikel/Aluminium-Celmet-soll-die-Kapazitaet-von-Lithium-Ionen-Batterien-verdreifachen-1270808.html>
- HARENBERG, B. (1991): Aktuell `92 – Lexikon der Gegenwart. Harenberg Lexikon-Verlag. Seite 424. ISBN 3611002224.
- HAUSCHILDT, J. & SALOMO, S. (2007): Innovationsmanagement. 4. Auflage. Vahlen, München.
- IG WINDKRAFT – Interessengemeinschaft Windkraft Österreich (2013a): Wind in Zahlen. Windkraft in Österreich, Europa und weltweit. (abgerufen am 10.10.2013). [http://www.igwindkraft.at/?xmlval_ID_KEY\[0\]=1047](http://www.igwindkraft.at/?xmlval_ID_KEY[0]=1047)
- IG WINDKRAFT – Interessengemeinschaft Windkraft Österreich (2013b): Geschichte der Windkraft. (abgerufen am 07.10.2013). [http://www.igwindkraft.at/?xmlval_ID_KEY\[0\]=1045](http://www.igwindkraft.at/?xmlval_ID_KEY[0]=1045)
- IWR – Internationales Wirtschaftsforum Regenerative Energien (2013): Forscher wollen 10 MW Offshore-Turbine bauen. (abgerufen am 09.10.2013). <http://www.offshore-windenergie.net/aktuelles/news/forschung/detail?nachricht=177>
- JAMES, P. (1997): The Sustainability Circle: a new tool for product development and design. Journal of Sustainable Product Design 2. pp. 52–57. <http://www.cfsd.org.uk/journal>
- KAYSER, R. (2009): Der Super-Akku. In: pro-physik.de. (12. März 2009). <http://www.pro-physik.de/Phy/leadArticle.do?laid=11595>
- KEMP, R. & PEARSON, P. (2007): Final report MEI about measuring eco-innovation. Deliverable 15 of Project MEI – Measuring eco-innovation under the STREP Instrument, Thematic Priority Call FP6-2005-SSP-5A, Area B, 1.6, Task 1.
- KHAMMAS, A. A. W. (2013a): Buch der Synergie. Teil C. Sonnenenergie. Solare Niedertemperatursysteme. Solarteiche. (abgerufen am 05.08.2013). <http://www.buch-der-synergie.de.2013a>
- KHAMMAS, A. A. W. (2013b): Buch der Synergie. Teil C. Windenergie. (abgerufen am 07.10.2013). <http://www.buch-der-synergie.de>
- KHAMMAS, A. A. W. (2013c): Buch der Synergie. Teil C. Energiespeichern. (abgerufen am 18.10.2013). <http://www.buch-der-synergie.de>
- KONIETZKO, S. & GERNUKS, M. (2011): Ressourcenverfügbarkeit von sekundären Rohstoffen. Potenzialanalyse für Lithium und Kobalt. <http://www.pt-elektromobilitaet.de/projekte/batterierecycling/-abschlussberichte-recycling/bericht-ressourcenverfuegbarkeit-projektuebergreifend.pdf>
- LEITLEIN, T. (2007): Chronologie ausgewählter Erfindungen zur Windenergienutzung. (abgerufen am 07.10.2013). http://www.buch-der-synergie.de/archiv/wec_chronologie_leitlein_2009.doc
- MAUTHNER, F. & WEISS, W. (2013): Solar Heat Worldwide. Markets and Contribution to the Energy Supply. Edition 2013. IEA Solar Heating & Cooling Programme & AEE INTEC.

- MIZUSHIMA, K.; JONES, P.C.; WISEMAN, P.J & GOODENOUGH, J.B. (1980): LiCoO₂ (0<x<1): A new cathode material for batteries of high energy density. In: Materials Research Bulletin 15, 1980: 783–789.
- MÖLLER, K-C. & WINTER, M. (2005): Primäre und wiederaufladbare Lithium-Batterien. Script zum Praktikum Anorganisch-Chemische Technologie. Institut für Chemische Technologie Anorganischer Stoffe, TU-Graz.
- MÜLLER-PROTHMANN, T. & DÖRR, N. (2011): Innovationsmanagement. Strategien, Methoden und Werkzeuge für systematische Innovationsprozesse. Pocket Power, 2. Auflage. Carl Hanser Verlag, München.
- NAM, K. T.; KIM D.-W.; YOO, P. J.; CHIANG, C.-Y.; MEETHONG, N.; HAMMOND, P. T.; CHIANG, Y.-M. & BELCHER, A. M. (2006): Virus-Enabled Synthesis and Assembly of Nanowires for Lithium Ion Battery Electrodes. In: Science 312, Nr. 5775, 2006: 885–888.
- NiW – Niedersächsisches Institut für Wirtschaftsforschung e.V. (2013): Umweltschutzgüter – wie abgrenzen? Methodik und Liste der Umweltschutzgüter 2013. Herausgeber: Umweltbundesamt, Dessau und Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Berlin.
- PILLOT, Ch. (2012): The worldwide battery market 2011–2025. (abgerufen am 22.10.2013).
<http://www.rechargebatteries.org/wp-content/uploads/2013/04/Batteries-2012-Avicenne-Energy-Batteries-Market-towards-20251.pdf>
- RECHARGE (2013): E-mobility Roadmap for the EU battery industry. (abgerufen am 22.10.2013).
<http://www.rechargebatteries.org/wp-content/uploads/2013/04/Battery-Roadmap-RECHARGE-05-July-2013.pdf>
- SAUER, D. U. (2006): Optionen zur Speicherung elektrischer Energie in Energieversorgungssystemen mit regenerativer Stromerzeugung. ISEA, RWTH Aachen.
- SCHALLHORN, R.; KUHLMANN, R. & BESENHARD, J. O. (1976): Topotactic Redox Reactions and Ion Exchange of Layered MoO₃ Bronzes. Mat. Res. Bull. 11, 83.
- SCIENCE DAILY (2007): New Nanowire Battery Holds 10 Times The Charge Of Existing Ones.
- STATISTIK AUSTRIA – Bundesanstalt Statistik Österreich (2011): Umweltgesamtrechnungen. Modul – Umweltorientierte Produktion und Dienstleistung (EGSS) 2010. Umsatz und Beschäftigte in der Umweltwirtschaft. Projektbericht. Statistik Austria, Wien.
- SUNVENTION INTERNATIONAL GMBH (2012): Efficient Multi-Functional Solar Systems. (abgerufen am 16.10.2012). <http://www.bsrsolar.com/>
- TIM – Institut für Technologie- & Innovationsmanagement, Technische Universität Hamburg-Harburg (2012): Der Innovationsprozess. (abgerufen am 08.10.2012).
<http://www.global-innovation.net/innovation/de/index.html>
- TPWIND – European Wind Energy Technology Platform (2008): Strategic Research Agenda. Market Deployment Strategy. From 2008 to 2030. Brüssel.
- TREVOR, J. P. (2004): Blyth, J. (1839–1906). In: Matthew, H. C. G. & Harrison, B. (Hrsg.): Oxford Dictionary of National Biography, from the earliest times to the year 2000 (ODNB), Oxford University Press, Oxford 2004, ISBN 0-19-861411-X, online.

UMWELTBUNDESAMT (2012): Frischenschlager, H.: Öko-Innovation und Forschung. Betrachtung des Zeithorizonts anhand von drei ausgewählten Öko-Innovationen. Reports, Bd. REP-0406. Umweltbundesamt, Wien.

VESTAS (2013): Windfloat. The windfloat of the coast of Portugal. (abgerufen am 09.10.2013).

<http://video.vestas.com/video/6481618/windfloat>

DE VRIES, E. (2013): Platform sharing becoming norm for turbine manufacturers. In: Windpower Monthly, 1. Mai 2013. (abgerufen am 09.10.2013).

<http://www.windpowermonthly.com/article/1179386/platform-sharing-becoming-norm-turbine-manufacturers>

WIKIPEDIA (2013a): Geschichte der Windenergienutzung. Windkraftanlagen. (abgerufen am 07.10.2013).

http://de.wikipedia.org/wiki/Geschichte_der_Windenergienutzung#Windkraftanlagen

WIKIPEDIA (2013b): Windkraftanlage. Geschichte der Windkraftanlagen. (abgerufen am 07.10.2013).

http://de.wikipedia.org/wiki/Windturbine#Geschichte_der_Windkraftanlagen

WIKIPEDIA (2013c): Kategorie:Batterietechnik. (abgerufen am 17.10.2013).

<http://de.wikipedia.org/wiki/Kategorie:Batterietechnik>.

WWEA – The World Wind Energy Association (2013): World Wind Energy Report 2012. WWEA, Bonn.

Anmerkung: Bitte beachten Sie, dass die Internetadressen von Dokumenten häufig verändert werden. In diesem Fall empfehlen wir, die angegebene Adresse auf die Hauptadresse zu reduzieren und von dort aus das Dokument zu suchen. Die nicht mehr funktionierende, lange Internetadresse kann Ihnen dabei als Orientierungshilfe dienen.

Rechtsnormen und Leitlinien

Elektrizitätswirtschafts- und -organisationsgesetz (EIWOG; BGBl. I Nr. 143/1998): Bundesgesetz, mit dem die Organisation auf dem Gebiet der Elektrizitätswirtschaft neu geregelt wird.

Energieeinsparungsgesetz (EnEG; BGBl. I S. 1873: Gesetz zur Einsparung von Energie in Gebäuden) in der Fassung der Bekanntmachung vom 1. September 2005 (BGBl. I S. 2684), das durch Artikel 1 des Gesetzes vom 4. Juli 2013 (BGBl. I S. 2197) geändert worden ist.

Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG; BGBl. I S. 2074: Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien) zuletzt durch Artikel 5 des Gesetzes vom 20. Dezember 2012 (BGBl. I S. 2730) geändert.

Erneuerbare-Energien-Richtlinie (RL 2009/28/EG): Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. April 2009 zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen und zur Änderung und anschließenden Aufhebung der Richtlinien 2001/77/EG und 2003/30/EG. ABl. Nr. L 140.

- Gebäuderichtlinie (RL 2002/91/EG): Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates vom 16. Dezember 2002 über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden. ABl. Nr. L 1.
- KOM(2004)38 endgültig: Environmental Technologies Action Plan (ETAP). Stimulation von Technologien für nachhaltige Entwicklung: Ein Aktionsplan für Umwelttechnologie in der Europäischen Union. Europäische Kommission, Brüssel.
- KOM(2011)899 endgültig: Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen. Innovation für eine nachhaltige Zukunft – Aktionsplan für Öko-Innovationen (Öko-Innovationsplan). Brüssel.
- Ökostromgesetz (BGBl. I Nr. 149/2002 i.d.g.F.): Bundesgesetz, mit dem Neuregelungen auf dem Gebiet der Elektrizitätserzeugung aus erneuerbaren Energieträgern und auf dem Gebiet der Kraft-Wärme-Kopplung erlassen werden sowie das Elektrizitätswirtschafts- und -organisationsgesetz (EIWOG) und das Energieförderungsgesetz 1979 (EnFG) geändert werden.
- Stromeinspeisungsgesetz (StromEinspG; BGBl. I S. 2633: Gesetz über die Einspeisung von Strom aus erneuerbaren Energien in das öffentliche Netz) (abgelöst vom Erneuerbare-Energien-Gesetz am 1. April 2000).

Umweltbundesamt GmbH

Spittelauer Lände 5
1090 Wien/Österreich

Tel.: +43-(0)1-313 04

Fax: +43-(0)1-313 04/5400

office@umweltbundesamt.at

www.umweltbundesamt.at

Der Report untersucht beispielhaft anhand des Solarkollektors, der Windturbine und des Lithium-Ionen-Akkus, welche Faktoren für Technologiesprünge in der Entwicklung dieser Öko-Innovationen ausschlaggebend waren und wie viel Zeit dafür benötigt wurde.

Neben einer ausgereiften Technologie sind auch andere Faktoren für die Marktdurchdringung von Öko-Innovationen relevant. Insbesondere rechtliche Rahmenbedingungen lösen Technologiesprünge aus, die dem Bedarf nach Ressourceneinsparung, Klima- und Umweltschutz Rechnung tragen. Auch bessere Produkte oder niedrigere Kosten führen zu höheren Durchdringungsgraden.

Forschung ist nicht nur Voraussetzung für Innovation, sondern auch Serviceleistung für den gesamten Öko-Innovationsprozess. Dadurch können neue Anwendungsgebiete erschlossen und ein wesentlicher Nutzen und Mehrwert bei der Anwendung generiert werden.